

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**DISEÑO DE UN SISTEMA INTEGRADO GENERADOR DE
ENERGÍA QUE INCLUYE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS,
ELECTRICIDAD Y COMPOST, UTILIZANDO RESIDUOS
ORGÁNICOS DE ORIGEN ANIMAL EN LA FINCA RAMA
BLANCA DE SIPACATE, ESCUINTLA.**

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Rodrigo Antonio Arandi-Klee Aguirre
Isabel Eizaguirre Marinelli
José Andrés Lam Ceballos
Sylvia Karina Oliva Fernández
Juan Carlos Rodas Flores
Aldo Francisco Salomón Rojas Murga
Antonio José Vela Corona

para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química

Guatemala
2013

DISEÑO DE UN SISTEMA INTEGRADO GENERADOR DE ENERGÍA QUE INCLUYE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS, ELECTRICIDAD Y COMPOST, UTILIZANDO RESIDUOS ORGÁNICOS DE ORIGEN ANIMAL EN LA FINCA RAMA BLANCA DE SIPACATE, ESCUINTLA.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**DISEÑO DE UN SISTEMA INTEGRADO GENERADOR DE
ENERGÍA QUE INCLUYE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS,
ELECTRICIDAD Y COMPOST, UTILIZANDO RESIDUOS
ORGÁNICOS DE ORIGEN ANIMAL EN LA FINCA RAMA
BLANCA DE SIPACATE, ESCUINTLA.**

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:


Rodrigo Antonio Arandi-Klee Aguirre
Isabel Eizaguirre Marinelli
José Andrés Lam Ceballos
Sylvia Karina Oliva Fernández
Juan Carlos Rodas Flores
Aldo Francisco Salomón Rojas Murga
Antonio José Vela Corona

para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química

Guatemala
2013

Vo. Bo. Asesores

(f) 
Ing. Cristián Rossi


(f) 
Ing. Jaime Rosales Solórzano


(f) 
Ing. Allan Cifuentes


Fecha de aprobación: Guatemala, 18 de noviembre de 2013

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano Ruano

(f) 
Ing. Cristián Rossi

(f) 
Ing. Jaime Rosales Solórzano

(f) 
Ing. Allan Cifuentes

(f) 
Ing. José Andrés Hernández

Fecha de aprobación: Guatemala, 18 de noviembre de 2013

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS	xi
LISTA DE ILUSTRACIONES	xix
RESUMEN	xxiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
A. Objetivo general del Megaproyecto.....	3
B. Objetivos generales de cada módulo.....	3
C. Objetivos específicos de cada módulo	4
III. JUSTIFICACIÓN	7
IV. MARCO TEÓRICO	8
A. Biogás	8
B. Proceso de producción de metano:.....	10
1. Digestión anaeróbica.....	10
2. Factores que influyen en el proceso de digestión anaeróbica.....	13
C. Sustratos.....	16
1. Estiércol utilizado para producción de biogás.	16
D. Co-Substratos	17
1. Suero.....	17
E. Demanda Química de Oxígeno.....	21
F. Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	22
G. Ley de Beer Lambert	22
H. Datos teóricos encontrados para la caracterización de estiércol de búfalo y suero de leche de búfalo.....	23
I. Técnicas analíticas empleadas.....	24
1. pH	24
2. Sólidos totales y sólidos volátiles	25
3. Densidad.	25
4. Demanda Química de Oxígeno.....	25
5. Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	26
6. Proteínas.	27
7. Grasas.....	28

J.	Tipos de biodigestores	31
K.	Parámetros para diseño	35
L.	Diseño de reactores a partir de ecuación de diseño.	36
M.	Efectos del sulfuro de hidrógeno en plantas de biogás	38
N.	Remoción del sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) (desulfurización)	39
O.	Métodos de purificación por adsorción	41
P.	Métodos de purificación por absorción	42
	1. Absorción con compuestos de hierro.....	42
Q.	Tuberías.....	43
R.	Válvulas	45
S.	Tecnologías de producción.....	48
	1. Purificación del biogás.....	49
	2. Almacenamiento previo al uso	50
T.	Aplicaciones del biogás.....	52
	1. Generación de energía eléctrica.....	53
	2. Cogeneración.....	53
	3. Trigeneración	54
	4. Generación mediante motores de combustión.....	54
	5. Generación de electricidad mediante turbinas de gas	54
	6. Generación por pilas de combustible.....	55
	7. Conversión a gas natural.	55
	8. Generación de biogás en Guatemala.	56
	9. Generación de energía eléctrica en Guatemala.	57
U.	La basura.....	58
	1. Clasificación de la basura según su naturaleza	59
	2. Clasificación de la basura según su origen.....	59
	3. Problemas por la mala disposición de la basura.....	61
V.	Soluciones para basura inorgánica	70
	1. La regla de las tres erres.	70
	2. El consumo responsable.....	71
	3. Soluciones para basura orgánica	71
V.	ANTECEDENTES	82
VI.	METODOLOGÍA.....	84
VII.	RESULTADOS	90
	A. Resultados Módulo “Caracterización de Materia Prima”.	90
	B. Resultados Módulo “Utilización de suero láctico en el biodigestor”	100

C.	Resultados Módulo “Condiciones de operación”	109
D.	Resultado Módulo “Diseño de biodigestor”	114
E.	Resultados Módulo “Sistema de purificación y extracción de biogás”	115
F.	Resultados Módulo “Usos de biogás”	117
G.	Resultados Módulo “Compostaje”	118
VIII.	DISCUSIÓN	127
A.	Crecimiento poblacional en finca Rama Blanca.....	127
B.	Caracterización inicial de Materias Primas	129
C.	Biodigestor piloto.....	135
D.	Análisis de utilización de suero láctico.....	140
E.	Diseño del biodigestor	151
F.	Extracción y purificación del biogás	158
G.	Demanda energética actual.....	161
H.	Metodología seleccionada para el uso/ aplicación del biogás.....	162
I.	Evaluación económica.....	164
J.	Diagrama de flujo del proceso	166
	Plano de disposición del sistema.....	166
K.	Utilización de residuos sólidos del biodigestor – compostaje	167
IX.	CONCLUSIONES.....	172
X.	RECOMENDACIONES	177
XI.	BIBLIOGRAFÍA.....	182
XII.	APÉNDICE	190
A.	Módulo de caracterización de materias primas.....	190
1.	Cálculos de muestra	190
2.	Análisis de error.....	195
B.	Módulo de utilización de suero láctico en el biodigestor.....	203
1.	Datos calculados	203
2.	Cálculos de muestra:	257
3.	Análisis de error.....	258
a.	Propagación de error en sumas y restas:	258
C.	Módulo de condiciones de operación.....	260
1.	Diagrama de bloques utilizado para realización del estudio:	260
2.	Datos originales:.....	261

3.	Cálculos de muestra:	264
4.	Datos calculados	265
5.	Análisis de error:.....	269
6.	Esquemas:	270
D.	Módulo del diseño del biodigestor	272
1.	Cálculos de muestra	272
2.	Datos calculados	277
3.	Reglamentos	279
E.	Módulo sistema de extracción y purificación de biogás	280
1.	Datos originales.....	280
2.	Cálculos de muestra	282
3.	Datos calculados	288
4.	Especificaciones.....	291
5.	Cotizaciones.....	294
F.	Módulo de uso de biogás.....	297
1.	Biodigestor instalado actualmente.	297
2.	Diagrama de bloques para posibles metodologías de uso.....	299
3.	Flujo de caja.....	302
4.	FICHAS TÉCNICAS DEL EQUIPO PRINCIPAL.....	304
5.	LAYOUT DEL SISTEMA	307
6.	Datos originales.....	309
7.	Cálculos de muestra	310
G.	Módulo de compostaje	312
1.	Cálculos de muestra	312
2.	Análisis de error.....	313
3.	Ilustraciones	314
A.	Diagramas	321
B.	Fichas técnicas	327
XIII.	GLOSARIO.....	331

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Gases y composición de biogás.....	8
Tabla 2: Características generales del biogás.	9
Tabla 3: Características del metano	9
Tabla No. 4 Tiempo de retención de sólidos para producción de biogás.....	13
Tabla 5: Producción de metano respecto a la temperatura de operación, velocidad de carga orgánica, tiempo de retención y concentración de nitrógeno amoniacal, utilizando como materia orgánica estiércol bovino	14
Tabla No.6 Producción de estiércol diario fresco por masa	17
Tabla 7: Composición porcentual del suero dulce y el suero ácido.....	19
Tabla 8: Aplicaciones para el suero y el concentrado de suero o polvo.	20
Tabla 9: Aplicaciones para el concentrado proteico de suero en polvo y para la lactosa.....	20
Tabla 10 Nitrógeno para varios tipos de estiércol.....	23
Tabla 11 Nitrógeno para varios tipos de estiércol.....	23
Tabla 12 Nitrógeno para varios tipos de estiércol.....	23
Tabla 13 Nitrógeno para varios tipos de estiércol.....	23
Tabla 14 pH para estiércol de búfalo y suero de leche de búfalo	24
Tabla 15 Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno para estiércol de cerdo:.....	24
Tabla 16 Nitrógeno para varios tipos de estiércol.....	24
Tabla 17 Valores a utilizar para la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno	27
Tabla 18 Factores K teóricos para proteínas.....	31
Tabla 19: Ayuda para tomar decisiones para la selección de procedimientos para la remoción de sulfuro de hidrógeno.....	40

Tabla 20: Pérdidas de presión en mm de columna de agua, por cada 10 m de tuberías de PVC.	43
Tabla 21: Propiedades físicas del PVC.....	44
Tabla 22: Ventajas y desventajas de válvulas para sistemas de biogás.....	48
Tabla 23: Categorías de unidades de almacenamiento para biogás.....	51
Tabla 24: Marco legal para la generación de Energía Eléctrica en Guatemala, 2012.....	58
Tabla 25 Fincas agropecuarias que utilizan plaguicidas en cultivos anuales (mayo 2007 a junio 2008).	67
Tabla 26 Fincas agropecuarias que utilizan fertilizantes en cultivos anuales (mayo 2007 a junio 2008).	68
Tabla 27 Defunciones de origen ambiental y causas. (Periodo 2000 a 2008).	69
Tabla 28 Población total y estimación de la basura domiciliar por departamentos (toneladas) (Año 2009).....	69
Tabla 29 Usos más aconsejables para determinados tipos de compost y relación con los parámetros determinados	77
Tabla 30: pH de estiércol de búfalo y suero de leche de búfalo a 23°C.	90
Tabla 31: Promedio de sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para suero de leche de búfalo. Muestra del 24 de mayo de 2013.	90
Tabla 32: Promedio de sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para estiércol obtenido en época de verano. Muestra del 24 de mayo de 2013.	91
Tabla 33: Promedio de sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para estiércol obtenido en época de invierno.	91
Tabla 34: Demanda química de oxígeno y potencial de metano para el estiércol obtenido en época de verano. Muestra del 24 de mayo de 2013.	93
Tabla 35: Demanda química de oxígeno y potencial de metano para el estiércol obtenido en época de invierno. Muestra del 7 de agosto de 2013.	93
Tabla 36: Demanda Química de Oxígeno y potencial de metano para el suero de leche de búfalo. Muestra del 24 de mayo de 2013.....	94
Tabla 37: Demanda bioquímica de oxígeno de estiércol obtenido en época de invierno. Muestra del 7 de agosto de 2013.	96

Tabla 38: Demanda bioquímica de oxígeno de suero de leche de búfalo.....	96
Tabla 39: Promedio de Nitrógeno amoniacal y proteínas para las muestras en duplicado de estiércol de búfalo obtenida en época de invierno. Muestra del 7 de agosto de 2013.....	96
Tabla 40: Promedio de Nitrógeno amoniacal y proteínas para las muestras en duplicado de suero de leche de búfalo. Muestra del 7 de agosto de 2013.	97
Tabla 41: Porcentaje de metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico determinado con cromatografía de gases en las pruebas analizadas al biogás generado trabajando con los biodigestores batch.....	108
Tabla 42: Porcentaje de metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico determinado con cromatografía de gases en las pruebas analizadas al biogás generado trabajando con el biodigestor con alimentación intermitente	108
Tabla 43: Balance de masa realizado para todas las relaciones excremento agua todas a 35.00°C siendo la mejor la relación 1:1 de excremento (búfalo)/agua con 30 días tiempo de retención de sólidos. Muestra la mejor producción de biogás.	108
Tabla 44: Bases de diseño.....	114
Tabla 45: Balance de masa y dimensionamiento del biodigestor de acuerdo al espacio disponible.....	114
Tabla 46: Balance de masa y dimensionamiento del biodigestor de acuerdo a la materia prima.....	114
Tabla 47: Balance de masa y dimensionamiento de biodigestor de acuerdo a la fabricación de compost.	114
Tabla 48: Balance de masa y dimensionamiento de biodigestor de acuerdo al uso.....	115
Tabla 49: Equipo a utilizar para la fabricación del sistema de purificación y extracción.	115
Tabla 50: Especificaciones de la tubería y accesorios.....	115
Tabla 51: Especificaciones de Compresor Kaeser® SX5	115
Tabla 52: Tipo y material de válvula de paso a utilizar.	116
Tabla 53: Especificaciones de desulfurizador Puxin® PX-25L.	116
Tabla 54: Concentración final del H ₂ S luego de pasar por el desulfurizador PX-25L Puxin®.	116
Tabla 55: Costo de la inversión sistema de purificación y extracción de biogás.	116

Tabla 56: Gasto mensual energético de finca Rama Blanca.	117
Tabla 57: Impacto ambiental, emisión promedio de CO ₂ mensual de finca Rama Blanca.	117
Tabla 58: Demanda volumétrica de biogás para cubrir consumo energético actual.	117
Tabla 59: Diagramas de bloques para las diferentes metodologías analizadas.	117
Tabla 60: Requerimientos de la microturbina Capstone modelo C30.....	118
Tabla 61: Resultados de los análisis realizados para determinar la composición inicial de los residuos del biodigestor piloto	118
Tabla 62: Resultados de los análisis realizados al compostaje final por medio del método de aireación y su porcentaje de cambio (aumento o disminución) con respecto al análisis inicial de los residuos del biodigestor.....	118
Tabla 63: Resultados de los análisis realizados al compostaje final por medio del método de lombricultura y su porcentaje de cambio (aumento o disminución) con respecto al análisis inicial de los residuos del biodigestor	119
Tabla 64 Resumen de composición de nutrientes antes y después del compostaje	119
Tabla 65: Balance de masa para el método de compostaje por aireación.....	124
Tabla 66: Balance de masa para el método de compostaje por lombricultura.....	124
Tabla 67: Comparación del porcentaje de rendimiento para los métodos de compostaje por aireación y lombricultura	125
Tabla 68: Costos totales por realización de composteras con ambos métodos.....	126
Tabla 69 : Sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para las tres muestras de suero.....	197
Tabla 70: Sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para las tres muestras de estiércol obtenido en época de invierno.....	197
Tabla 71: Sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para las tres muestras de estiércol obtenido en época de verano.....	198
Tabla 72: Nitrógeno amoniacal y proteínas para las dos muestras de estiércol obtenidos en época de invierno	198
Tabla 73: Nitrógeno amoniacal y proteínas para la primera muestra de suero de leche de búfalo	198
Tabla 74: Datos de placa de la mufla	198

Tabla 75: Datos de placa del horno	199
Tabla 76: Datos de placa de la balanza analítica	199
Tabla 77: Datos de placa del potenciómetro	200
Tabla 78: Datos de placa del espectrofotómetro	200
Tabla 79: Datos de placa del extractor Soxhlet	201
Tabla 80: Datos de placa digestor Kjeldahl	201
Tabla 81: Datos de placa del medidor multipropósito la mufla	202
Tabla 82: Volumen promedio de biogás generado por kilogramo de biomasa alimentada, utilizando diferentes proporciones de mezcla (50% m/m de agua y 50% m/m de estiércol) y de suero láctico. Se reporta el valor promedio calculado a partir de los datos obtenidos en las tres pruebas realizadas para cada formulación.	203
Tabla 83: Razón de biogás generado utilizando una alimentación intermitente de 10g de suero láctico a un biodigestor con 100g de agua y 100g de estiércol.	204
Tabla 84: Razón de biogás generado utilizando 80% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 20% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.	204
Tabla 85: Razón de biogás generado utilizando 75% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 25% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.	206
Tabla 86: Razón de biogás generado utilizando 66% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 34% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.	208
Tabla 87: Razón de biogás generado utilizando 50% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 50% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.	210
Tabla 88: Razón de biogás generado utilizando 34% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 66% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.	212
Tabla 89: Razón de biogás generado utilizando 100% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.	214
Tabla 90: Razón de biogás generado utilizando una alimentación intermitente de suero láctico, a un biodigestor con 200.00±0.01g de mezcla agua-estiércol (50% m/m)	216
Tabla 91: Datos obtenidos para las relaciones 1:1; 2:1 y 4:1 a 35.00±0.001°C.	261
Tabla 92: Datos obtenidos a 35.00±0.01°C y temperatura ambiente con relación 1:1.....	262
Tabla 93: Datos obtenidos de una relación 4:1 a distintas temperaturas.....	263

Tabla 94: Datos calculados para la relación (1:1) excremento/agua.....	265
Tabla 95: Datos calculados para una relación 1:1 excremento/agua a 20°C.....	266
Tabla 96: Datos calculados para una relación (1:1) excremento/agua a 35°C.	266
Tabla 97: Datos calculados para una relación (2:1) excremento/agua, para una producción de 16 días.	267
Tabla 98: Datos calculados para una relación (2:1) excremento/agua para una producción de 30 días.	267
Tabla 99: Datos calculados para una relación (4:1) excremento/agua para una producción de 30 días.	268
Tabla 100: Datos calculados para una relación (4:1) excremento/agua en una producción de 30 días.	268
Tabla 101: Datos calculados para una relación de (4:1) excremento/agua en una producción de 30 días.	269
Tabla 102: Concentración de metano y velocidad de reacción para la producción de cada día.	277
Tabla 103: Porcentaje peso para cada uno de los componentes del biogás.	278
Tabla 104: Propiedades del biogás a 35°C.	278
Tabla 105: Densidad promedio del estiércol y de la mezcla 1-1 agua estiércol.	278
Tabla 106: Producción de metano diaria de acuerdo a cada criterio.	278
Tabla 107: Volúmenes efectivos de las partes del biodigestor.	278
Tabla 108: Volumen que ocupa el biodigestor.	278
Tabla 109: Masa y densidad de los principales componentes del biogás.	280
Tabla 110: Composición teórica del biogás	280
Tabla 111: Concentración inicial de H ₂ S en ppmV y ppm del biogás generado	280
Tabla 112: Caudal necesario para la producción de productos lácteos	280
Tabla 113: Longitud y accesorios del sistema de tuberías para la estufa.....	281
Tabla 114: Longitud del sistema de tuberías para la microturbina Capstone® CR-331033D	281
Tabla 115: Tabla de accesorios para sistema de tuberías de la Estufa.....	281

Tabla 116: Tabla de accesorios para sistema de tuberías de la turbina	281
Tabla 117: Costos unitario de los accesorios a utilizar en el sistema de purificación y extracción de biogás.	281
Tabla 118: Composición del biogás (%peso).....	288
Tabla 119: Datos sobre flujos del biogás en el sistema de tuberías.	288
Tabla 120: Cantidad de óxido férrico necesaria para una reacción al 100%	288
Tabla 121: Cantidad de óxido férrico necesaria para una reacción al 85%	288
Tabla 122: Cantidad de H ₂ S sin reaccionar	288
Tabla 123: Cantidad de H ₂ S remanente en el biogás.....	289
Tabla 124: Cantidad de H ₂ S remanente utilizando un filtro desulfurizador PX-25L Puxin®	289
Tabla 125: Determinación del diámetro necesario de tubería.....	289
Tabla 126: Número de Reynolds y constante de Fanning	289
Tabla 127: Tubería 1" PVC 160 Cat.40	289
Tabla 128: Tubería ½" PVC 160 Cat. 40.....	289
Tabla 129: Coeficiente de fricción por contracción	289
Tabla 130: Pérdidas por fricción para sistema de tuberías de estufa.....	290
Tabla 131: Pérdidas por fricción para sistema de tuberías de turbina	290
Tabla 132: Caídas de presión en ambos sistemas.....	290
Tabla 133: Costo para la construcción del sistema de extracción y purificación	290
Tabla 134: Medidas de válvula de bola.....	292
Tabla 135: Partes de válvula de bola	292
Tabla 136: Flujo de caja del año 0 a 5 para la inversión evaluada.....	302
Tabla 137: Flujo de Caja para el año 6 al 10.	303
Tabla 138: Consumo mensual energético de Finca Rama Blanca por tipo de combustible	309
Tabla 139: Factores de emisión utilizados para el cálculo de Huella de CO ₂	309

Tabla 140: Precios base utilizados para el cálculo del total de factura energética mensual.	309
Tabla 141: Relación peso/ excreta diaria para el cálculo de excremento disponible diario.....	309
Tabla 142: Composición volumétrica utilizada a lo largo del trabajo.	310
Tabla 143: Biogás disponible para utilización.	310

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración No.1 Proceso de la materia orgánica para la producción de metano, mediante los procesos de hidrólisis, acetogénesis, acidogénesis y metanogénesis.	11
Ilustración 2 Dependencia de la velocidad de crecimiento microbiano con respecto a la temperatura del biodigestor.....	13
Ilustración No.3 Gráfica de tiempo de retención respecto a la temperatura, producción de biogás y metano a lo largo del tiempo de retención de sólidos y la relación de agua/excremento.....	15
Ilustración 4 Digestión de las muestras de estiércol de búfalo y suero de leche de búfalo.....	29
Ilustración 5 Destilación de las muestras de estiércol de búfalo y suero de leche de búfalo.....	30
Ilustración 6 Reactor anaeróbico de contacto.....	32
Ilustración 7 : Filtro de flujo ascendente.....	33
Ilustración 8 Reactor RAFA.....	34
Ilustración 9 Reactor intermitente.....	36
Ilustración 10 Reactor continuo de tanque agitado.....	37
Ilustración 11 Reactor de flujo pistón.....	37
Ilustración 12 Válvula de Bola.....	46
Ilustración 13 Válvula de diafragma.....	46
Ilustración 14 Válvula de compuerta.....	47
Ilustración 15 Válvula de mariposa.....	47
Ilustración 16 Válvula de globo.....	48
Ilustración 17: Diagrama esquemático de una Planta de Biogás.....	49

Ilustración 18: Aplicaciones de biogás.....	52
Ilustración 19: Distribución del Sub-sector Eléctrico Guatemalteco, 2012	57
Ilustración 20 Mufla utilizada para volatilizar la materia combustible de los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo	199
Ilustración 21 Horno utilizado para quitar la humedad de los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo	199
Ilustración 22 Balanza analítica utilizada para el peso de sólidos totales y cenizas del suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo	200
Ilustración 23 Potenciómetro utilizado para medición del ph de suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo	200
Ilustración 24 Espectrofotómetro utilizado para la Demanda Química de Oxígeno del suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo.....	201
Ilustración 25 Soxhlet utilizado para la extracción de grasa de los dos sustratos utilizados: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo	201
Ilustración 26 Digestor Kjeldahl para la digestión y destilación de los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo.....	202
Ilustración 27 Multipropósito utilizado para medir el oxígeno disuelto de los dos sustratos utilizados: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo.....	202
Ilustración 28 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con una proporción de 66% (m/m) de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 34% (m/m) de suero láctico, en un biodigestor batch.	217
Ilustración 29 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con una proporción de 50% (m/m) de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 50% (m/m) de suero láctico, en un biodigestor batch.	218
Ilustración 30 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con $9.09 \pm 6.47 \times 10^{-5}$ % de suero en un biodigestor alimentado de forma intermitente.....	219
Ilustración 31 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con $13.04 \pm 7.61 \times 10^{-5}$ % de suero en un biodigestor alimentado de forma intermitente.....	220
Ilustración 32 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con $20.00 \pm 9.16 \times 10^{-5}$ % de suero en un biodigestor alimentado de forma intermitente.....	221
Ilustración 33 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con $25.93 \pm 9.42 \times 10^{-5}$ % de suero en un biodigestor alimentado de forma intermitente.....	222

Ilustración 34 Espectro IR de las botellas de Coca Cola utilizadas para captación del biogás.....	223
Ilustración 35 Espectro IR de las botellas de jugo Rabinal utilizadas para captación del biogás.	224
Ilustración 37: Vista planta de biodigestor.	270
Ilustración 38: Vista de elevación de biodigestor.	271
Ilustración 39: Vista de perfil de biodigestor.	271
Ilustración 40: Vista Isométrica de biodigestor.	271
Ilustración 41 Diagrama de entradas y salidas del biodigestor	275
Ilustración 42: Dimensiones de tuberías PVC ASTM D-1785, Catálogo 40	291
Ilustración 43: Diagrama de válvula de bola a utilizar	292
Ilustración 44: Especificaciones de la microturbina CR30 Capstone. ®	293
Ilustración 45: Características generales de microturbina CR30 Capstone. ®	294
Ilustración 46: Precios de los diferentes desulfurizadores ofrecidos por SAIGUA S.A	295
Ilustración 47: Características generales de los desulfurizadores Puxin ®	296
Ilustración 48: Biodigestor actual de finca Rama Blanca.	297
Ilustración 49: Área disponible para colocación del nuevo sistema.	297
Ilustración 50: Sistema de distribución actual de Biogás.	298
Ilustración 51: Salida de biogás de bolsa contenedora.	298
Ilustración 52: Diagrama de bloques para sistema de combustión directa.	299
Ilustración 53: Diagrama de bloques para sistema de cogeneración.	300
Ilustración 54: Diagrama de bloques para metodología de generación de EE.	301
Ilustración 55: Ficha técnica – compresor de tornilla Kaeser SX5	304
Ilustración 56: Ficha técnica – microturbina Capstone C30	305
Ilustración 57: Ficha técnica-Transformados Jefferson Electric trifásico seco 220/480 V	306
Ilustración 58: Distribución espacial en finca Rama Blanca	307

Ilustración 59: Distribución espacial equipo seleccionado para la cogeneración de energía eléctrica	308
Ilustración 60 Montaje de pila compostera para ambos métodos.....	314
Ilustración 61 Pila de compostaje luego de 13 días de descomposición.....	315
Ilustración 62 Área de compostaje por el método de aireación dentro de la pila	315
Ilustración 64 Humus obtenido por el método de compostaje por aireación	316
Ilustración 63 Área de compostaje por el método de lombricultura dentro de la pila	316
Ilustración 65 Humus obtenido por el método de compostaje por lombricultura	317
Ilustración 66 Análisis de laboratorio hecho a la muestra obtenida de los residuos del biodigestor piloto.....	318
Ilustración 67 Análisis de laboratorio hecho a la muestra de humus obtenido por medio del método de compostaje por aireación.....	319
Ilustración 68 Análisis de laboratorio hecho a la muestra de humus obtenido por medio del compostaje por lombricultura	320
Ilustración 69: Vista planta del biodigestor	321
Ilustración 70: Vistas de elevación frontal y posterior del biodigestor	322
Ilustración 71: Vistas de elevación lateral del biodigestor.	322
Ilustración 72: Isométrico del biodigestor	324
Ilustración 73: Diagrama de Flujo del sistema de purificación y extracción de biogás.	325
Ilustración 74: Distribución espacial del sistema de tuberías que va hacia la turbina.	326
Ilustración 75: Diagrama de proceso para la generación de biogás.....	327
Ilustración 76: Especificaciones de Desulfurizador Puxin ® PX-25.....	327
Ilustración 77: Características de compresor Kaeser® SX5.....	328
Ilustración 78: Especificaciones Microturbina Capstone C30.....	329
Ilustración 79: Especificaciones Transformador Electric trifásico seco 220/480.....	330

RESUMEN

El objetivo general de este trabajo fue el diseño de un sistema integrado generador de energía que incluye la producción de biogás, electricidad y compost utilizando residuos orgánicos de origen animal en la finca de Rama Blanca de Sipacate, Escuintla.

Respecto al objetivo de desarrollo de una propuesta técnica y económicamente viable de generación de energía a partir de desechos orgánicos para esta investigación, se partió de la caracterización de las materias orgánicas utilizadas que son excremento de búfalo y suero, un sub producto generado a partir de la manufactura de quesos. Se realizaron pruebas con dos biodigestores a escala laboratorio en estos se probaron diferentes materias primas orgánicas. Uno de los biodigestores trabajó solamente con excremento bufalino y agua como materia prima, mientras que el otro utilizó suero, excremento y agua como materia prima. El primer biodigestor obtuvo los mejores rendimientos en cuanto a concentración de metano y poder calorífico. Subdividiendo la etapa de diseño en tres módulos, el primero fue el diseño del biodigestor principal, seguido de la purificación del biogás primario y por último el almacenaje y uso del biogás producido. El diseño seleccionado es un arreglo de dos biodigestores colocados en paralelo tipo estanque de material flexible. Se seleccionaron dos metodologías de uso: la cogeneración y la combustión directa. Para la combustión se realizará purificación del biogás utilizando un purificador marca Puxin modelo PX 25L para remover el ácido sulfídrico previo al ingreso a las estufas. El sistema de cogeneración se realizará por medio de una microturbina marca Capstone modelo C30 la cual entrega 30 kWh de energía constantes. Por último las cenizas remanentes en el biodigestor serán utilizadas para la generación de compost a partir de la lombricultura. Este sub-producto será aprovechado en el área circundante a la finca y en las áreas de pastoreo del hato de bovinos. El análisis económico del proyecto tomando la inversión de Q. 700,889.29 determino una TIR del 67.8% con un VAN de Q.1,906,638.00 en un pronóstico a 10 años. Se determinó como viable la generación de energía eléctrica a partir del excremento de búfalo disponible en Finca Rama Blanca, Sipacate Escuintla y se recomienda evaluar la posibilidad de generar una mayor cantidad de energía para cubrir más holgadamente la demanda energética y evaluar la implementación de sistemas de control y automatización en la operación.

I. INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años los combustibles fósiles han representado la principal fuente de energía de uso doméstico e industrial, sin embargo, el problema ambiental que genera el uso inadecuado de los mismos ha ocasionado severos problemas de contaminación ya que se emiten a la atmósfera toneladas de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero, dando como resultado problemas globales relacionados con el cambio climático y calentamiento global.

El manejo de residuos sólidos también es un tema que cada vez se vuelve más relevante debido a que el espacio en dónde estos son depositados, rellenos sanitarios, cada vez es menor. Es por esto que ahora se realizan más esfuerzos para tener procesos más eficientes en dónde disminuyan los residuos sólidos.

Debido a lo anterior, han surgido alternativas energéticas para solucionar estas problemáticas. Una de estas alternativas es el aprovechamiento del gas metano que se genera por la descomposición de los desechos orgánicos por microorganismos anaeróbicos. El metano es un hidrocarburo más ligero que el aire, incoloro e inflamable, que acumulado en las capas más altas de la atmósfera es el causante del conocido efecto invernadero. Por otra parte, su poder calorífico se puede aprovechar de muchas formas en procesos industriales o domésticos. También este tratamiento representa un buen manejo de residuos sólidos. El tratamiento también representa una posibilidad de ahorro para las empresas ya que los residuos orgánicos luego de la descomposición puede ser reciclados o reutilizados lo cual disminuirá costos de disposición de los residuos. Incluso pueden ser utilizados como materia prima para la fabricación de compost. Con estos se reducen los desechos y se genera un combustible útil a partir de lo que en un principio era considerado desecho.

En este megaproyecto se diseñó un sistema de aprovechamiento de los desechos orgánicos en finca Rama Blanca ubicada en Sipacate, Escuintla Guatemala para la obtención y uso de biogás y generación de compost para su posterior aprovechamiento como sub-producto del sistema. Éste megaproyecto se realizó en diversos módulos en los que se dividió el trabajo y luego se consolidó. Se comenzó con la caracterización inicial de sustratos para la producción de biogás, después se determinaron las condiciones de operación, luego se estudió la viabilidad de la utilización de suero láctico en el biodigestor, con esto se diseñó del biodigestor, el sistema de extracción y purificación del biogás, de la mano de los módulos anteriores se plantearon usos del biogás de acuerdo a los requerimientos energéticos de la finca y finalmente se realizó un estudio para la utilización del efluente del biodigestor como compostaje a través de la tecnología de lombri-compost.

Los principales resultados obtenidos fueron el potencial de generación de biogás de los residuos orgánicos que es de $0.290 \text{ mg CH}_4/\text{L}_{\text{solución}}$, la relación de la mezcla que se alimenta en el biodigestor es de 1:1 en peso agua/peso estiércol, no es recomendable utilizar suero láctico para la mezcla del biodigestor, la producción de biogás necesaria para abastecer las necesidades de una micro turbina y de estufas es de $515 \text{ m}^3/\text{día}$, se proponen dos biodigestores de 61.81 m^3 cada uno y construidos de concreto reforzado, y la mejor manera de realizar compost es a través de lombrices pues es la que representa un incremento mayor en los nutrientes necesarios.

La información de este reporte se presenta en distintas secciones. Como apertura se inicia con un resumen, en el que se muestran los principales resultados de la investigación. Para continuar se tiene la sección de antecedentes en donde se presenta información relevante sobre los principios en los que se basa el trabajo. Luego se presentan los objetivos, su justificación y una descripción del problema que se desea resolver, esto con motivo de explicar el por qué del estudio. Después se muestra la metodología utilizada, en donde se enlistan los pasos que se siguieron para la realización del estudio. Posteriormente se presentan los resultados y su respectiva discusión y análisis para interpretarlos. Sigue una sección de conclusiones y otra de recomendaciones y para concluir se presenta una sección de apéndice en donde se presenta toda la información necesaria para comprender cómo se obtuvieron los resultados y otros aspectos.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general del Megaproyecto

Diseñar un sistema integrado generador de energía que incluye la producción de biogás, electricidad y compost utilizando residuos orgánicos de origen animal en la finca Rama Blanca de Sipacate, Escuintla.

B. Objetivos generales de cada módulo

1. Caracterización inicial de materias primas disponibles para la producción de biogás en finca Rama Blanca de Sipacate, Escuintla.
2. Producción de biogás a partir de estiércol de búfalo en reactores escala laboratorio para obtener los factores de diseño de un reactor industrial.
3. Evaluar el uso de suero láctico y las posibles materias orgánicas disponibles en mezclas con estiércol de búfalo para su utilización en el biodigestor de la finca Rama Blanca.
4. Diseñar un sistema de extracción de biogás y un sistema de purificación del mismo para su posterior almacenaje, y uso sin problemas en las aplicaciones de la finca Rama Blanca.
5. Diseñar un biodigestor para la producción y recolección de biogás a partir de excremento de búfalo; para su construcción e instalación en la finca Rama Blanca Sipacate, La Gomera Escuintla.
6. Selección de metodología para el correcto almacenamiento y uso de biogás a partir de las condiciones de operación del proceso propuesto a Finca Rama Blanca, Sipacate, Guatemala.
7. Estudiar de forma analítica y metodológica las opciones disponibles para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en el biodigestor de producción de biogás, para la generación de Compost en la finca "Rama Blanca

C. Objetivos específicos de cada módulo

1. Caracterización analítica inicial de los sustratos que posteriormente se utilizarán en la digestión anaeróbica: estiércol de búfalo y suero de leche de búfalo así como comparación con valores de la literatura para poder llevar a cabo una predicción de la cantidad de metano a producir.

2. Caracterización analítica del agua de lavado de estiércol de los patios con el fin de conocer la composición y viabilidad para utilizarse en el biodigestor.

3. Realizar un procedimiento para la toma de muestras de estiércol, su tratamiento y almacenaje al momento que ya se encuentra en los patios para hacer análisis representativos del mismo y que permitan la predicción de la operación del reactor.

4. Comparar cinco formulaciones diferentes de suero láctico y estiércol, para determinar qué relación proporciona una mejor producción de biogás, mediante pruebas a nivel laboratorio trabajando con diferentes relaciones de suero láctico y una mezcla al 50% (m/m) de suero con agua, y determinando la relación que genera una mayor cantidad de biogás por unidad de masa.

5. Determinar cómo incide la presencia de suero láctico en la producción de biogás en el reactor, modelando gráficamente su comportamiento, para determinar si es preferible trabajar con un alto porcentaje de suero o si su presencia es preferible en bajas cantidades.

6. Determinar el porcentaje de metano en el biogás producido con cada una de las formulaciones trabajadas mediante analizador de gases, para determinar cuál de estas relaciones genera un mayor porcentaje de metano en el biogás.

7. Determinar la mejor relación de estiércol y suero láctico que se puede trabajar a escala real en "Rama Blanca", tomando en cuenta las cantidades de estiércol y suero láctico que se manejan diariamente en la finca y en base a los resultados obtenidos.

8. Analizar la posibilidad de generar biogás a partir de mezclas de estiércol y otras materias primas orgánicas disponibles en Rama Blanca o sus alrededores, para hacer más rentable la operación.

9. Evaluar el efecto de la temperatura para obtener una mayor producción de biogás, comparando los resultados a una temperatura de 35°C y temperatura ambiente (20-25°C).

10. Definir la relación más adecuada de excremento de búfalo y agua para obtener la mayor producción de biogás, trabajando con relaciones en masa de 1:1; 1:2 y 1:4, respectivamente, para evaluar fluidez y determinar la relación mínima de agua.

11. Determinar el tiempo de retención de sólidos para una producción de biogás más eficiente, trabajando con corridas de 30 días y observando el comportamiento de la producción de biogás.

12. Realizar el balance de masa de producción de biogás para la suspensión de excremento de búfalo en agua, utilizando la relación excremento/agua más adecuada.

13. Determinar la cantidad de excremento generado por día mediante el pesado de las heces durante el periodo de actividad de los búfalos, así como la necesidad de biogás (metano) de la Finca Rama Blanca Sipacate, la Gomera Escuintla.

14. En base al tipo de materia orgánica (excremento de búfalo) que se introducirá en el biodigestor, comparar las tecnologías y diseños ya existentes para la elección y dimensionamiento del biodigestor más adecuado.

15. Realizar diagramas para el biodigestor propuesto.

16. Determinar los costos y condiciones de operación para producir biogás en el biodigestor elegido.

17. Establecer el proceso de purificación del biogás removiendo las impurezas que estén presentes, con el fin de eliminarlas a través de métodos químicos y/o físicos y así obtener un gas con mayor concentración de metano.

18. Establecer qué tipo de sistema se utilizará para el proceso de purificación del biogás que se utilizará para separar cada una de las impurezas que pueda contener el mismo.

19. Determinar las características necesarias del sistema de tuberías a través del caudal y composición del biogás, con el fin de transportarlo al lugar de almacenamiento.

20. Determinar el balance general de la operación para poder proyectar en base al número de cabezas de búfalos la cantidad de biogás generado para una posterior aplicación como combustible.

21. Diseñar y seleccionar el equipo de manejo, almacenaje y transformación en energía en base a los cálculos y posibles aplicaciones tecnológicamente factibles.

22. Hacer un diagrama de distribución del equipo seleccionado y proceso para la opción seleccionada determinando el área necesaria.

23. Hacer un estudio económico comparativo de las aplicaciones determinadas para seleccionar la que presente el mejor escenario económico.

24. En función a la población y su ciclo de vida, proyectar las ganancias que se pueden esperar utilizando un balance general del sistema que se ajuste a la metodología de utilización seleccionada.

25. Analizar los residuos obtenidos del biodigestor piloto para determinar la composición inicial antes del compostaje.

26. Hacer diferentes mezclas de los residuos del biodigestor con otros desechos orgánicos disponibles en la finca, con el fin de determinar qué desecho sería el óptimo para nutrir el residuo del biodigestor. También se determinará la proporción óptima de cada uno en la mezcla, haciendo escalamiento del 10% de desecho secundario en cada mezcla.

27. Comparar los resultados del compostaje por método aireado y por lombricultura, para determinar los rendimientos y características de los productos obtenidos.

28. Analizar la composición del compost obtenido después del proceso microbiológico y determinar sus posibles usos dentro de la finca Rama Blanca.

III. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la dependencia del mundo de los combustibles fósiles es alta, lo cual es un problema ya que se está abusando del uso de los mismos. Es necesario el aprovechamiento de recursos energéticos renovables, como el biogás. Entre las ventajas del biogás, cabe mencionar que:

- Proviene del proceso de degradación microbiana de materiales orgánicos de fuentes domésticas, industriales, agrícolas o ganaderas,
- El riesgo de contaminación por derrame de las materias primas y residuos es mucho menor.
- Las emisiones de la combustión a la atmósfera son mucho menos contaminantes que las de los combustibles fósiles.
- Para la producción se utilizan materiales considerados como desperdicios, como la basura, grasas animales o vegetales usadas , estiércol, entre otras.
- Se evita la emisión directa de metano a la atmósfera, que es normalmente producido en la degradación de los diferentes materiales orgánicos.

La acumulación de desperdicios se ha hecho evidente a lo largo de los años en Guatemala. Un claro ejemplo de esto es la finca “Rama Blanca” dedicada a la crianza de búfalos, producción de sal refinada y producción de lácteos. El hato de búfalos es de 414 al mes de septiembre de 2013 y estos producen alrededor de 4 toneladas diarias de estiércol de las cuales una fracción es utilizado para la producción de biogás en un biodigestor tipo taiwanés de material flexible y como abono; sin embargo lo utilizado en el biodigestor no es todo por lo que los residuos orgánicos son mezclados con agua y descartados en canales de desagüe y aguas negras, incrementando así el nivel de contaminación.

Al mejorar la forma de manejo de residuos se lograría no sólo beneficiar el medio ambiente sino que también Rama Blanca obtendría beneficios a partir de la actividad, entre los que se encontrarían la generación de biogás, que puede utilizarse como combustible o para generación de energía eléctrica, y el fertilizante orgánico obtenido a partir del efluente del biodigestor. Existen tres posibilidades de uso: combustión directa, generación de energía eléctrica o la comercialización directa. De acuerdo al volumen y la tecnología disponible se debe evaluar la rentabilidad de cada una de estas posibilidades para definir la metodología correcta.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Biogás

El metano es el principal componente del biogás, es un combustible bastante limpio y eficiente que puede ser utilizado directamente. “El valor energético del biogás por lo tanto estará determinado por la concentración de metano que es de 20-25 MJ/m³ comparado con 33-38 MJ/m³ para el gas natural.” (Werner *et al* 1989).

La duración de la reducción del material biológico depende de los microorganismos especiales y de sus temperaturas óptimas del crecimiento. Los principales componentes del biogás son el metano y dióxido de carbono. Aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada se presenta a continuación: (CEDECAP, 2007)

El estiércol fresco contiene bacterias que continúan digiriéndolo y producen metano, dióxido de carbono y otros gases. Esta digestión debe de ser en ausencia de aire para producir biogás, esto es la parte importante de un biodigestor. Unas inicialmente producen una hidrólisis del estiércol generando ácidos orgánicos. Otro tipo de bacterias digieren estos ácidos orgánicos a través de una deshidrogenación y acetogénesis dando como resultado ácido acético e hidrogeno. Y finalmente otra bacterias, llamadas metanogénicas, digieren el hidrógeno y el ácido acético para transformarlo en metano, que es el gas más importante del biogás y el que permite la combustión. (Herrero 2008)

Tabla 1 Gases y composición de biogás

Gas	Composición % en fracción molar
Metano (CH ₄)	40-70 %
Dióxido de carbono (CO ₂)	30-60%
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0-3%
Hidrógeno (H ₂)	0-1 %

(Herrero 2008)

Tabla 2: Características generales del biogás.

Composición	55-70% metano 30 – 45% dióxido de carbono Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kWh/m ³
Límites de exposición	6 – 12% biogás en aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (para el contenido de metano mencionado anteriormente)
Presión crítica	75 – 89 bar
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg/m ³
Olor	El olor del biogás desulfurizado es difícilmente notable
Masa molar	16.043 kg/kmol

(Deublein & Steinhauer, 2008)

El metano que es el elemento principal del biogás y el más importante posee las siguientes características: (Cervantes, 2002)

Tabla 3: Características del metano

	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Densidad (kg/L)
Punto crítico	-82.59	45.98	0.162
Punto de ebullición a 1.013 bar	-161.52	-	0.4226
Punto triple	-182.47	0.117	-

Metano y dióxido de carbono:

La composición del biogás se refiere principalmente a la razón CO₂-metano que puede ser controlada parcialmente. Esto depende de los siguientes factores:

1. La adición de materiales que son ricos en grasa pueden ayudar a mejorar la calidad del biogás, tomando en cuenta que si se agrega más de una cantidad razonable el biodigestor puede acidificarse. (Deublin, 2008)
2. La descomposición de la biomasa se mejora con tiempos de exposición mayores. (Deublin, 2008)
3. El proceso de fermentación es más rápido si el material en el biorreactor está homogéneamente bien activado, haciendo que el tiempo de exposición sea más corto. (Deublin, 2008)

Por otro lado, los residuos de la fermentación (efluentes), contienen una alta concentración de nutrientes y material orgánico, son susceptibles de ser utilizados como un fertilizante que puede ser aplicado en fresco, el proceso de digestión anaerobia elimina los malos olores y la proliferación de moscas. Otra ventaja es la eliminación de agentes patógenos

presentes en las heces, lo cual significa que el efluente líquido puede ser utilizado para regadío de cualquier tipo de cultivos. (Herrero 2008)

El biogás es el gas producido durante el proceso de fermentación anaerobia (sin presencia de oxígeno) de la fracción orgánica de los residuos. Está compuesto principalmente por Metano (CH_4) y Dióxido de Carbono (CO_2), además de otros gases en cantidades menores. Cuando los desechos orgánicos inician el proceso químico de fermentación (pudrimiento), liberan una cantidad de gases llamados biogás. Con tecnologías apropiadas, el biogás se puede transformar en otros tipos de energía, como calor, electricidad o energía mecánica. (CEDECAP, 2007).

B. Proceso de producción de metano:

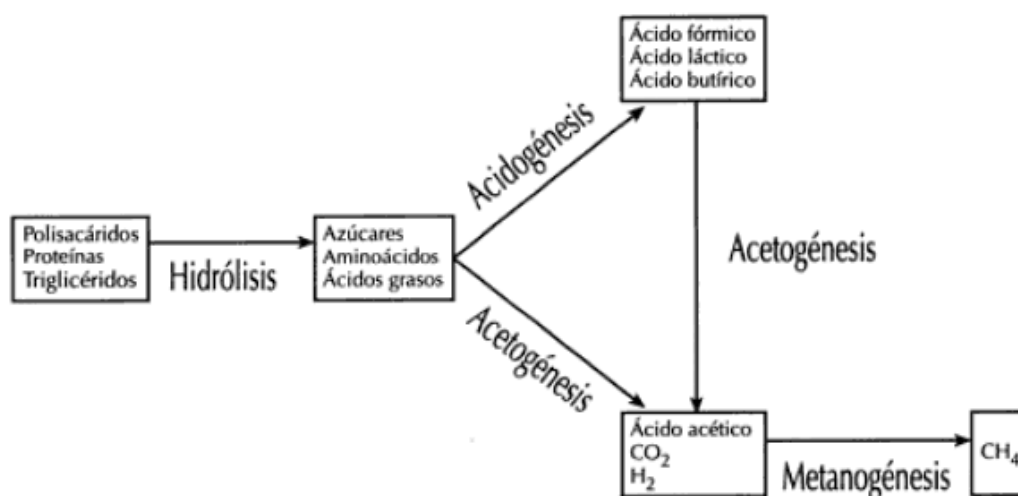
Básicamente, el proceso considera tres etapas: Hidrólisis, etapa en la que los polisacáridos (celulosa, almidón, etc.), los lípidos (grasas) y las proteínas, son reducidas a moléculas más simples; Acidogénesis, etapa en que los productos formados anteriormente son transformados principalmente en ácido acético, hidrógeno y CO_2 ; Metanogénesis, los productos resultantes de esta etapa son metano CH_4 y CO_2 , principalmente. El metano es el producto que se espera en mayor porcentaje como se puede observar en la tabla No.2.

Considerando que las bacterias son el ingrediente esencial del proceso, es necesario mantenerlas en condiciones que permitan asegurar y optimizar su ciclo biológico. Los principales parámetros que influyen en la producción de biogás son: (CEDECAP, 2007)

- Temperatura
- Tiempo de retención
- Relación Carbono/Nitrógeno
- Porcentaje de sólidos
- pH
- Agitación

1. **Digestión anaeróbica.** La digestión anaeróbica se refiere a la ruptura de la mayoría de tipos de materia orgánica por acciones de varios microorganismos, que son principalmente bacterias, en ausencia de oxígeno y otros agentes oxidantes fuertes. El dióxido de carbono y metano son los productos finales principales aunque cabe mencionar que se producen en cantidades menores otros, usualmente en un porcentaje menor al 1% del volumen total. (Bermúdez, 1988)

Ilustración No.1 Proceso de la materia orgánica para la producción de metano, mediante los procesos de hidrólisis, acetogénesis, acidogénesis y metanogénesis.



(Hernández, A. 2004)

La digestión anaerobia está caracterizada por cuatro fases diferenciadas en el proceso de degradación de sustratos. Estas son:

- **Etapa hidrolítica:**
Los compuestos orgánicos complejos, como las proteínas son despolimerizadas debido a la acción de enzimas hidrolíticas. Estos son convertidos en moléculas solubles y fácilmente degradables por otras bacterias. (Campos, 2012)
- **Etapa acidogénica:**
Los compuestos solubles obtenidos en la etapa anterior se transforman en ácidos grasos volátiles como el ácido acético, ácido propiónico, ácido butírico y ácido valérico. Durante esta fase, el pH baja a valores menores a 5. (Campos, 2012)
- **Etapa acetogénica:**
Las bacterias acetogénicas transforman los compuestos intermediarios en productos como ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. (Campos, 2012)
- **Etapa metanogénica:**
Esta es la etapa final del proceso, en el que compuestos como el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono son transformados en metano y dióxido de carbono. (Campos, 2012)

En las fases de hidrólisis y acidogénesis los microorganismos que están involucrados son facultativos, mientras que en la acetogénesis los organismos son estrictos con una tasa de crecimiento cinco veces menor que la de la acidogénesis. Si las bacterias metanogénicas llegarán a tener problemas para reproducirse o consumir ácidos entonces habría una acumulación de los últimos mencionados con lo cual se afectaría las condiciones de los metanógenos, responsables de producir metano. (Campos, 2012)

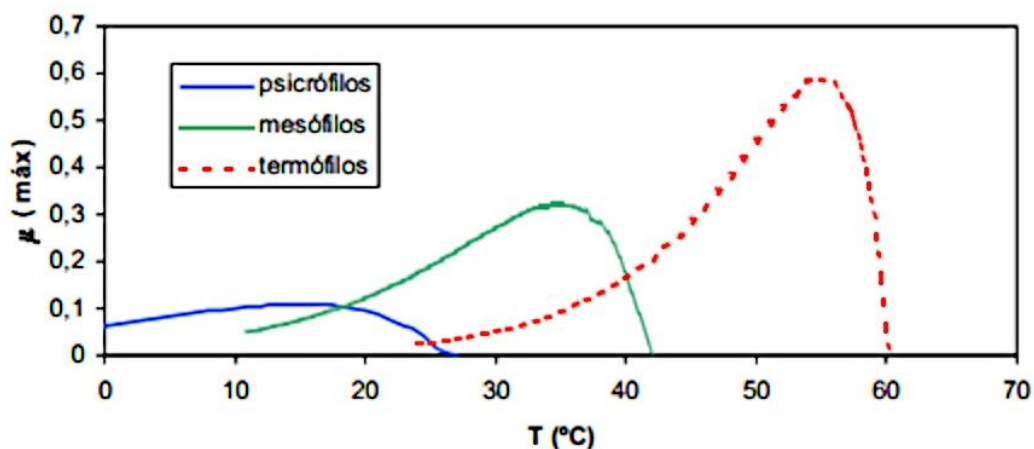
Los metanógenos son organismos claves en el biodigestor. Su desarrollo es lento y son muy sensibles a las variaciones que se producen en su medio. Existen dos grandes clases de bacterias metanogénicas que difieren entre sí en las temperaturas de desarrollo. Las bacterias mesofílicas tienen una temperatura óptima de desarrollo entre 33°C y 45°C y las termófilas entre 45°C y 65°C. (Hilbert, 2008)

Se debe tener control sobre las condiciones a las que se opera un biodigestor para cumplir con los requerimientos específicos de los microorganismos para vivir. Una de las variables más importantes que debe ser controlada es la temperatura. Los microorganismos anaerobios pueden desarrollarse en un amplio rango de temperaturas que oscilan entre los -5°C y los 80°C, sin embargo, se clasifican en tres grupos, dependiendo del rango óptimo para su crecimiento (Fernández, 2008):

- Psicofílicas: Para temperaturas menores a 15°C, siendo 15°C la temperatura óptima
- Mesofílicas: Para temperaturas entre 15°C y 45°C, con un óptimo de 35°C
- Termofílicas: Para temperaturas entre 50°C y 80°C, con un óptimo de 55°C

En cada rango de temperaturas existe una temperatura óptima en la que se alcanza la máxima actividad microbiana, y es en dicha temperatura que se alcanza la máxima eficiencia. Este aspecto se debe a que las reacciones biológicas de transformación de los sustratos en productos dependen de la temperatura, y requieren, por lo general, menor energía a mayor temperatura, lo que implica que a una temperatura mayor se tendrá un proceso de generación de biogás más rápido. La digestión psicrófila requiere de tiempos de retención mayores a los requeridos en la digestión mesófila y termófila. En general, el tratamiento anaerobio termófilo es el que devuelve resultados más rápidamente, y entre las ventajas de trabajar con este sistema se encuentran también un elevado grado de eliminación de patógenos y de virus debido a la combinación de la alta temperatura y el ambiente anaerobio, baja generación de lodos, mejora la hidrólisis de compuestos orgánicos complejos, reduce las espumas con respecto al tratamiento mesofílico gracias a la eliminación de microorganismos filamentosos, entre otras (Fernández, 2008).

Ilustración 2 Dependencia de la velocidad de crecimiento microbiano con respecto a la temperatura del biodigestor.



(Fuente: Fernández, Luis. 2008. Caracterización cinética de la degradación anaerobia termofílica seca de la forsu. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo. Tesis Universidad de Cádiz.)

2. Factores que influyen en el proceso de digestión anaeróbica. Para que la fermentación se produzca de una manera deseada y normal es necesario controlar parámetros externos ya que las bacterias metanogénicas crecen de manera muy lenta y son muy sensibles a estos factores externos. (Hilbert, 2008)

Tiempo de retención hidráulica:

Se define como el tiempo que deben permanecer los desechos orgánicos en el digestor. La finalidad es conseguir un nivel de energía o una reducción de carga contaminante que se haya prefijado. Los residuos que contienen compuestos simples como azúcares requieren de bajos tiempos de retención hidráulica, mientras que desechos complejos necesitan de un mayor tiempo de retención hidráulico debido a que se degradan de manera lenta. Este factor está dado por la cantidad en kilogramos de residuos que se fermentan y pueden entrar en el digestor por día. (Hilbert, 2008)

Tabla No. 4 Tiempo de retención de sólidos para producción de biogás

Región característica	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempos de retención
Trópico	30	15 días
Valle	20	25 días
Altiplano	10	60 días

(Herrero 2008)

Temperatura:

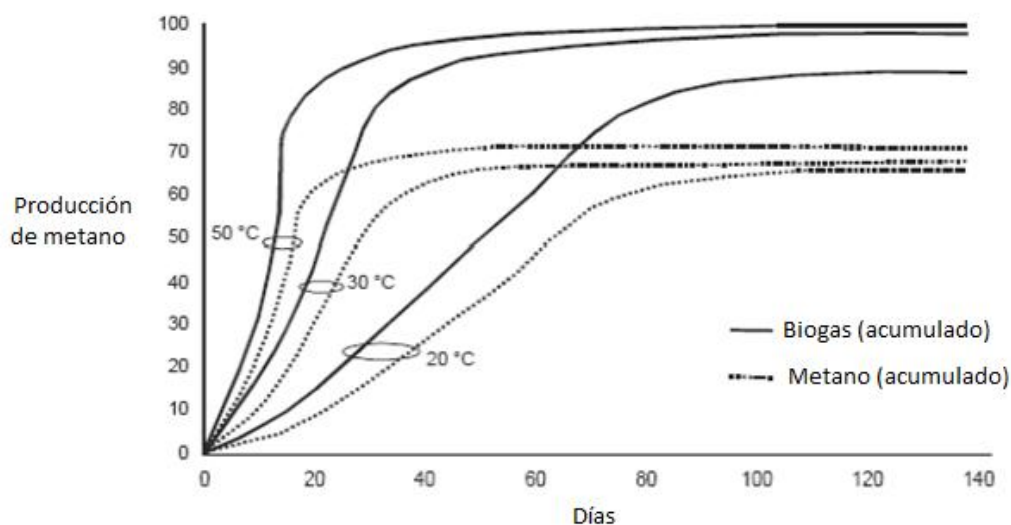
Dentro de un rango de temperaturas definido los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y la mayoría de las veces es a niveles altos de temperatura. Las bacterias metanogénicas son más sensibles a estos cambios de temperatura. Otros organismos crecen más rápido como las bacterias acidogénicas, que pueden alcanzar un catabolismo sustancial, inclusive a a temperaturas bajas. (Shmid, 1969)

Tabla 5: Producción de metano respecto a la temperatura de operación, velocidad de carga orgánica, tiempo de retención y concentración de nitrógeno amoniacal, utilizando como materia orgánica estiércol bovino

Sustrato	Temperatura (°C)	Velocidad de carga orgánica (kg / m ³ día)	Tiempo de retención (días)	Nitrógeno amoniacal (g N/L)	Producción de metano (m ³ CH ₄ /kg materia prima)
Estiércol bovino	55	3.00	15	1.5	0.20
				4.0	0.05
				6.0	0.05
		2.80	15	2.5	0.2
				3.0	0.2
				5.0	0.15
	6.0			0.15	
	37	2.63	16	0.7	0.20
				4.2	0.16
				1.4	0.21
				2.8	0.08
	35	4.44	9	1.04	0.49
				2.64	0.54
				4.33	0.40
				6.08	0.51
				7.74	0.09
				9.12	0.40
	55	7.76	5	0.97	0.30
				4.36	0.30
		8	5	4.38	0.30
5.4				0.29	
5.37				0.28	

(Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007)

Ilustración No.3 Gráfica de tiempo de retención respecto a la temperatura, producción de biogás y metano a lo largo del tiempo de retención de sólidos y la relación de agua/excremento



(Al Seadi, T. 2008)

Cuando la temperatura en el digestor aumenta también lo hace la actividad metabólica de las bacterias, haciendo que el tiempo de retención sea menor. Se debe tener cuidado con este tiempo de retención ya que si es muy corto las bacterias saldrán del biodigestor a un ritmo más rápido, originando un tratamiento deficiente del sustrato. (Shmid, 1969)

pH:

La digestión anaeróbica se desarrolla mejor en pH neutro o muy cercano a este (6.6-7.6). El pH en el biodigestor es una función de la concentración de ácidos volátiles, alcalinidad de materia prima y de la concentración de dióxido de carbono en el biogás. (An, 1996)

El pH del sustrato tiende a disminuir con la acumulación de ácidos grasos volátiles y de acetatos. Cuando los metanógenos no pueden convertir rápidamente los ácidos grasos volátiles al ritmo que las bacterias acetogénicas se producen, estos tienden a acumularse como se mencionó con anterioridad. El equilibrio entre dióxido de carbono y bicarbonato se opone a cambios en el pH. Al disminuirse el pH las bacterias metanogénicas se inhiben y dejan de crecer. Con esto se disminuye la producción de metano y se aumenta el contenido de dióxido de carbono, trayendo como resultado olores desagradables debido al aumento del contenido de sulfuro de hidrógeno. (An, 1996)

Existen dos métodos para corregir los niveles bajos de pH en el biodigestor:

- Parar la alimentación del biodigestor para que los metanógenos asimilen los ácidos grasos volátiles. Con esto se logra un aumento en el pH, así como una disminución en la actividad de las bacterias fermentativas reduciendo la producción de ácidos grasos volátiles. Ya que se haya restablecido el valor del pH, se puede continuar con la alimentación del digestor pero en pequeñas cantidades y poco a poco se puede ir aumentando. Con esto se logra evitar que se repita lo anterior. (Deublin, 2008)
- Agregar sustancias reguladoras o buffer para aumentar el pH como en el caso del uso de agua con cal. (Deublin, 2008)

Ácidos volátiles:

El aumento en la concentración de ácidos volátiles es un indicador que el digestor no está funcionando de manera correcta. Esto puede estar relacionado a una sobrecarga orgánica, una entrada de elementos tóxicos o una variación en la temperatura. Un aumento elevado en estos ácidos hará que el pH se reduzca, lo que causará la inhibición de las bacterias metanogénicas. (Hilbert, 2008)

C. Sustratos

Generalmente todos los tipos de biomasa pueden ser utilizados como sustratos siempre y cuando estos contengan proteínas, carbohidratos, grasas, celulosa y hemicelulosa como componentes principales. En el momento de seleccionar la biomasa a usar, es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- El contenido de sustancias orgánicas debe ser apropiado para el proceso de fermentación seleccionado. (Deusche, 2005)
- El valor de sustancias orgánicas presentes debe de ser lo más alto posible.
- El sustrato debe estar libre de patógenos. (Deusche, 2005)
- El contenido de sustancias dañinas así como basura deben ser bajas para permitir que el proceso de fermentación se lleva a cabo. (Deusche, 2005)
- La composición del biogás debe ser la apropiada para las aplicaciones posteriores. (Deusche, 2005)

1. Estiércol utilizado para producción de biogás. La materia prima para la producción de biogás es el estiércol fresco. Se pueden considerar otro tipo de residuos orgánicos, pero en ningún caso residuos duros (con cascara dura) o de larga duración de descomposición (como vísceras). El estiércol que mayor cantidad de biogás produce es el de chanco y el humano, pero el fertilizante que producen es muy ácido, además de que en el caso humano hay tener otras

consideraciones como se verá en el correspondiente apartado. El estiércol más equilibrado es el de vaca, además que por animal se produce gran cantidad de estiércol, y por tanto es el más fácil de recoger. (Herrero 2008).

Tabla No.6 Producción de estiércol diario fresco por masa

Ganado	Masa de kg estiércol fresco producido en 100kg de peso del animal.
Cerdo	4
Bobino	7
Caprino	4
Conejos	3
Equino	7
Humano adulto	0.4 kg por adulto
Humano niño	0.2 kg por niño

(Herrero 2008)

- Para obtención de biogás: La mezcla de estiércol y agua deberá ser de 1:4.
- Para la obtención de biol primordialmente: La mezcla deberá ser 1:3

D. Co-Substratos

Añadiendo co-substratos a la excreta líquida se incrementa el contenido de sustratos orgánicos, así como el rendimiento de biogás. En general, el contenido de materia seca en el sustrato debería estar debajo del 2-12% para asegurar la funcionalidad de las bombas así como la mezcla apropiada en el biorreactor, lo cual es importante para un proceso eficiente. (Deusche, 2005)

Si los residuos del proceso de fermentación se quieren utilizar como fertilizantes para áreas de agricultura, los co-sustratos deben cumplir con leyes nacionales y no deben poseer peligros por exposición, deben ser libres de patógenos. (Deublin, 2008)

1. Suero. El suero lácteo es el líquido que se obtiene en el proceso de fabricación del queso luego que se da la separación de la cuajada. Sus características corresponden a un líquido de color verdoso amarillento, turbio con sabor dulce y de carácter ácido. Este por lo general posee una Demanda Bioquímica de Oxígeno de al menos 30,000 mg O₂/L y con una cantidad de sólidos totales entre 6.0-6.5% (V/V). (Pintado *et al*, 2008).

El suero es un derivado de la industria láctea, subproducto de la elaboración de quesos. El suero láctico puede definirse como un líquido remanente luego de la separación de la caseína de la leche por coagulación (producción de queso). En la producción del queso coagulan cerca del 80% de las proteínas de la leche (principalmente caseínas), y el 20% restante queda en el suero. Además de las proteínas solubles que no precipitan, el suero también está compuesto por grasa, vitaminas, minerales y lactosa (la cual se encuentra en una concentración muy similar a la de la leche utilizada para la elaboración del queso). En esta industria se producen grandes volúmenes de suero, ya que éste comprende entre el 80 y el 90% del volumen total de leche procesada para la fabricación de queso, y posee cerca del 50% de los nutrientes presentes en la leche (Franchi, 2010).

El tipo y composición del suero generado depende de muchos factores, entre los que principalmente influyen el tipo de queso realizado y el proceso utilizado para ello. En cuanto al tipo de queso realizado, el suero obtenido varía de 4 litros por kilogramo de queso producido, para los quesos frescos, hasta 11.3 litros por kilogramo en el caso de los quesos de pasta dura. Con respecto al tipo de proceso utilizado, en el que se puede mencionar muchos factores como si se utiliza leche fresca o si se utilizan técnicas de extensión o recombinación, el tipo de extensor utilizado, el tratamiento térmico empleado (ya que la temperatura influye en la calidad del queso producido y por lo tanto en la composición del suero resultante), la forma de coagulación y el tipo de cuajo empleado (este factor afecta principalmente en la amargura del suero). Existen básicamente dos tipos de suero, el suero dulce y el suero ácido. El suero dulce es obtenido al elaborar queso utilizando enzimas proteolíticas o cuajo, las cuales catalizan la ruptura de un solo enlace peptídico de la κ -caseína, lo que provoca la desestabilización de las micelas (partículas formada por asociaciones de proteínas entre las que destacan la α y β -caseína) y por lo tanto la precipitación de casi todas las caseínas, que posteriormente se transforman en queso. Por otro lado, el suero ácido es obtenido a través de la precipitación ácida de la caseína, proceso en el que el pH de la leche desciende a 4.5, se alcanza el punto isoeléctrico de la mayoría de las caseínas, por lo que la micela de caseína se desestabiliza y precipita (Valencia, 2008) (Franchi, 2010) (Grasselli *et al.*, 1997).

Tabla 7: Composición porcentual del suero dulce y el suero ácido.

Compuesto	Suero dulce (% m/m)	Suero ácido (% m/m)
Agua	93.6	93.5
Sólidos Totales	6.4	6.5
Grasa	0.05 – 0.37	0.04 – 0.27
Proteína	0.6 – 1.0	0.6 – 0.8
Lactosa	4.6 – 5.2	4.4 – 4.6
Minerales	0.5	0.8
Calcio	0.043	0.12
Fósforo	0.04	0.065
Sodio	0.05	0.05
Potasio	0.16	0.16
Cloro	0.11	0.11
Ácido Láctico	0.05	0.4

(Franchi, 2010)

La producción de lactosa a partir de suero ha sido otra de las alternativas más recientes. El suero contiene lactosa en proporciones que varían de 4.52% al 5.18%, dependiendo de su procedencia. Dicha lactosa obtenida se utiliza a nivel industrial principalmente en la industria farmacéutica (como excipiente para comprimidos o aditivo para medios de cultivo) y en la industria de los alimentos (en repostería, como alimento para bebés, en confitería, entre otras). En la alimentación humana destaca el uso de suero concentrado y en polvo en productos de panadería, helados, salsas y bebidas hidratantes. En cuanto a la industria farmacéutica, también se ha logrado obtener péptidos antihipertensivos, que son fragmentos de proteínas específicas que ejercen diversas actividades biológicas (Pastrana, 2011).

Los usos del suero son prácticamente ilimitados, solo están más bien definidos por el tipo de queso del que provienen y las características utilizadas en el proceso de producción. En las siguientes dos tablas se resumen las aplicaciones para los diferentes tipos de suero

La utilización del suero ha ido más allá y actualmente está enfocada en la producción de energías renovables. Existe producción de etanol a partir de suero. Por ejemplo en Nueva Zelanda, el 50% de la producción de suero es utilizada como materia prima para la producción de etanol. Cabe mencionar que esta alternativa no es rentable cuando se trabaja con suero no concentrado, ya que la destilación del alcohol producido representa altos costos (Pastrana, 2011).

Siempre en el área de las energías renovables, el suero también ha sido utilizado como materia prima para la producción de biogás. Debido a su alta cantidad de materia orgánica, existe la posibilidad de aprovecharlo para la producción de metano, mediante su descomposición por digestión anaeróbica. Esta posibilidad se basa en la utilización de los nutrientes del suero

láctico para alimentar a las bacterias fermentativas, las bacterias acetogénicas y los microorganismos metanógenicos que participan en el complejo proceso de la producción de biogás. Estudios previos demuestran que puede alcanzarse eficiencias de conversión del 95% en la aproximación de depuración de aguas residuales (Magaña et al. 2011) (Franchi, 2010).

Se utiliza el término biogás para hacer referencia a una mezcla de gases que se obtiene como producto en la descomposición de la materia orgánica realizada por la acción bacteriana en condiciones anaeróbicas. Entre la materia orgánica que puede utilizarse como materia prima para la generación de biogás, la más comúnmente utilizada consta de desechos, entre los que se encuentran desechos de animales, aguas municipales, desechos agrícolas, residuos alimenticios, entre otros, ya que es una forma de darle un valor adicional a los residuos. La digestión anaeróbica es básicamente la degradación bioquímica de materia orgánica compleja a nutrientes orgánicos más simples, realizado por la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno (Lasing, Botero & Martin, 2008).

Tabla 8: Aplicaciones para el suero y el concentrado de suero o polvo.

Uso	Suero	Concentrado de suero o polvo				
	Líquido	Natural	Endulzado	Desmineralizado	Desproteínizado	Deslactosado
Alimento animal	X	X		X	x	X
Alimento bebés				X		
Alimento dietético				X		
Salchichas				X		
Sopas		X	X	X		
Panadería	X	X		X		
Aderezos		X		X		
Quesos		X		X		
Bebidas	X				x	
Productos de levadura	X					

(Franchi, 2010)

Tabla 9: Aplicaciones para el concentrado proteico de suero en polvo y para la lactosa

Suero	Concentrado proteico de suero o en polvo			Lactosa	
	Desmineralizado	Deslactosado	Desmineralizado y deslactosado	Cruda	Refinada
Alimento bebés	X	X	X		X
Alimento dietético	X	X	X	x	X
Salchichas	X				
Panadería	X				
Aderezos	X				

Continuación Tabla 9

Suero	Concentrado protéico de suero o en polvo			Lactosa	
	Desmineralizado	Deslactosado	Desmineralizado y deslactosado	Cruda	Refinada
Bebidas			X		
Productos farmacéuticos					X
Productos industriales				x	X

(Franchi, 2010)

E. Demanda Química de Oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO) es una medida aproximada de la cantidad de materia orgánica contenida en una muestra de agua. La materia orgánica en condiciones naturales puede ser biodegradada a dióxido de carbono y agua a través de un proceso muy lento que puede tardar varios días. (Grisales, 2012)

El proceso de degradación realizado por los microorganismos es acelerado en las pruebas de DQO mediante procesos de oxidación forzada en los cuales se utilizan oxidantes químicos y métodos estandarizados.

(Grisales, 2012)

La degradación biológica de un carbohidrato en condiciones aeróbicas puede expresarse como:



Esto puede compararse con la degradación química de la misma sustancia pero acelerando el proceso con dicromato de potasio: (Grisales, 2012)



La DQO determinada se expresa como oxígeno equivalente al necesario para degradar la materia orgánica por litro (mg/L) (Grisales, 2012)

Puede emplearse una mezcla de ácido sulfúrico y dicromato de potasio con iones plata como catalizador. En el tiempo de digestión que será de dos horas y a una temperatura de 150

celsius el cromo VI pasa a estado de oxidación cromo III oxidando la materia orgánica. (Grisales, 2012)

F. Demanda Bioquímica de Oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas municipales, industriales y en general, residuales. Su aplicación permite calcular los efectos de las descargas de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas de los cuerpos receptores. Los datos de la prueba de la DBO se utilizan en ingeniería para diseñar las plantas de tratamiento de aguas residuales. (Santambrosio, 2007)

La prueba de la DBO es un procedimiento experimental que mide el oxígeno requerido por los organismos en sus procesos metabólicos al consumir la materia orgánica presente en las aguas residuales o naturales. Las condiciones estándar del ensayo incluyen incubación en la oscuridad a 20°C por un tiempo determinado, generalmente cinco días. Las condiciones naturales de temperatura, población biológica, movimiento del agua, luz solar y la concentración de oxígeno no pueden ser reproducidas en el laboratorio. Los resultados obtenidos deben tomar en cuenta los factores anteriores para lograr una adecuada interpretación. (Santambrosio, 2007)

Las muestras de agua residual o una dilución conveniente de las mismas, se incuban por cinco días a 20°C en la oscuridad. La disminución de la concentración de oxígeno disuelto (OD), medida por el método Winkler o una modificación del mismo, durante el periodo de incubación, produce una medida de la DBO. (Santambrosio, 2007)

G. Ley de Beer Lambert

La ley de Beer Lambert es una ley de absorción de luz que indica de manera cuantitativa la relación entre el grado de atenuación con respecto a la concentración de las moléculas que absorben y de la longitud del trayecto en que ocurre la absorción. Cuando la luz atraviesa un medio que contiene un analito que absorbe la misma, se disminuye su intensidad como consecuencia de la excitación del mismo. Según esta ley, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de una especie absorbente c y a la longitud del trayecto b del medio de absorción, como lo expresa la siguiente ecuación: (Skoog, 2010)

$$A = \log \frac{P_o}{P} = abc$$

H. Datos teóricos encontrados para la caracterización de estiércol de búfalo y suero de leche de búfalo

Tabla 10 Nitrógeno para varios tipos de estiércol

Materia biodegradable	Nitrógeno (% m/m)
Estiércol cerdos	2.8
Estiércol vacas	1.8
Estiércol pollos	3.7
Excremento humano	7.1
Estiércol patos	0.8

(Maramba, 1978)

Tabla 11 Nitrógeno para varios tipos de estiércol

Materia biodegradable	Nitrógeno (% m/m)
Estiércol vacas	1.7
Estiércol pollo	6.3
Estiércol caballo	2.3

(Barnett, 1978)

Tabla 12 Nitrógeno para varios tipos de estiércol

Materia biodegradable	Nitrógeno (% m/m)
Excremento humano	6
Estiércol vaca	1.7
Estiércol cerdo	3.8
Excremento pollo	6.3
Estiércol caballo	2.3

(Kaltwascer, 1980)

Tabla 13 Nitrógeno para varios tipos de estiércol

Tipo de estiércol	Producción de biogás por kilogramo de estiércol (L/kg estiércol)
Vaca	22 – 40
Cerdos	40 – 60
Aves de corral	65.5 – 115
Humano	20 – 28

(Lara, 2011)

Tabla 14 pH para estiércol de búfalo y suero de leche de búfalo

Suero de leche de búfalo	5.3
Estiércol de búfalo	7.7

(Janis *et al*, 2011) (Soil, 2013)

Tabla 15 Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno para estiércol de cerdo:

DQO (mg/L)	1400
DBO (mg/L)	725

(Carrillo, 2003)

Tabla 16 Nitrógeno para varios tipos de estiércol

Materia biodegradable	N (% respecto materia seca, m/m)
Estiércol vacuno	1.7-3
Estiércol de caballo	2.3
Estiércol de cerdo	3.75-7
Estiércol de aves de corral	6.3
Estiércol de oveja	3.75

(Elías, 2012)

I. Técnicas analíticas empleadas

La mayoría de las técnicas analíticas empleadas en muchas de las etapas experimentales del trabajo corresponden a las descritas en los Métodos Estándar para el Análisis de Aguas Potables y Residuales (APHA, AWWA, WPCF, 1989).

1. pH. La determinación inicial del pH se llevó a cabo sobre una muestra que se tomó del estiércol de búfalo y una del suero de leche de búfalo. Se utilizó un potenciómetro marca Fischer Scientific AB15 Plus con un rango de pH entre 1-14 y una incertidumbre de ± 0.001 , que fue previamente calibrado con soluciones patrón a pH 7 y pH 4. (APHA, AWWA, WPCF, 1989).

La medición se llevó de forma directa de acuerdo al método normalizado 4500B de la APHA-AWWA-WPFC, 1989, por inmersión del electrodo de pH en la muestra de 5 gramos que fue previamente homogenizada agitándola con una paleta de metal. (APHA, AWWA, WPCF, 1989).

2. **Sólidos totales y sólidos volátiles.** Los sólidos totales se determinaron sobre tres muestras de sustrato, tres de suero, tres de estiércol obtenido en época de invierno y tres de estiércol obtenido en época de verano. Esta determinación se realizó de acuerdo al método normalizado 2540B de la APHA-AWWA-WPFC, por gravimetría utilizando una balanza analítica marca Sartorius BP 4100S con una capacidad entre 0-4100 gramos y una incertidumbre de ± 0.01 g. La muestra se secó a 70°C hasta masa constante en un horno de secado marca Fisher Scientific Isotemp 500 series, con un rango de temperaturas entre $0-150^{\circ}\text{C}$ y una incertidumbre de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Luego de que la muestra se sacó del horno también fue posible calcular la humedad que contenía. (APHA, AWWA, WPCF, 1989).

Los sólidos volátiles se determinaron también por gravimetría a partir del residuo seco obtenido luego de peso constante en el horno mencionado con anterioridad. Este se calcinó en una mufla a 600°C , marca Thermolyne 62700 furnace con un rango de temperaturas entre $0-1500^{\circ}\text{C}$ y una incertidumbre de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Los resultados se expresan como sólidos volátiles sobre sólidos totales. También fue posible calcular las cenizas contenidas en el estiércol luego de sacada la muestra de la mufla mediante una simple resta entre el peso de la muestra luego de sacada de la misma con el peso del crisol, esto para obtener dicho resultado. (APHA, AWWA, WPCF, 1989).

3. **Densidad.** Para determinar la densidad del estiércol se utilizó un beaker marca Kimax No. 54000 con una capacidad de 80 mL y una incertidumbre de ± 5 mL. Se introdujo agua en el mismo hasta un cierto volumen conocido y luego agregarle muestra de estiércol al mismo evitando que tocara las paredes para así llegar a otro volumen conocido y poder hacer diferencia entre las masas y el volumen y así obtener la densidad. (Atares, 2009)

Para determinar la densidad del suero de queso se utilizó un picnómetro marca Kimax con una capacidad de 25 mL. Lo que se hizo fue pesar el picnómetro vacío y luego se llenó de suero y se volvió a pesar. Ya que el picnómetro tiene un volumen proporcionado por el fabricante solo se lleva a cabo la diferencia de pesos y se divide dentro de dicho volumen y se obtiene la densidad. (Atares, 2009)

4. **Demanda Química de Oxígeno.** La Demanda Química de Oxígeno se realizó para una muestra de estiércol obtenida en época de invierno, una muestra del mismo obtenida en época de verano y una muestra de suero de queso.

Esta determinación se realizó mediante el procedimiento DIN 38409 H41 o ISO 6060 método 5220D de la APHA-AWWA-WPFC, 1989. Para la oxidación de la muestra se utiliza

dicromato potásico y sulfato de plata como catalizador. El cloruro es enmascarado por el sulfato de mercurio. Se lleva a cabo una determinación fotométrica de los iones $Cr_2O_7^{2-}$ amarillos no consumidos. Para esto se utilizó un kit Merck Spectroquant 1.14560; el cual consta de viales con tapón que contienen los reactivos mencionados con anterioridad a los cuales se le añade 1 mL de la solución 1/40 (V/V). Estos viales luego son incubados en un termo reactor por dos horas a 150°C a los cuales posteriormente se les determina el cambio de oxidación de cromo, de hexavalente a trivalente por espectrofotometría a una longitud de onda de 600 nm, con un espectrofotómetro marca Shimadzu UV mini 1240 con un rango de longitud de onda entre 190-100 nm y una incertidumbre de ± 0.0001 nm. (Grisales, 2012)

Como muestra patrón primario se utilizó ftalato ácido de potasio en solución estándar con lo cual se hizo cuatro diluciones para obtener concentraciones finales de 5000, 2500, 1250 y 625 mg ftalato/L. Con estas concentraciones y sabiendo que la DQO teórica es de 1.176 mg/mg O_2 se logró obtener la DQO experimental que se graficó contra la absorbancia del ion Cr^{+3} . (Grisales, 2012)

5. Demanda Bioquímica de Oxígeno. La Demanda Bioquímica de Oxígeno se realizó para una muestra de estiércol obtenida en época de invierno, una muestra del mismo obtenida en época de verano y una muestra de suero de queso. (Santambrosio, 2007)

Esta determinación se realizó mediante el método de dilución 10230 adaptado de los Métodos Estándar para el Análisis de agua. Este método dura por 5 días en el cual se mide oxígeno disuelto en 300 mL de la botella de BOD. (Santambrosio, 2007)

Se hizo una estimación del volumen de la muestra necesario para el análisis. Por lo menos 2.0 mg/L del oxígeno disuelto deben ser consumidos durante el análisis y al menos 1.0 mg/L de oxígeno disuelto debe quedar remanente en la botella. Cabe mencionar que se tomó como referencia la Demanda Química de Oxígeno para llevar a cabo el proceso de selección del rango de BOD a nivel del mar. (Santambrosio, 2007)

Tabla 17 Valores a utilizar para la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno

BOD a nivel del mar	BOD a 304.78 m snm	BOD a 1,523.93 m snm	Volumen máximo de la muestra (mL)
2460	725.39	619.32	1
1230	362.39	309.66	2
820	241.69	206.34	3
615	181.35	154.83	4
492	145.08	123.74	5
410	121.00	103.32	6
304	89.61	76.50	8
246	72.54	61.87	10
205	60.35	51.51	12
164	48.16	41.15	15
123	36.27	30.78	20
82	24.08	20.73	30
41	12.19	10.36	60
25	7.31	6.40	100
12	3.66	3.05	200
8	2.44	2.13	300

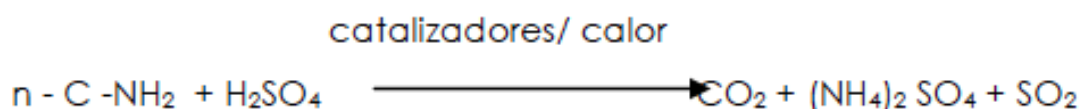
Con base en los valores escogidos de la tabla anterior, se procedió a hacer las respectivas diluciones las cuales fueron aforadas en los envases de BOD con una solución salina. Luego de esto, se midió el BOD con un medidor multipropósito en cuyas funciones está medir el oxígeno disuelto en una muestra, para tener valores iniciales de las mismas. Las muestras permanecieron en el laboratorio por cinco días para tomar la lectura del BOD. (Santambrosio, 2007)

6. Proteínas. El método Kjeldahl se basa en la determinación del nitrógeno. La determinación del contenido de nitrógeno en muestras de naturaleza orgánicas importante en muchos campos de análisis, como los relacionados con las industrias agroalimentaria o farmacológica o con el medio ambiente, entre otros. (Fernández, 2010)

El método Kjeldahl mide el contenido en nitrógeno en muestras orgánicas. El contenido en proteína se puede calcular seguidamente, presuponiendo una proporción entre la proteína y el nitrógeno para el alimento específico que está siendo analizado, tal y como se explicará más adelante. (Fernández, 2010)

Este método puede ser dividido, básicamente en tres etapas: digestión o mineralización, destilación y valoración. El procedimiento a seguir es diferente en función de si en la etapa de destilación el nitrógeno liberado es recogido sobre una disolución de ácido bórico o sobre un exceso conocido de ácido clorhídrico o sulfúrico patrón. Ello condiciona la forma de realizar la siguiente etapa de valoración, así como los reactivos empleados. (Fernández, 2010)

Etapa de digestión: un tratamiento con ácido sulfúrico concentrado, en presencia de un catalizador y ebullición convierte el nitrógeno orgánico en ion amonio (Fernández, 2010)



Procedimiento: Se introducen de 1 a 5 g de muestra un tubo de mineralización y se ponen 3 g de catalizador que suele estar constituido por una mezcla de sales de cobre, óxido de titanio o/y óxido de selenio. De forma habitual se utiliza como catalizador una mezcla de K_2SO_4 : $CuSO_4$: Se (10:1:0,1 en peso). Después se adicionan 10 mL de H_2SO_4 concentrado y 5 mL de H_2O_2 . Posteriormente se digiere a 420 °C durante un tiempo que depende de la cantidad y tipo de muestra. Se sabe que la digestión ha terminado porque la disolución adquiere un color verde esmeralda característico. (Fernández, 2010)

7. Grasas. El método Soxhlet involucra una extracción sólido-líquido con el fin de determinar la concentración de la materia grasa. El solvente a utilizar debe tener un punto de ebullición bajo y no reaccionar con el aceite a extraer. (Mejía, 2008)

Las etapas de este método comprenden de los siguientes procesos físicos: vaporización, condensación, extracción y evacuación por el sifón. (Mejía, 2008)

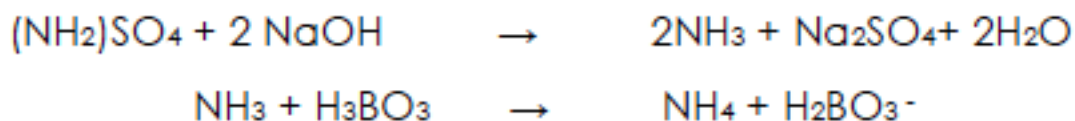
Para llevar a cabo estos pasos lo primero que se hizo fue la preparación de la muestra: para el estiércol y el suero lo primero que se hizo fue secarlos en un horno para poder tenerlos libre de humedad, luego de esto dicha materia seca se homogenizó moliéndolo. Se pesó el papel filtro en una balanza analítica y luego la muestra sobre el mismo. Con una estufa, se secó el balón y luego se pesó en la balanza. Se adaptó el balón al cuerpo extractor y se colocó en este último el papel filtro con la muestra dentro de él. Se añadió solvente en el extractor. Se adaptó el cuerpo extractor al condensador y con la estufa comenzó a calentarse el solvente hasta su punto de ebullición para que en estado gaseoso pasara al condensador de reflujo. Este último lo lleva a

la fase líquida, luego el solvente cae nuevamente en el extractor que contiene al papel filtro con la muestra dentro de él. El solvente diluye los lípidos de la muestra y tanto el solvente como la grasa atraviesan el papel filtro. Este solvente va llenando poco a poco el extractor y a través del sifón se produce un reflujo que devuelve este solvente al balón junto con los lípidos extraídos. (Mejía, 2008)

Ilustración 4 Digestión de las muestras de estiércol de búfalo y suero de leche de búfalo



Etapa de destilación: se alcaliniza la muestra digerida y el nitrógeno se desprende en forma de amoníaco. El amoníaco destilado se recoge sobre un exceso desconocido de ácido bórico. (Fernández, 2010)



Procedimiento: Después de enfriar se adicionan al tubo de digestión 50 mL de agua destilada, se pone en el soporte del destilador y se adiciona una cantidad suficiente de hidróxido sódico 10 N, en cantidad suficiente (50 mL aproximadamente) para alcalinizar fuertemente el medio y así desplazar el amoníaco de las sales amónicas. El amoníaco liberado es arrastrado por el vapor de agua inyectado en el contenido del tubo durante la destilación, y se recoge sobre una disolución de ácido bórico (al 4 % v/v). (Fernández, 2010)

Ilustración 5 Destilación de las muestras de estiércol de búfalo y suero de leche de búfalo



Etapa de valoración: La cuantificación del nitrógeno amoniacal se realiza usando titulación volumétrica ácido-base del ion borato formato, empleando ácido clorhídrico o sulfúrico y como indicador una disolución alcohólica de una mezcla de rojo de metilo y azul de metileno. Los equivalentes de ácido consumidos corresponden a los equivalentes de amoniacos destilados. (Fernández, 2010)



De la valoración se puede calcular el número de equivalentes de nitrógeno recogidos, y con este dato se obtiene el porcentaje de nitrógeno en la muestra. Para calcular el porcentaje de proteína basta con multiplicar el porcentaje de nitrógeno calculado por un factor de conversión. Este factor de conversión está tabulado para cada grupo de alimentos. En la Tabla 1 se resumen los factores para algunos alimentos. (Fernández, 2010)

Tabla 18 Factores K teóricos para proteínas

Alimento	Factor K
Harina de trigo	5.70
Trigo, centeno, cebada	5.83
Arroz	5.95
Cacahuates	5.46
Almendras	5.18
Sojas	5.71
Semillas oleaginosas	5.30
Leche y derivados	6.38
Carne y derivados	6.25
Clara de huevo	6.70
Yema de huevo	6.62
Huevo entero	6.68
Gelatina	5.55
Vegetales	6.25

(Potus, 2000)

Este proceso se realiza por 45 minutos generalmente. El material extraído se va concentrando en el balón. Se retira el papel filtro con la muestra se calienta el balón para evaporar el solvente el cual se condensa posteriormente, para que de este modo solo quede la grasa dentro del balón. El balón se pesa en la balanza obteniendo el peso del mismo con la grasa. Finalmente se calculó el porcentaje de grasa. (Mejía, 2008)

J. Tipos de biodigestores

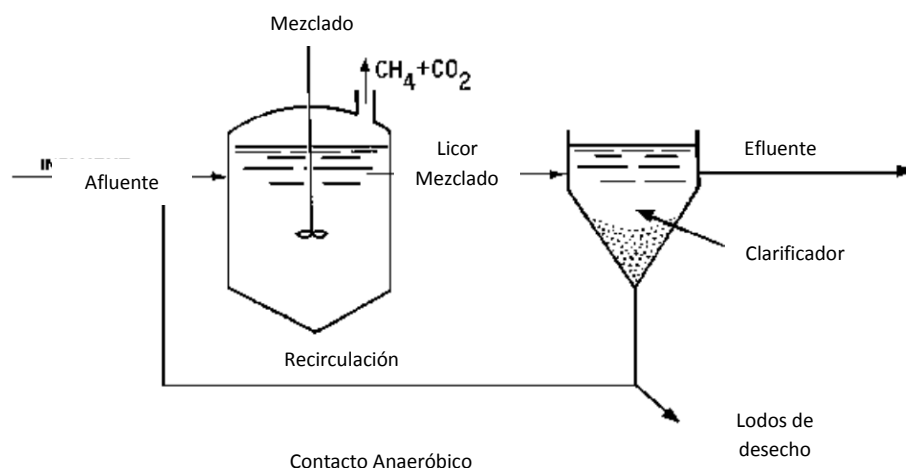
Para la producción del biogás es necesario contar con un reactor adecuado para su generación, éste es llamado biodigestor; *bio* por vida ya que contiene microorganismos vivos y *digestor* porque se lleva a cabo un proceso de digestión anaerobia.

Existen varios diseños o tipos de biodigestores para diversas aplicaciones y especificaciones. A continuación se describen los tipos más utilizados.

- Reactor anaeróbico de contacto; *Anaerobic Contact Process* (ACP):

Este tipo de reactor es utilizado cuando el efluente tiene concentraciones muy elevadas de biomasa. Entre sus características está que es altamente eficiente y requiere de un menor tamaño. El reactor tiene un tanque digestión anaeróbica y luego uno de sedimentación para el efluente del digestor, el tanque de sedimentación regresa los lodos sedimentados lo cual permite un contacto adicional entre la biomasa y los residuos lo que permite una mejor eficiencia ya que el lodo pasa dos veces por el digestor (Hassan, S. 2013).

Ilustración 6 Reactor anaeróbico de contacto



(Hassan, S. 2013).

- Filtro anaeróbico de corriente descendente o ascendente:

Este tipo de reactor fue desarrollado en 1968 y desde la fecha se ha modificado y representa una tecnología avanzada que es utilizada eficientemente en el tratamiento de aguas industriales. El principio se basa en el contacto del efluente con una película fija. Dentro del reactor, generalmente cilíndrico, existe una matriz cubierta por sólidos biológicos y esto forma una biopelícula delgada, lo cual mantiene una biomasa floculada o gránulos dentro. La digestión comienza cuando los compuestos orgánicos solubles pasan por los gránulos y se difunden en la superficie de estos, y termina cuando se convierten en biogás. En estos tipos de reactor es de ayuda tener flujos uniformes a través del reactor para que toda la película sea utilizada de igual forma y mejorar el contacto entre lo que entra y la biomasa del reactor, lo que provoca la acumulación de grandes cantidades de biomasa para producir los tiempos necesarios de retención de sólidos para que se realice el proceso (Thomas, I. 1998).

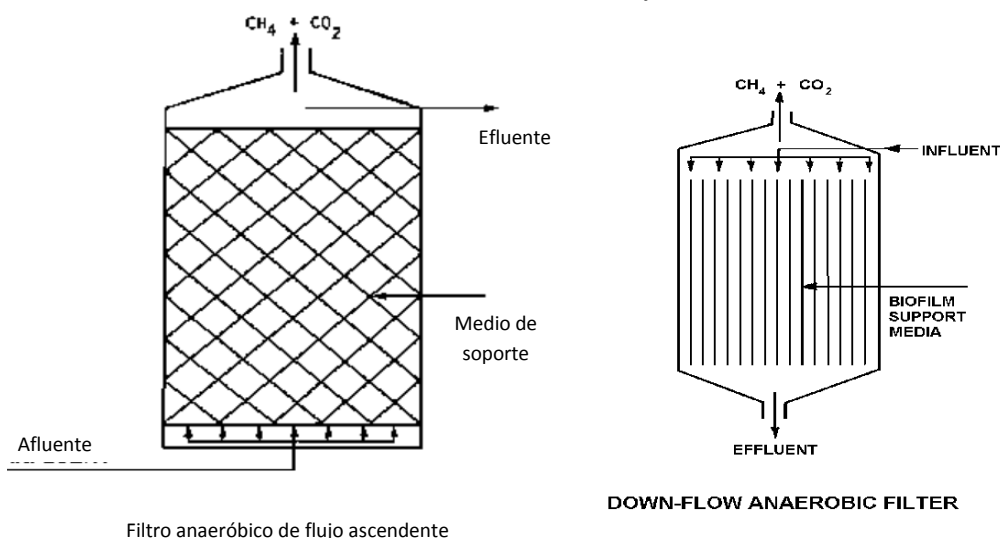
Los materiales utilizados para la formación de la matriz son anillos de Pall y medios de comunicación modulares de tipo bloque formados a partir de láminas de plástico corrugado (Thomas, I. 1998).

Si no se diseña bien y no se utilizan los flujos adecuados existirá un estancamiento para evitar esto se recomienda que los reactores deben tener menos del 70% de su volumen ocupado por los medios de comunicación o matriz, a gran escala se diseñan para que tengan $100\text{m}^2/\text{m}^3$ de área superficial específica. Cada vez que se duplica este factor la eficiencia mejora en un 5% por lo que en la mayoría de casos no es económicamente justificable aumentar el área superficial específica. Además para evitar el estancamiento u obstrucción del medio se le puede

dar una limpieza periódica que consiste en hacer pasas piedras por el medio lo cual saca el exceso de sólidos (Thomas, I. 1998).

Las diferencias entre el digestor de flujo ascendente y el de flujo descendente son que el ascendente se utiliza con tamaños de 100 a 2,000 m³, en cambio uno descendente son de volumen más grande, de 600 a 4,000 m³ y se usa para concentraciones de DQO del desecho orgánico que estén entre 15,000 a 85,000 mg/L y acepta desechos con concentración de sólidos alta, sin embargo los que se han puesto a funcionar se tapan por lo que se requiere costo en limpieza y en regenerar la matriz de biomasa (Thomas, I. 1998).

Ilustración 7 : Filtro de flujo ascendente



(Thomas, I. 1998).

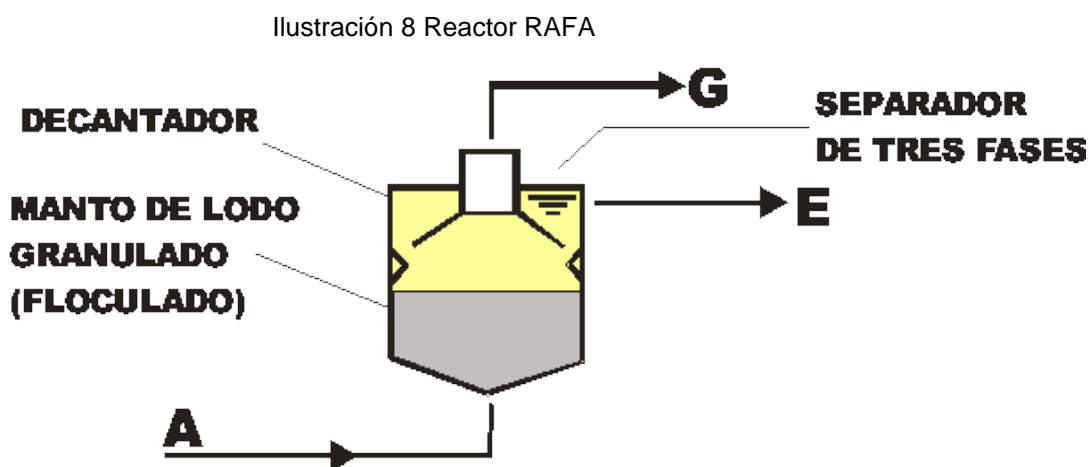
- Reactor anaeróbico de flujo ascendente (RAFA); *Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)*:

Este biodigestor fue desarrollado en Holanda por Gatzert Lettinga de la Universidad de Wageningen en 1980. Se basa en la granulación de biomasa o formación de un lodo granular, la cual es un proceso en el que los microorganismos que se encuentran dispersos en el medio forman agregados celulares, o grupos de microorganismos. La formación de estos gránulos mejora la cooperación entre microorganismos lo que reduce el tiempo de degradación de sustratos. El desarrollo de los gránulos depende de la calidad y componentes de los desechos orgánicos y las condiciones ambientales de operación. El lodo granular se define como un ecosistema en las que interactúan todas las especies bacterianas para la degradación anaeróbica de desechos orgánicos (Groppelli, Eduardo. 2008).

Las ventajas al utilizar un diseño RAFA están que los gránulos permanecen intactos y siguen realizando sus funciones biológicas a pesar de agitación o casos de de esfuerzo o corte. Al no tener un relleno de soporte para retener la flora anaeróbica no se producen canalizaciones lo cual hace que se aproveche de mejor manera el volumen disponible. No sufre problemas de taponamiento si se tratan aguas con una fracción relativamente alta de sólidos sedimentables. Al tener flujos grandes o sobrecargas se beneficia ya que al no tener material de relleno se tiene la capacidad de absorber y distribuir más fácilmente los flujos extras, aumentando la intensidad de producción de biogás y aportando un mayor efecto de mezcla (Groppelli, Eduardo. 2008).

El mecanismo para el funcionamiento es que el líquido con desechos orgánicos a tratar fluye ascendentemente a través del manto de lodos y a medida que pasa se logra una degradación de la fracción orgánica soluble, este proceso hace que se opere con bajos tiempos de residencia hidráulica y altos tiempos para la retención de sólidos lo cual mejora la eficiencia del biodigestor. Mientras el líquido fluye se depura por la acción de las bacterias anaeróbicas y se producen burbujas de biogás lo cual produce un efecto de agitación suave y esto es beneficioso para el proceso biológico que se desarrolla dentro del tanque (Groppelli, Eduardo. 2008).

En la parte superior del reactor saldrá el gas, el líquido y el sólido a medida que el manto de lodos vaya aumentando su volumen, debido a esto es necesario colocar separador de estas tres fases. Esto permite retener el biogás producido para su conducción y consumo; colocar un regreso de sólidos al digestor para no agotar los gránulos y tomar el sólido de exceso para su tratamiento y producción de otros productos como compost y bioabono (Groppelli, Eduardo. 2008).



(Groppelli, Eduardo. 2008).

K. Parámetros para diseño

La técnica utilizada en estos reactores es la separación del tiempo de retención de sólidos (SRT, *Solid Retention Time*) con la del tiempo de retención hidráulica (HRT, *Hydraulic Retention Time*). El HRT indica el tiempo en que los residuos, agua de desecho, están dentro del reactor en contacto con la biomasa y el SRT es el tiempo que la masa microbiológica o microorganismos están dentro del reactor para alcanzar un grado deseado de estabilización para que éstos puedan generar el producto deseado. En el caso de microorganismos metanógenos se quiere tener un SRT largo y que son microorganismos de crecimiento lento; el objetivo es lograr crear un medio estable de metanógenos y que lo que utilicen del afluente y los residuos que producen salga pronto teniendo así un HRT bajo (Kumar, S 2008).

Para calcular el HRT que es uno de los parámetros de diseño se utilizar la siguiente fórmula:

$$HRT = \frac{V_R}{V} \text{ (Ecuación No.1)}$$

(Al Seadi, T; *et. al.* 2008)

En donde

HRT: Tiempo de retención hidráulica.

V_R : Volumen del biodigestor.

V: Caudal de sustrato alimentado.

De acuerdo con la fórmula si la alimentación de los sustratos al biodigestor es muy alta el HRT será más bajo, éste es un factor a tomar muy en cuenta por lo mencionado anteriormente sobre el tiempo que los microorganismos necesitan para producir biogás (Al Seadi, T; *et. al.* 2008).

Para el cálculo del STR que es el otro parámetro se utiliza la fórmula siguiente:

$$STR = \frac{M_R}{M} \text{ (Ecuación No.2)}$$

(Baxter Woodman. 2009)

En donde

SRT: Tiempo de retención de sólidos.

M_R : Masa de sólidos en el reactor por unidad de tiempo.

M: Masa de sólidos en el efluente por unidad de tiempo.

Otro factor que también es muy utilizado en el dimensionamiento es la carga de materia orgánica u OLR por sus siglas en inglés (Organic Loading Rate) el cual es una medida de la cantidad de desecho que puede ser tratada por unidad de volumen del reactor (Zhou, I. 2007).

$$OLR = \frac{C_i * Q}{V} \text{ (Ecuación No.3)}$$

(Zhou, I. 2007)

En donde

OLR: Carca de materia orgánica.

C_i : Materia orgánica que generalmente es el valor de DBO o DQO.

Q: Caudal del afluente.

V: Volumen del reactor.

Se ha podido observar que la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO) son valores que se utilizan para los cálculos de los factores necesarios para el diseño y dimensionamiento de los biodigestores. El DQO es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar todo el contenido orgánico, el biodegradable y el no biodegradable, de la muestra y la DBO es la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan para degradar el material orgánico biodegradable de la muestra (Ramalho, R. 2003).

L. Diseño de reactores a partir de ecuación de diseño.

Otra forma de diseñar un biodigestor es a través de las ecuaciones de diseño para los diferentes tipos de reactor, los reactores utilizados para esto son el reactor batch o intermitente (BR), el reactor continuo de tanque agitado (MFR o CSTR en inglés) y el reactor de flujo pistón o de tubos (PFR) (Heinzle, E. 2009).

Ilustración 9 Reactor intermitente

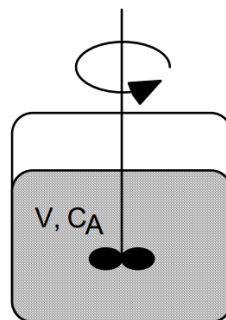


Ilustración 10 Reactor continuo de tanque agitado

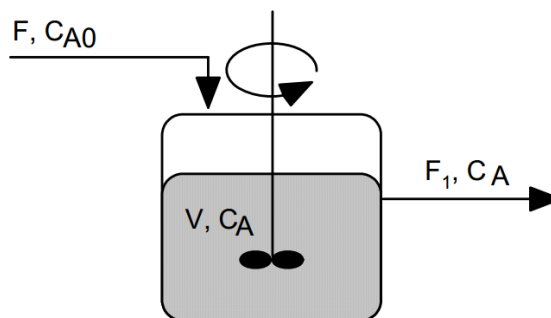
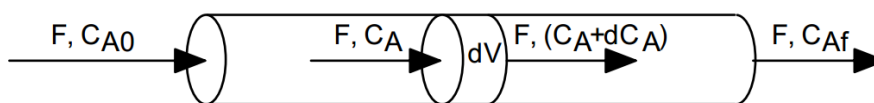


Ilustración 11 Reactor de flujo pistón



(Heinzle, E. 2009)

PFR

Para el reactor continuo de tanque agitado las ecuaciones de diseño son:

$$\frac{V}{F_{A0}} = \frac{\tau}{C_{A0}} = \frac{\Delta X_A}{-r_A} = \frac{X_A}{-r_A} \quad (\text{Ecuación No.4})$$

(Levenspiel, O. 2012)

$$\tau = \frac{1}{s} = \frac{V C_{A0}}{F_{A0}} = \frac{C_{A0} X_A}{-r_A} \quad (\text{Ecuación No.5})$$

(Levenspiel, O. 2012)

Para el reactor de flujo pistón las ecuaciones de diseño son:

$$\frac{V}{F_{A0}} = \frac{\tau}{C_{A0}} = \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{-r_A} \quad (\text{Ecuación No.6})$$

(Levenspiel, O. 2012)

$$\tau = \frac{V}{v_0} = \frac{V C_{A0}}{F_{A0}} = C_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{-r_A} \quad (\text{Ecuación No.7})$$

(Levenspiel, O. 2012)

Para las cuatro ecuaciones de diseño:

V: Volumen del reactor.

F_{A0} : Caudal molar del componente A.

τ : Espacio-tiempo (tiempo necesario para tratar un volumen de alimentación igual al volumen del reactor).

X_A : Conversión del componente A.

$$X_A = 1 - \frac{C_A}{C_{A0}} \text{ (Ecuación No.11)}$$

C_A : Concentración final del elemento A.

C_{A0} : Concentración inicial del componente A.

$-r_A$: Cinética de reacción para el componente A.

u_0 : Caudal de alimentación volumétrica.

(Levenspiel, O. 2012)

M. Efectos del sulfuro de hidrógeno en plantas de biogás

El biogás producido no es absolutamente puro, ya que principalmente posee residuos de polvo, lodo, dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y está saturado de agua. Dicha contaminación tiene que ser removida, y la remoción de ésta dependerá del uso que se le dará al biogás. Las partículas sólidas en el biogás son filtradas a través de los filtros de polvo que comúnmente se utilizan en la industria. Los componentes de lodo normalmente son separados a través de ciclones. Esta separación puede ser mejorada inyectando agua en el biogás antes de entrar al ciclón. (Deublein & Steinhauser, 2008).

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) puede encontrarse en aguas estancadas, desagües y alcantarillados y es parte de la composición química de combustibles como el petróleo, gas natural e incluso del biogás, debido a que se produce por descomposición anaeróbica de restos orgánicos. La eliminación de este compuesto del biogás es relevante, pues este gas inflamable e incoloro, es altamente tóxico y corrosivo, lo que constituye una gran desventaja, pues dificulta el traslado del gas por tuberías, su almacenamiento en tanques y otras estructuras metálicas, como aquellas que participan en la generación y distribución de electricidad. (Varnero, Carú, Galleguillos & Achondo, 2011).

Utilizar motores con un gas que contiene sulfuro de hidrógeno reduce el tiempo de vida del motor entre un 10 a un 15%. Además el sulfuro contenido en el biogás usado en motores de combustión disminuye de igual manera la vida de estos. Ya que el óxido de azufre formado por la combustión y el vapor de agua se disuelve en el lubricante, por lo que el lubricante tiende a acidificarse por lo que sus propiedades cambian. El lubricante pierde su habilidad para lubricar y empieza a corroer los componentes metálicos del motor. (Zimmermann & Muche, 1985).

En estufas para cocción, si el biogás es quemado en cuartos poco ventilados, los ocupantes de dicho cuarto se verán afectados por el óxido de azufre esparcido en el aire. Los indicadores de óxido de azufre en los ocupantes son: tos, irritación en membranas mucosas, ojos llorosos y corrosión en superficies metálicas. (Zimmermann & Muche, 1985).

Para la remoción de otros gases como dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) se pueden utilizar técnicas como adsorción, absorción y secado, las cuales son las técnicas más utilizadas. La remoción de los gases contaminantes se lleva a cabo a través de los siguientes pasos (Deublein & Steinhauser, 2008):

- Separación de la mayor cantidad de sulfuro de hidrógeno (H_2S) a través de filtros.
- Remoción de las trazas restantes de sulfuro de hidrógeno (H_2S).
- Separación del dióxido de carbono (CO_2) y otros componentes del biogás.
- Deshumidificación del biogás.

Los pasos de desulfurización y deshumidificación se llevan a cabo en la mayoría de las plantas de biogás. Mientras que el enriquecimiento del metano a través de la remoción de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases es solo necesario si el biogás será mezclado con gas natural o utilizado como combustible para vehículos. (Deublein & Steinhauser, 2008).

N. Remoción del sulfuro de hidrógeno (H_2S) (desulfurización)

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) generado en la fermentación del gas afecta la vida útil de las tuberías y las instalaciones de una planta de biogás. Este gas es tóxico y altamente corrosivo para una gran mayoría de metales. Cuando el sulfuro de hidrógeno (H_2S) contenido en el biogás se quema este se convierte a óxidos de azufre (SO_x), los cuales corroen los componentes metálicos de las instalaciones y por otro lado acidifican el aceite de los motores, si el gas se utiliza como combustible. Para prevenir daños al equipo e instalaciones el sulfuro de hidrógeno debe de ser removido o por lo menos reducido. (Deublein & Steinhauser, 2008).

Para que las operaciones de CHP (Combined heat and power) no tengan problemas, los valores límites de sulfuro de hidrógeno deben encontrarse dentro de un rango de 100-500 mg/Nm³ (equivalente a 0.05 % volumen), estos rangos pueden variar, todo dependerá de las recomendaciones y requerimientos de los fabricantes de CHP. (Deublein & Steihauser, 2008).

Existen diferentes procedimientos para la remoción del sulfuro de hidrógeno, estos pueden ser, químicos, biológicos y físicos. El objetivo es reducir el contenido de sulfuro de hidrógeno a 20 mg/Nm³ en el gas descontaminado. Este valor es difícil de alcanzar a través de procesos biológicos y procesos fisicoquímicos. Por lo que es necesaria la combinación de ambos procesos para alcanzar dicha cantidad. Por ejemplo se utilizan procesos biológicos para la remoción de la mayoría de sulfuro de hidrógeno y luego se utiliza un proceso de adsorción para llegar a la cantidad establecida. (Deublein & Steihauser, 2008).

Generalmente, el proceso de desulfurización debe de ser seleccionado en relación a la concentración de sulfuro de hidrógeno, el flujo másico de sulfuro y también las posibilidades que se tienen dentro de la planta para la eliminación de los residuos que se obtienen con la limpieza del biogás. En la Tabla No. 4 se muestra que procedimiento es el adecuado en relación a diferentes aspectos como, costo de inversión, costo de operación, etc. (Deublein & Steihauser, 2008).

Tabla 19: Ayuda para tomar decisiones para la selección de procedimientos para la remoción de sulfuro de hidrógeno.

(++ muy adecuado, + adecuado, - menos adecuado, - - no adecuado.)

Tecnología	Costos de inversión	Costos de operación	Descontaminación (General/Eficiente)
Desulfurización biológica interna	-	-	Muy General
Planta de filtros	+	-	General
Torre empacada	++	-	General
Precipitación de sulfuros	+	++	General
Quelatos de hierro	++	-	General
Óxido de hierro	++	+	Eficiente
Carbón activado	-	++	Eficiente

Continuación Tabla 19

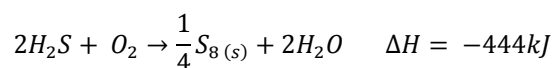
Tecnología	Costo de inversión	Costo de operación	Descontaminación (General/Eficiente)
Óxido de Zinc	-	++	Eficiente
Sufractantes	+	+	Eficiente
Absorción con Glicol y etanolaminas	++	++	Eficiente
Algas	-	+	Eficiente
Oxidación directa	+	++	Eficiente

(Deublein & Steinhauser, 2008).

O. Métodos de purificación por adsorción

Los métodos de purificación por adsorción también llamados de lecho seco, se llevan a cabo sobre un material sólido fijo, sobre el cual el sulfuro de hidrógeno es adsorbido por adherencia. Por lo general, los materiales sólidos utilizados como adsorbentes son carbón activado, sílicagel y tamices moleculares de zeolitas o tamices moleculares de carbón. Como el proceso de adsorción ocurre sobre la superficie del adsorbente, donde las moléculas son retenidas por fuerzas electrostáticas débiles, la reacción puede verse afectada por la humedad, selectividad, temperatura, presión y presencia de partículas. (Varnero, Carú, Galleguillos & Achondo, 2011).

El proceso de adsorción que requiere menos energía es cuando se utiliza carbón activado, porque opera con temperatura y presión menores, donde la reacción se realiza en los poros y el sulfuro de hidrógeno reacciona con el oxígeno produciendo azufre y agua. El azufre donde el sulfuro de hidrógeno queda ocluido en los poros del carbón. (Varnero, Carú, Galleguillos & Achondo, 2011).



(Varnero, Carú, Galleguillos & Achondo, 2011).

La adsorción empleando silicagel como indicador también ha permitido la eliminación de sulfuro de hidrógeno y anhídrido carbónico. El cambio de coloración del compuesto indica la saturación del adsorbente que puede ser regenerado calentándolo a 117°C. La utilización de tamices moleculares, permite que el sistema opere a temperaturas cercanas a la ambiental. Estos pueden usarse para eliminar el sulfuro de hidrógeno. Mercaptanos, agua y un buen

número de otras impurezas. Los tamices moleculares compuestos de zeolita con alta afinidad por las moléculas polares, presentan un área superficial de hasta $590 \text{ cm}^2/\text{g}$ teniendo tamaños de poros bien definidos lo que permite una remoción selectiva de diferentes compuestos. (Varnero, Carú, Galleguillos & Achondo, 2011).

P. Métodos de purificación por absorción

Los métodos de purificación por absorción se utilizan ampliamente, debido a la eficiencia y reactividad del sulfuro con la mayoría de los metales. En otros casos, presentan costos relativamente bajos. (Varnero, Carú, Galleguillos & Achondo, 2011). Los sistemas más empleados son:

1. **Absorción con compuestos de hierro.** Es uno de los métodos más antiguos para remover sulfuro de hidrógeno, este proceso produce sulfuros de hidrógeno. Se utilizan limallas de hierro colocadas en columnas de purificación que se encuentran humedecidas de forma discontinua con agua y rellenas con otro material, con el fin de ayudar a la hidrodinámica del sistema. El proceso opera a distintas presiones, logrando eliminar eficientemente el sulfuro de hidrógeno a temperatura ambiente o superiores. Con un contenido de humedad de las limallas entre 30 y 60%, debiendo realizarse la operación a pH entre 7.5 y 8.5. Es posible emplear óxido de hierro (III) hidratado para la purificación del biogás, adición de cloruro de hierro (III), utilización de pelets de hierro, como también, otros sustratos “secos” tales como óxido de zinc y sólidos alcalinos, entre otros. (Varnero, Carú, Galleguillos & Achondo, 2011).

El sulfuro de hidrógeno es necesario eliminarlo si su concentración es mayor de 2%, por las molestias que ocasiona y su alto poder corrosivo. Esta eliminación se puede realizar por absorción con hidróxido de hierro u óxido de hierro. Cada uno de estos puede ser regenerado por exposición al aire. (Guardado, 2007).

El óxido de hierro se utiliza para que ésta interactúe de manera selectiva con el sulfuro de hidrógeno y los mercaptanos. El principal componente activo de la viruta de hierro son, óxidos de hierro hidratados a partir de estructuras cristalinas. Las especificaciones típicas de la viruta de hierro se muestran en la tabla # 5. En el mercado se pueden encontrar diferentes grados de óxido de hierro, con una masa de 100, 140, 190, 240 y $320 \text{ kg Fe}_2\text{O}_3/\text{m}^3$. La más común de encontrar es la de $190 \text{ kg Fe}_2\text{O}_3/\text{m}^3$. (McKinsey, 2003)

Q. Tuberías

El gas producido en el biodigestor debe ser conducido a los lugares de uso a través de tuberías. La tubería de presión de PVC resulta adecuada para esta finalidad, ya que presenta las siguientes ventajas:

- Resistente a la corrosión
- Facilidad de Instalación
- Precios Económicos

Su desventaja radica en la necesaria protección contra los rayos solares (UV) y el movimiento de animales y transporte pesado. El diámetro de la tubería requerida depende de la distancia desde la planta hasta el lugar de consumo del gas, así como el flujo máximo de gas requerido y de la pérdida de presión admisible. El flujo máximo del gas se obtiene sumando los consumos de los equipos que funciones simultáneamente. La siguiente tabla permite seleccionar el diámetro de la tubería. (Guardado, 2007).

Tabla 20: Pérdidas de presión en mm de columna de agua, por cada 10 m de tuberías de PVC.

CAUDAL (M ³ /H)	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"
0,5	1,0	0,3	0,1		
1,0	2,5	0,7	0,2		
2,0	7,0	1,8	0,6		
2,5	9,9	2,5	0,8		
3,0	13,1	3,3	1,0	0,2	
4,0	20,7	5,2	1,6	0,3	
5,0	29,6	7,4	2,2	0,4	
6,0	29,7	9,8	2,9	0,6	
7,0		12,6	3,7	0,7	
8,0		15,7	4,6	0,9	0,3
9,0		19,0	5,6	1,0	0,4
10,0		22,6	6,6	1,3	0,5

(Guardado, 2007).

El PVC (Policloruro de Vinilo) es un termoplástico que se obtiene por polimerización de cloruro de vinilo (CV). La resina que se obtiene es un polvo blanco, fino, inodoro y atóxico. Las propiedades físicas de este material son:

Tabla 21: Propiedades físicas del PVC.

Características	Valor
Densidad (g/cm ³)	1.38-1.40
Resistencia a la tracción (kg/cm ²)	500-550
Elongación (%)	80-125
Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	30,000-40,000
Calor Específico (Cal/g°C)	0.25
Coefficiente de dilatación lineal (m/m°C)	$7 \times 10^{-5} - 8 \times 10^{-5}$
Conductividad Térmica (kcal/mh°C)	0.13-0.15
Temperatura de ablandamiento Vicat (°C)	76-80

(Cabrera, 2007)

Las características principales de este material son:

- Resistencia Química: No reacciona con fluidos ni actúa como catalizador.
- Resistencia a la corrosión; Debido a su resistencia química a los ácidos, sales, medios orgánicos, etc.
- Resistencia Química al fuego; es auto-extinguible.
- Resistencia al ataque biológico: no le afectan microorganismos ni macroorganismos.
- Tubo flexible desde el punto de vista del diseño. Es decir se puede deformar en cierto porcentaje, sin sufrir ningún daño.
- Larga vida útil, un promedio de 50 años en condiciones normales de uso.
- Baja densidad.
- Fácil instalación: fácil manejo por ser livianas, no se requiere de herramientas especiales para cortar o unir. Se pueden instalar siendo soldadas, roscadas, bridadas o juntas ranuradas.
- Inmune a ataque galvánico o electrolítico, por lo que se puede conectar a accesorios metálicos bajo el agua, por ser no conductor.
- No requiere mantenimiento, ya que no se oxida, no se descascara, ni se corroe.
- No tóxico, es inodoro e insípido.
- Pérdida de fricción baja por la superficie interior y el material. Por no oxidarse, se garantiza que se mantendrá el caudal inicial por toda la vida útil del sistema de tubería.
- Baja conductividad térmica, manteniendo los fluidos conducidos a una temperatura más constante.

- No es dañada por suelos corrosivos ni aguas violentas. (Cabrera, 2007)

En la tubería PVC el ensamblaje puede realizarse por medio de varios elementos entre los que están:

- Uniones fijas
 - Cementadas: Debe cumplir principios básicos de cementado.
 - Con enchufe: Se expande un extremo de tubo formando una campana e insertando la otra pieza en la misma.
 - Con manguitos o coplas lisas: Empalma dos extremos macho.
- Soldada: Utilizando pegamento
- Uniones desmontables
 - Bridas: Es para tuberías sometidas a presión.
 - Roscas: Menos económico, pero más seguro que las mencionadas anteriormente.
- Válvula de bola
- Válvula de mariposa
- Válvulas de diafragma
- Codos de 90 y 45°
- Tees, reducciones, acoples roscados macho y hembra, unión universal, tapas roscadas macho, hembra y lisas y demás acoples. (Cabrera, 2007)

Los materiales necesarios para el acoplamiento son bastante básicos:

- Sierra de Arco.
- Trapo o talla limpiadora
- Pegamento para PVC

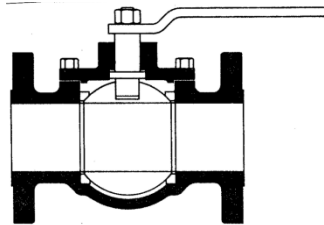
Cabe mencionar que las válvulas de bola de PVC son capaces de conducir caudales con mayor eficiencia y con pérdidas de carga menores que las válvulas de bola de bronce. (Cabrera, 2007).

R. Válvulas

Una válvula es un elemento que en un sistema de tubería cumple con alguna de las siguientes funciones, cierra por completo el flujo, controla el flujo o previene el contraflujo. Por flujo se refiere al movimiento de un fluido. Dependiendo del tipo de cierre o control pueden existir varios tipos de válvulas. Las principales válvulas son:

- Válvula de bola: Realiza las funciones de apertura y cierre de flujo. Se caracteriza como mecanismo regulador una bola perforada en la parte interna que es la que controla el flujo. Se abre mediante el giro del eje unido a la esfera, permitiendo el paso del fluido cuando está alineada la perforación con la entrada y la salida de la válvula cuando la válvula está cerrada, el agujero estará perpendicular a la entrada y a la salida. (Cabrera, 2007).

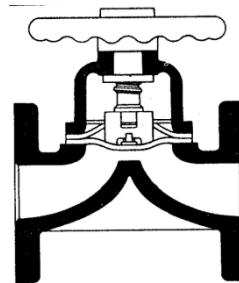
Ilustración 12 Válvula de Bola



(Perry & Green, 2001)

- Válvula de diafragma: Realiza función de apertura o cierre de flujo. Se caracteriza por tener un diafragma que es el que corta el flujo o lo deja pasar. Se utiliza cuando el fluido es altamente corrosivo. (Cabrera, 2007).

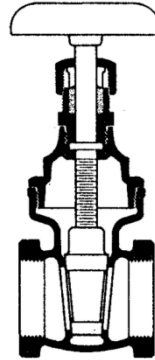
Ilustración 13 Válvula de diafragma



(Perry & Green, 2001)

- Válvula de compuerta: Utilizada para apertura y cierre de flujos en diámetros mayores. Funcionan con un mecanismo de guillotina, la cual es la compuerta, que cierra o abre el flujo. (Cabrera, 2007).

Ilustración 14 Válvula de compuerta



(Perry & Green, 2001)

- Válvula de mariposa: Permite o restringe el paso de flujo aumentando o reduciendo la sección de paso mediante una placa, mariposa, que gira sobre un eje. Tiene una baja pérdida de carga al estar abierta. (Cabrera, 2007).

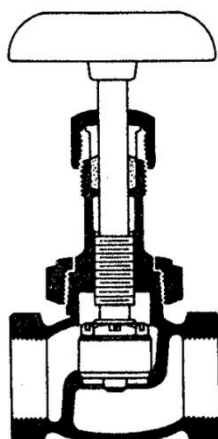
Ilustración 15 Válvula de mariposa



(Perry & Green, 2001)

- Válvula de globo: Utilizada principalmente si se quiere controlar el flujo, funciona ocasionándole al flujo dos cambios de dirección de 90° cada uno, causando una significativa caída de presión. (Cabrera, 2007).

Ilustración 16 Válvula de globo



(Perry & Green, 2001)

Tabla 22: Ventajas y desventajas de válvulas para sistemas de biogás.

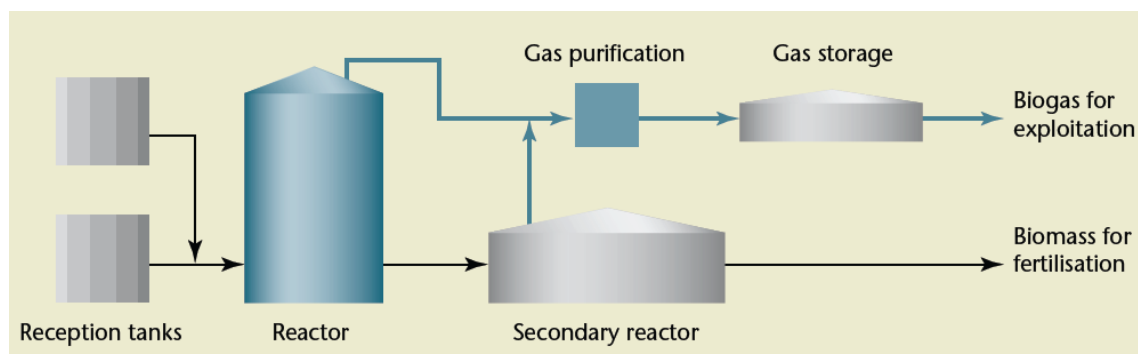
Tipo	Ventajas	Desventajas
Puerta	Bajo costo	Acumulación de contaminación
Globo	Poco más cara que válvula de compuerta	No adecuada para cerrar el flujo inmediatamente
Mariposa	Bajo costo	No recomendada para servicios de gas combustible
Bola	Mejor opción para cerrar y abrir flujo	Costo

S. Tecnologías de producción

Existen dos formas de producción, por medio de un proceso de fermentación húmedo (concentración de sólidos menor al 10%) o seco (concentración de sólidos de 15 – 35%). En el proceso húmedo es posible utilizar un reactor de agitación constante, la mezcla fluye por medio de tuberías y posterior a la producción del biogás es posible la distribución del compostaje para su uso como abono. En la fermentación seca se puede producir de forma continua o tipo “batch”. Actualmente en el mundo de la agricultura se utiliza más el proceso húmedo. (Weiland, 2009)

Independientemente del reactor seleccionado para la producción de biogás la mayoría de las plantas siguen el siguiente esquema de bloques durante su operación.

Ilustración 17: Diagrama esquemático de una Planta de Biogás



(Sánchez, Santines, Vicente, & Villar, 2006)

El reactor de tanque de agitación continua (CSTR por sus siglas en inglés) es utilizado en más del 90% de las plantas en Alemania. Este reactor se puede considerar como continuo pues se agrega constantemente cierta cantidad de biomasa y al mismo tiempo es necesario sacar un poco para no saturar el equipo. La desventaja de este reactor es que al sacar la biomasa es probable que salga cierta cantidad de la biomasa entrante y el tiempo de residencia sea muy corto por lo que no se aprovecha al máximo el potencial de conversión en la carga. (Jongersen, 2009)

1. **Purificación del biogás.** El biogás no es absolutamente puro, cuenta con trazas y algunas impurezas sólidas. Dependiendo de su aplicación el grado de pureza necesario. Para la remoción de partículas comúnmente se utilizan filtros con colectores de polvo usuales. Los lodos y espuma se remueven por medio de un ciclón, la separación puede ser mejorada por medio de la inyección de agua al biogás antes de pasarlo por el ciclón. Agua del proceso puede ser utilizada. (Dublein & Steinhauser, 2008)

Para la remoción de trazas se pueden utilizar las operaciones de transferencia de masa: absorción, adsorción y secado entre otras. La remoción de trazas se hace en etapas empezando por la separación de sulfuro de hidrógeno en el biodigestor o por separado, seguido por una remoción de trazas de sulfuro de hidrógeno especializado, luego se hace la remoción del exceso de dióxido de carbono y otros gases seguido por una dehumidificación. El enriquecimiento del metano se realiza solamente cuando el biogás se alimentará en lugar de gas natural o como combustible de automóvil. (Dublein & Steinhauser, 2008)

El sulfuro de hidrógeno es un gas tóxico y altamente corrosivo que daña equipo y tubería al momento de su combustión. Para evitar dañar el equipo este debe ser removido o por lo menos reducido. La aplicación más sensible a la concentración de sulfuro de hidrógeno son los motores de cogeneración. Consultando con Capstone una de las principales marcas

desarrolladoras de microturbinas para la cogeneración a partir de biogás, es necesario mantener la concentración del $H_2S < 5000$ ppm. (Capstone Turbine Corporation, 2013)

2. **Almacenamiento previo al uso.** La producción de biogás se debe mantener tan estable y constante como sea posible, dentro del digestor la formación tiene fluctuaciones y picos de producción a lo largo del día; sin embargo para su alimentación en un quemador o motor de combustión la alimentación debe ser constante es por esto que es necesaria una unidad de almacenamiento. También se puede dar el caso que por situaciones adversas no se utilice el biogás con la misma demanda diariamente y sea necesario su almacenamiento. (Al Seadi , y otros, 2008)

En principio los contenedores de biogás no pueden ser muy grandes. Mientras más grande es el volumen de almacenamiento más fácilmente se pueden balancear los cambios en la producción diaria de biogás y menores serán las pérdidas de biogás al ambiente; pero las unidades de almacenamiento son demasiado caras y por lo tanto tienen sus límites. El volumen recomendado para las unidades de almacenamiento varía desde 0.75 a 1.5 veces la producción diaria; el valor real depende mucho de la utilización. Si el biogás es utilizado para el calentamiento del bioactor y otros tanques en la planta, no es necesario tener una unidad de almacenamiento. Cuando el biogás se utiliza en una unidad de cogeneración y la generación de energía la unidad debería almacenar 0.5 veces la generación diaria. Si la corriente generada cubre la operación del biodigestor se debería almacenar 0.75 veces la producción y si el biogás cubre solamente altas demandas energéticas la unidad debería poder almacenar la producción diaria. (Dublein & Steinhauser, 2008)

Varios tipos de tanques de almacenamiento son utilizados hoy en día, con gran variedad de materiales de construcción. La solución más simple es el almacenamiento sobre el biodigestor utilizando una membrana plástica especial. Para plantas más grandes se utiliza el almacenamiento por separado. El biogás se puede almacenar a bajas, medias o altas presiones. Las consideraciones generales para el diseño de unidades de almacenamiento es que deben ser resistentes a los rayos UV, a la temperatura y a condiciones climáticas adversas. Por medidas de seguridad la unidad debe contar con válvulas de seguridad para aliviar la presión y una llave de seguridad para poder liberar la sobrealimentación de una forma no tan dañina al medio ambiente. (Al Seadi , y otros, 2008)

Tabla 23: Categorías de unidades de almacenamiento para biogás

PRESIÓN	RANGO	TAMAÑO USUAL M ³	MATERIAL
BAJA PRESIÓN	10 – 50 MBAR 0.05 – 5 MBAR	5 – 2 10 – 2000	GASÓMETRO BOLSAS DE MEMBRANA PLÁSTICAS
PRESIÓN MEDIA	5 – 20 BAR	1 – 100	TANQUES DE ACERO
ALTA PRESIÓN	200 – 300 BAR	0.1 – 0.5	RECIPIENTE DE ACERO

(Dublein & Steinhauser, 2008)

Alrededor del 80% de las unidades de almacenamiento instaladas son de baja presión. En su mayoría son de plástico. Esta membrana tiene una gran resistencia a quiebres y son muy durables. Algunas veces construcciones secundarias se instalan para proteger esta capa. La única desventaja de esta aplicación es que pueden ser perforadas fácilmente y deben ser reparadas. Para mayor resistencia existe la doble membrana, donde la primera membrana retiene el biogás y la segunda protege a la primera y deja circular aire entre ambas. Al instalar bolsas de biogás se pueden construir estructuras guía para direccionar el llenado. (Dublein & Steinhauser, 2008)

El almacenamiento a presiones medias requiere un mayor costo de operación por la compresión y expansión del gas. Son construidos de acero y en forma cilíndrica. Algunas veces se pueden encontrar en forma de bola. Por la presión que manejan se deben tener medidas de seguridad. (Dublein & Steinhauser, 2008)

Como punto de referencia, las unidades de almacenamiento de presión media requieren 0.22 kWh/m³ para su operación y las unidades a altas presiones requieren alrededor de 0.33 kWh/m³; por este alto costo raras veces se observa este tipo de almacenamiento en planta de biogás agrícolas. (Al Seadi , y otros, 2008)

Muchas veces todo el biogás producido no puede ser utilizado y el tener unidades de almacenamiento extras o motores de cogeneración sobre dimensionados no es económicamente viable. Es por esto que se tiene una llama de alivio. (Al Seadi , y otros, 2008) Esta llama previene la liberación de biogás sin quemar a la atmósfera por lo tanto es esencial para la protección del medio ambiente. En algunos países es obligatoria por ley. (Dublein & Steinhauser, 2008)

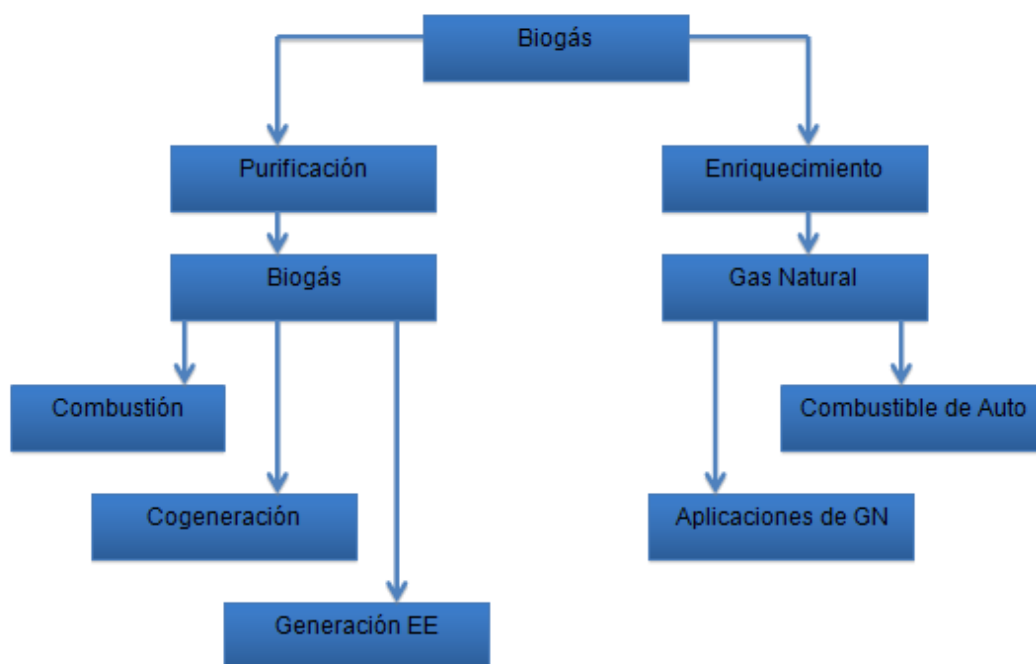
La combustión dentro de la llama debe ser completa para evitar liberar metano al ambiente. Para lograr la combustión de todos los componentes del biogás es necesario mantener la temperatura entre 850 – 1200 °C y el tiempo de residencia en 0.3s. La presión del gas debe estar entre 3 – 15 kPa en la ignición. Existen dos tipos de llamas: abiertas y cerradas.

Las llamas abiertas son rudimentarias, de bajo costo y consisten de un quemador y un parabrisas para permitir la combustión a pesar de corrientes de aire. Este tipo de llama no garantizaba una combustión completa, según las nuevas regulaciones internacionales de emisión su uso en países desarrollados irá en declive para migrar a la llama cerrada. La llama cerrada se encuentra al nivel del suelo y se encuentra en un contenedor cilíndrico de material refractario; gracias a esto la combustión es más uniforme y las emisiones son bajas. En este ambiente cerrado el monitoreo de las condiciones de operación es más sencillo. (Al Seadi , y otros, 2008)

T. Aplicaciones del biogás

Previo al uso del biogás en cualquiera de las siguientes aplicaciones es necesario asegurar que se cuenta con el biogás en las condiciones necesarias. La composición necesaria varía entre las diferentes aplicaciones.

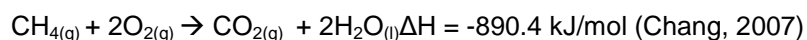
Ilustración 18: Aplicaciones de biogás



(Al Seadi , y otros, 2008)

- Combustión Directa

El biogás está compuesto mayormente de metano y dióxido de carbono, ambos gases inflamables; por lo tanto su mayor aplicación es para la combustión. Una reacción de combustión es una reacción en la cual los reactivos reaccionan con oxígeno y se libera calor por medio de una flama. Se sabe que la combustión de gas natural libera calor, es exotérmica. La reacción de la combustión de metano se describe a continuación. (Chang, 2007)



Es posible realizar la combustión en quemadores de gas natural. Esto se puede hacer directamente en el lugar de manufactura o transportar por medio de tuberías al usuario final. Aunque la metodología para la combustión es relativamente sencilla el biogás producido por el biodigestor debe ser tratado para la remoción de sólidos. Esto se hace por medio de una condensación, remoción de partículas, compresión, enfriamiento y secado. (Al Seadi , y otros, 2008)

La desventaja de este uso para el biogás es la necesidad de ubicar la generación (reactor) cerca del punto de uso, pues por el bajo poder calorífico del biogás este no puede ser trasladable por largos tramos de tubería de forma rentable. (Sánchez, Santines, Vicente, & Villar, 2006)

1. **Generación de energía eléctrica.** La generación de energía eléctrica es uno de los usos más comunes e investigados para el biogás. Existen tres metodologías predominantes para este proceso que se listan a continuación:

- a. Utilizando motores de combustión unidos a generadores de electricidad.
- b. Empleando turbinas o micro turbinas de gas.
- c. Con pilas de combustible estacionarias. (Sánchez, Santines, Vicente, & Villar, 2006)

Antes de explicar detenidamente el funcionamiento de cada uno de estos mecanismos es importante entender el concepto de cogeneración, sistema que aumenta significativamente el rendimiento del proceso independientemente de la metodología de generación utilizada.

2. **Cogeneración.** La cogeneración (CHP por sus siglas en inglés, combined heat and power), presenta como beneficio que se tienen dos productos finales, la energía eléctrica que se incorpora a la red pública y la energía térmica que es aprovechada internamente. Los motores de cogeneración tienen una eficiencia del 90% con un 35% de conversión en calor y un 35% de conversión a energía. En muchos casos no es rentable utilizar el biogás sólo como medio de obtención de energía eléctrica, sino que es necesario utilizar el calor. Uno de los usos dentro del

proceso mismo es como medio de calentamiento para el reactor, esto consumirá aproximadamente 1/3 de la producción. (Al Seadi , y otros, 2008)

Existen diferentes tecnologías para la cogeneración como micro-turbinas de biogás, motores de agitación, celdas de combustible y la más popular por medio de una central térmica tipo bloque (BTTP por sus siglas en ingles Block Type Thermal Power Plant). En la BTTP se utilizan motores de combustión acoplados al generador. Para poder utilizar motores de Otto es necesario tener una concentración mayor al 45 % en metano. (Al Seadi , y otros, 2008)

Si no se cuenta con tanta cantidad de biogás es posible cogenerar por medio de una micro-turbina de biogás. (Al Seadi , y otros, 2008)

Otra opción son las celdas de combustibles, las cuales a partir de la energía de reacción producen energía eléctrica. A grandes rasgos el funcionamiento de una celda de combustible consiste en la alimentación continua del ánodo con biogás y del cátodo con el oxidante que es en la mayoría de los casos el oxígeno. La reacción química se lleva a cabo en los electrodos y se produce corriente eléctrica. (Al Seadi , y otros, 2008)

3. **Trigeneración.** Proceso similar a la cogeneración, pero se incorpora la producción de frío además de la energía eléctrica y el calor. Este frío se obtiene por medio de un método de absorción, la existencia de estas tres variables hace posible cumplir con la demanda tanto en invierno como en verano. (Sánchez, Santines, Vicente, & Villar, 2006)

4. **Generación mediante motores de combustión.** Generación por medio de uso de motores de gasolina o gasóleo. Previo a la introducción del biogás a estos motores es necesario realizar una limpieza de impurezas. El biogás tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110, por lo que es posible utilizarlo en motores con una alta relación volumétrica de compresión, pero como desventaja tiene una baja velocidad de encendido. Los motores de Otto pueden funcionar con un 100% de biogás, sólo para el arranque del motor será necesario utilizar otros combustibles. Por otro lado los motores de biodiesel utilizan una mezcla, para esto se le añade un mezclador de gases al motor manteniendo el sistema de inyección intacto. (Sánchez, Santines, Vicente, & Villar, 2006)

5. **Generación de electricidad mediante turbinas de gas.** Paravolver el proceso aún más eficiente se ha dedicado gran esfuerzo e investigación al uso de turbinas de gas. Una ventaja de las turbinas frente a otras tecnologías es el tiempo de instalación, es menor. Sin embargo, los sistemas de generación con turbinas en de gas en ciclo simple no son más eficientes que los sistemas de generación de energía basados en recursos no renovables, ya

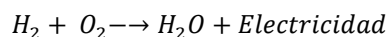
que los gases a la salida de la turbina se encuentran a temperaturas muy altas. Por esta razón se han introducido nuevos diseños. (Sánchez, Santines, Vicente, & Villar, 2006)

Como una mejora en su rendimiento es más efectivo utilizar turbinas en ciclos combinados versus las turbinas de ciclo abierto. Las ventajas del uso de turbinas se listan a continuación:

- a. Pueden producir electricidad y calor simultáneamente.
 - b. El calor del proceso es recuperable en su mayoría.
 - c. Se puede operar conectado a la red eléctrica de forma permanente.
 - d. Bajo nivel de contaminación y ruidos.
 - e. Permiten el uso de combustibles de bajo nivel calorífico como lo es el biogás.
 - f. Se pueden operar en un ciclo combinado (gas y vapor) para aumentar la eficiencia.
- (Sánchez, Santines, Vicente, & Villar, 2006)

Otra posibilidad es utilizar turbinas específicas para este fin, por ejemplo las micro turbinas. El funcionamiento básico de una micro turbina se da por medio de una combustión en una cámara interna causando un incremento en la temperatura y la expansión del gas. El gas caliente es liberado para pasar por una turbina, la cual está conectada a un generador. La capacidad de este sistema es menor a los 250 KW, actualmente la operación de este sistema es costosa y se sigue desarrollando tecnología buscando una mayor eficiente y rentabilidad. (Al Seadi , y otros, 2008)

6. Generación por pilas de combustible. Las pilas de combustible convierten la energía de una reacción química en electricidad. Estas pilas no deben ser recargadas, mientras el combustible y oxidante le sean suministrados. Una pila de combustible consiste en un ánodo al cual se le inyecta el combustible y un cátodo donde se introduce un oxidante. En las pilas de combustible se obtiene electricidad por medio de la reacción: (Sánchez, Santines, Vicente, & Villar, 2006)



Aunque la eficiencia de las pilas de combustible es mayor una de las mayores ventajas es la emisión de solamente vapor de agua al medio ambiente. Para poder utilizar el biogás en estas pilas este se debe convertir en hidrógeno; esto se puede hacer por medio de un reformado con vapor de agua, oxidación parcial o el autoreformado que es una combinación de los dos procedimientos anteriores. . (Sánchez, Santines, Vicente, & Villar, 2006)

7. Conversión a gas natural. De acuerdo a la Ilustración 20: Aplicaciones de Biogás, de los posibles usos para el biogás solamente el uso como combustible térmico, la cogeneración y

la generación de energía eléctrica pueden usar el biogás directamente. Para el resto de aplicaciones es necesario mejorar la calidad del biogás. De realizar este proceso el producto se considerará biometano y será posible utilizarlo en lugar del gas natural o como combustible para carro.

Por su alto contenido en metano el biogás puede ser igualmente utilizado en aplicaciones destinadas al uso de gas natural, previo a la utilización se debe purificar el biogás. La purificación consiste en la remoción de CO_2 , SH_2 , NH_3 , agua y partículas sólidas. Posterior a la purificación el biogás se conoce como biometano y se puede utilizar en vehículos diseñados para el uso de gas natural. La investigación de esta aplicación está tomando gran auge actualmente. (Sánchez, Santines, Vicente, & Villar, 2006)

8. **Generación de biogás en Guatemala.** En Guatemala la generación de biogás no ha tomado el mismo auge que en otros países más desarrollados. Sin embargo con el apoyo de entidades internacionales se ha tenido el primer acercamiento a esta tecnología económica y viable por la gran cantidad de granjas agrícolas generadoras de desechos orgánicos. A continuación se presentaran dos proyectos (ambos patrocinados por entidades estadounidenses):

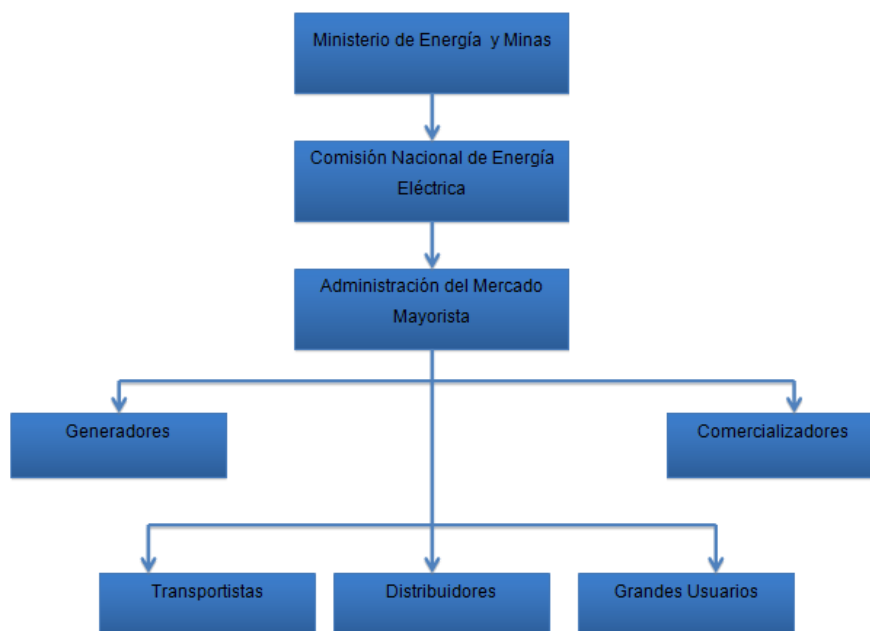
- a. Xelateco, empresa guatemalteca sin fines de lucro que provee a comunidades soluciones amigables al medio ambiente que ayudan a llevar servicios básicos a comunidades remotas, en conjunto con AIDG (Appropriate Infrastructure Development Group) entidad estadounidense que provee fondos monetarios para la implementación de proyectos verdes y soporte técnico, han instalado biodigestores tipo chorizo en comunidades cercanas al lago Atitlán que proveen por medio de un motor de combustión interna electricidad a comunidades de hasta 50 casas. (AIDG, 2008)
- b. USAID (United States Agency for International Development) condujo en 2005 un estudio de pre-viabilidad para la producción de biogás y generación de energía eléctrica a partir de los desechos en el relleno sanitario El Trébol en Guatemala. El relleno sanitario cuenta con un área superficial de 16.2 ha y el máximo espesor de residuos es de 100 metros. Al 2005 3.2 ha habían sido clausuradas con cubierta final. En base al estudio realizado se estableció un flujo de generación de $823 \text{ m}^3/\text{h}$ en la sección clausurada pudiendo llegar a $2013 \text{ m}^3/\text{h}$ luego de 9 años de operación y expansión del área utilizada. Con esto sería suficiente para alimentar una planta de 2.12 MW. De acuerdo al estudio el proyecto es técnicamente y económicamente viable. Se analizaron dos posibilidades: la generación de energía o la comercialización del biogás obteniendo mayores rendimientos económicos la venta directa. (SCS Engineers, 2005)

9. **Generación de energía eléctrica en Guatemala.** Durante 2010 las fuentes de energía utilizadas en Guatemala se distribuían de la siguiente manera: 58.2% de la energía se obtenía por medio de leña, 33.0% de derivados del petróleo y solamente el 8.8% de energía eléctrica. En la búsqueda de un cambio en la matriz energética guatemalteca es necesario disminuir el consumo de fuentes no renovables de energía. Guatemala cuenta con el potencial para la generación de energía partir de fuentes: hidráulicas, geotérmicas, solar, eólica y de biomasa. Según datos de 2012 solamente el 54% de la biomasa generada en el país es aprovechada para la generación de energía. (CNEE, 2012)

El Ministerio de Energía y Minas trabaja desde el 2007 en el Plan de Expansión Indicativo del Sistema de generación 2008-2022. Con la implementación de este plan se pretende el cambio de la matriz energética de un 38% de energía generado por hidroeléctricas a un 63% y una reducción en el uso del Bunker de un 34% al 1%. Este plan pretende impulsar los proyectos con un potencial de fuentes renovables en Guatemala dando concesiones especiales en cuanto al marco legal y tasas económicas aplicables. (CNEE, 2012)

La estructura del subsector eléctrico guatemalteco se compone de la siguiente manera:

Ilustración 19: Distribución del Sub-sector Eléctrico Guatemalteco, 2012



(CNEE, 2012)

Las leyes que regulan la generación de energía eléctrica y la aportación a la red nacional se listan en la siguiente tabla:

Tabla 24: Marco legal para la generación de Energía Eléctrica en Guatemala, 2012.

NORMA/ DECRETO	TÍTULO
DECRETO No. 93-96	LEY GENERAL DE ELECTRICIDAD
AG No. 211 - 2005	LEY DE INCENTIVOS PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE ENERGÍA RENOVABLE.
AG No. 256 – 97	REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE ELECTRICIDAD
AG No. 299 – 98	REGLAMENTO DEL ADMINISTRADOR DEL MERCADO MAYORISTA
RES. 171 - 2008	NORMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE

(CNEE, 2012)

Uno de los mayores aportadores de energía eléctrica a la red guatemalteca es la industria azucarera. En 2011 318.1 MW fueron generados entre los 8 ingenios principales de Guatemala aportando así el 15% de la potencia del sistema eléctrico nacional. Esto se logra a partir de la cogeneración que se hace en tiempo de zafra. A partir del bagazo seco, el cual se quema en caldera, se utiliza este calor para el movimiento de turbogeneradores los cuales distribuyen energía tanto para el uso interno como para la red pública. (Superintendencia de Bancos, 2011) La cogeneración de los ingenios azucareros en Guatemala es una práctica que lleva más de 15 años. El Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA) cuenta con la base de datos de la cogeneración clasificada por ingenio, y sistema de generación los cuales incluyen turbinas de escape, turbinas de condensación y se obtiene a partir de bunker (práctica que va en decremento), bagazo o caña molida. (CENGICAÑA, 2004)

U. La basura

Según la Real Academia Española de la Lengua, basura significa suciedad, residuos desechados y otros desperdicios, estiércol de las caballerías, entre otros. Normalmente, se habla de basura o desechos cuando se refiere a todos los materiales que sobran que aparentemente no pueden brindar utilidad. En los ecosistemas naturales no existe la basura como tal, ya que todo lo que se cree que es desecho es reincorporado al ciclo a través de las cadenas tróficas y de ciclos biogeoquímicos. (Uribe, 2012)

En los ecosistemas antrópicos, replicados de la naturaleza por el hombre, la basura o desechos son un gran problema y no se reintegran naturalmente al ciclo si no que se acumulan en zonas específicas donde generalmente no se les da el manejo adecuado lo que genera grandes problemas a nivel ambiental, económico y social. Se define Gestión de Residuos como

“El conjunto de prácticas, procedimientos y políticas que conformas el sistema de manejo de los residuos sólidos. La meta es realizar una gestión que proteja la salud de las personas, sea ambiental y económicamente adecuada”. (Uribe, 2012)

También se define como basura a cualquier objeto, material, sustancia o elemento que resulta del consumo o uso de un bien que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de transformación a un nuevo bien con valor económico o de aprovechamiento alguno. (Enviaseo, 2010).

El ser humano genera volúmenes inmensos y crecientes de residuos de muchos tipos. La gestión o administración de dichos residuos se está volviendo una de las mayores dificultades de la sociedad moderna. Se considera como uno de los mayores problemas que se tiene en la actualidad. Esta problemática ha hecho surgir, a partir de los años 70, una conciencia conservacionista que ha impulsado diferentes normativas basadas en el reciclaje y la reutilización de los materiales considerados como desechables. (UCML, 2013)

1. Clasificación de la basura según su naturaleza

- *Basura inorgánica:* Se considera basura inorgánica a todo aquel desecho de origen no biológico, que ha pasado por algún tipo de tratamiento de carácter industrial o de algún proceso no natural. Algunos ejemplos son los plásticos, duroport, telas, metales, etc. (Sánchez, 2013) Son los que por sus características químicas sufren una descomposición naturalmente lenta. En muchos de los casos, su transformación o reciclaje es imposible, por lo que se acumulan en la tierra y generan diferentes tipos de problemas a la misma. (Mantra, 2013).
- *Basura orgánica:* Es considerada la basura orgánica toda aquella que proviene de origen biológico, que alguna vez estuvo vivo o fue parte de algún ser vivo. Algunos ejemplos son las hojas, cáscaras de fruta, estiércol de animal, etc. (Sánchez, 2013) Son biodegradables ya que su descomposición ocurre de forma natural. Son aquellos que tienen la característica de poder desintegrarse o degradarse rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica. (Mantra, 2013).

2. Clasificación de la basura según su origen. Como base para la legislación y normativa

para la manipulación y almacenamiento de los residuos, se ha generado una clasificación de los mismo. Se establecen los tipos de residuos dependiendo de su origen de la siguiente forma: (UCML, 2013)

- Residuos sólidos urbanos: Son todos aquellos residuos que se originan en las ciudades y áreas próximas. Incluyen los residuos domiciliarios, los generados en vías urbanas, zonas verdes y recreativas, los de construcción, demoliciones y obras domiciliarias, animales domésticos muertos, muebles y enseres y vehículos abandonados. (UCML, 2013)
- Residuos industriales: Son lo que se generan a raíz de las actividades industriales de cualquier tipo. Pueden ser muy variados, y se clasifican en función del tipo de industria que los genera. Por lo general, se caracterizan por ser potencialmente peligrosos. Algunos ejemplos de estos desechos son las baterías, adhesivos, productos químicos, desechos contaminados, materiales de empaque, maquinaria obsoleta, entre otros. (UCML, 2013) (Uribe, 2012)
- Residuos mineros: Son todos aquellos que se originan durante las actividades mineras. Incluyen los que provienen de las etapas de prospección, extracción y almacenamiento de recursos minerales, y pueden ser de carácter sólido o líquido. (Uribe, 2012)
- Residuos radioactivos: Se consideran como residuos radioactivos todo aquellos que son generados en centrales nucleares, y en cualquier otra instalación que utilice materiales radioactivos. Algunos ejemplos de productores de dichos residuos son las plantas de tratamiento de minerales de uranio, plantas nucleares, hospitales entre otros. (Uribe, 2012)
- Residuos Forestales: Son todos lo que proceden del mantenimiento y mejora de las montañas y masas forestales. También son los residuos resultantes de cortar los troncos de los árboles para hacer productos de madera. (Uribe, 2012)
- Residuos sanitarios o clínicos: Son todos aquellos residuos originados en instalaciones sanitarias tales como los hospitales, clínicas, centros de salud, y que pueden ser extremadamente peligrosos. Entre estos pueden estar medicamentos vencidos o en desuso, restos quirúrgicos, materiales infectados, materiales curativos, vendas, jeringas, sangre, orina, entre otros. (UCML, 2013) (Uribe, 2012)
- Residuos agropecuarios: Es aquel residuo generado en las explotaciones agrícolas y ganaderas y unidades de transformación y comercialización (empaquetadores, queserías, bodegas) incluidos algunos residuos peligrosos. Una de las características del sector agrario radica en la gran diversidad de materiales y sustancias que se transforman eventualmente en residuos. Algunos se caracterizan por ser de carácter peligroso, como los envases y productos fitosanitarios en agricultura y los Materiales Especificados de Riesgo en

ganadería. Otros se caracterizan por su gran volumen. Entre estos están la materia vegetal, los plásticos de invernadero y los estiércoles y purines. También se consideran los envases plásticos, papel o cartón, tuberías, alambres y materas de infraestructura de los invernaderos, maderas y residuos veterinarios.

Otra de las características más importantes de estos tipos de residuos es su dispersión geográfica. Estos desechos se generan en cada una de las fincas, granjas o unidades de transformación y comercialización.

Estos residuos se generan en condiciones y volúmenes tan diversos según las zonas y tipo de actividad, que las problemáticas a tratar y sus posibles soluciones varían en sobremanera. (Magram, 2012)

3. Problemas por la mala disposición de la basura

a. Contaminación ambiental: La contaminación ambiental se define como la presencia de sustancias, energía u organismos extraños en cantidades, tiempo y condiciones tales, que pueden causar un desequilibrio ecológico. (Arellano, 2002). Si se mira desde la perspectiva socioecológica, la contaminación ambiental se traduce en flujos de residuos y emisiones que provienen del subsistema económico. Los residuos son los flujos de materiales sólidos o líquidos que son adsorbidos muchas veces por el agua, el suelo o el subsuelo. Las emisiones son los flujos de descargas gaseosas que son absorbidas por la atmósfera. (Castañeda, 2012).

Los residuos de cualquier tipo son la causa de problemas ambientales en las áreas urbanas, rurales y especialmente en zonas industrializadas de los municipios, ya que generan un impacto ambiental negativo causado por el mal manejo de los mismos. Este mal manejo o mala disposición de dichos residuos, amenazan la sostenibilidad y la sustentabilidad ambiental. (Enviaseo, 2010).

Desde el momento en que se dispone de estos residuos, éstos comienzan un proceso de descomposición en el cual la materia orgánica, gracias a las bacterias y otros microorganismos, logran generar subproductos que muchas veces pueden ser nocivos para la salud y especialmente para el ambiente. Dichos subproductos pueden ser de carácter líquido, sólido e incluso gaseoso. (Enviaseo, 2010).

Existen diferentes tipos de contaminación dependiendo del tipo de contaminante:

- Contaminación biológica: Este tipo de contaminación se presenta cuando un microorganismo se encuentra en un ambiente que no le corresponde y por lo mismo causa daños a los otros microorganismos que habitan en él. Muchas veces este problema se da por las deficiencias de los servicios de saneamiento como los drenajes y alcantarillados, abastecimiento de agua potable, sistemas de tratamiento de aguas negras o por malos hábitos higiénicos. Se puede evitar y prevenir si se llevan a cabo las medidas de recolección oportuna y adecuada de la basura, su confinamiento en lugares adecuados y campañas de educación para la salud. (Arellano, 2002).
- Contaminación física: Es la provocada por agentes físicos como las radiaciones ionizantes, energía nuclear, ruido, presiones extremas, calor y vibraciones. Este tipo de contaminación se puede presentar en ambientes cerrados como en abiertos, donde provocan daños a la población en general. Una de las consideraciones más grandes que se tienen que tener con este tipo de contaminación es que posee la característica de presentar efectos negativos a largo plazo, como por ejemplo en el caso del ruido, donde puede afectar la salud auditiva de la persona luego de varios años de estar en presencia de este tipo de contaminación. (Arellano, 2002).
- Contaminación química: Normalmente, es provocada por diferentes sustancias de uso industrial y doméstico que se encuentran expuestas en el ambiente. Es la peor y más grave de las tres, ya que las sustancias pueden encontrarse en cualquiera de los tres estados de la materia (sólido, líquido y gaseoso). Esto significa que pueden quedar depositados en el agua, el suelo y el aire por lo que entran con mayor facilidad en los organismos vivos. También puede entrar fácilmente a los ciclos bioquímicos, causando daños significativos en el ambiente. (Arellano, 2002).

El problema con el manejo de la basura se remonta a los años más antiguos de la sociedad humana. A medida que el hombre se ha ido asentando en aldeas y pueblos y se concentró en ciudades el problema ha ido aumentando. Esto se debe a que la generación de dichos residuos ha ido aumentando y por ende la acumulación de los mismos ha sido mayor. (Enviaseo, 2010).

Cuando se habla de problemática ambiental relacionada directamente con el manejo de los residuos sólidos, se habla de todos aquellos problemas que puedan afectar al hombre y a su entorno, sea de la manera que sea. Se divide dependiendo del sector al que afecte: Salud pública, destrucción de los recursos naturales renovables y no renovables, factores sociales y factores económicos. Cada uno de estos elementos afectan los componentes ambientales que todos los habitantes de la Tierra necesitan. Los recursos que se ven afectados con esta problemática son: (Enviaseo, 2010).

- Recursos hídricos: son todos los cuerpos de agua que posee el planeta. El proceso de contaminación de estos cuerpos varía dependiendo de la naturaleza del contaminante. Los problemas que se pueden presentar en el recurso hídrico son los siguientes: (Enviaseo, 2010).
- Contaminación por materia orgánica: Se da cuando existe presencia de materiales de carácter orgánico ($C_xH_yO_z$), que reaccionan biológicamente con bacterias, microorganismos y oxígeno para generar compuestos que afectan las propiedades del agua y hacen que esta sea dañina para la vida de las especies acuáticas y para el consumo humano. (Enviaseo, 2010).
- Taponamiento y represamiento de caudales: La alta acumulación de basura, tales como bolsas plásticas, colchones, escombros y cualquier otro tipo de residuos sólidos, puede afectar el flujo o cauce normal de un río o una quebrada. En casos donde se dan crecientes repentinas en dicho flujo, como es el caso de épocas de alto invierno o con la presencia de excesiva cantidad de residuos, estos cauces se represan y producen inundaciones, afectando a gran cantidad de población que vive cerca de estos cuerpos de agua, dañando zonas de cultivo y vivienda impactando de forma negativa a la zona. (Enviaseo, 2010).
- Altos costos de tratamiento: Cuando las fuentes de agua se ven contaminadas por cualquier elemento, debe pasar por un proceso de tratamiento para que el hombre pueda emplearla en el consumo humano, en el riego de cosechas o en general para cualquier actividad en la que se necesite emplear este recurso. Obviamente entre más contaminada se encuentre el agua, más altos serán los costos de los procesos de tratamiento. (Enviaseo, 2010).
- Impacto en costas y mares: La presencia de residuos afecta ambiental, social y económicamente las zonas marítimas, ya que causa un deterioro ambiental en las costas y playas, se amenaza la flora y la fauna marina, afecta el turismo y las actividades económicas relacionadas a estas zonas tales como la pesca y la recreación. (Enviaseo, 2010).

- Contaminación de aguas subterráneas: Se da debido a la filtración de lixiviados a través del suelo, ya que éste los absorbe y los lleva hasta donde se encuentran las fuentes de agua. (Enviaseo, 2010).
- Recurso atmosférico: En el proceso natural de descomposición de cualquier desecho sólido, se general gases tales como metano y dióxido de carbono. Estos gases incrementan el efecto invernadero, aumentando la temperatura del planeta y generando el derretimiento incontrolado de los polos. También, si estos residuos son quemados se acelera su proceso natural de descomposición por lo que se generan de forma más acelerada los gases mencionados anteriormente. Esto produce problemas tanto para el ambiente como para el ser humano. Los gases producidos se incorporan al aire y pueden afectar directamente el sistema respiratorio de los seres humanos, causando de esta forma, enfermedades gastrointestinales, oculares, de la piel, infecciones respiratorias aguas, entre otras. (Enviaseo, 2010).
- Recurso suelo: Se podría decir que este es el recurso que se ve afectado de forma más directa por el mal manejo de la basura. Esto se debe a que el ser humano ha dispuesto del suelo como el lugar de almacenamiento de los residuos generados. Su contaminación ocurre cuando los compuestos generados por su descomposición, se filtran a través del suelo, afectando la productividad del mismo y acabando con la microfauna que habita en él (bacterias, hongo, invertebrados, musgos, entre otros). La presencia constante de basura en el suelo evita la recuperación de la flora de la zona e incrementa la presencia de plagas y animales que causan enfermedades como las ratas, las cucarachas, las moscas y los zancudos. Además, la mala disposición de la basura en los suelos causa otros tipos de contaminación como lo es la contaminación visual. El crecimiento del desarrollo urbano y la gran concentración poblacional ha generado un deterioro en los paisajes, contaminándolos con desechos que no le corresponden. Este tipo de contaminación afecta directamente el diario vivir de las personas y su calidad de vida. Evita que estén armonía con el entorno y afecta a la comunidad en general. (Enviaseo, 2010).

b. Problemas por la mala disposición de los residuos agropecuarios. La mala disposición de los residuos agropecuarios y la mala gestión de los mismos, suponen problemas medioambientales que origina un deterioro progresivo y acumulativo del entorno, lo que puede causar eventualmente problemas de higiene pública. Las malas prácticas más comunes y que causan mayor impacto ambiental son las siguientes: (Magram, 2012)

- Quema indiscriminada de residuos: Esta es una práctica habitual que provoca emisiones de gases tóxicos a la atmósfera.
- Abandono de restos en el campo: Esta práctica no es recomendable ya que supone riesgos en la propagación de plagas y enfermedades. Además, atrae roedores e insectos que afectan no solo la vida vegetal y animal del área, si no también la salud de las personas que viven en los alrededores.
- Vertido de residuos y productos fitosanitarios: Esto provoca la contaminación de los suelos, las aguas superficiales y de los acuíferos por lixiviados de manera irreparable.
- Abandono de residuos metálicos: Muchos de estos residuos metálicos contienen trazas de mercurio, plomo o cromo, los cuales contaminan igualmente los recursos naturales, además de ser un riesgo potencialmente alto para la salud de las personas. (Magram, 2012)

Todas estas prácticas ponen en peligro la salud de las personas así como a los animales y al medio ambiente que los rodea. También se derivan otros problemas como los malos olores y la contaminación visual. (Magram, 2012)

Los residuos agrarios son un poco más difíciles de manejar que residuos domésticos por el hecho de que la responsabilidad de su disposición depende exclusivamente de su poseedor. Esto implica que ya sea el agricultor, ganadero, pescador o unidad de transformación, tiene la obligación de hacer un buen manejo de dichos residuos, así como tomar la responsabilidad económica de la disposición de los mismos. Esto muchas veces no está regulado por ningún tipo de entidad, por lo que no se tiene control gubernamental ni ambiental y puede tener un impacto económico muy grande. (Magram, 2012)

c. Situación ambiental en Guatemala: Contaminación, tendencias incrementales.

La valoración general de los niveles de contaminación ambiental en Guatemala es negativa. Esto se debe al crecimiento descontrolado de áreas urbanas y también al poco interés por el establecimiento de políticas claras en las áreas rurales. Esto, entre otras cosas, ha causado la producción de flujos de contaminantes de todo tipo (líquidos, sólidos y gaseosos) en dimensiones que exceden las capacidades de asimilación de los ecosistemas naturales nacionales. (Castañeda, 2012).

Lo mencionado anteriormente se puede demostrar con el hecho de que Guatemala ha pasado a ser un emisor neto de gases de efecto invernadero (GEI), ante reducciones

significativas en la capacidad de absorción de los ecosistemas naturales, fenómeno asociado a las altas tasas de deforestación. Los flujos con tendencias crecientes generan círculos viciosos donde el estado del subsistema natural se ve significativamente afectado. Esto, en consecuencia, reduce la calidad de sus componentes (agua, suelo y aire) hasta llegar a límites que exceden las posibilidades de inversión para recuperar estos componentes. (Castañeda, 2012).

La generación de residuos ha variado poco durante el periodo 2006-2010, con un promedio de 116.6 millones de toneladas anuales de residuos, producidos por la economía nacional. En el 2007 fue el año en que la economía originó la mayor cantidad de residuos, alcanzado los 121.7 millones de toneladas, mientras que en el año 2010 se reporta el menor nivel de generación de residuos. Esta disminución está asociada a la desaceleración de la economía que pasó de una tasa de crecimiento de 6.3% en el 2007 a una tasa del 2.8% en el 2010. (Castañeda, 2012).

La contribución de Guatemala a las emisiones de GEI a nivel mundial es menos al 1% anual, sin embargo, es un país emisor neto de GEI. Estas emisiones incrementaron en un 10% entre el 2006 y 2010, por otro lado, la capacidad de remoción de la cobertura forestal del país disminuyó en un 33.1%. Esta reducción se debe directamente a las altas tasas de deforestación con las que se ve afectado el país actualmente. (Castañeda, 2012).

El impacto de la contaminación se puede ver reflejado en la calidad del aire. Existe ya una relación directa entre el número de vehículos y la emisión de contaminantes a la atmósfera. El parque vehicular en Guatemala ha incrementado en un 71% entre 2006 y 2011. La mayor parte de los automóviles en el año 2011 eran de modelos anteriores al año 2000. Esto implica que muchos automotores son de tecnologías obsoletas y poco eficientes en términos del uso de energía y control de gases contaminantes. Este mismo año, el 85% de los vehículos utilizaban gasolina, mientras que sólo el 15% utilizaba diesel y otros energéticos. (Castañeda, 2012).

También la calidad del suelo es un indicador de los altos índices de contaminación actual. Ésta se puede medir en términos de la cantidad de plaguicidas y fertilizantes que se utilizan. Durante el periodo 2001 a 2010 se han utilizado cerca de ocho millones de toneladas de fertilizantes y plaguicidas. La superficie afectada por el uso de ambos productos es superior al 90% del total de superficie registrada. (Castañeda, 2012).

Tabla 25 Fincas agropecuarias que utilizan plaguicidas en cultivos anuales(mayo 2007 a junio 2008).

Departamento y tipo de cultivo	Total		Tipo de plaguicida					
			Químico		Orgánico		Ambos	
	Fincas	Ha	Fincas	Ha	Fincas	Ha	Fincas	ha
República	277,929	355,295	271,413	353,147	209	84	6,307	2,064
Guatemala	5,235	3,757	5,235	3,757	-	-	-	-
El Progreso	6,394	5,758	6,155	5,518	-	-	239	239
Sacatepéquez	9,871	3,707	9,453	3,545	209	84	210	78
Chimaltenango	23,424	11,207	22,709	11,091	-	-	716	117
Escuintla	7,031	19,482	7,031	19,482	-	-	-	-
Santa Rosa	4,475	8,067	4,475	8,067	-	-	-	-
Sololá	8,933	2,620	8,693	2,547	-	-	240	73
Totonicapán	3,247	967	3,247	967	-	-	-	-
Quetzaltenango	11,526	10,702	7,347	9,618	-	-	4,179	1,084
Suchitepéquez	8,843	33,156	8,843	33,156	-	-	-	-
Retalhuleu	7,475	43,691	7,475	43,691	-	-	-	-
San Marcos	22,532	20,083	22,300	19,752	-	-	232	332
Huehuetenango	58,009	31,633	57,518	31,580	-	-	491	53
Quiché	23,877	22,462	23,877	22,462	-	-	-	-
Baja Verapaz	9,906	8,815	9,906	8,815	-	-	-	-
Alta Verapaz	13,517	28,460	13,516	28,453	-	-	1	7
Petén	6,667	42,612	6,667	42,612	-	-	-	-
Zacapa	7,715	13,262	7,715	13,262	-	-	-	-
Chiquimula	15,255	10,488	15,255	10,488	-	-	-	-
Jalapa	5,713	6,888	5,713	6,888	-	-	-	-
Jutiapa	15,635	22,674	15,635	22,674	-	-	-	-

Fuente: INE, 2013

Tabla 26 Fincas agropecuarias que utilizan fertilizantes en cultivos anuales (mayo 2007 a junio 2008).

Departamento y tipo de cultivo	Total		Tipo de Fertilizante					
			Químico		Orgánico		Ambos	
	Fincas	ha	Fincas	Ha	Fincas	ha	Fincas	Ha
República	1,590,366	991,447	1,259,450	899,280	70,593	21,079	260,323	71,088
Guatemala	47,005	39,116	34,600	30,389	701	623	11,704	8,104
El Progreso	21,886	21,021	20,138	18,937	1,248	1,962	500	123
Sacatepéquez	38,176	10,333	36,237	9,320	599	271	1,340	742
Chimaltenango	122,172	39,796	115,498	36,165	974	158	5,700	3,473
Escuintla	11,466	34,057	11,192	33,839	88	62	186	156
Santa Rosa	24,585	32,668	24,585	32,668	-	-	-	-
Sololá	116,524	28,253	112,590	27,431	686	60	3,248	762
Totonicapán	79,855	14,926	76,751	14,610	671	29	2,433	287
Quetzaltenango	192,210	52,435	90,862	31,126	23,287	5,820	78,061	15,488
Suchitepéquez	12,343	31,683	10,874	29,338	184	36	1,285	2,308
Retalhuleu	14,975	54,406	14,972	54,350	3	56	-	-
San Marcos	194,596	60,256	29,281	23,309	23,847	3,042	141,468	33,905
Huehuetenango	176,723	67,490	153,156	61,622	12,249	2,311	11,318	3,557
Quiché	216,219	85,025	213,774	84,188	337	52	2,108	786
Baja Verapaz	24,358	17,792	23,521	17,112	762	677	75	3
Alta Verapaz	49,333	81,519	46,600	79,759	2,567	1,698	166	62
Petén	9,540	64,029	8,745	60,141	596	2,847	199	1,041
Izabal	3,860	11,486	3,410	10,671	369	773	81	43
Zacapa	10,021	29,807	9,932	29,687	87	60	2	60
Chiquimula	70,251	43,438	70,251	43,438	-	-	-	-
Jalapa	70,370	56,931	69,020	56,376	983	464	367	91
Jutiapa	83,898	114,979	83,461	114,804	355	78	82	97

Fuente: INE, 2013

Relación de la salud humana con la contaminación: Entre los años 2000 y 2008 murieron 142,879 personas por causas de origen ambiental en Guatemala. Las defunciones de origen ambiental superaron las 13mil víctimas en el año 2008. (Castañeda, 2012).

En la siguiente tabla se puede observar las defunciones de origen ambiental y sus causas en el periodo del 2000 al 2008 según la INE. (Castañeda, 2012).

Tabla 27 Defunciones de origen ambiental y causas. (Periodo 2000 a 2008).

Causa de muerte	Año								
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Total defunciones	67,284	68,041	66,089	66,695	66,991	71,039	69,756	70,030	70,233
Total de muertes de origen ambiental	18,436	18,720	17,832	16,980	16,152	15,175	13,477	13,074	13,033
Porcentaje	27.4	27.5	27.0	25.5	24.1	21.4	19.3	18.7	18.6
Neumonía	6,039	6,017	5,682	5,707	5,750	5,446	4,945	4,891	5,193
Síndrome diarreico agudo	4,314	4,426	4,282	3,943	3,425	3,505	2,918	2,951	2,751
Bronconeumonía	4,161	4,158	3,952	3,709	3,776	3,639	3,102	2,694	2,588
Desnutrición	2,527	2,759	2,618	2,279	2,058	2,585	2,512	2,538	2,501
Fiebre	1,395	1,360	1,298	1,342	1,143	nd	nd	nd	nd

Fuente: INE, 2013

Gestión de residuos en Guatemala: En el 2009, de las 1.7 millones de toneladas de residuos domiciliarios, el 25% se generaron en el departamento de Guatemala. Del total de residuos a nivel nacional, el 56.7% fue incinerado o simplemente tirado en algún lugar, sin control sanitario; y solo el 30% cuenta con algún servicio de recolección. La producción nacional per cápita de residuos domiciliarios fue cercana a los 125 kilogramos por persona por año. (Castañeda, 2012).

Tabla 28 Población total y estimación de la basura domiciliar por departamentos (toneladas) (Año 2009).

Departamento	Población total	Total	Servicio municipal	Servicio privado	Quemada	Tirada	La entierran	Otra
República	14,017,057	1,746,059	162,136	361,445	530,196	459,722	170,829	61,732
Guatemala	3,049,601	445,242	63,371	257,938	58,473	45,119	7,239	13,103
El Progreso	153,261	19,020	537	2,567	10,937	3,694	811	473
Sacatepéquez	303,459	18,830	2,650	6,002	3,640	2,004	1,894	2,639
Chimaltenango	578,976	80,304	6,579	13,634	23,479	17,061	11,792	7,758
Escuintla	670,570	93,008	13,623	11,538	51,313	11,522	2,940	2,073
Santa Rosa	334,720	41,539	2,813	3,321	21,545	11,303	1,948	608
Sololá	411,202	46,528	8,193	1,180	7,998	17,164	9,811	2,182
Totonicapán	447,651	62,089	2,699	987	19,312	15,144	21,345	2,603
Quetzaltenango	754,457	85,367	18,274	4,503	29,172	16,883	13,754	2,781
Suchitepéquez	492,481	68,307	6,248	9,118	34,606	14,695	2,450	1,189
Retalhuleu	290,796	40,333	3,231	4,073	24,857	6,787	994	391
San Marcos	972,781	134,925	6,594	5,164	37,919	50,667	25,644	8,936

Continuación Tabla 28

Departamento	Población total	Total	Servicio municipal	Servicio privado	Quemada	Tirada	La entierran	Otra
Huehuetenango	1,085,357	95,077	4,501	4,006	15,281	50,373	17,352	3,565
Quiché	890,764	113,795	2,816	4,147	20,812	57,079	23,346	5,595
Baja Verapaz	257,876	29,179	2,037	644	9,141	13,142	3,297	918
Alta Verapaz	1,046,185	118,376	2,267	8,443	42,341	49,348	13,976	2,001
Petén	588,860	32,240	364	2,055	22,569	6,272	734	247
Izabal	393,345	50,250	1,643	8,372	30,461	8,074	1,115	584
Zacapa	215,752	29,925	3,617	2,934	14,695	7,902	520	257
Chiquimula	355,223	49,269	5,522	3,677	14,543	22,647	1,608	1,272
Jalapa	301,755	38,549	1,646	3,346	11,038	15,207	6,165	1,147
Jutiapa	421,984	53,908	2,908	3,795	26,064	17,634	2,098	1,409

Fuente INE, 2013

V. Soluciones para basura inorgánica

1. **La regla de las tres erres.** Es una regla que busca minimizar el impacto de los residuos sobre el ambiente y maximizar la disminución de los mismos. Las tres erres significan reducir, reutilizar y reciclar. (Uribe, 2012)

Reducir: Es la disminución o eliminación de la generación de residuos mediante un cambio en los hábitos o un cambio en los procesos de producción. (Uribe, 2012)

Reutilizar: Es el aprovechamiento máximo de los artículos, utilizándolos para diferentes usos antes de ser desechados. (Uribe, 2012)

Reciclar: Utilizar el material de un producto para transformarlo en otro. (Uribe, 2012). Los materiales más reciclados son: papel, aluminio, plástico y materia orgánica.

Entre los beneficios del reciclaje están: (EPA, 2012)

- Protege y expande los empleos del sector manufacturero y aumenta la competitividad en el mercado global.
- Reduce la necesidad de los vertederos y la incineración.
- Ahorra energía y evita la contaminación causada por la extracción y procesamiento de materiales vírgenes y la manufactura de productos utilizando materiales vírgenes.
- Disminuye las emisiones de gases de invernadero que contribuyen al cambio climático global.
- Conserva los recursos naturales como la madera, el agua y los minerales.

- Ayuda a sostener el medioambiente para generaciones futuras. (EPA, 2012)

El reciclaje no sólo proporciona beneficios desde el punto de vista ambiental, sino también en el sentido financiero. Por ejemplo, la producción de latas de aluminio reciclado es económicamente más conveniente ya que el proceso necesita menos energía y el costo por la recolección de la materia prima es menor. (EPA, 2012)

2. **El consumo responsable.** Es un concepto que trata de que los consumidores sigan un estilo de vida de consumo ético, ecológico y solidario. Un consumo ético, donde se introduzcan valores como una variante importante a la hora de consumir o de optar un producto. Un consumo ecológico que siga el movimiento de las tres erres pero en el que también se incluyan elementos como la agricultura y ganadería ecológica. Un consumo solidario en el que se refiere a las relaciones sociales y condiciones laborales en las que se ha elaborado un producto o servicio, se trata de pagar lo justo por el trabajo realizado. (Ecodes, 2011).

3. Soluciones para basura orgánica

a. **Compostaje.** El compostaje se define como el proceso por el cual la materia orgánica es transformada microbiológicamente para obtener compost. Este compost es un tipo de abono natural muy utilizado en la actualidad. Este proceso se puede llevar a cabo sin ningún mecanismo especial de ningún tipo. Lo único que se necesita es un compostador, el cual se puede construir y diseñar fácilmente. Según Monsserrat Soliva, compostar es la transformación biológica de los residuos en condiciones controladas. También establece que es gestionar los residuos de una manera respetuosa con el entorno, involucrando y responsabilizando a las sociedades que los genera. (Soliva, 2013).

Según Haug, compost se define como la materia orgánica que ha sido estabilizada, que está libre de patógenos y de semillas de malas hierbas, que no atrae insectos o vectores, que puede ser manejada y almacenada sin ocasionar molestias y que es beneficiosa para el suelo y el crecimiento de las plantas. (Soliva, 2013)

El proceso de compostaje aplicado a la gallinaza, estiércol o fracción líquida de purines de bovino o vacuno permite obtener productos de elevada calidad, minimizando costos de transporte y hasta posibilitando la obtención de sustratos substitutivos de la turba. Se puede asegurar que las tecnologías para el tratamiento de residuos ganaderos se encuentran disponibles, con un grado avanzado de conocimiento científico sobre los procesos y experiencia sobre su implantación. Lo limitantes más grandes que existen son los aspectos económicos y de internalización, así como los aspectos organizativos y de gestión. (Moreno, 2007).

Se define como abono orgánico a los productos naturales resultantes de la descomposición de materia de origen vegetal, animal o mixto, que puede tener la capacidad de mejorar la fertilidad del suelo y por lo tanto de la producción y productividad de los cultivos. La aplicación de este fertilizante puede llegar a sustituir los fertilizantes químicos, y puede reducir los efectos que éstos han ocasionado. (Xelhuantzi, 2012)

El hecho de que en muchas ocasiones se haya usado de forma incorrecta la palabra compost, ha llevado al desprestigio de este producto y a que su uso y comercialización tengan varias dificultades. Este producto puede obtenerse por un proceso de compostaje directamente, o después de estabilizar (por medio de compostaje) el material generado en un proceso de digestión anaeróbica. (Soliva, 2013)

El compostaje es un proceso biológico aeróbico, que si se tiene a condiciones de aireación, humedad y temperaturas controladas puede llegar a transformar los residuos orgánicos degradables, en productos estables e higienizados que pueden aplicarse como abonos o sustratos. Es una técnica de estabilización y tratamiento para los residuos orgánicos biodegradables. (Xelhuantzi, 2012)

1. **Ventajas.** Desde el punto de vista ecológico el compostaje elimina y recicla muchos tipos de residuos orgánicos. Lo que hace el compostaje es que aumenta la similitud entre la materia orgánica de los residuos y el humus del suelo. En otras palabras, elimina los posibles productos tóxicos que pueden permanecer en los residuos por la descomposición incompleta de materiales y aumenta la estabilidad biológica o resistencia a la biodegradación, con lo que se resuelven o atenúan los efectos desfavorables de la descomposición natural sobre el suelo. Además ayuda con la eliminación de semillas de maleza, disminución de plagas y enfermedades y el desdoblamiento de los nutrientes. (Xelhuantzi, 2012)

2. **Proceso del compostaje.** Durante este proceso ocurren una serie de etapas caracterizadas por la actividad de diferentes organismos, existiendo una estrecha relación entre la temperatura, el pH y el tipo de microorganismos que actúan en cada fase. (Álvarez, 2009)

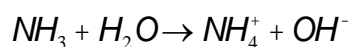
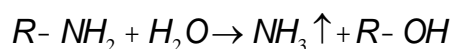
- **Preparación:** Se mezclan y se acondicionan los materiales de partida para regular su contenido de agua, tamaño de partículas, eliminar los elementos no biodegradables y ajustar los nutrientes. (Álvarez, 2009)
- **Descomposición mesófila:** En esta etapa se produce una degradación de azúcares y aminoácidos por la acción de grupos de bacterias. Normalmente, se produce a una temperatura de 40°C. Se da la acidificación de materia y la degradación de

fracciones de carbono débiles. Hongos mueren y generan calor y dióxido de carbono. (UCLM, 2013) (Álvarez, 2009).

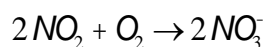
- Descomposición Termófila: En esta etapa se degradan ceras polímeros y hemicelulosa por hongos del grupo de actinomicetos. Se produce entre 60 a 70°C. Se degradan productos del carbono resistentes y se destruyen los microorganismos patógenos y disminuye la actividad respiratoria. (UCLM, 2013) (Álvarez, 2009).
- Etapa de maduración: Se estabiliza y polimeriza el humus a temperatura ambiente, desciende el consumo de oxígeno y desaparece la fitotoxicidad. En esta etapa, al no haber casi nutrientes, desciende la actividad bacteriana. (UCLM, 2013) (Álvarez, 2009).

a. Transformaciones químicas del nitrógeno. El nitrógeno es muy importante para el crecimiento y nutrición de las plantas.. El nitrógeno contenido en los residuos orgánicos está unido a la estructura de las proteínas y péptidos. Generalmente, su disponibilidad en estos residuos orgánicos es muy baja. Las transformaciones químicas del nitrógeno durante el proceso del compostaje se describen por las reacciones de amonificación, nitrificación y desnitrificación: (Moreno, 2007)

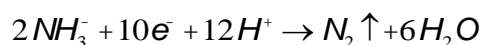
Amonificación:



Nitrificación:



Desnitrificación:



Durante el proceso del compostaje la concentración de los nutrientes normalmente aumenta debido a que la masa total de la mezcla disminuye. Sin embargo, para el caso del nitrógeno, su concentración varía y puede ser similares o inferiores a la de la mezcla inicial. Esto sucede ya que existen pérdidas de los macroelementos durante el proceso debido a las reacciones mencionadas anteriormente. Esta pérdida se produce por tres formas diferentes siendo la más importante de ellas la volatilización de amoníaco. Esta pérdida de nitrógeno es uno

de las principales desventajas del compostaje, ya que puede originar problemas medioambientales. (Moreno, 2007)

b. **Materiales para compostaje.** Una composta requiere suministrarse de desechos orgánicos, que se pueden clasificar de acuerdo a su origen:

- **Domésticos:** Son todos aquellos materiales residuales que no se utilizan a la hora de la preparación de comidas y desechos de origen animal que provienen de viviendas comunes o comunidades pequeñas. (Torres, 2005)
- **De jardín:** Esta categoría incluye todos los restos de cultivos de huertas, flores muertas, tallos, pastos y hojarascas. (Torres, 2005)
- **Subproductos agrícolas:** Entre estos se encuentran los residuos de cosecha prácticamente de cualquier tipo de cultivo, así como las cascarillas obtenidas de la trilla o molienda. (Torres, 2005)
- **Desechos del ganado:** Los estiércoles, orina y deyecciones de cualquier tipo de animales contienen un porcentaje alto de nutrientes y esto permite su compostaje.
- **Forestales:** En esta categoría se encuentra los restos de árboles, hojas y ramas caídas. Estos desechos contienen gran cantidad de celulosa y lignina que se descompone parcialmente en el compostaje y mineraliza el suelo después de aplicados. (Torres, 2005)
- **Desechos urbanos y agroindustriales:** Entre estos se encuentra la fracción biodegradable de la basura procedente de la industrialización de productos. Se tiene que evitar el uso de materiales no biodegradables como vidrio, metal, alambre, plástico, caucho, fibras sintéticas, entre otros. (Torres, 2005)

c. **Procedimiento para la elaboración de una caja de compostaje**

- **Ubicación de la composta:** De acuerdo con las condiciones del terreno, se recomienda que se ubique en un lugar protegido del sol y del viento, cerca de una fuente de agua y que se encuentre de preferencia, paralela a la dirección del viento. (Torres, 2005)

- Formas de construcción: Las compostas se pueden construir sobre la superficie del suelo, en pequeños hoyos excavados y en pequeños depósitos contruidos de cemento, plástico, acero inoxidable y alambre. Esto dependerá de las condiciones climáticas del área, ya que si son áreas muy lluviosas se recomienda construir sobre la superficie del suelo y cuando no es un área lluviosa, se sugiere que se construya en fosas u hoyos en el suelo. (Torres, 2005)

Pasos para la construcción:

1. Elegir un lugar que se encuentra disponible y limpiar de melazas el terreno. El tamaño de la pila de la composta será en función a la disponibilidad de material biodegradable que se tenga y es importante que tenga forma rectangular con suficiente profundidad para que quepan las diferentes capas de la mezcla. (Torres, 2005)
2. Sobre la superficie del terreno se coloca una rejilla para facilitar una buena aireación del material. Colocar la pila seleccionada. (Torres, 2005)
3. Como primera capa se coloca dentro de la pila se coloca material inerte ya sea tierra o paja creando una especie de cama. (Torres, 2005)
4. Posteriormente, se agrega una capa con rastrojos de maíz o frijol, malezas, residuos de hortalizas, ramas, desechos de comida, bagazos, aserrín, viruta, pulpa de café, y cualquier otros material que se tenga disponible. (Torres, 2005)
5. Luego, agregar una capa de altura significativa de estiércol lo más desmenuzado posible. (Torres, 2005)
6. Se continúa poniendo capas alternas sin repetir la primera capa de material grueso hasta que se llegue a la altura media de la pila. (Torres, 2005)
7. Finalmente, se debe cubrir la composta para que ésta no se vea afectada por la lluvia ni por los rayos del sol. (Torres, 2005)

d. Cuidados y recomendaciones

- Se debe evitar que la composta se seque o que cuente con condiciones de exceso de humedad. Si la composta está muy seca se retrasa la descomposición y puede ocurrir invasiones de hormigas, ácaros y otros animales. Si la composta está muy húmeda, pueden proliferar ciertos hongos indeseados y aumenta la producción de malos olores. (Torres, 2005)

- La temperatura no debe rebasar los 50-60°C. Si llegara a ocurrir esto, se recomienda voltear o regar la composta. (Torres, 2005)
- Voltear la composta para favorecer la penetración del aire, lo cual disminuye la producción de malos olores. (Torres, 2005)
- Es importante que en el sitio de composteo se tenga aproximadamente la misma cantidad de material verde y material seco. (Torres, 2005)
- Es recomendable adicionar tierra a la composta, ya que ésta contiene microorganismos que ayudan al proceso de descomposición. (Torres, 2005)
- Si la composta no se usa en el momento en que esté lista, se debe almacenar en costales colocados en un lugar seco. (Torres, 2005)

e. **Calidad del compostaje.** Se establecen distintas exigencias en los niveles de calidad según el mercado al que el compost vaya destinado. Se considera la calidad del compost a partir de las características que resulten de aplicar un tratamiento respetuoso con el medio ambiente, de acuerdo a una gestión adecuada de los residuos y que tenga como meta ser un producto destinado para su uso en el suelo o como sustrato. (Soliva, 2013).

La calidad del compost se determina por el conjunto de propiedades y características que se definen a partir de los siguientes criterios: destino del producto, protección del entorno, requerimientos del mercado. Estas propiedades y características deben ir dirigidos a conseguir en el compost: aspecto y olor aceptables, higienización correcta, muy bajo nivel de impurezas y contaminantes, nivel bueno de componentes agrónomicamente útiles y una cierta constancia de características. (Soliva, 2013)

Cuando se plantean las características óptimas finales para el compost, es complicado poner niveles para el contenido de nutrientes y microorganismos, ya que depende directamente de los materiales tratados. En casi todas las normativas o legislaciones solamente se establecen los contenidos de metales pesados, y son muy poco exigentes con los parámetros agrónomicos. Sin embargo, se deben de cuidar los siguientes aspectos: (Soliva, 2013).

- **Calidad física:** Granulometría, capacidad de retención de agua, humedad, presencia de partículas extrañas, olor. (Soliva, 2013)
- **Calidad química:** Contenido y estabilidad de la materia orgánica, contenido y velocidad de mineralización de los nutrientes vegetales que contenga y presencia de contaminantes inorgánicos u orgánicos. (Soliva, 2013)

- Calidad biológica: Presencia de semillas de malas hierbas y patógenos primarios y secundarios. (Soliva, 2013)

Tabla 29 Usos más aconsejables para determinados tipos de compost y relación con los parámetros determinados

Materiales compostables	pH	Materia orgánica	Contenido nutrientes	Olor	Aplicaciones
Estiércol	Regular/ Inadecuado	Bueno	Bueno	Bueno/ Regular	<ul style="list-style-type: none"> • Agrícolas • Jardinería privada • Parques y jardines públicos • Restauración de paisaje • Recuperación de espacios degradados • Revegetación obra pública • Césped deportivo.
Cortezas	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	<ul style="list-style-type: none"> • Jardinería privada • Parques y jardines públicos • Preparación de substratos • Césped deportivo.
Restos vegetales	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	<ul style="list-style-type: none"> • Jardinería privada • Parques y jardines públicos • Restauración de paisaje • Recuperación de espacios degradados • Revegetación obra pública • Preparación de substratos • Césped deportivo.
Lodos + restos vegetales	Bueno/ Regular	Bueno	Regular/ Inadecuado	Bueno/ Regular	<ul style="list-style-type: none"> • Agrícolas • Jardinería privada • Parques y jardines públicos • Restauración de paisaje • Recuperación de espacios degradados • Revegetación obra pública • Preparación de substratos • Césped deportivo.

(Soliva, 2013)

f. **Sistemas de compostaje.** Para el tratamiento de residuos orgánicos, existen diferentes métodos y formas de hacer compostaje. El método a elegir, deberá depender de los ingredientes que se van a añadir a la composta, el presupuesto, el tiempo y el espacio disponible. (CWMI, 2012).

- **Compostaje en pila:** Es uno de los más sencillos. No se requieren materiales de construcción ya que solamente se amontonan los residuos orgánicos en una pila. (CWMI, 2012).
- **Compostaje en contenedores:** Como contenedor, se puede utilizar cualquier cosa que contenga los residuos mientras se descomponen. Se pueden organizar los residuos en capas para obtener mejores resultados. Este proceso requiere relativamente mucho tiempo, porque como no se revuelve, no se añade oxígeno a la composta. Si se quisiera acelerar el proceso, se puede recortar o triturar los residuos antes de colocarlos en el recipiente. (CWMI, 2012).
- **Compostaje revuelto y/o aireado:** Es el tipo de compostaje donde los residuos son mezclados o revueltos con frecuencia. Se recomienda que se haga cada dos días para fomentar la entrada de aire al mismo. También para ayudar a la aireación, se puede colocar agujeros en el recipiente, para que el oxígeno fluya a través del mismo todo el tiempo. Esto acelera la descomposición ya que se tiene la cantidad de aire necesaria para que los microorganismos realicen su función de descomposición. (CWMI, 2012).
- **Compostaje en hoyos:** Se hace abriendo un agujero de menos de dos pies en el suelo. Los residuos orgánicos se entierran y se coloca algún tipo de manta o cobertor para que no ingresen moscas o animales no deseados y para que no se vea afectado por la lluvia. (CWMI, 2012).
- **Compostaje con lombrices de tierra:** Se coloca en un contenedor el material o residuos orgánico y se le añaden las lombrices de tierra. Este compostaje requiere poco mantenimiento y produce un compost de alta calidad. (CWMI, 2012).

Lombricultura es el cultivo de lombrices. Un proceso limpio y de fácil aplicación para reciclar una amplia y variada gama de residuos biodegradables (restos orgánicos), produciendo abono y lombrices. La lombricultura se inserta en una serie de actividades, desde las de tipo hobby, hasta las de índole comercial (producción de humus o lombricompostos fertilizantes, expansión de cultivos, alimentación animal, tratamiento de residuos orgánicos, industriales, agrícolas, urbanos, entre otros). (Schuldt, 2006).

El sustrato es el medio en el que se cultivan las lombrices y del cual se alimentan. Este medio puede constituirse con una diversidad de materia orgánica y experimenta un proceso de compostaje más o menos avanzado. El bienestar de las lombrices, el desarrollo de las mismas y la calidad de humus producido se relaciona íntimamente con las condiciones en que se produce el

compostaje. El humus es el producto final, estabilizado, amorfo, coloidal, de color pardo oscuro, que resulta de la desintegración material. El proceso de humificación es lento en la naturaleza, tal es así que un estiércol puede requerir varios años para transformarse en humus si no se toman recaudos para acelerar la transformación. (Schuldt, 2006).

Las lombrices son micrófagas por lo que se alimentan de bacterias, protozoarios, microalgas y hongos, que ingieren en el medio. Este conglomerado de organismos abunda en los estiércoles animales adecuadamente madurados y es la razón por la cual constituyen el medio básico por excelencia para este tipo de práctica. (Schuldt, 2006).

El lombricompuesto puede ser utilizado como enmienda orgánica proporcionando carbono orgánico al suelo, optimizando sus características fisicoquímicas. Como abono orgánico, mejora las condiciones físicas del suelo, incrementando su capacidad de movilización y absorción de los nutrientes y desde el punto de vista químico, aporta macroelementos (cinc, hierro, cobre manganeso, boro, entre otros) indispensables para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Puede constituirse en un sustrato solo o combinado con otros, proporciona un medio apropiado para el desarrollo y crecimiento de las plantas. Finalmente, puede complementar otros fertilizantes, tanto orgánicos como inorgánicos. (Schuldt, 2006).

El humus de lombriz es un fertilizante orgánico, biorregulador y corrector que no presenta problemas de sobredosificación, aún en aquellos casos en que se lo utiliza puro como medio de cultivo para plantaciones. Utilizado como medio único de cultivo, puede demorar la germinación, pero incrementa el volumen de cosecha. Su aplicación es conveniente tanto en suelos con partículas muy finas, como en aquellos estructurados con partículas de mayor talla, mejorando en ambos casos la dinámica de agua y gases. (Schuldt, 2006).

Otro de los beneficios de este tipo de compostaje es que sus niveles de nutrientes no ven afectados con el paso del tiempo. El nitrógeno, potasio y fósforo resisten bastante bien al paso del tiempo, y al cabo de 3 años todavía se encuentran en concentraciones en torno al 65% de los valores que consignaban al año. Se recomienda utilizar el vermicompuesto con menos de 4 años de elaborados. (Schuldt, 2006).

g. Nutrición vegetal. Según Oswaldo E. Macz de la empresa Yara, el estudio de la nutrición vegetal tiene mucha importancia ya que el ciclo de vida mismo de la planta depende de la presencia y la cantidad de nutrientes que tenga disponible en el suelo. Estos nutrientes son muy importantes ya que en el metabolismo propio de las plantas no puede ser reemplazado con ningún otro elemento. Esto se debe a que cada nutriente tiene su función específica y está involucrado de forma directa con el metabolismo de la planta. (Macz, 2013)

Existen diferentes tipos de nutrientes minerales que necesitan las plantas para su correcto crecimiento. Estos nutrientes pueden estar presentes en la tierra (cuando éstas están en óptimas condiciones), o pueden ser agregadas a la misma por medio de fertilizantes de origen natural o químico. Los nutrientes se dividen según su importancia para la nutrición de la planta. Los nutrientes que se consideran primarios son el nitrógeno, fósforo y potasio. Los nutrientes secundarios son el calcio, el magnesio y el azufre. También existe una tercera categoría donde se encuentran los denominados micronutrientes entre los cuales están el boro, el cobre, el hierro, el manganeso, el molibdeno y el cinc. (Macz, 2013)

- **Nitrógeno:** El nitrógeno es un elemento químico el cuál es absorbido por la planta en forma de nitratos (NO_3) y en forma de amonio (NH_4). La función del nitrógeno en la planta es la síntesis de la clorofila. También sintetiza los carbohidratos y ayuda a que la planta tenga un mejor provecho de los mismos. Una de las funciones más importantes del nitrógeno en las plantas es el aumento de biomasa que se da a través de este elemento, y el incremento en el área floral. (Macz, 2013)
- **Fósforo:** El fósforo es otro de los elementos que junto con el nitrógeno forman parte de los nutrientes primarios para las plantas. El fósforo sirve para la fotosíntesis y la respiración de la planta. También funciona como almacenamiento de energía y división y desarrollo celular. Muchos estudios indican que la presencia de fósforo en el metabolismo vegetal ayuda a estimular la formación de raíces y fomentan la floración de forma adecuada. (Macz, 2013)
- **Potasio:** El potasio es uno de los elementos más importantes en la nutrición de las plantas ya que regula el balance hídrico de las mismas. También es el encargado de que se dé la apertura necesaria de estomas para el correcto funcionamiento de los sistemas más importantes de la planta. Permite la translocación a lo largo de toda la planta de carbohidratos y hace que la planta se haga más resistente a cualquier tipo de enfermedad que se pueda presentar. (Macz, 2013)
- **Calcio:** El calcio le da integridad y permeabilidad a las células vegetales de la planta. También es un formador de la pared celular. El calcio es el encargado de proveer la resistencia a los frutos y también ayuda de forma significativa a la salud de la planta, habitando y dándole resistencia en contra de enfermedades. Se cree que la presencia de calcio ayuda a alargar la vida pos cosecha de la planta. (Macz, 2013)

- Magnesio: El magnesio es un cofactor enzimático el cual activa la fosforilación de la planta y es un componente esencial de la clorofila. (Macz, 2013)
- Cobre, Hierro, Manganeso y Cinc: Estos cuatro elementos pertenecen al grupo de micronutrientes esenciales para las plantas. Estos están involucrados en el transporte de electrones y son activadores de enzimas. (Macz, 2013)

V. ANTECEDENTES

La finca “Rama Blanca”, ubicada en Sipacate, Escuintla, Guatemala, entre otras actividades, se dedica a la cría de búfalos, los cuales se alimentan de caña de azúcar, concentrado, palmiste, pasto, entre otros. Los búfalos son criados como ganado lechero y para ayudar en el trabajo del campo. La leche es utilizada en una pequeña planta productora de lácteos, entre la que se produce diferentes tipos de queso, dulce de leche, yogurt, entre otros.

En la finca cuentan con aproximadamente 456 búfalos, los cuales consumen cerca del 10% de su peso diariamente, del cual excretan el 65%. Se estima que en la finca deben encargarse diariamente del manejo de 4.84 toneladas de estiércol de búfalo. Este excremento en exceso ha representado un problema para la finca ya que deben encontrar formas apropiadas de deshacerse de él, preferiblemente generando utilidades en el proceso. Los búfalos aceptan prácticamente cualquier fuente de alimento que reciben, por lo que cuentan con una gran lista de opciones.

Con este objetivo, en “Rama Blanca” se llevó a cabo la instalación de un biodigestor que actualmente está en funcionamiento. Este biodigestor es alimentado diariamente con 200 litros de estiércol con agua (se desconoce la relación utilizada ya que utilizan agua para lavar los patios con estiércol y luego se recoge para llevarlo al biodigestor, en ningún momento se mide el volumen de agua utilizado), y actualmente es capaz de generar 57m³ de biogás. No se tiene control sobre las condiciones de operación del biodigestor, únicamente en el volumen de la alimentación. En cuanto al estiércol utilizado en el biodigestor, el hecho de que los búfalos no tengan una dieta estable representa un problema en la caracterización de los mismos, dado a que el contenido orgánico de los desechos depende completamente de la calidad alimenticia que tengan los animales. La investigación bibliográfica realizada indica que cuando se utiliza estiércol como materia prima, la cantidad de biogás generado y la concentración de metano en el mismo dependen directamente de la alimentación de los animales. Por ejemplo, en el caso que los búfalos se alimenten de caña de azúcar, su estiércol tendría un alto contenido de fibra, lo cual perjudicaría la metanogénesis dado que a los microorganismos se les dificulta más digerir la fibra.

El sistema de tubería instalado actualmente conecta el biodigestor directamente con las estufas de la planta de lácteos, y es únicamente allí en donde se utiliza el biogás. La producción de biogás no es controlada, por lo que muchas veces la producción no es suficiente para satisfacer la demanda, y en dichas ocasiones es necesaria la compra de gas propano para continuar las operaciones en la planta de lácteos. La cantidad de estiércol que puede contener el biodigestor no está dimensionado adecuadamente, ya que del total de estiércol producido

diariamente por los animales, únicamente una pequeña fracción se utiliza para generar biogás, el resto simplemente se lava y termina regado en la finca o va a dar a cuerpos líquidos cercanos.

En cuanto al suero láctico, residuo de la producción de quesos, actualmente se utiliza como alimento para el ganado porcino de la finca. Sin embargo, la finca dejó de criar cerdos, por lo que es necesario encontrar un nuevo uso para este subproducto. De la fabricación de quesos se estima que del 100% de la leche utilizada, el 90% se convierte en suero láctico, mientras que únicamente el 10% representa el queso producido. Desecharlo a los drenajes no es una opción, ya que por su alta demanda biológica y química de oxígeno, tiene un alto poder contaminante y causaría estragos en las fuentes hídricas cercanas. No se recomienda utilizarlo como sustituto alimenticio para los búfalos debido a que la cantidad de nutrientes que el suero puede brindar es muy poco en comparación a los requisitos alimenticios de estos animales, y se necesitaría mucho más de los 160L de suero láctico generados diariamente para satisfacer dichos requisitos alimenticios

VI. METODOLOGÍA

Para el módulo de caracterización inicial de materias primas lo que se hizo de primero fue una recolección de estiércol en la finca Rama Blanca, se buscó estiércol de distintos búfalos y se recogieron en una bolsa plástica, luego de eso se procedió a realizar los respectivos análisis fisicoquímicos como: sólidos totales, cenizas, humedad y sólidos volátiles según el método normalizado 2540B de la APHA-AWWA-WPFC por gravimetría (base seca), DQO mediante método 5220D de la APHA-AWWA-WPFC 1989, pH mediante el método normalizado 4500B de la APHA-AWWA-WPFC 1989 por inmersión del electrodo de pH en la muestra, DBO mediante el método de dilución 10230 adaptado de los Métodos Estándar para el Análisis de agua, porcentaje de grasas (base seca) mediante el método Soxhlet que involucra una extracción sólido-líquido con el fin de determinar la concentración de la materia grasa, porcentaje de proteínas (base seca) mediante el método Kjeldahl el cual mide el contenido en nitrógeno en muestras orgánicas y porcentaje de carbohidratos (base seca). Esto se hizo con la muestra de estiércol y suero lo más frescas posible para evitar que perdiera sus propiedades. En caso no se pudiera hacer los análisis el mismo día de la recolección de la muestra, esta se refrigeró a 6 °C. Este análisis se llevó a cabo en dos épocas del año las cuales son verano e invierno con el fin de comparar las diferencias encontradas en ambos análisis. Con el suero se hizo básicamente lo mismo que con el estiércol. Se realizó al igual que con el estiércol sólidos totales, sólidos volátiles, pH, demanda química de oxígeno etc; bajo los mismos métodos normalizados. A diferencia del estiércol este solo se caracterizó una vez ya que el mismo no se ve afectado por épocas de lluvia o de calor. Con el agua de lavado lo que se debió haber hecho fue: primero una recolección luego de lavados los patios, luego se debió haber realizado un análisis de la misma en la cual se determinaría coliformes, cloro, pH, etc. con el fin de determinar si ésta es apta o no para el uso en el biodigestor ya que se busca que no interfiera el funcionamiento del biodigestor. El procedimiento a realizar con la muestra inicial de estiércol consistió en tomar tiempo a partir que el búfalo sacó la excreta para así recolectarla luego que fue desechada ya que se busca mantener propiedades como la humedad; esto con el fin de que la misma no tenga que mezclarse con agua de otro tipo sino que conserve la que ya contiene. También se analizó el tipo de almacenaje para dichas muestras con el fin de que no pierdan sus propiedades.

Para el módulo de utilización de suero láctico en biodigestor piloto se creó un medio adecuado para que los microorganismos involucrados en la metanogénesis puedan degradar la materia orgánica adecuadamente es necesario fluidizar el medio, ya que en un medio sólido es limitada la cantidad de nutrientes a los que tienen acceso. Experimentalmente, Juan Carlos Rodas en su módulo del megaproyecto, determinó que la relación de agua y estiércol que generó un mayor volumen de biogás por unidad de masa fue constituida por 50% (m/m) de agua y 50% (m/m)

de estiércol de búfalo. Utilizando esta mezcla como base se trabajó con cinco formulaciones diferentes, variando la cantidad de suero láctico en la alimentación. Las cinco relaciones de mezcla y suero que se trabajó fueron 80%-20%, 75%-25%, 66%-34%, 50%-50% y 34%-66% respectivamente, todos fueron porcentaje de masa. También se trabajó un biodigestor utilizando únicamente suero láctico, para comparar sus resultados con los resultados obtenidos integrando suero con estiércol y agua. Para realizar las pruebas a nivel de laboratorio se instaló un sistema de generación y captación de biogás, en el que un recipiente de vidrio con un volumen aproximado de 3L sirvió como biodigestor. Dentro del biodigestor se agregó la cantidad de suero láctico, agua y estiércol necesaria para la relación que se trabajaría. Las mezclas se hicieron pesando la cantidad de estiércol y de agua que debía tener cada relación en el recipiente de vidrio que sería el biodigestor. La masa agregada de cada material al biodigestor se midió utilizando una balanza electrónica con incertidumbre de $\pm 0.02\text{kg}$, tarando la masa total cada vez que se agregó un nuevo material. El recipiente de vidrio una vez con la biomasa dentro de él fue sellado con un tapón de hule, el cual fue previamente perforado y se unió a una manguera que sirvió de conexión para trasladar el biogás generado del recipiente de vidrio a un recipiente de polietileno tereftalato (PET). Fue necesario aislar el medio del aire para conseguir que el biodigestor trabajara de forma anaerobia. El recipiente PET permaneció lleno de agua, invertido en una trampa de agua, y a medida que se generó biogás, éste llegó a la botella y desplazó el agua en su interior. La escala utilizada para medir el volumen de biogás recolectado en las botellas PET fue hecha previamente utilizando una probeta de 100mL, marcando el volumen que ocupa cada 100mL en el recipiente, para poder determinar diariamente la cantidad de biogás generado. Las mediciones se realizaron midiendo el nivel de biogás contenido en dichos recipientes. Los biodigestores se mantuvieron dentro de un recipiente lleno de agua a una temperatura de 40°C utilizando un calentador eléctrico y un sistema de recirculación. Los reactores fueron monitoreados diariamente por un periodo de 20 días, hasta que se determinó que la producción de biogás había cesado, ya que el volumen total de biogás generado se mantuvo constante por más de cinco días. Cada formulación se trabajó en triplicado. Para analizar la generación de biogás utilizando biodigestores con alimentación intermitente se utilizó dos erlenmeyers de 600mL. Uno de los erlenmeyers se cargó con $100.00 \pm 0.01\text{g}$ de agua y $100.00 \pm 0.01\text{g}$ de estiércol, y fue sellado con un tapón de hule previamente perforado con dos aberturas, y en cada una se puso una manguera. La primera abertura sirvió como medio de alimentación, a través de ella se agregó $10.00 \pm 0.01\text{g}$ de suero láctico cada dos o tres días, y se cerró para evitar la entrada de aire al sistema. La segunda manguera sirvió para conectar un erlenmeyer con el otro, es decir, para conectar el biodigestor con el recipiente de captación de biogás. Éste erlenmeyer se mantuvo a una temperatura de 55°C , la temperatura óptima de operación en el rango de temperaturas termofílico, que es la temperatura que genera biogás más rápido. Este sistema isotérmico se mantuvo utilizando un baño térmico. El segundo erlenmeyer fue utilizado para captar el biogás generado. Éste se llenó de agua y se selló con un

tapón de hule, con dos aberturas, una por la que ingresó el biogás y otra por la que salió el agua desplazada por el biogás que entró al erlenmeyer. El agua desplazada por el biogás se recibió en una probeta de 100mL, la cual fue utilizada para medir el volumen del gas generado diariamente.

Para el módulo de condiciones de operación fue necesario llevar a cabo la determinación de las condiciones de operación, fue necesario un biodigestor piloto, para poder realizar pruebas de temperatura, composición y relación de agua/excremento. Las condiciones de operaciones fueron controladas. Los biodigestores fueron colocados en recipientes de plástico con agua, el agua fue utilizada para poder controlar la temperatura. Los biodigestores contendrán agua y excremento para poder producir biogás. Se hizo una recirculación de agua mediante tubería PVC para mantener el agua caliente y recirculaba por el biodigestor. Las principales condiciones de operación que fueron controladas: Temperatura en intervalo de 30-35°C, relación agua/excremento y tiempo de retención de sólidos debe de ser 20 a 30 días. Se colocaron 2 calentadores de agua, para poder llevar a una temperatura a un rango de 30°- 40°C. Se midió la temperatura todos los días. El agua a ser calentada fue controlada y se mantuvo el nivel del agua para asegurar la transferencia de calor. Si el nivel de agua disminuye se le agrega una nueva cantidad de agua. La relación excremento/agua fue pesada, se pesó el excremento y de acuerdo a la relación con agua se agregó la cantidad de agua necesaria. El biogás producido fue atrapado en envases de plástico de 2L de volumen, antes de tomar la medida de biogás producido, el reactor debe de ser agitado para liberar el gas atrapado en el reactor y este se puede desplazar a la botella PET. Estos envases contendrán agua y el biogás desplazara el agua, de esta forma se desea atrapar el biogás para posteriormente hacer pruebas en una cromatografía. Los envases de plástico fueron calibrados para poder medir la producción de biogás diaria. Para el módulo del diseño del biodigestor se realizó revisión bibliográfica de los diferentes tipos de reactores utilizados y de los métodos para su diseño y dimensionamiento. Se pidió en la Finca Rama Blanca ubicada en el caserío Rama Blanca de Sipacate, La Gomera Escuintla que se realice un pesado de la cantidad de excremento por día. Para tener la cantidad de materia prima disponible. Se preguntó usos actuales y futuros para el biogás para poder tener un valor deseado de generación del mismo. Para tener la cantidad de producto necesaria. También se preguntó sobre problemas que se tienen con el uso de biogás actualmente, para tomarlo en cuenta al momento de realizar el diseño. Se midió el espacio asignado para el biodigestor, su tanque de mezclado y su tanque de almacenamiento. Se recopilaron los datos de relación agua-excremento y condiciones de operación del módulo "Producción de biogás a partir de excremento de búfalo determinando las condiciones de operación: temperatura, relación excremento/agua y tiempo de retención de sólidos, para condiciones del biodigestor en la finca Rama Blanca" a cargo de Juan Carlos Rodas y de datos de relación agua-excremento-suero del módulo "Evaluación del uso de suero lácteo y las posibles materias orgánicas disponibles en mezclas con estiércol de búfalo para su utilización en el biodigestor de la finca Rama Blanca" a cargo de Antonio Vela. En base a los datos recopilados resultados de los módulos "Producción de biogás a partir de excremento de búfalo determinando

las condiciones de operación: temperatura, relación excremento/agua y tiempo de retención de sólidos, para condiciones del biodigestor en la finca Rama Blanca” a cargo de Juan Carlos Rodas y de datos de relación agua-excremento-suero del módulo “Evaluación del uso de suero lácteo y las posibles materias orgánicas disponibles en mezclas con estiércol de búfalo para su utilización en el biodigestor de la finca Rama Blanca” a cargo de Antonio Vela se realizó un modelo de reacción cinética. Se analizó el modelo cinético de reacción y se evaluó si era posible diseñar el biodigestor de acuerdo a ecuaciones de diseño de reactores.

Se concluyó que no, por lo que realizó el diseño a partir del DBO del material orgánico utilizado como materia prima obtenido del módulo “Caracterización de materia prima a partir de materia orgánica disponible, y productos” a cargo de Rodrigo Arandi-Klee. Se calculó el requerimiento de biogás de la Finca Rama Blanca ubicada en el caserío Rama Blanca Sipacate, La Gomera Escuintla y se consideró el tratamiento de los residuos que el biodigestor producirá apoyándose en los requerimientos del módulo “Aprovechamiento de los Residuos del Biodigestor productor de biogás, diseñado para la Finca Rama Blanca, por medio de Compostaje” a cargo de Isabel Eizaguirre y también se consideró otros usos según el módulo “Selección de metodología para el correcto almacenamiento y uso de biogás a partir de las condiciones de operación del proceso propuesto a Finca Rama Blanca, Sipacate, Guatemala” a cargo de Sylvia Oliva. Se realizó el balance de masa para el sistema. En base a las condiciones de operación de la Finca Rama Blanca ubicada en el caserío Rama Blanca de Sipacate, La Gomera Escuintla, la cantidad de biogás que se desea producir y los residuos orgánicos necesarios para ello se dimensionó el bioreactor. En base a la alimentación diaria calculada se realizó el dimensionamiento del tanque mezclador de agua y estiércol necesario. Se realizó el diagrama de proceso del reactor propuesto. De acuerdo a los datos recopilados del análisis químico de la mezcla que entrará al biodigestor y del metano que se obtendrá realizado en la parte “Caracterización de materia prima a partir de materia orgánica disponible, y productos” a cargo de Rodrigo Arandi-Klee y las características propias del proceso se eligió materiales adecuados para el biodigestor, el tanque de almacenamiento de metano y el tanque de mezclado de agua y estiércol. A partir del dimensionamiento y de la forma de operación se realizaron los planos del biodigestor. En base al área de construcción se calculó el costo de construcción del biodigestor propuesto.

Para el módulo de sistema de extracción y purificación del biogás se desarrolló a lo largo de tres semestres. A finales de 2012 se presentó la problemática de la Finca Rama Blanca para manejar sus desechos orgánicos y la posibilidad de generación de energía y compost a partir de los mismos. Ante esto se creó el Megaproyecto Diseño de un sistema integrado generador de energía que incluye la producción de biogás, electricidad y compost utilizando residuos orgánicos de origen animal en la finca Rama Blanca de Sipacate, Escuintla”. El cual se dividió en seis módulos de acuerdo al siguiente diagrama. Este reporte se basó en el desarrollo del módulo 5,

“Selección de un sistema de purificación y extracción del biogás producido en finca Rama Blanca” este se desarrolló en 3 semestres y se dividió en las siguientes fases. Se realizó revisión bibliográfica acerca de las impurezas que puede contener el biogás y que métodos se aplican para eliminarlas. Así mismo se investigó los materiales que son adecuados para diseñar un sistema de extracción de biogás. A partir de la revisión bibliográfica fue necesario determinar los siguientes datos. Se determinó: Composición del biogás, ya sea por medio de análisis de laboratorio o por medio de comparación literaria. Cabe mencionar que en este trabajo no se analizaron las características del biogás producido, por lo que se tomaron los datos del biogás generado por el excremento porcino ya que los valores de DQO (Demanda Química de oxígeno) y DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) fueron similares a estos, caudal de salida del biodigestor, distancia de la esfera de almacenamiento hacia las estufas que se utilizan para la producción de lácteos, distancia de la esfera de almacenamiento hacia la microturbina, requerimiento volumétrico de biogás para satisfacer todas las fuentes determinadas. A partir del caudal de salida del biodigestor y la aplicación de flujo de fluidos, se determinó el diámetro que tendrá el sistema de tuberías para la extracción del biogás. A partir de la longitud de la tubería y la cantidad de accesorios que se tiene, se determinó la caída de presión. Con base en la composición presente del biogás estableció que impurezas son factibles eliminar, según el uso que se le da al biogás en Finca Rama Blanca. Se determinó el material más adecuado para el sistema de tuberías analizando como la composición del biogás interactúa con los diferentes materiales de manufactura de tuberías. Se determinó cual será el orden para la eliminación de impurezas en el biogás. Se estableció un diagrama de flujo del sistema de extracción y purificación del biogás, a través del caudal de salida del biodigestor, la caída de presión, y los pasos de eliminación de impurezas. Se estimó el costo total de inversión del sistema de purificación y extracción del biogás. Se justificó y se discutió sobre la toma de decisiones para el diseño del sistema de extracción y purificación del biogás. Se establecieron las conclusiones de acuerdo a los objetivos planteados. Se identificaron puntos de mejora, los cuales se pueden encontrar en la sección de recomendaciones del presente documento.

Para el módulo de compostaje se estudiaron los posibles desechos sólidos disponibles en la finca. Se llegó a la conclusión que los residuos más significativos (por su cantidad) eran el estiércol de búfalo y los residuos del biodigestor. Se decidió hacer entonces una mezcla de ambos de 1:1 en peso, para aprovechar a utilizar la mayor cantidad de cada uno. Se realizó una revisión bibliográfica con los diferentes tipos de compostaje y sus metodologías para determinar cuáles eran los más adecuados para este caso. Se eligió comparar el método de aireación y el método de lombricultura. El método de aireación se eligió ya que es un método relativamente económico y de fácil montaje. El método de lombricultura se eligió ya que la literatura mostraba que era el método con mejores resultados en relación a composición de nutrientes. Se llevó a cabo el estudio de ambos métodos de forma experimental. Para esto, se utilizó una caja de plástico con agujeros en las partes laterales así como en el fondo de la misma. Esta caja se utilizó como pila para ambos

métodos de compostaje, utilizando una plancha de aluminio para hacer la separación entre cada uno. Para el área de lombricultura, se utilizaron las mismas planchas de aluminio para tapar los agujeros y de esta forma evitar que las lombrices se salieran. En ambos casos, se dejaron espacios para que el agua pudiera drenarse y así evitar acumulación de la misma. También, se dejaron espacios para promover el ingreso de aire necesario para el proceso de descomposición. Para el montaje de las composteras se siguieron los siguientes pasos: Se pesó la cantidad disponible que se tenía de residuos del biodigestor piloto, se obtuvo la misma cantidad en peso de estiércol de búfalo de la finca, se hizo una mezcla entre ambos residuos hasta lograr obtener una mezcla espesa y homogénea, se pesó tierra que se encontró disponible en el área, en una mayor cantidad, para darle más consistencia a la pila compostera. Es mejor si en la tierra van contenidos otros materiales inertes, como hojas secas, pedazos de madera, entre otros, se colocó en la pila una capa de tierra en el fondo. Luego, se agregó una capa de materia orgánica (mezcla de estiércol). Para el método de aireación, solamente se fueron colocando capas hasta terminar con lo último de estiércol disponible. Para el método de lombricultura, se realizó el mismo procedimiento con la diferencia de que se agregaron las lombrices en la mitad de la pila ya que se recomienda que las lombrices no reciban mucha luz, se colocó una tapadera en la pila con el fin de evitar el ingreso de la luz del sol ya que no se recomienda para el método de lombricultura. la intemperie. Para determinar el contenido de nutrientes que tenían los residuos inicialmente, se le hizo un análisis de suelo a los desechos del biodigestor. Esto se hizo con un laboratorio externo experto en este tipo de análisis. Para determinar la composición de ambos métodos, se hizo un análisis de abono orgánico luego de 13 días de descomposición, donde se indica la composición de nutrientes final para cada uno de los métodos. Para elegir qué método era el más adecuado para la finca, se hizo una comparación de los resultados de los análisis de laboratorio, determinando cuál de los dos tenía un mayor contenido de nutrientes. También se hizo una comparación entre los rendimientos de cada método. Para esto, se pesó inicialmente la cantidad de mezcla para compostar. Luego, al finalizar los 13 días, se pesó la masa final del humus obtenido. De esta forma, se hizo una relación entre humus obtenido y mezcla inicial, para determinar cuál había tenido mejores resultados.

VII. RESULTADOS

A. Resultados Módulo “Caracterización de Materia Prima”.

Tabla 30: pH de estiércol de búfalo y suero de leche de búfalo a 23°C.

pH estiércol	7.34	±	0.01
pH suero	4.63	±	0.01

Gráfica 1: Valores de pH obtenidos para los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo a 23°C. Muestras del 7 de agosto de 2013.

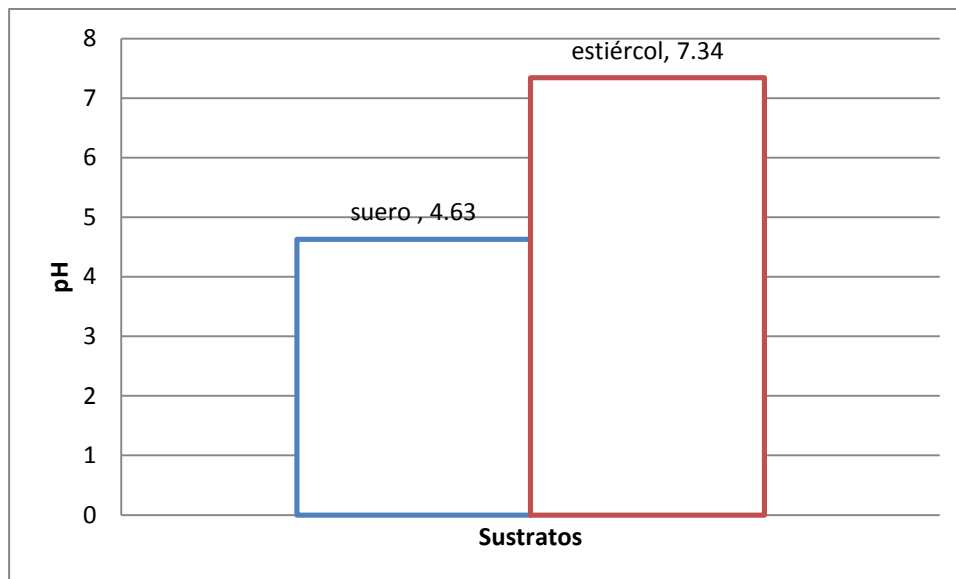


Tabla 31: Promedio de sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para suero de leche de búfalo. Muestra del 24 de mayo de 2013.

Propiedad	(g)	%
Sólidos totales	9.07 ± 1.330	7.93 ± 1.275
Humedad	105.54 ± 4.584	92.07 ± 1.275
Cenizas	0.57 ± 0.072	6.30 ± 0.208
Sólidos volátiles	8.50 ± 1.260	93.70 ± 0.208

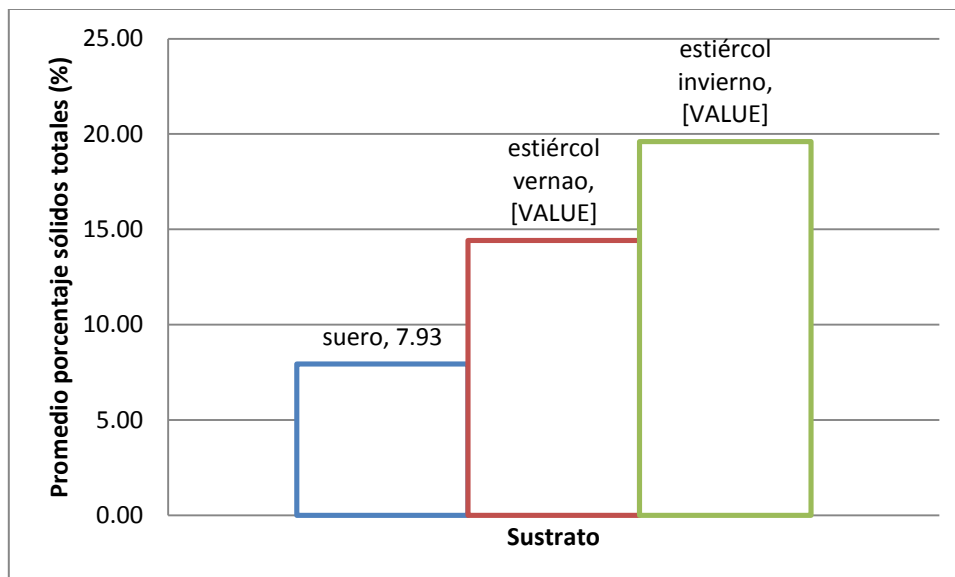
Tabla 32: Promedio de sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para estiércol obtenido en época de verano. Muestra del 24 de mayo de 2013.

Propiedad	(g)			%		
	Sólidos totales	5.54	±	0.286	14.42	±
Humedad	32.87	±	1.433	85.58	±	0.112
Cenizas	1.10	±	0.059	19.92	±	0.205
Sólidos volátiles	4.44	±	0.229	80.08	±	0.205

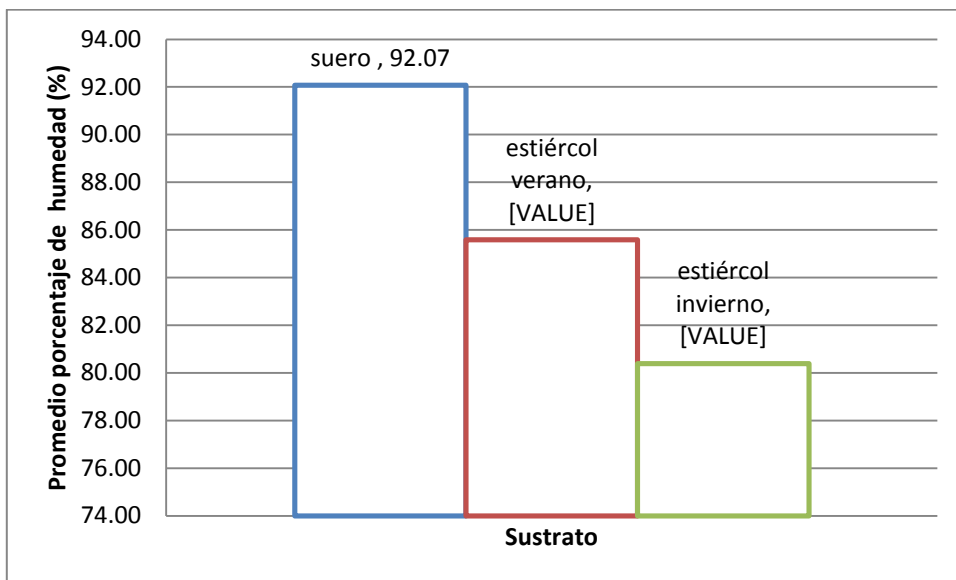
Tabla 33: Promedio de sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para estiércol obtenido en época de invierno.

Propiedad	(g)			%		
	Sólidos totales	6.15	±	0.185	19.61	±
Humedad	25.20	±	0.702	80.39	±	0.059
Cenizas	1.99	±	0.087	32.37	±	0.432
Sólidos volátiles	4.16	±	0.099	67.63	±	0.432

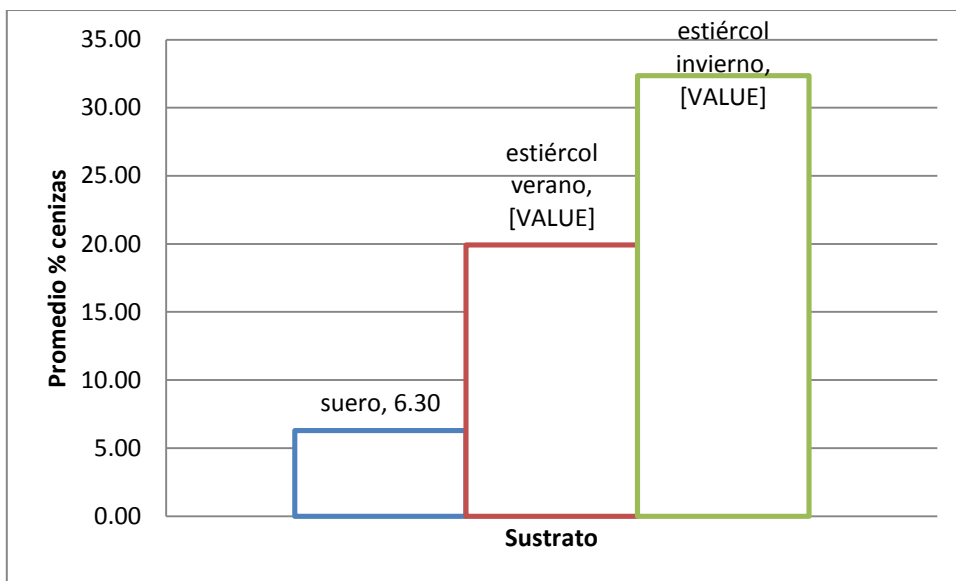
Gráfica 2: Promedios de sólidos totales para los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Gráfica 3: Promedios de porcentaje de humedad para los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Gráfica 4: Promedios de porcentaje de cenizas para los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Gráfica 5: Promedio de sólidos volátiles para los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo.

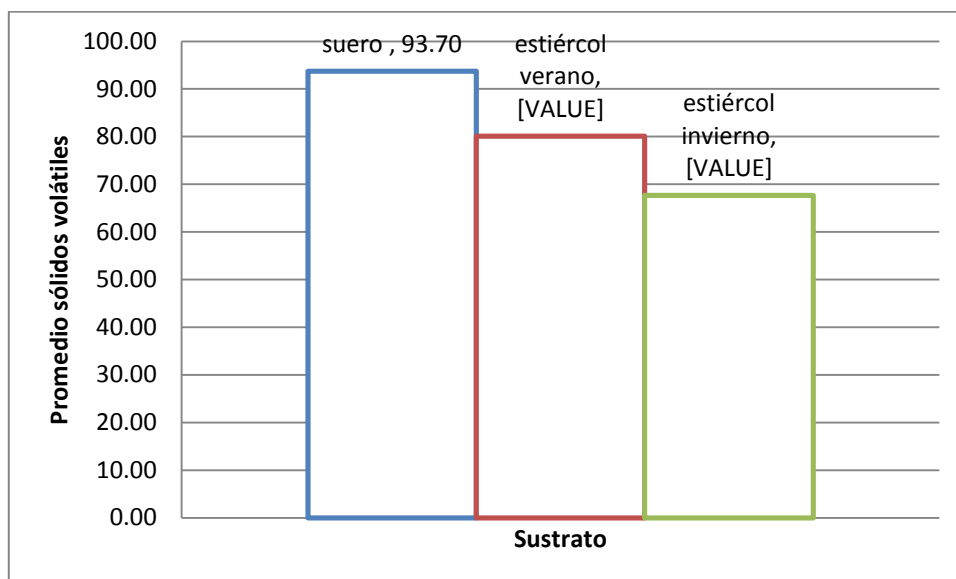


Tabla 34: Demanda química de oxígeno y potencial de metano para el estiércol obtenido en época de verano. Muestra del 24 de mayo de 2013.

Potencial de metano (m ³ metano/g sólidos totales)	0.0002438	±	0.000012
Demanda química de oxígeno (mg DQO/L)	2347.5	±	0.334

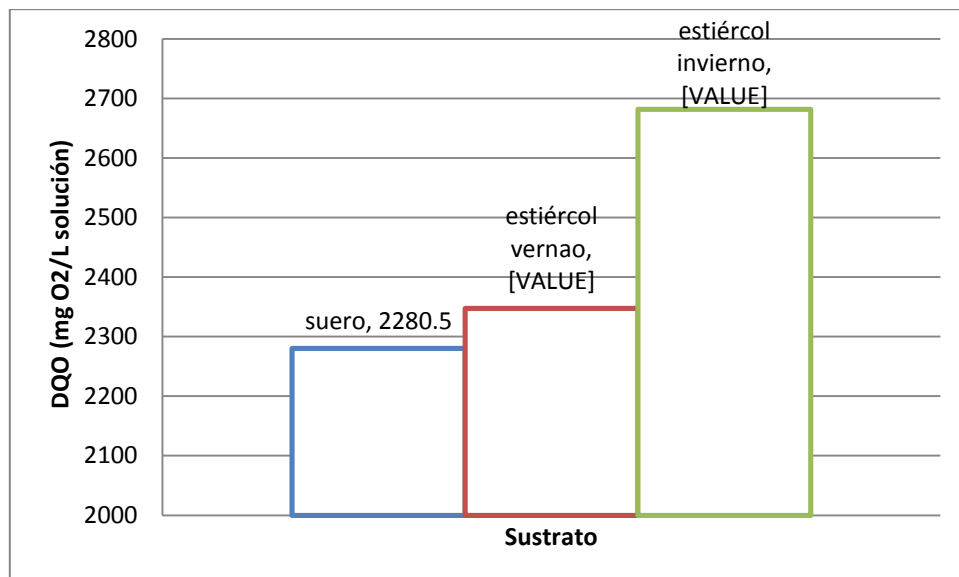
Tabla 35: Demanda química de oxígeno y potencial de metano para el estiércol obtenido en época de invierno. Muestra del 7 de agosto de 2013.

Potencial de metano (m ³ metano/g sólidos totales)	0.0002046	±	0.000006
Demanda química de oxígeno (mg DQO/L)	2681.5	±	0.345

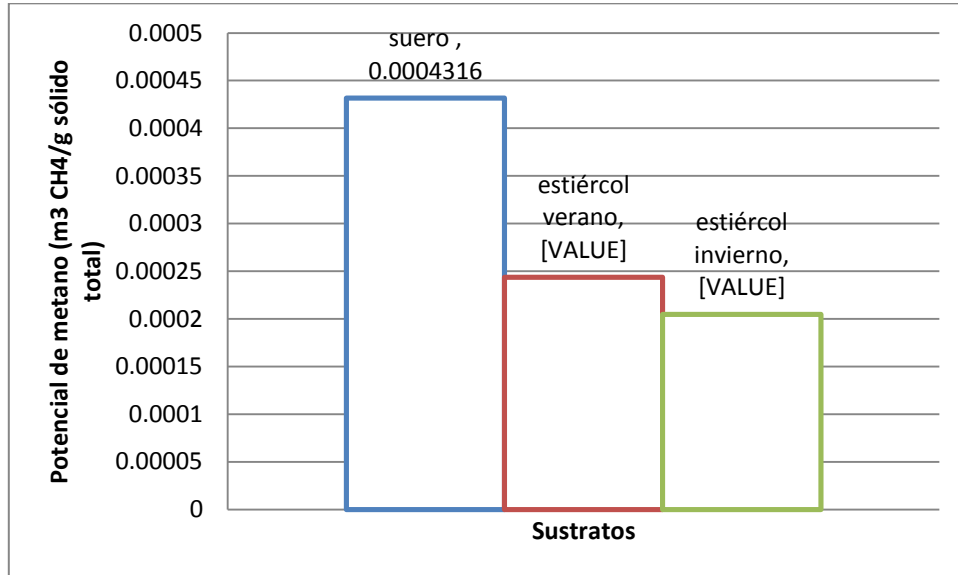
Tabla 36: Demanda Química de Oxígeno y potencial de metano para el suero de leche de búfalo. Muestra del 24 de mayo de 2013.

Potencial de metano (m ³ metano/g sólidos totales)	0.0004316	±	0.000063
Demanda química de oxígeno (mg DQO/L)	2280.5	±	0.456

Gráfica 6: Demanda química de oxígeno para los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Gráfica 7: Potencial de metano calculado para los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Gráfica 8: Curva de calibración utilizada para la determinación de la demanda química de oxígeno del estiércol en época de verano e invierno y del suero de leche de búfalo.

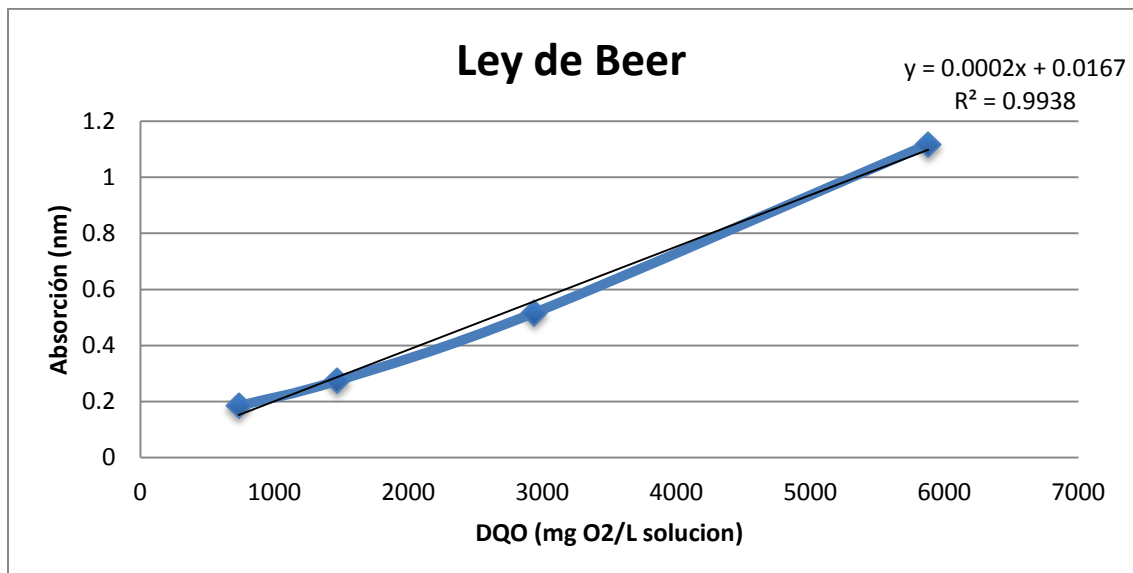


Tabla 37: Demanda bioquímica de oxígeno de estiércol obtenido en época de invierno.

Muestra del 7 de agosto de 2013.

DBO (mg O ₂ /L)		
1992	±	0.0439

Tabla 38: Demanda bioquímica de oxígeno de suero de leche de búfalo.

Muestra del 7 de agosto de 2013.

DBO (mg O ₂ /L)		
2091.00	±	0.0464

Gráfica 9: Demanda bioquímica de oxígeno para el suero de leche de búfalo y el estiércol de búfalo.

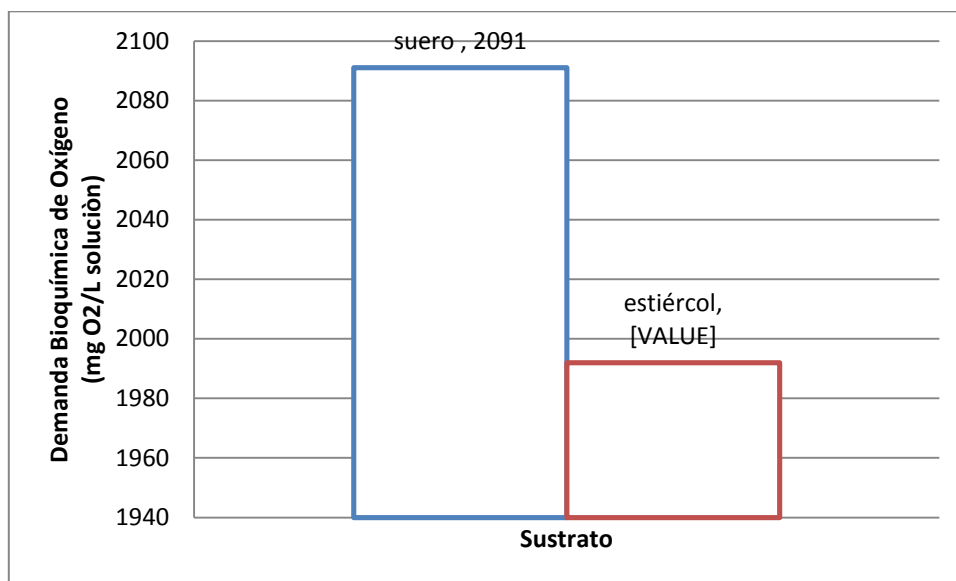


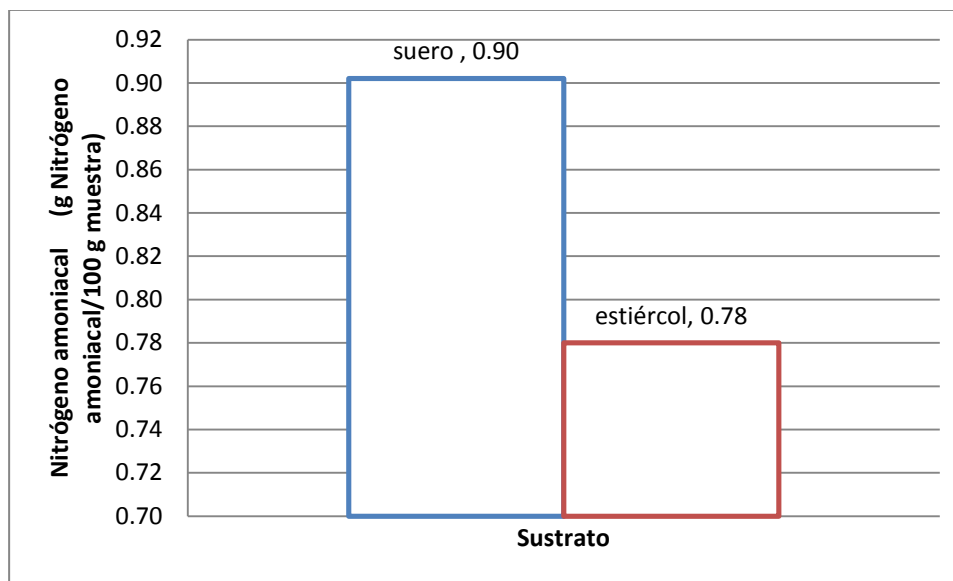
Tabla 39: Promedio de Nitrógeno amoniacal y proteínas para las muestras en duplicado de estiércol de búfalo obtenida en época de invierno. Muestra del 7 de agosto de 2013.

N amoniacal	0.78	±	0.04	g N amoniacal/100 g muestra
% proteínas	4.87	±	0.23	% proteínas
% grasa	16.25	±	1.77	%
%carbohidratos	59.27	±	1.79	%

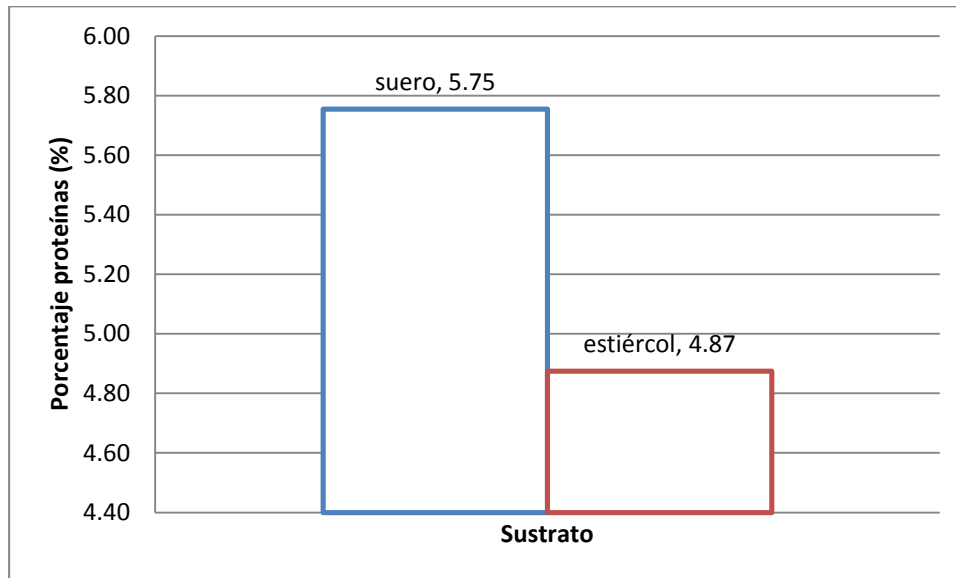
Tabla 40: Promedio de Nitrógeno amoniacal y proteínas para las muestras en duplicado de suero de leche de búfalo. Muestra del 7 de agosto de 2013.

N amoniacal	0.90	±	0.11	g N amoniacal/100 g muestra
% proteínas	5.75	±	0.70	% proteínas
% grasa	11.89	±	1.53	%
%carbohidratos	74.42	±	2.07	%

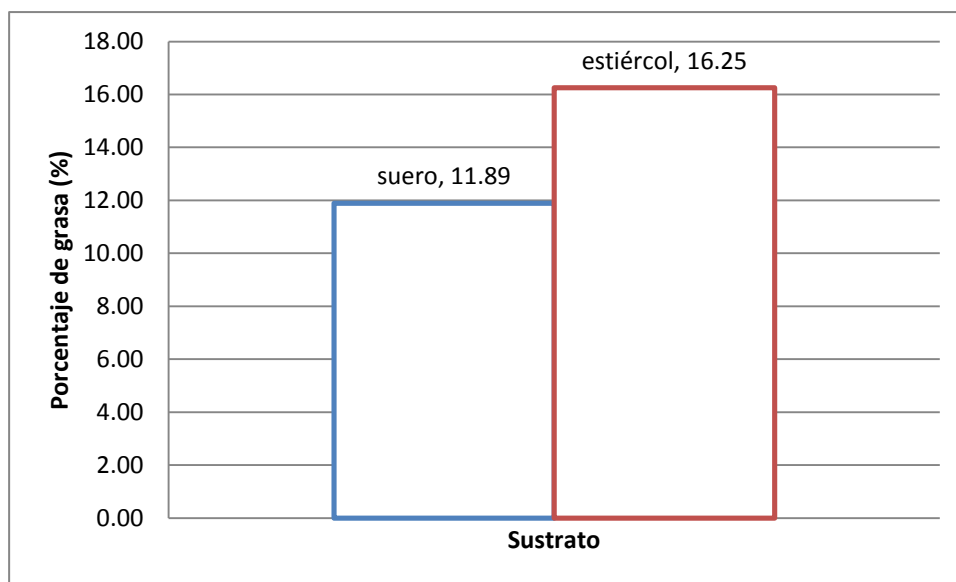
Gráfica 10: Promedio del Nitrógeno amoniacal para los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



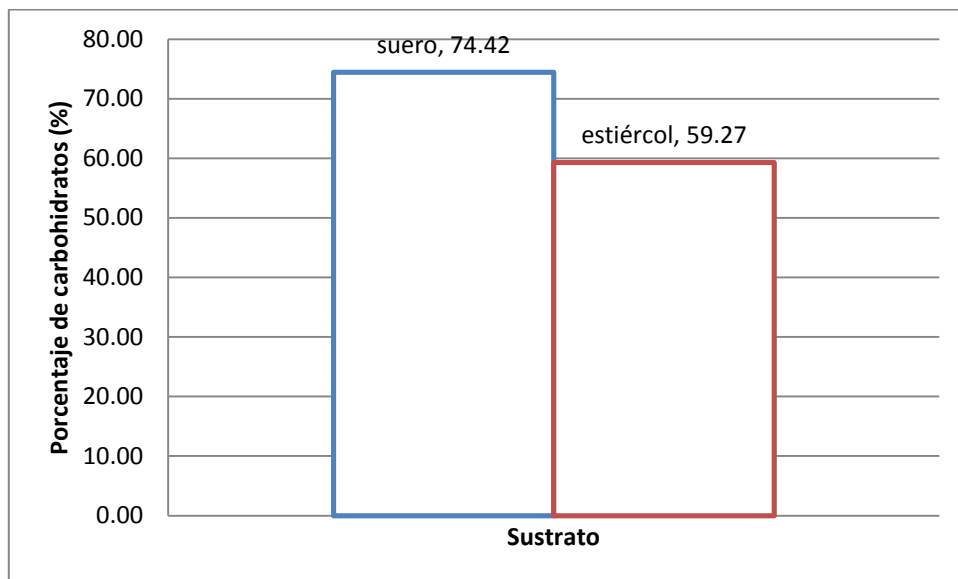
Gráfica 11: Promedio del porcentaje de proteínas calculado para los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Gráfica 12: Promedio del porcentaje de grasa calculado para los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo

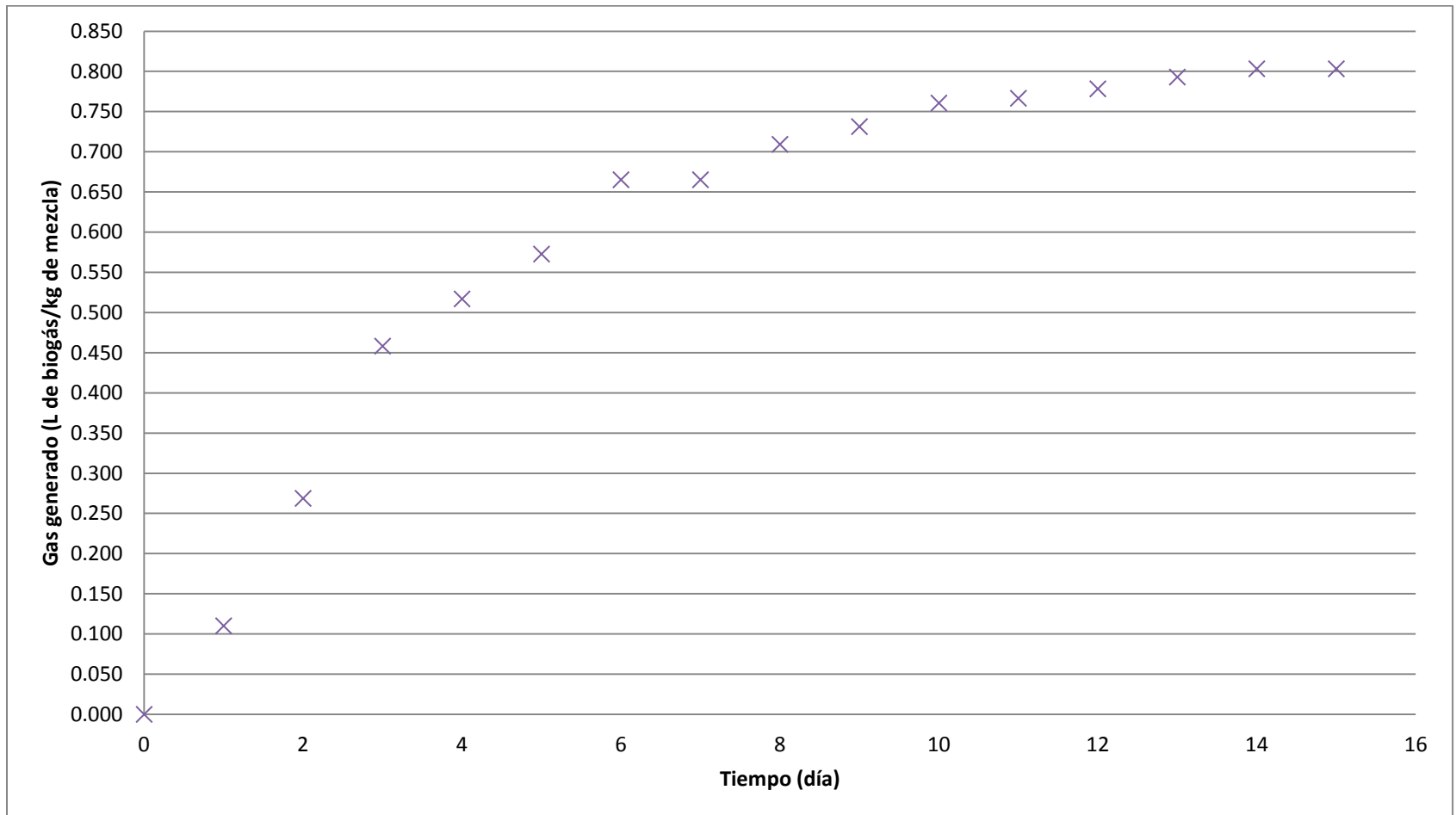


Gráfica 13: Promedio del porcentaje de carbohidratos calculado para los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo

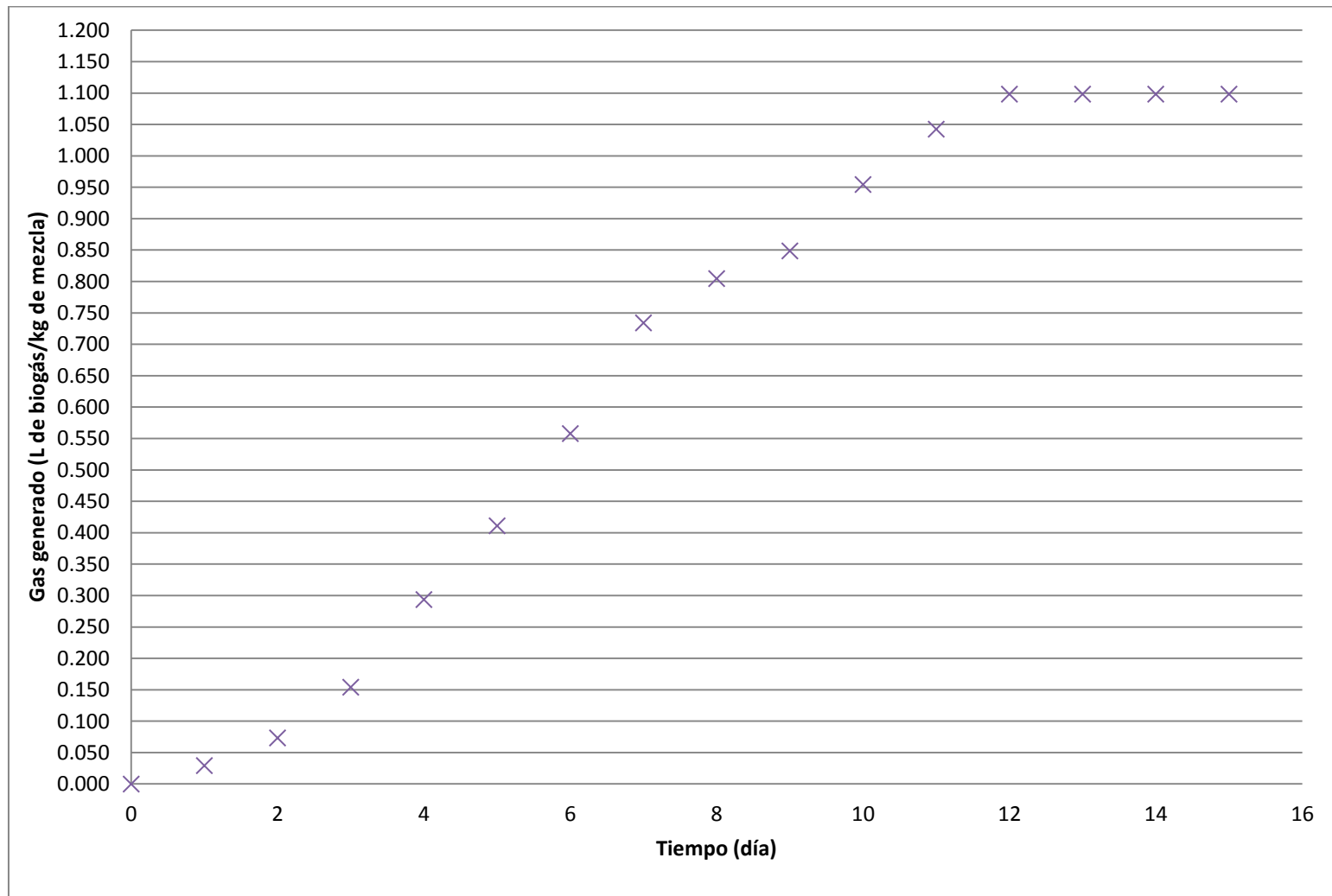


B. Resultados Módulo “Utilización de suero láctico en el biodigestor”

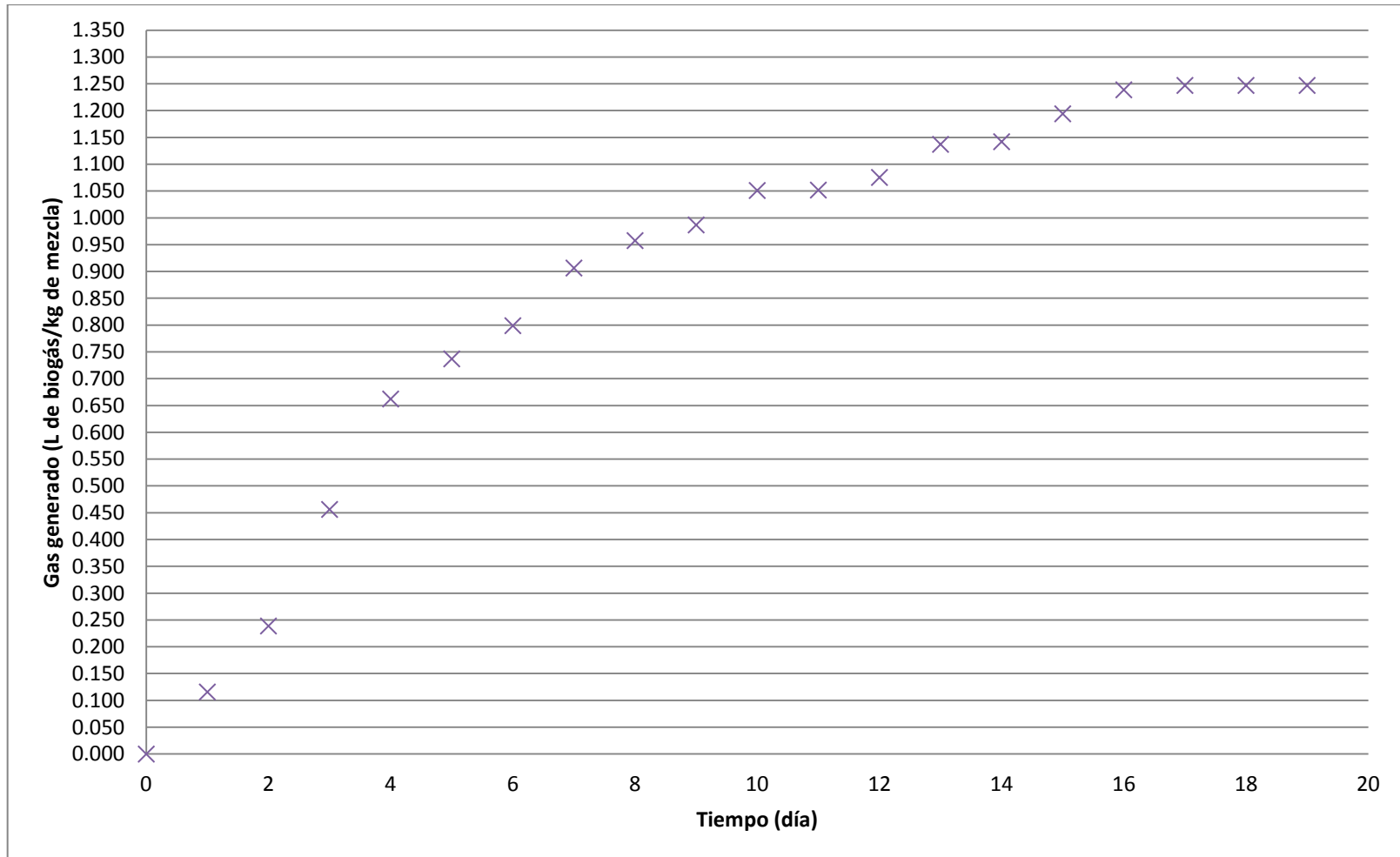
Gráfica 14: Razón de generación de biogás obtenida trabajando con una proporción de 80% de mezcla (50% agua y 50% estiércol m/m) y 20% de suero láctico (porcentaje en masa). Valores promedio calculados en base a los resultados obtenidos en las tres pruebas realizadas con esta proporción.



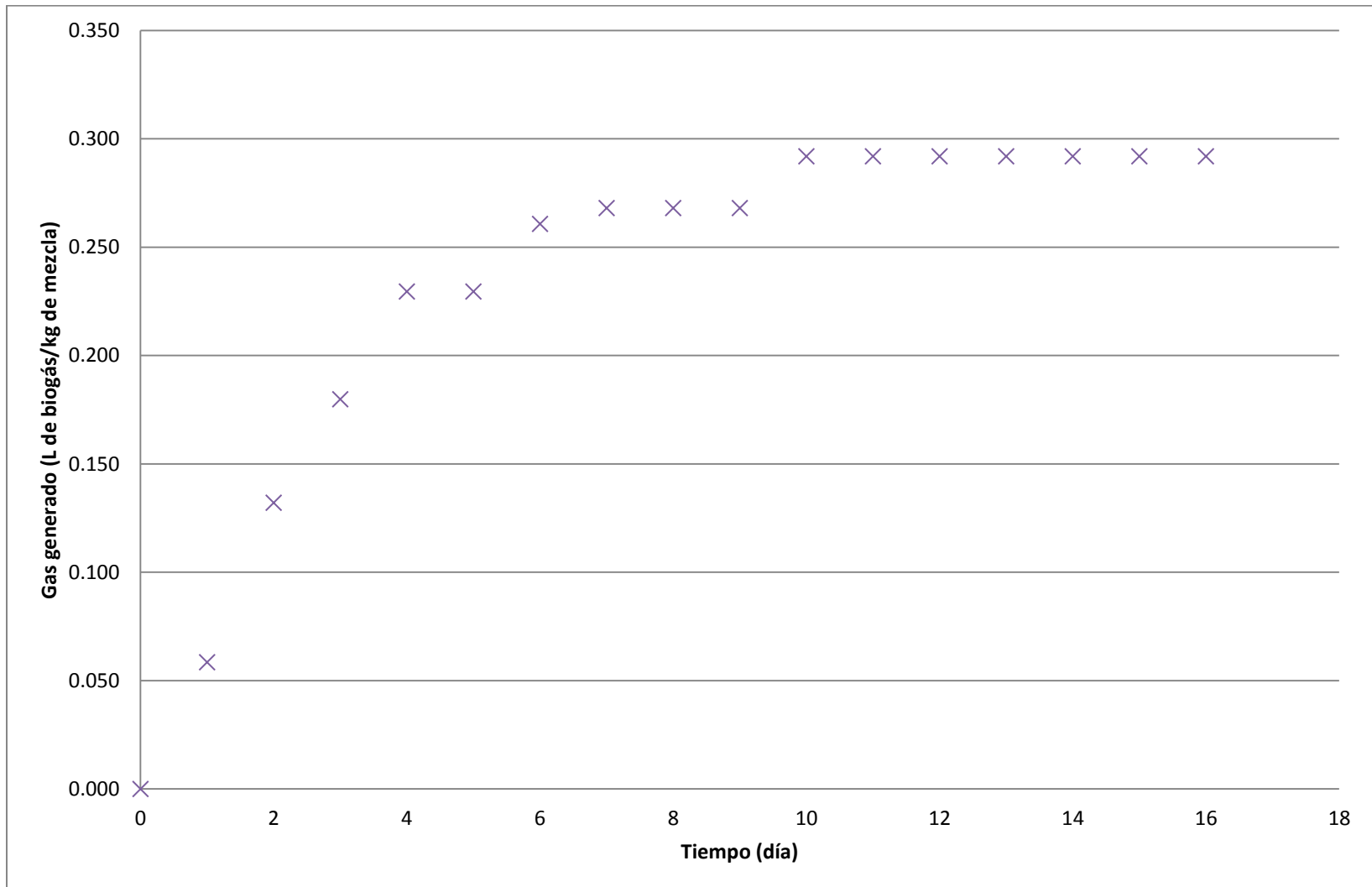
Gráfica 15: Razón de generación de biogás obtenida trabajando con una proporción de 75% de mezcla (50% agua y 50% estiércol m/m) y 25% de suero láctico (porcentaje en masa). Valores promedio calculados en base a los resultados obtenidos en las tres pruebas realizadas con esta proporción.



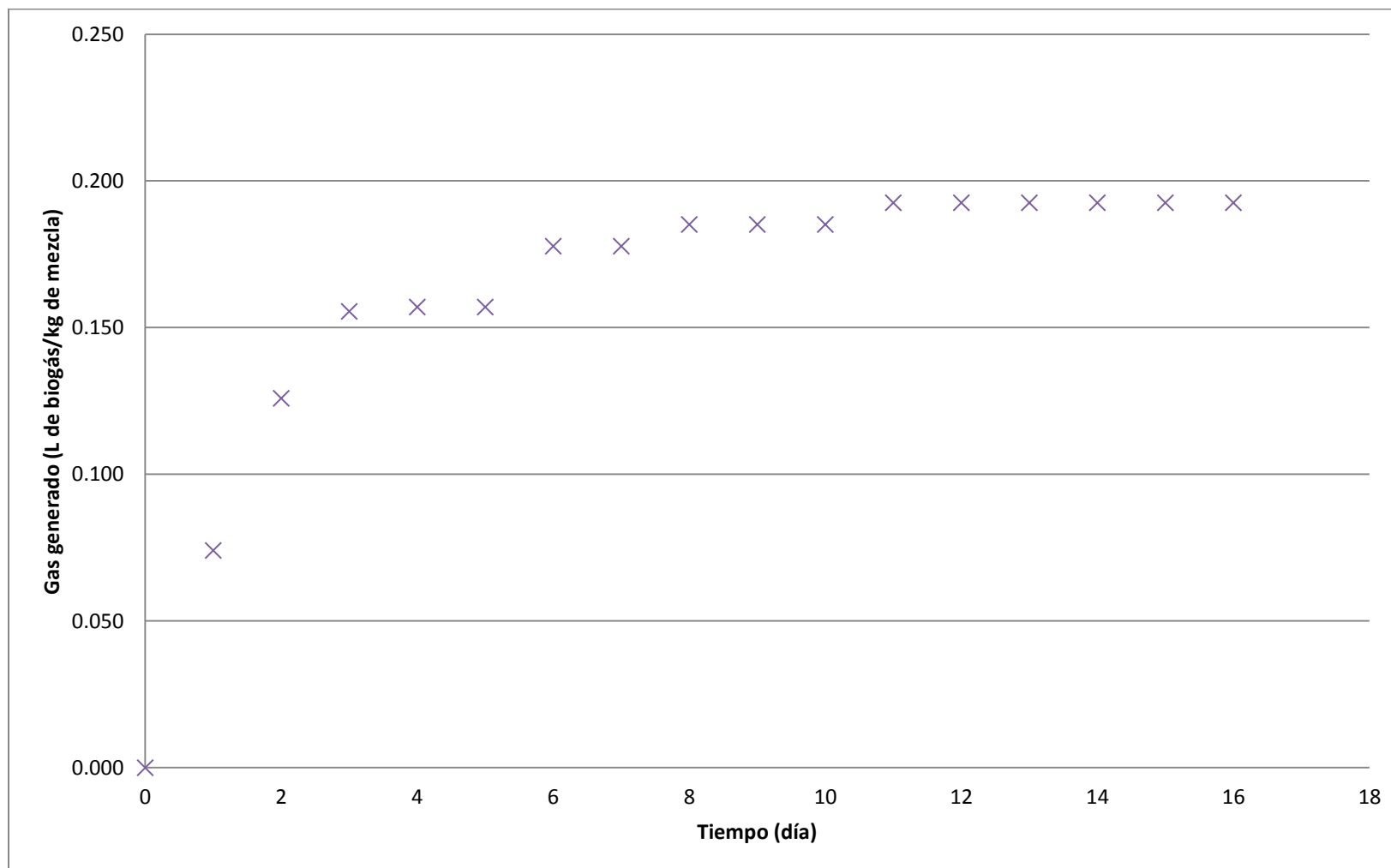
Gráfica 16: Razón de generación de biogás obtenida trabajando con una proporción de 66% de mezcla (50% agua y 50% estiércol m/m) y 34% de suero láctico (porcentaje en masa). Valores promedio calculados en base a los resultados obtenidos en las tres pruebas realizadas con esta proporción.



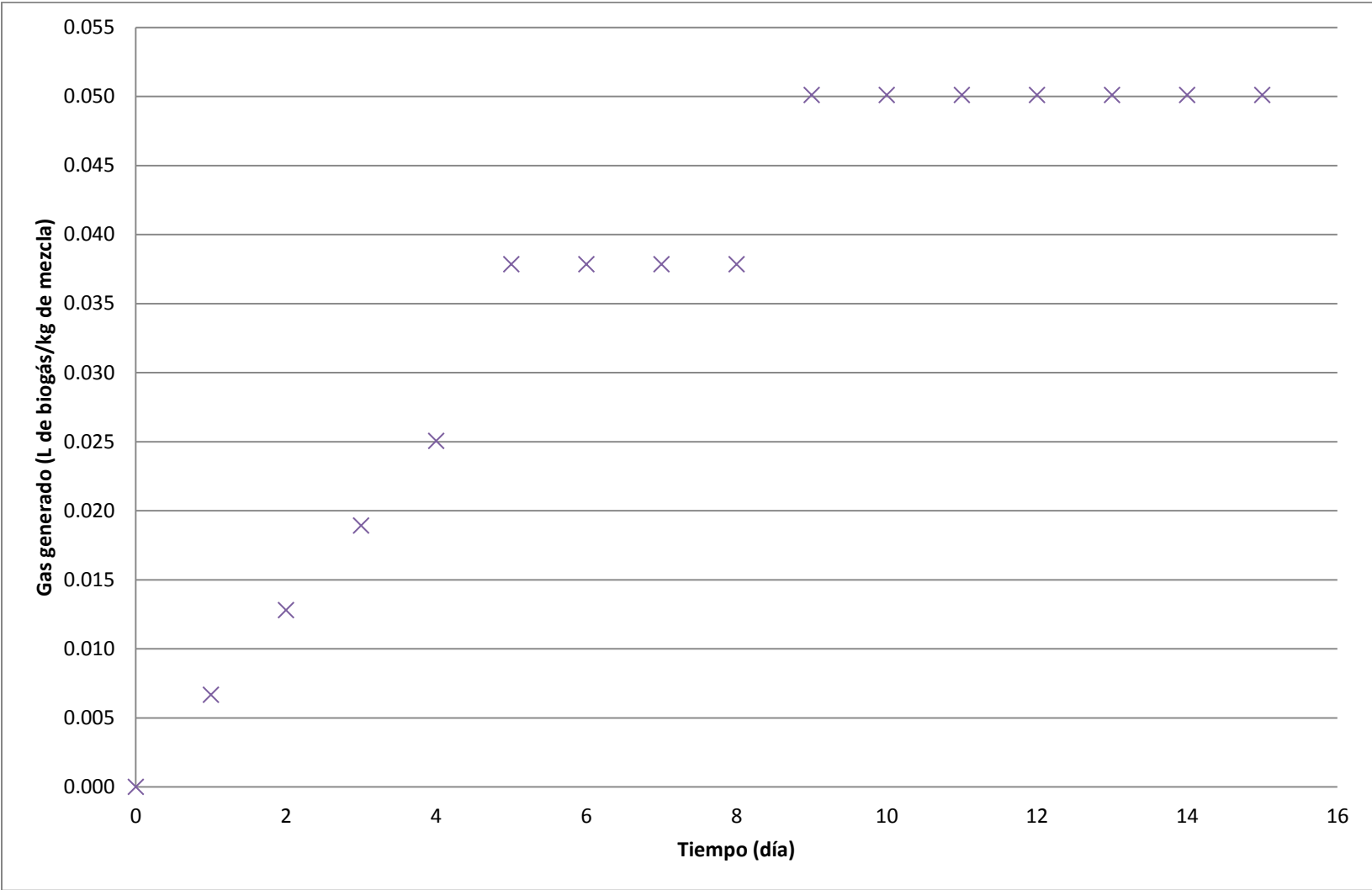
Gráfica 17: Razón de generación de biogás obtenida trabajando con una proporción de 50% de mezcla (50% agua y 50% estiércol m/m) y 50% de suero láctico (porcentaje en masa). Valores promedio calculados en base a los resultados obtenidos en las tres pruebas realizadas con esta proporción.



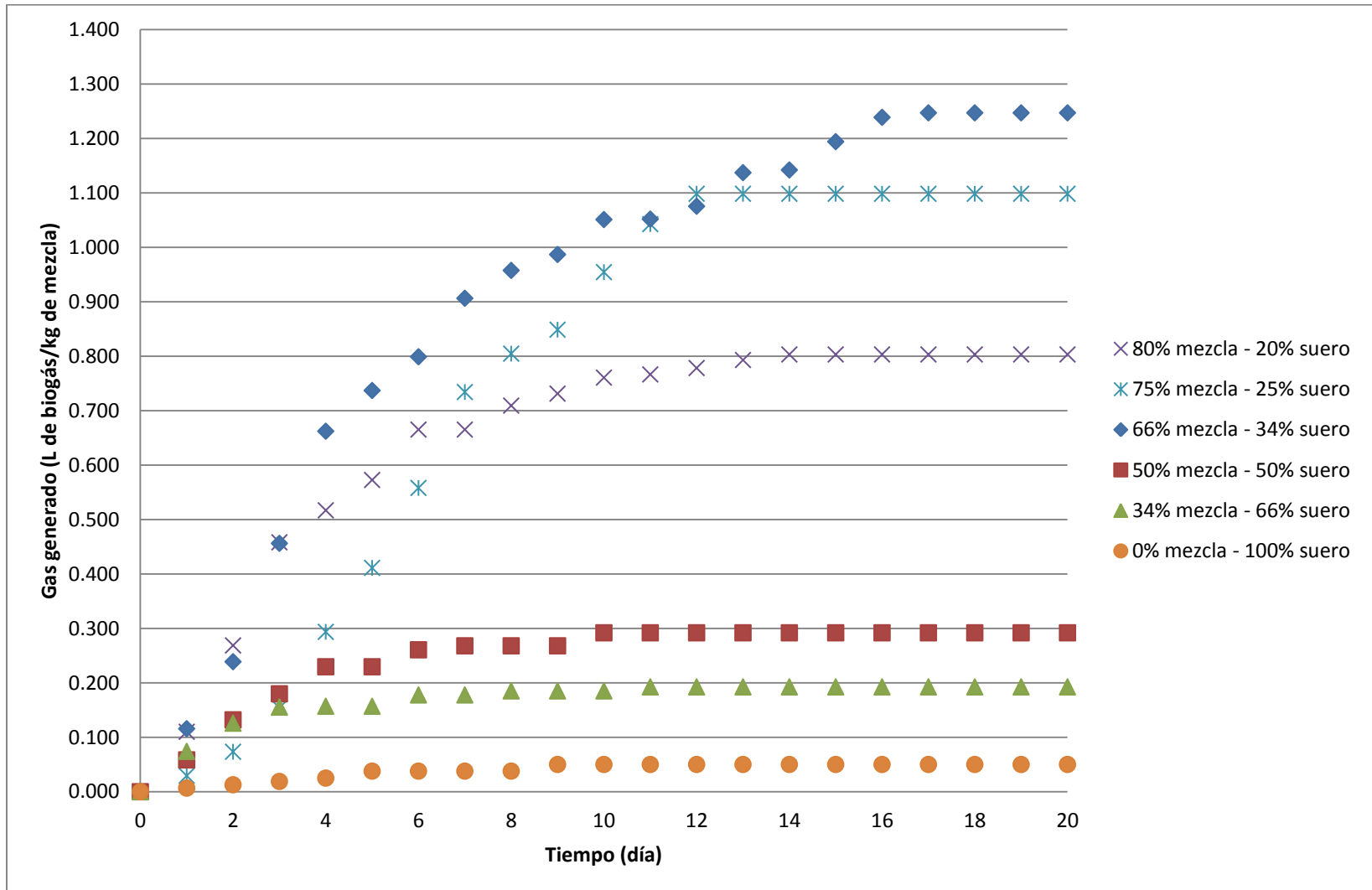
Gráfica 18: Razón de generación de biogás obtenida trabajando con una proporción de 34% de mezcla (50% agua y 50% estiércol m/m) y 66% de suero láctico (porcentaje en masa). Valores promedio calculados en base a los resultados obtenidos en las tres pruebas realizadas con esta proporción.



Gráfica 19: Razón de generación de biogás obtenida trabajando con 100% (m/m) de suero láctico en el biodigestor. Valores promedio calculados en base a los resultados obtenidos en las tres pruebas realizadas con esta proporción.



Gráfica 20: Razón de biogás logrado con las diferentes formulaciones de suero láctico trabajadas en los biodigestor de prueba



Gráfica 21: Razón de biogás obtenida trabajando con un sistema alimentado intermitentemente con 10g de suero láctico, a un biodigestor con 200g de la mezcla de agua y estiércol (50%- 50% m/m)

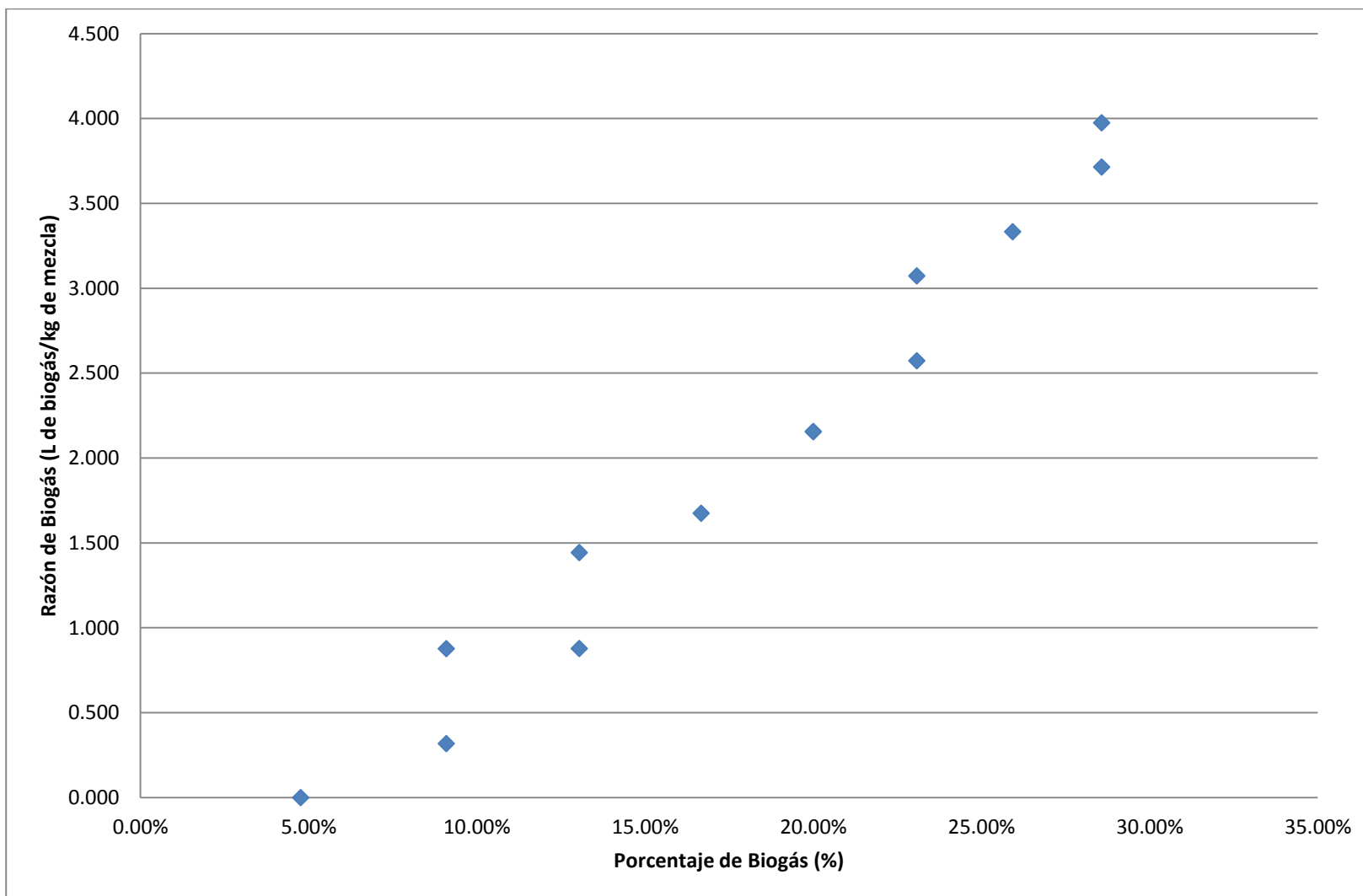


Tabla 41: Porcentaje de metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico determinado con cromatografía de gases en las pruebas analizadas al biogás generado trabajando con los biodigestores batch

Porcentaje de suero utilizado (%)	Porcentaje de metano (%)	Porcentaje de dióxido de carbono (%)	Porcentaje de ácido sulfhídrico (%)	Tiempo en el que se realizó la medición (días)
50.00±0.03	0.18	12.88	50.76	15
66.00±0.03	0.32	83.17	8.55	15

Tabla 42: Porcentaje de metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico determinado con cromatografía de gases en las pruebas analizadas al biogás generado trabajando con el biodigestor con alimentación intermitente

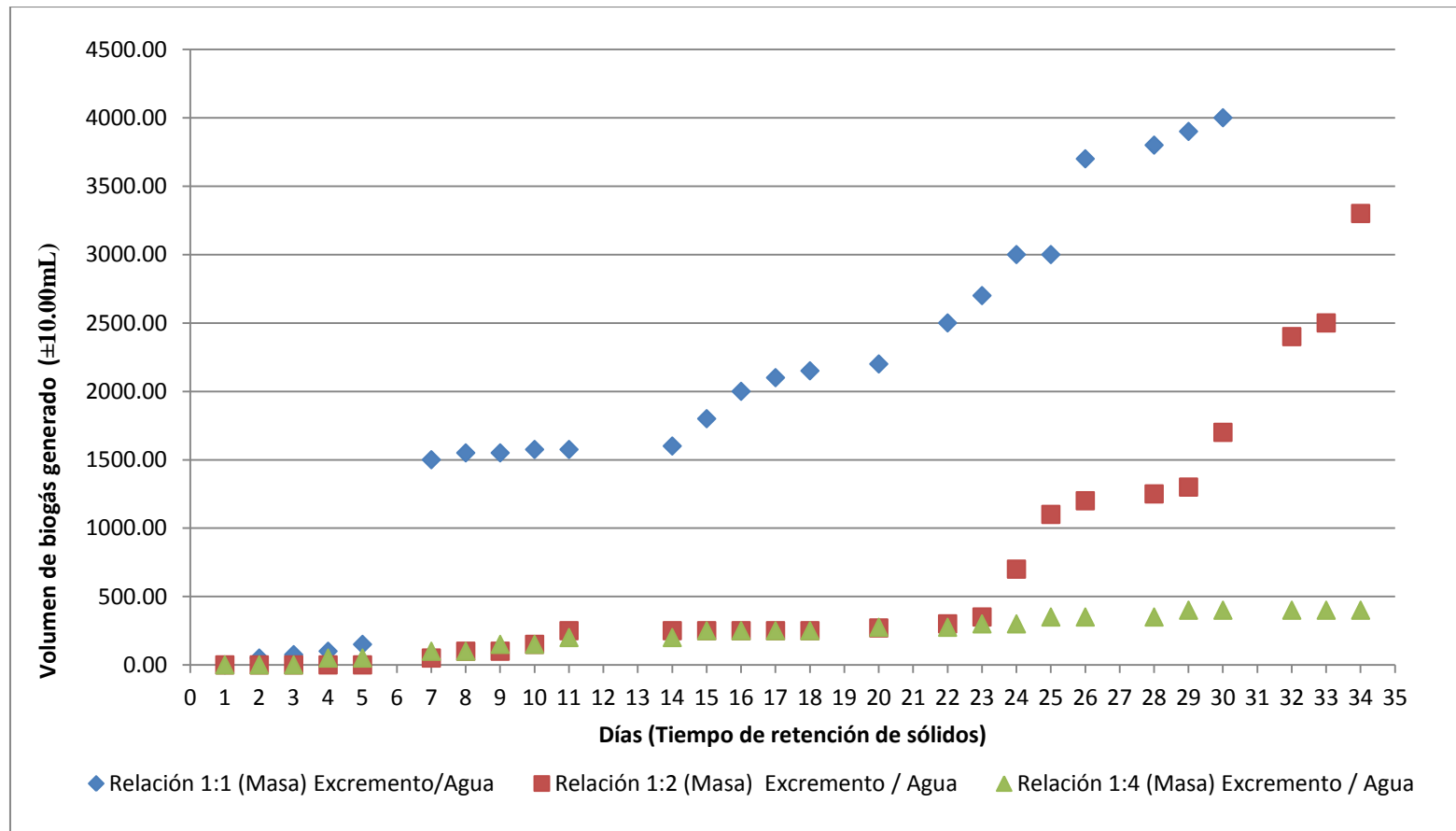
Porcentaje de suero utilizado (%)	Porcentaje de metano (%)	Porcentaje de dióxido de carbono (%)	Porcentaje de ácido sulfhídrico (%)	Tiempo en el que se realizó la medición (días)
9.09±6.47x10 ⁻⁵	35.27	14.44	50.29	4
13.04±7.61x10 ⁻⁵	6.01	86.83	7.15	7
20.00±9.16x10 ⁻⁵	0.296	40.17	59.53	10
25.93±9.42x10 ⁻⁵	0.380	94.38	5.24	12

Tabla 43: Balance de masa realizado para todas las relaciones excremento agua todas a 35.00°C siendo la mejor la relación 1:1 de excremento (búfalo)/agua con 30 días tiempo de retención de sólidos. Muestra la mejor producción de biogás.

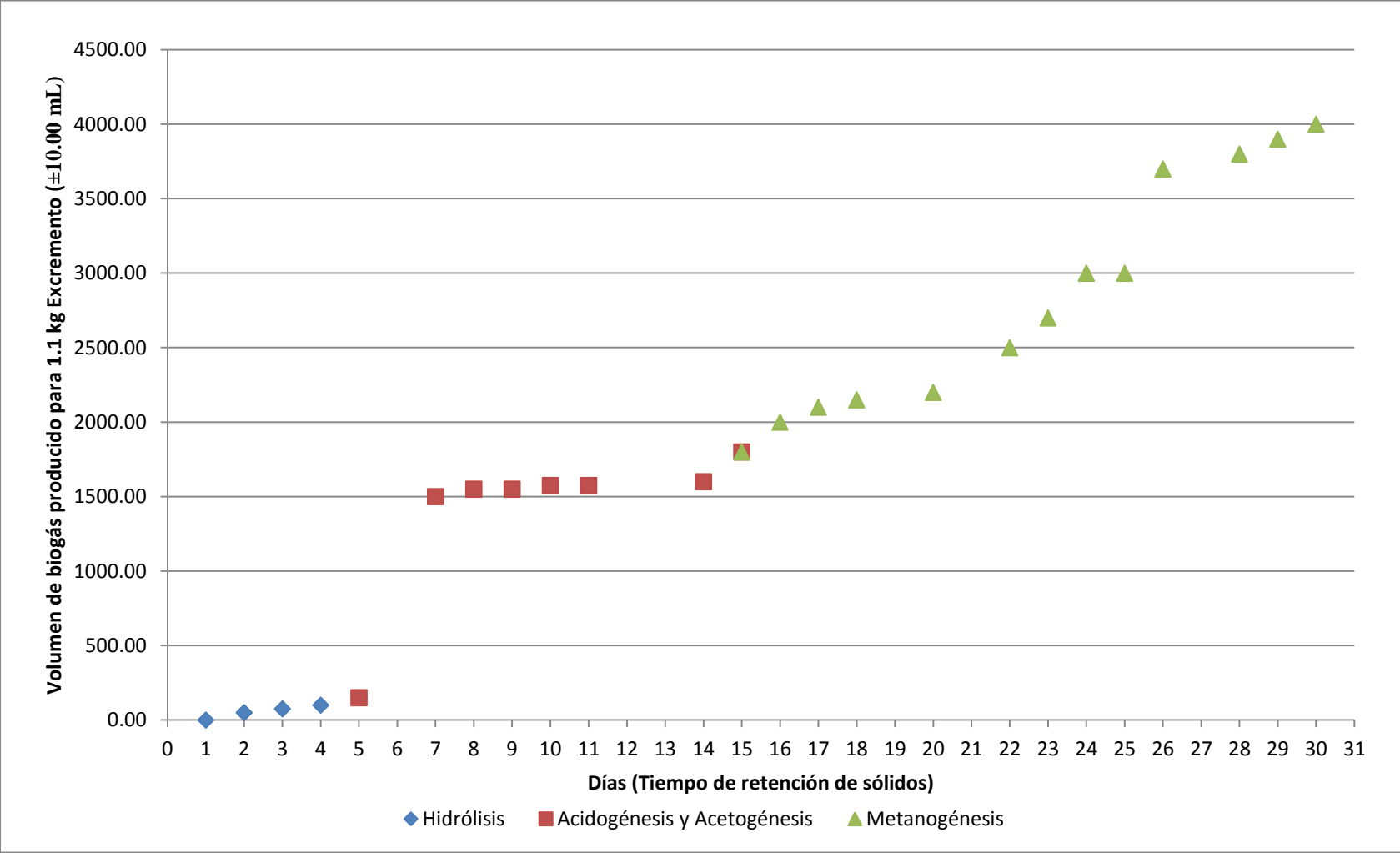
	Relación 1:1	Relación 2:1	Relación 4:1
Entrada de agua	1.1 ±0.02 kg	0.7 ±0.02 kg	0.5 ±0.02 kg
Entrada de excremento	1.1 ±0.02 kg	1.5 ±0.02 kg	2 ±0.02 kg
Acumulación de biogás (producción)	3.98 ± 1.1 kg	3.29 ± 1.1 kg	0.50 ± 1.1 kg
Entradas totales	6.18 ±0.39 kg	5.49 ±0.39 kg	3.00 ±0.39 kg
Salida de mezcla (excremento de búfalo con agua)	2.00 ±0.03 kg	2.00 ±0.03 kg	2.30 ±0.03 kg
Salida del biogás producido	3.98 ± 1.1 kg	3.29 ± 1.1 kg	0.50 ± 1.1 kg
Salidas Totales	5.98 ±0.39 kg	5.29 ±0.39 kg	2.80 ±0.39 kg

C. Resultados Módulo “Condiciones de operación”

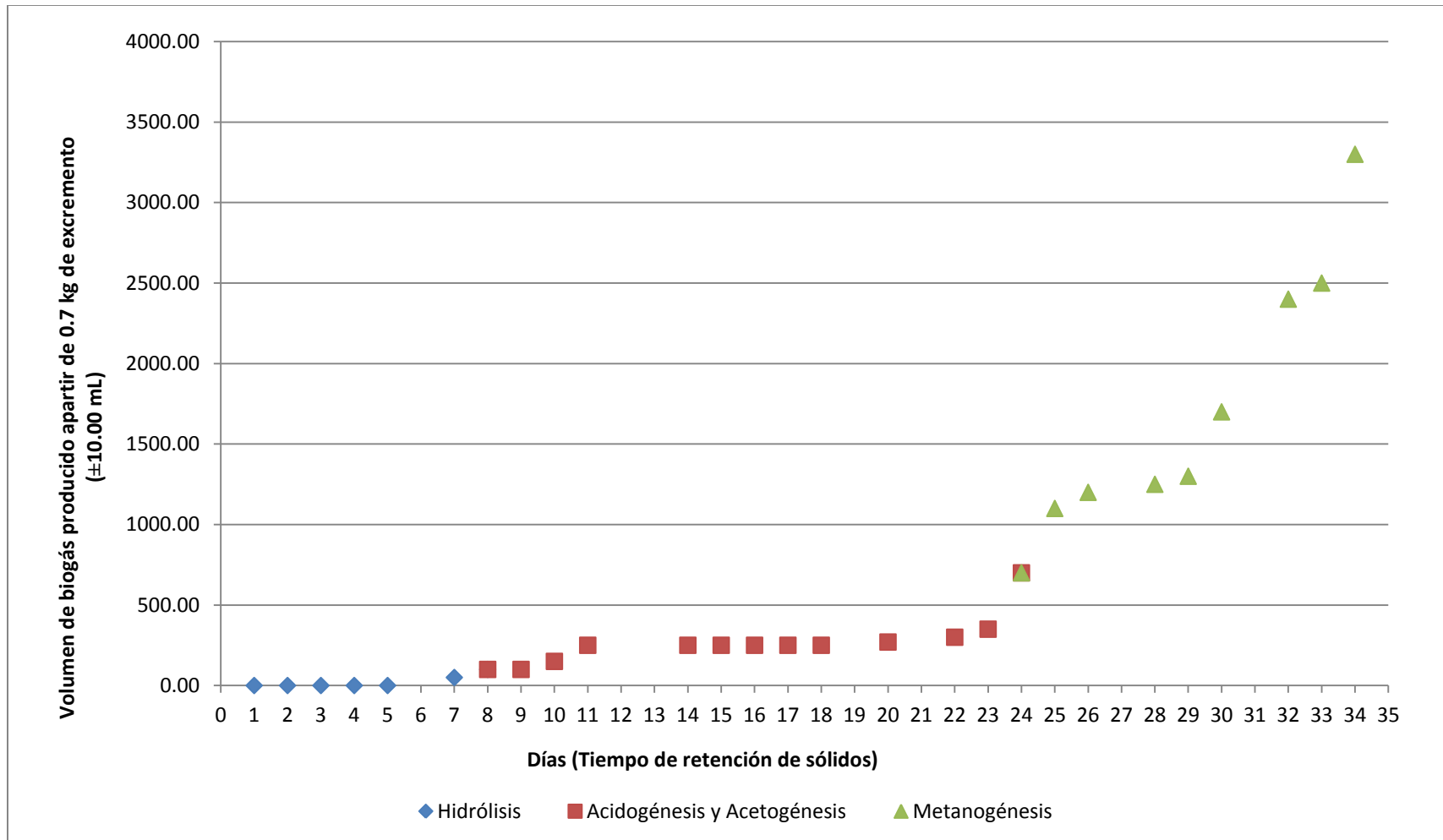
Gráfica 22: Comparación del comportamiento de producción de biogás a $35.00 \pm 0.01^\circ\text{C}$, utilizando tres relaciones distintas de excremento de búfalo con agua



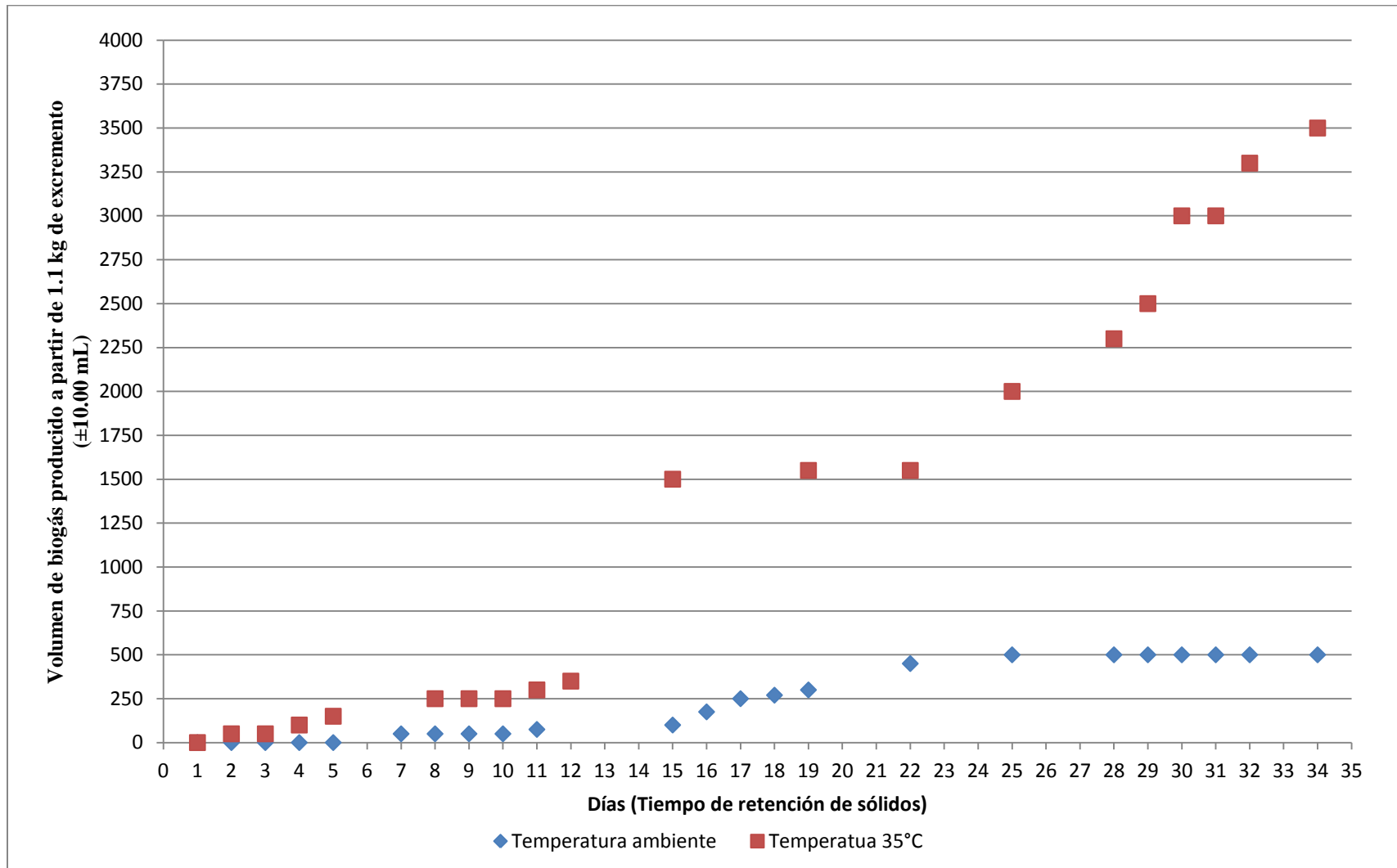
Gráfica 23: Producción de biogás con una relación excremento (búfalo)/agua (1:1) a una temperatura de 35.00±0.01°C indicando las etapas de producción de generación de biogás.



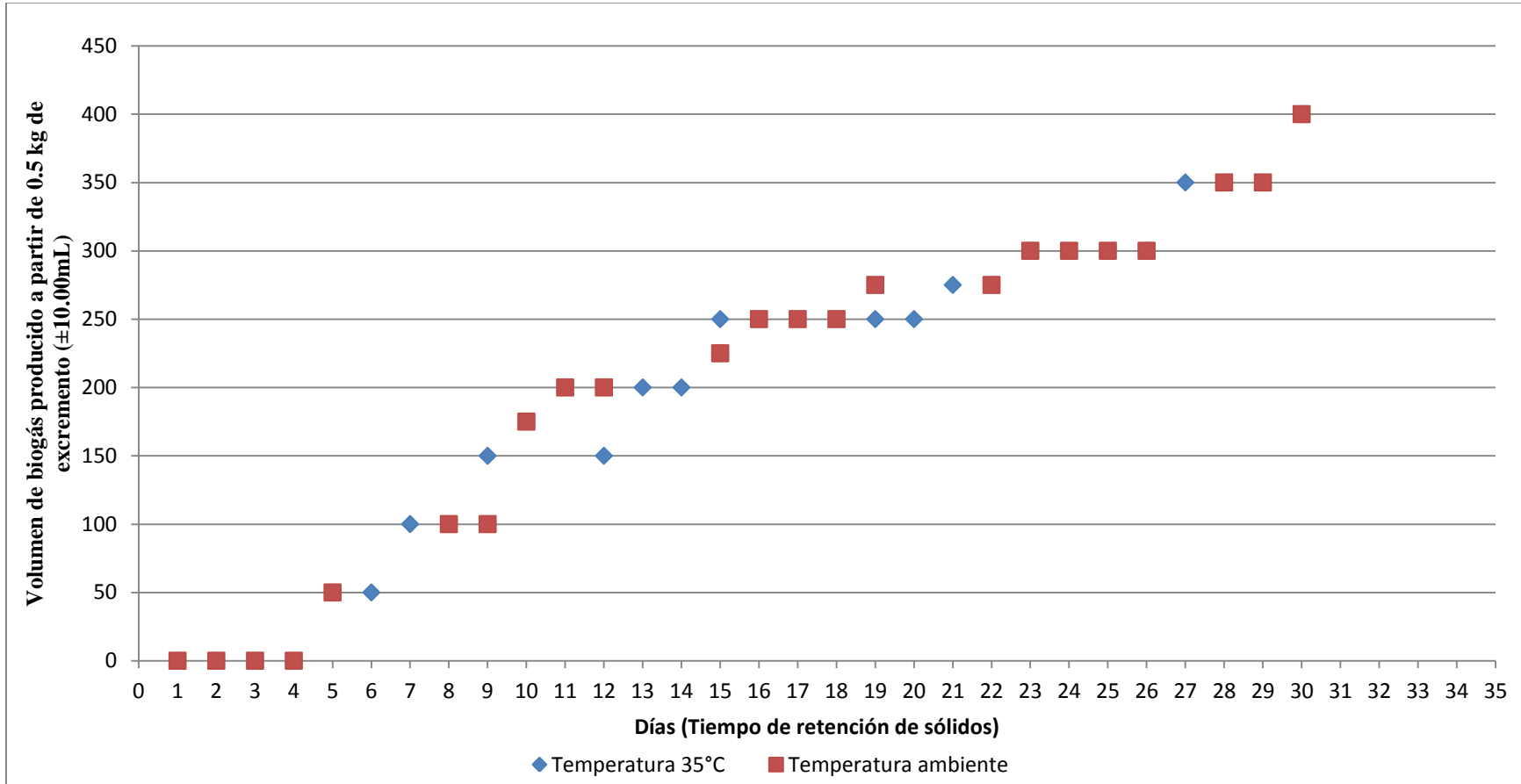
Gráfica 24: Producción de biogás con una relación de excremento (búfalo)/agua (2:1) a una temperatura de $35.00 \pm 0.01^\circ\text{C}$ observando el comportamiento de la producción de biogás.



Gráfica 25: Comparación de producción de biogás con relación 1:1 utilizando 1.1 kg de excremento a temperatura, 35.00°C y temperatura ambiente (20-25°C)



Gráfica 26: Comparación de la producción de biogás con relación 4:1 en masa a partir de 0.5 kg de excremento a temperatura, 35.00°C y temperatura ambiente (20-25°C).



D. Resultado Módulo “Diseño de biodigestor”

Tabla 44: Bases de diseño.

Temperatura ambiente (K)	303.15
Generación (kg CH ₄ /L mezcla)	0.290
SRT (días)	30
Estiércol disponible (kg/día)	4,840
Composición biogás (%m)	CH ₄ :0.46, CO ₂ : 0.51, H ₂ S: 0.03
Espacio disponible	35m * 100m

Tabla 45: Balance de masa y dimensionamiento del biodigestor de acuerdo al espacio disponible.

Alimentación	42,158.65	kg/día	42.31	m ³ /día
Estiércol	21,079.32	kg/día	21.24	m ³ /día
Agua	21,079.32	kg/día	21.08	m ³ /día
Biogás	13,294.35	kg/día	10,586.58	m ³ /día
Efluente	28,864.29	kg/día		
Volumen del biodigestor			1,586.77	m ³

Tabla 46: Balance de masa y dimensionamiento del biodigestor de acuerdo a la materia prima.

Alimentación	9,680.00	kg/día	9.72	m ³ /día
Estiércol	4,840.00	kg/día	4.88	m ³ /día
Agua	4,840.00	kg/día	4.84	m ³ /día
Biogás	3,052.50	kg/día	2,430.77	m ³ /día
Efluente	6,627.50	kg/día		
Volumen del biodigestor			364.34	m ³

Tabla 47: Balance de masa y dimensionamiento de biodigestor de acuerdo a la fabricación de compost.

Alimentación	4,085.56	kg/día	4.10	m ³ /día
Estiércol	2,042.78	kg/día	2.06	m ³ /día
Agua	2,042.78	kg/día	2.04	m ³ /día
Biogás	1,288.35	kg/día	1,025.94	m ³ /día
Efluente	2,797.22	kg/día		
Volumen del biodigestor			153.77	m ³
Estiércol para compost	2,797.22	kg/día		

Tabla 48: Balance de masa y dimensionamiento de biodigestor de acuerdo al uso.

Alimentación	2,050.87	kg/día	2.06	m3/día
Estiércol	1,025.43	kg/día	1.033	m3/día
Agua	1,025.43	kg/día	1.025	m3/día
Biogás	646.72	kg/día	515.00	m3/día
Efluente	1,404.15	kg/día		
Volumen del biodigestor			77.19	m3

E. Resultados Módulo “Sistema de purificación y extracción de biogás”.

Tabla 49: Equipo a utilizar para la fabricación del sistema de purificación y extracción.

	Cantidad	
Tubería	72 metros	25 mm (1") Cat. 40 PVC 160
Válvulas	4	Valvula de Bola de 25mm (1") PVC
Codo	11	25 mm (1") 90° Cat. 40 PVC
Reductor	1	25 mm a 13 mm (1" a 1/2") cat. 40 PVC
Separador de Flujo T	1	25 mm (1") Cat. 40 PVC 160
Desulfurizador	1	PX-25L Puxin®
Compresor	1	Kaeser SX5
Uniones Universales	12	25 mm (12) Cat. 40 PVC 160

Tabla 50: Especificaciones de la tubería y accesorios.

Diámetro de tubería	25mm (1")
Material	PVC
Catálogo	40
Presión	1,103 kPa (160 psi)
Temperatura Max de operación	80 °C

Tabla 51: Especificaciones de Compresor Kaeser® SX5

Tipo	Tornillo
Modelo	SX5
Potencia	3.73 kW (5 hp)
Presión de operación	862-1,034 kPa (125-150 psig)
Capacidad	0.59 m ³ /min (21 ft ³ /min)

Tabla 52: Tipo y material de válvula de paso a utilizar.

Tipo de Válvula	Bola
Material	PVC
Diámetro	25mm (1 ")
Marca	EBM®
Modelo	EBV1215

Tabla 53: Especificaciones de desulfurizador Puxin® PX-25L.¹

Marca	Puxin®
Modelo	PX-25L
Cantidad de Óxido Férrico (Fe ₂ O ₃)	25 kg
Capacidad de Purificación	5000m ³ de biogás
Eficiencia	90%

Tabla 54: Concentración final del H₂S luego de pasar por el desulfurizador PX-25L Puxin®.

Filtro desulfurizador	
Volumen de biogás (m ³)	24.00
Cantidad de H ₂ S inicial (kg)	0.653
Eficiencia	90.00%
Cantidad de H ₂ S final (kg)	0.065
Cantidad de H ₂ S final (ppm)	2.72

Tabla 55: Costo de la inversión sistema de purificación y extracción de biogás.^{2,3}

	Precio unitario	Cantidad	Costo
Tubería 25 mm (1") PVC 160 Cat.40 (Q/m)	Q9.30	72	Q669.60
Válvula de Bola 25mm (1") PVC 160 Cat. 40	Q20.00	4	Q80.00
Reductor de 25mm a 13mm (1" a 1/2")	Q2.85	1	Q2.85
Tubería 13mm (1/2") PVC 315 Cat. 40 (Q/m)	Q5.50	1	Q5.50
Codo Estándar 90° de 25mm (1") PVC 160 Cat. 40	Q6.50	11	Q71.50
T de 25 mm (1") PVC 160 Cat.40	Q5.50	1	Q5.50
Uniones Universales 25 mm (1") PVC 160 Cat. 40	Q3.00	12	Q36.00
Compresor Kaeser® SX5	Q64,000.00	1	Q64,000.00
Desulfurizador PX-25L Puxin®	Q4,200.00	1	Q4,200.00
		Total	Q69,070.95

²No incluye el costo de instalación.³Precios obtenidos personalmente a través de ferretería local.

F. Resultados Módulo “Usos de biogás”.

Tabla 56: Gasto mensual energético de finca Rama Blanca.

Fuente	Consumo	Rubro	Precio Unitario (Q.)	Total
Gas LPG	4	Tambos 25 lb.	130.00	520.00
Combustible Diesel	2640	Gal/mes	31.21	82,394.40
Energía Eléctrica	16254.00	kWh	2.57	41,772.78
Gasto mensual				GTQ124,687.18

Tabla 57: Impacto ambiental, emisión promedio de CO₂ mensual de finca Rama Blanca.

Fuente	Consumo	Unidades	Factor Emisión	Dimensión	kg CO ₂ generados
Gas LPG	45.36	Kg	2.96	kg CO ₂ / kg GLP	134.26
Combustible Diesel	9979.2	L	2.79	kg CO ₂ / L Diesel	27841.97
Energía Eléctrica	16254	kWh	0.267	kg CO ₂ / kWh	4339.82
Generación promedio de CO ₂ mensual					32316.05

Tabla 58: Demanda volumétrica de biogás para cubrir consumo energético actual.

Fuente	Consumo	Unidades	Eq. Energético (kcal)	Poder Cal. Biogás (kcal/m ³)	Eq. Biogás (m ³)
Electricidad	16254	kWh	13,985,266.68	5,300.00	2,638.73
Propano GLP	100	lb	2,272,727.27	5,300.00	428.82
Diesel	9.9792	m ³	102,785.76	5,300.00	13.58
Demanda mensual de biogás					3,081.12

Tabla 59: Diagramas de bloques para las diferentes metodologías analizadas.

Aplicación de biogás	Ver Anexo B
Combustión directa	Ilustración 51: Diagrama de bloques para sistema de combustión directa.
Cogeneración	Ilustración 52: Diagrama de bloques para el sistema de cogeneración
Generación de energía eléctrica	Ilustración 53: Diagrama de bloques para metodología de generación de EE.

Tabla 60: Requerimientos de la microturbina Capstone modelo C30⁴

Características del combustible		
Especificación	Rango permitido	Valor del biogás producido
Poder calorífico	12.1 - 32.1 MJ/h	22.32 MJ/h
Contenido de H ₂ S	< 70,000 ppm	5,000 ppm
Flujo	457 MJ/h	457 MJ/h
Presión de entrada	414 - 483 kPa	450 kPa

G. Resultados Módulo “Compostaje”

Tabla 61: Resultados de los análisis realizados para determinar la composición inicial de los residuos del biodigestor piloto

Nutrientes	
Ntotal (g/kg)	8.96
P Mehlich (mg/kg)	220.33
K (mg/kg)	626.25
Ca (mg/kg)	348.75
Mg (mg/kg)	157.50
Fe (mg/kg)	25.00
Cu (mg/kg)	0.90
Mn (mg/kg)	4.85
Zn (mg/kg)	4.65

Tabla 62: Resultados de los análisis realizados al compostaje final por medio del método de aireación y su porcentaje de cambio (aumento o disminución) con respecto al análisis inicial de los residuos del biodigestor

	Resultado análisis	Porcentaje de Cambio
Nutrientes		
N-total (g/kg)	2.59	-71%
P Mehlich (mg/kg)	1560	608%
K (mg/kg)	2010	221%
Ca (mg/kg)	2370	580%
Mg (mg/kg)	600	281%
Fe (mg/kg)	2800	11100%
Cu (mg/kg)	13.5	1400%
Mn (mg/kg)	159.5	3189%
Zn (mg/kg)	21	352%

⁴ Ver Ilustración 55: Ficha técnica – microturbina Capstone C30.

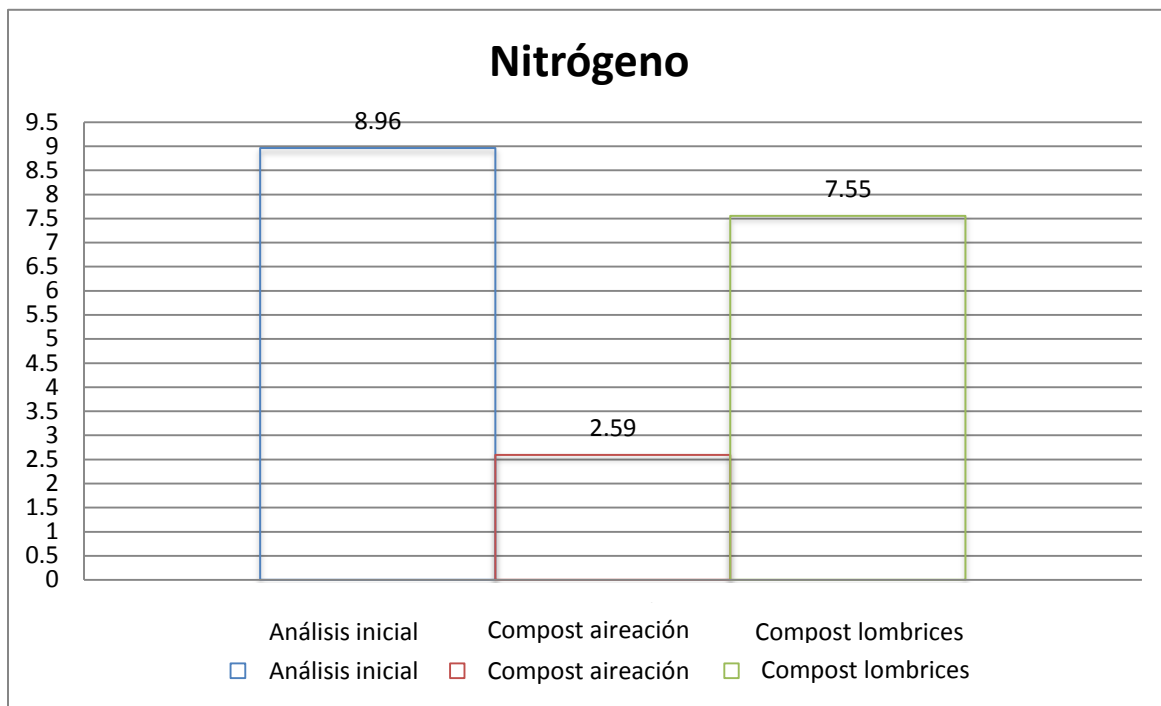
Tabla 63: Resultados de los análisis realizados al compostaje final por medio del método de lombricultura y su porcentaje de cambio (aumento o disminución) con respecto al análisis inicial de los residuos del biodigestor

	Resultado análisis	Porcentaje de cambio
Nutrientes		
N-total (g/kg)	7.55	-16%
P Mehlich (mg/kg)	1800	717%
K (mg/kg)	3090	393%
Ca (mg/kg)	6450	1749%
Mg (mg/kg)	1080	586%
Fe (mg/kg)	2950	11700%
Cu (mg/kg)	16.5	1733%
Mn (mg/kg)	164	3281%
Zn (mg/kg)	55.5	1094%

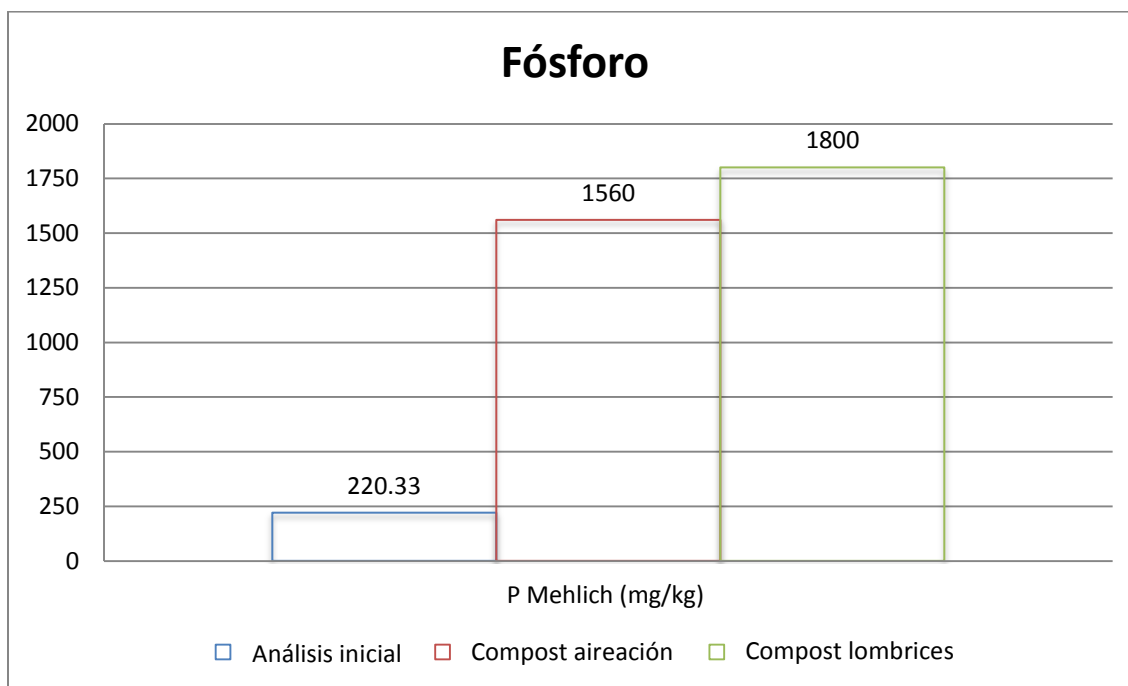
Tabla 64 Resumen de composición de nutrientes antes y después del compostaje

Nutrientes	Composición inicial	Composición compost aireación	Porcentaje de cambio	Composición compost lombricultura	Porcentaje de cambio
N total (g/kg)	8.96	2.59	-71%	7.55	-16%
P Mehlich (mg/kg)	220.33	1560	608%	1800	717%
K (mg/kg)	626.25	2010	221%	3090	393%
Ca (mg/kg)	348.75	2370	580%	6450	1749%
Mg (mg/kg)	157.5	600	281%	1080	586%
Fe (mg/kg)	25	2800	11100%	2950	11700%
Cu (mg/kg)	0.9	13.5	1400%	16.5	1733%
Mn (mg/kg)	4.85	159.5	3189%	164	3281%
Zn (mg/kg)	4.65	21	352%	55.5	1094%

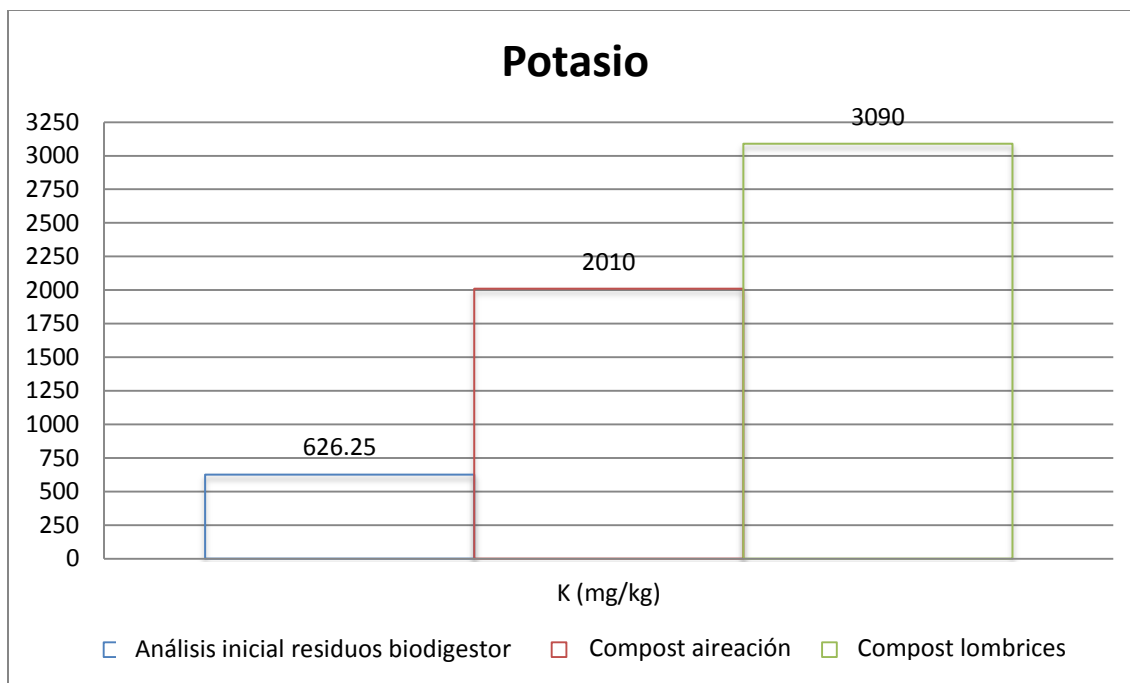
Gráfica 27: Comparación del nivel de nitrógeno entre el análisis de los residuos del biodigestor, los análisis del compost por aireación y el compost por lombricultura



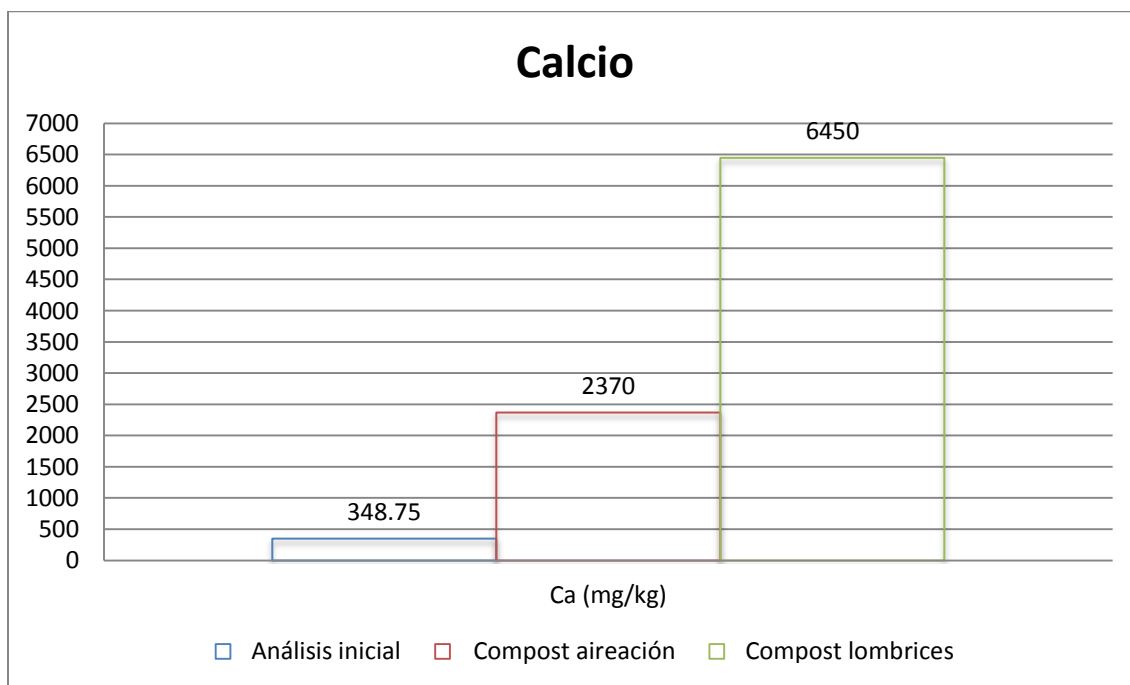
Gráfica 28: Comparación del nivel de fósforo entre el análisis de los residuos del biodigestor, los análisis del compost por aireación y el compost por lombricultura



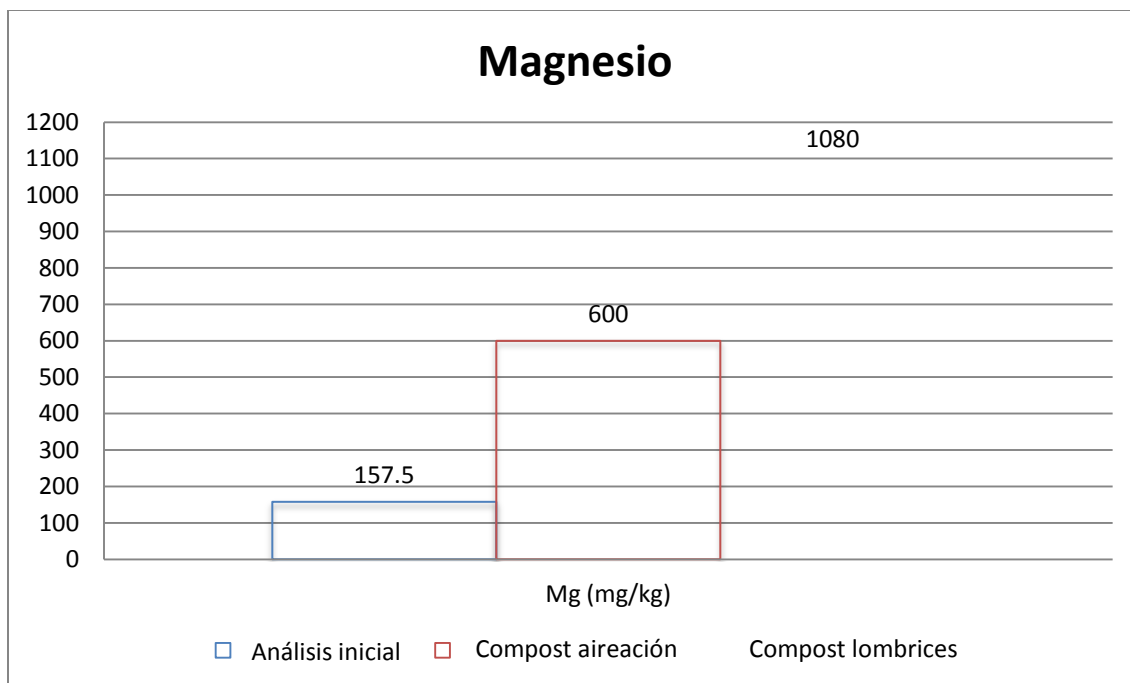
Gráfica 29: Comparación del nivel de potasio entre el análisis de los residuos del biodigestor, los análisis del compost por aireación y el compost por lombricultura



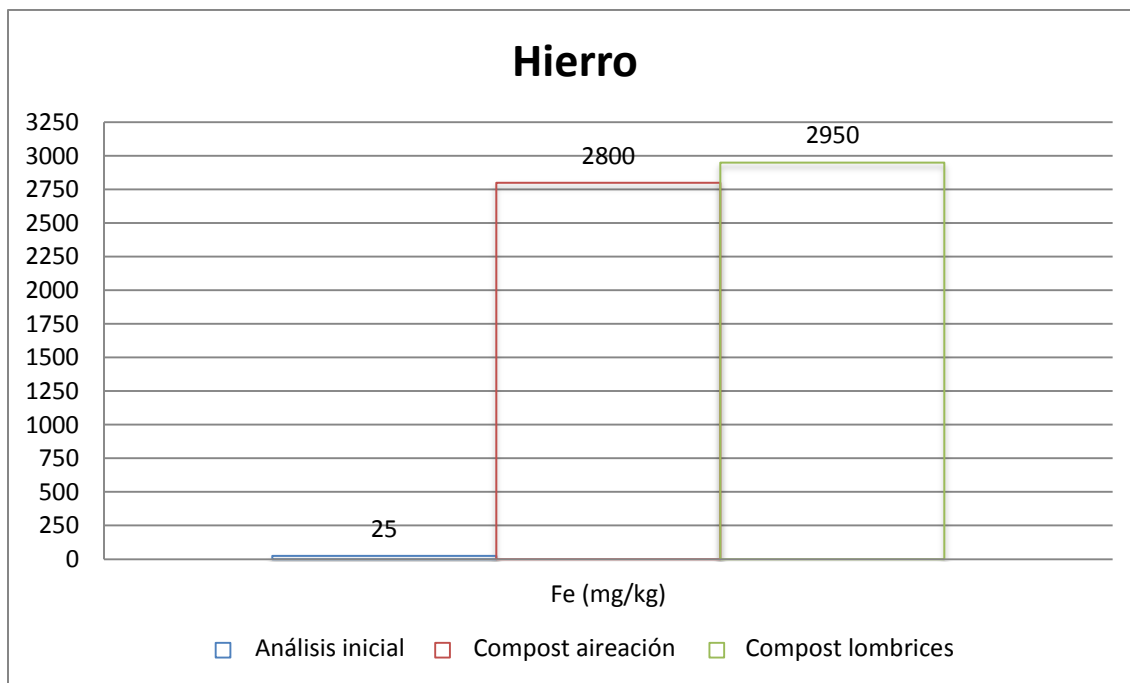
Gráfica 30: Comparación del nivel de calcio entre el análisis de los residuos del biodigestor, los análisis del compost por aireación y el compost por lombricultura



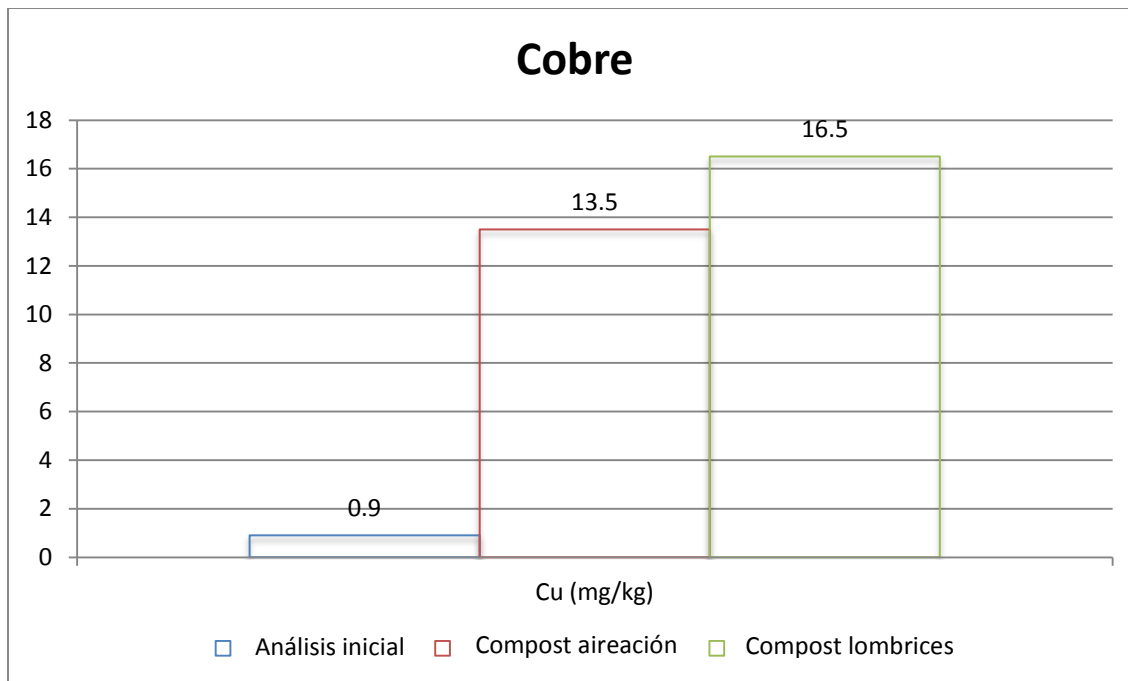
Gráfica 31: Comparación del nivel de Magnesio entre el análisis de los residuos del biodigestor, los análisis del compost por aireación y el compost por lombricultura



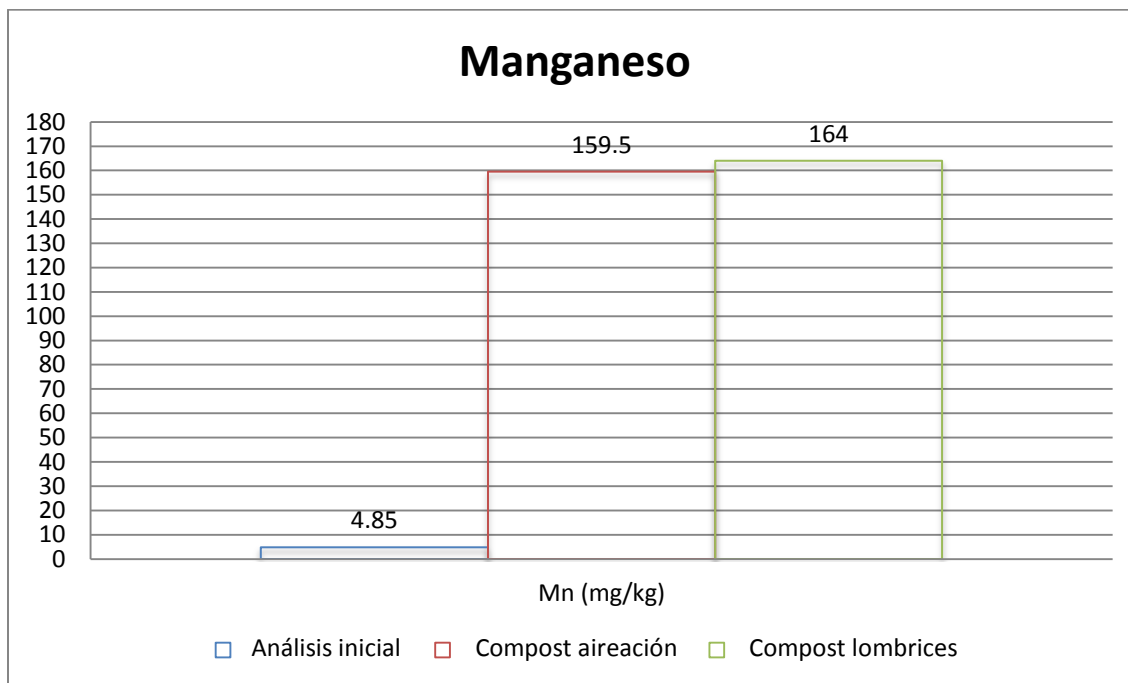
Gráfica 32: Comparación del nivel de hierro de los residuos del biodigestor, los análisis del compost por aireación y el compost por lombricultura



Gráfica 33: Comparación del nivel de cobre entre el análisis de los residuos del biodigestor, los análisis del compost por aireación y el compost por lombricultura



Gráfica 34: Comparación del nivel de manganeso entre el análisis de los residuos del biodigestor, los análisis del compost por aireación y el compost por lombricultura



Gráfica 35: Comparación del nivel de Zinc entre el análisis de los residuos del biodigestor, los análisis del compost por aireación y el compost por lombricultura

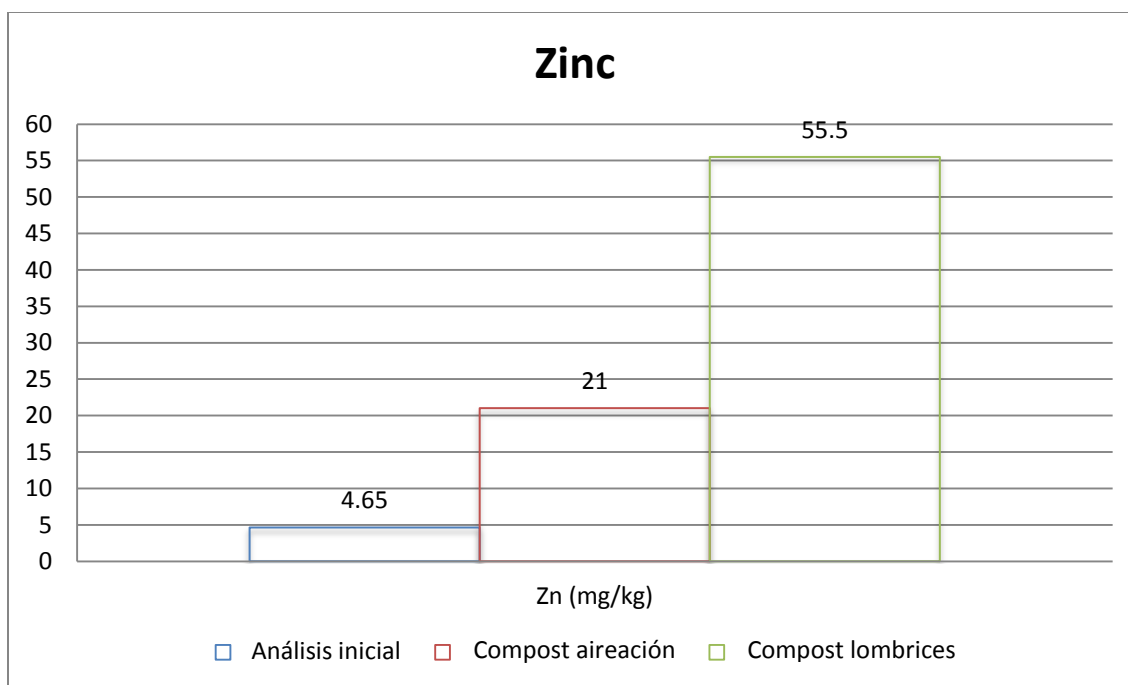


Tabla 65: Balance de masa para el método de compostaje por aireación

Entradas	Masa		Inc		%	Salidas	Masa		Inc		%
Tierra+Materiales Inertes	7.41	±	0.01	kg	69%	Humus	6.74	±	0.01	Kg	62%
Residuos biodigestor	1.70	±	0.01	kg	16%	Pérdidas	4.07	±	0.02	Kg	38%
Excremento	1.70	±	0.01	kg	16%						
Total	10.81	±	0.02	kg	100%	Total	10.81	±	0.02	Kg	100%

Tabla 66: Balance de masa para el método de compostaje por lombricultura

Entradas	Masa		Inc		%	Salidas	Masa		Inc		%
Tierra+Materiales Inertes	7.41	±	0.01	kg	58%	Humus	8.80	±	0.01	kg	69%
Residuos biodigestor	1.70	±	0.01	kg	13%	Pérdidas	4.01	±	0.02	kg	31%
Excremento	1.70	±	0.01	kg	13%						
Lombrices	2.00	±	0.01	kg	16%						
Total	12.81	±	0.02	kg	100%	Total	12.81	±	0.02	kg	100%

Tabla 67: Comparación del porcentaje de rendimiento para los métodos de compostaje por aireación y lombricultura

Método de compostaje	Masa inicial mezcla		Inc		Masa final humus		Inc		Rendimiento		
Aireación	10.81	±	0.02	kg	6.74	±	0.01	kg	62%	±	0.13
Lombricultura	12.81	±	0.02	kg	8.80	±	0.01	kg	69%	±	0.13

Gráfica 36: Comparación de rendimientos entre los métodos de compostaje por aireación y lombricultura

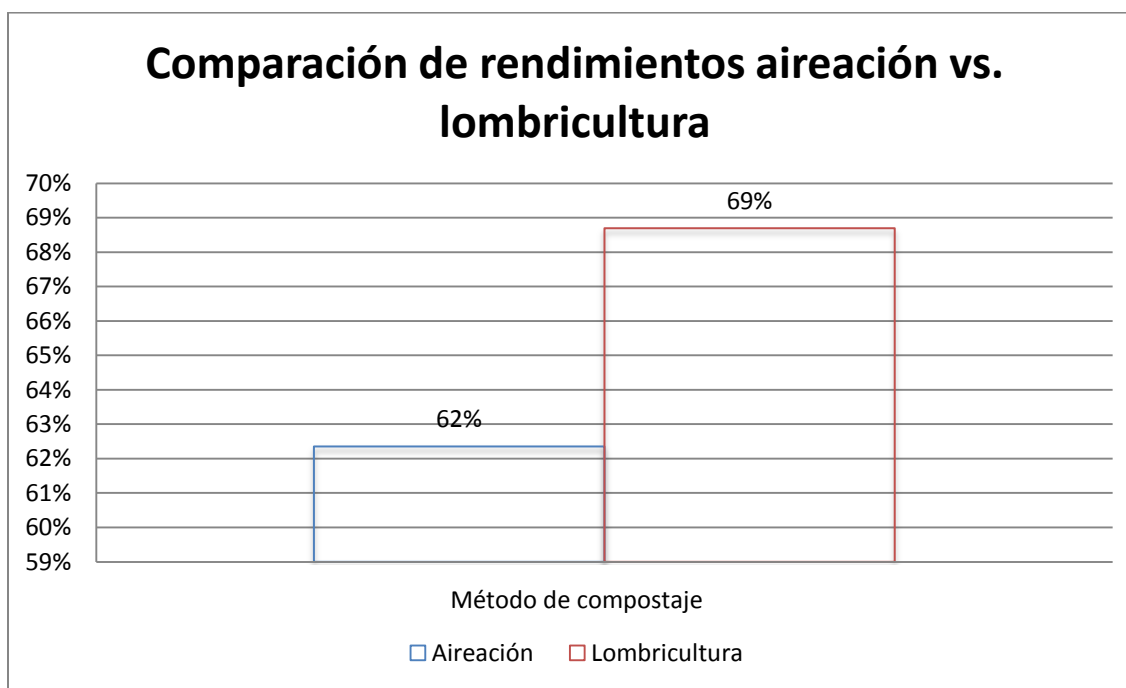


Tabla 68: Costos totales por realización de composteras con ambos métodos.

	Materiales			Costo	Total
Aireación	Tierra+Materiales Inertes	7.41	kg	GTQ1.40	GTQ10.37
	Total				GTQ10.37
Lombricultura	Tierra+Materiales Inertes	7.41	kg	GTQ1.40	GTQ10.37
	Lombrices	2.00	kg	GTQ120.00	GTQ240.00
	Total				GTQ250.37
Total global					GTQ260.75

VIII. DISCUSIÓN

El objetivo principal de este megaproyecto era diseñar un sistema de aprovechamiento de los desechos orgánicos en finca Rama Blanca ubicada en Sipacate, Escuintla, Guatemala para la obtención, uso y comercialización de biogás y generación de compost para su posterior aprovechamiento como sub-producto del sistema. Estos desechos orgánicos en su mayoría son el estiércol producido por más de 400 búfalos con los que cuenta actualmente la finca. Para esto, se utilizó como base el sistema actual que se tiene en la finca, y se hicieron pruebas a nivel laboratorio para definir cuál era la proporción adecuada de agua/estiércol para alimentar a dicho biodigestor. También se hizo un dimensionamiento de la cantidad óptima de material que puede ingresar al biodigestor con el fin de aprovechar de una mejor manera los desechos sólidos de los búfalos. Con este nuevo diseño de biodigestor, se obtiene la cantidad de biogás necesario para procesarlo y luego cumplir con la demanda energética actual que se tiene en la finca. Paralelo a la producción de biogás es posible preparar compost a partir de los desechos del digestor.

A. Crecimiento poblacional en finca Rama Blanca

Finca Rama Blanca ubicada en Sipacate, departamento de Escuintla Guatemala cuenta con un hato de 414 cabezas de búfalos *Bubalus Bubalis*, conocidos como búfalos de agua, al mes de septiembre 2013. Para futura referencia se llamará búfalo dentro de este trabajo al búfalo de raza *Bubalus Bubalis*. El hato de Rama Blanca está compuesto por 326 hembras y 88 machos.

Rama Blanca es parte de un grupo de fincas que han encontrado en los búfalos una excelente fuerza de trabajo. Dentro de este grupo finquero, uno de los principales objetivos de la finca Rama Blanca es la reproducción del búfalo, la época alta de nacimientos se da en los meses de julio a octubre y el tiempo de gestación de una búfala es de 10 meses con 5 días promedio de acuerdo a las condiciones climáticas de Sipacate, Escuintla. Este es el promedio de los partos registrados en Rama Blanca durante 2012. La finca cuenta con 22 manzanas dedicadas a ser áreas de pastizaje, esta extensión territorial es poca para la demanda alimenticia de un búfalo, la cual es el doble de una vaca; por esto Rama Blanca se ve en la necesidad de recurrir a fuentes alternas de alimentación como lo son el palmiste, zacate y la caña. Por esta misma limitante de espacio ellos han definido su capacidad para un hato entre 400 a 500 cabezas momentáneamente. Durante el 2012 se registraron 182 nacimientos en la finca y para 2013 se espera llegar a los 220 nacimientos. De estos nacimientos solamente el 10% son por inseminación. El semen utilizado es traído de Italia, y el principal objetivo de esta práctica es

mantener la pureza del animal, el resto de gestaciones se dan por medio de reproducción natural. Los búfalos viven un promedio de 30 años, de estos su vida reproductiva empieza a los 18 meses de edad y termina a los 25 años.

A pesar de esta tasa de crecimiento con la que cuenta el hato, su número se mantiene constante a través del tiempo pues los animales son distribuidos entre diferentes fincas de la región. Los machos normalmente se llevan a trabajar como animales de carga a fincas de cultivo de Palma, ahí mismo son engordados y retornan a Rama Blanca para el destaje. Las hembras son enviadas igualmente a fincas cercanas, pero para ser cargadas, nombre común del área, que hace referencia al inicio de la gestación. Rama Blanca se dedica a la comercialización de búfalos y el precio de venta actual es de Q.7.50/ lb en pie.

Para la reducción de la cuenta energética, Rama Blanca cuenta con un biodigestor tipo taiwanés o tubular (llamado comúnmente tipo chorizo) el cual es alimentado con una mezcla de excremento de búfalo y agua de lavado. Este biodigestor ayuda a disminuir la descarga de desechos sólidos a los cuerpos de agua y prevenir así su contaminación, pero carece de los controles necesarios. Actualmente se encuentra conectado por medio de tubería PVC a las hornillas de manufactura de quesos, pero la presión de salida es tan pequeña que se dificulta el uso, por lo mismo prefieren utilizar el gas propano. Aparte, debido a la pequeña capacidad del biodigestor, el biogás generado no cubre la demanda actual. Rama Blanca ha decidido destinar un espacio de 3000m² para la construcción de un biodigestor de mayor capacidad que cumpla con los controles necesarios para poder aprovechar el biogás generado y disminuir la factura energética. El actual biodigestor tiene un volumen de 57.51 m³ al modelarlo como un cilindro y es alimentado diariamente con 8 cubetas con capacidad de 25L de estiércol mezclado con agua en exceso en una proporción cercana a 75% agua, 25% estiércol. Esto no es toda la existencia de estiércol que se tiene actualmente pero es la capacidad de alimentación del digestor.

La población de búfalos es de gran interés pues son los productores de la materia prima principal que es el excremento. Como se expuso anteriormente a pesar de la capacidad de Rama Blanca de aumentar su población por limitantes de espacio la finca actualmente no puede sobrepasar las 500 cabezas de ganado. Si se desea incrementar la población de búfalos se debe incrementar la extensión territorial de la finca o modificar las actividades a las que se dedica la finca para poder dedicar una mayor cantidad de espacio al área de pastizaje.

Para los cálculos de este megaproyecto se tomó la población de 414 búfalos como base. De acuerdo a mediciones realizadas en Rama Blanca se determinó que en promedio un búfalo macho tiene un peso de 1000 lbs una vez ha alcanzado su edad adulta de 18 meses, mientras

que una hembra pesa en promedio 800lbs, este dato basado en que tras el periodo de gestación la madre pierde una gran cantidad de peso al dar a luz y esto la deja con un peso de alrededor 800 lbs. Se puede tomar este dato como promedio pues Rama Blanca es, como se dijo anteriormente, una finca enfocada en la reproducción de los animales para la sostenibilidad de la especie. Para poder determinar la relación de excretación se observó el comportamiento de un espécimen; el búfalo de 1000lbs ingirió alrededor de 100lbs de comida y excreto 35 lbs. Utilizando esta misma relación se definió que una hembra consumiría entonces 80 lbs de alimento y excretaría, de acuerdo al comportamiento observado 28lbs. Multiplicando estos resultados por la población de cada género se obtiene un total de 4.85 toneladas diarias de excremento que se producen dentro de la finca.

B. Caracterización inicial de Materias Primas

El enfoque específico de este trabajo es la caracterización inicial de materias primas disponibles para la producción de biogás. Se caracterizó los sustratos, que en este caso fueron suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo, con el fin de conocer de que estaban compuestos. Con esta caracterización se logró determinar la cantidad de sólidos totales (materia seca), humedad (cantidad de agua presente en la muestra), sólidos volátiles (materia combustible que se puede convertir en biogás), cenizas (material no combustible y remanente), Demanda Química de Oxígeno (cantidad de oxígeno necesario para degradar materia orgánica degradable y biodegradable), Demanda Bioquímica de Oxígeno (cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica biodegradable únicamente), porcentaje de grasas (cuya ruptura es importante para la generación de ácidos grasos), proteínas y carbohidratos (importantes para el primer paso de la digestión anaeróbica ya que su ruptura a moléculas más simples las hace disponibles para otras bacterias) y el porcentaje de nitrógeno amoniacal que es muy importante controlar ya que a valores muy altos del mismo se inhibe la producción de biogás.

Los sólidos totales del estiércol de búfalo y suero de leche de vaca se determinaron para encontrar la carga sólida que se introducirá al biorreactor, esto a escala laboratorio. Para el estiércol, en época de verano, se obtuvo un promedio de 5.54 ± 0.286 g y un porcentaje de $14.42 \pm 0.112\%$ y para invierno se obtuvo un promedio de 6.15 ± 0.185 g y un porcentaje de $19.61 \pm 0.059\%$. En el caso del suero, un promedio de 9.07 ± 1.33 g y un porcentaje de $7.93 \pm 1.275\%$. Estos valores son en base seca.

Comparando la masa de sólidos totales obtenidos para el búfalo experimentalmente y el teórico de estiércol de cerdo, del cual fue del único animal se encontraron datos teóricos, se logra ver que el del último tiene un valor de sólidos totales de 4.9 g, el cual como puede

observarse se acerca mucho al valor encontrado para los búfalos. Estos valores son de mucha utilidad ya que en base a estos valores se procedió a encontrar los sólidos volátiles y las cenizas remanentes de los sólidos totales.

Los sólidos volátiles representan la parte de los sólidos totales de la materia orgánica que están sujetos a pasar a una fase gaseosa. Debido a esto es que la producción diaria de biogás depende en gran parte de los sólidos volátiles que se encuentren en la muestra orgánica por lo que es necesario el cálculo de los mismos. Dependiendo del tipo de materia orgánica utilizada para la digestión anaeróbica en el reactor, la producción de biogás será mayor o menor.

En los resultados obtenidos en el laboratorio, se obtuvo que los sólidos volátiles promedio para el estiércol obtenido en época de invierno fue 4.16 ± 0.099 g y un porcentaje de $67.63 \pm 0.075\%$, para el estiércol obtenido en época de verano se obtuvo un promedio en masa de 4.44 ± 0.229 g y un porcentaje de $80.08 \pm 0.079\%$ y para el suero se obtuvo un promedio en masa de sólidos volátiles de 8.5 ± 1.260 g y un porcentaje de $93.70 \pm 1.203\%$. Con lo dicho anteriormente puede observarse que el sustrato que produciría más biogás sería el suero de leche de búfalo seguido del estiércol obtenido en época de verano y finalmente el estiércol obtenido en época de invierno. Esto puede deberse a que el contenido de lípidos, proteínas y azúcares que contiene el suero sea mayor al contenido en el estiércol.

Las cenizas se refieren al material que no se volatilizó en la mufla y fueron el remanente en el crisol. Para el estiércol obtenido en época de invierno se obtuvo un promedio en masa de cenizas de 1.99 ± 0.087 g y un porcentaje de $32.37\% \pm 0.095$, para el estiércol obtenido en época de verano se obtuvo un promedio en masa de 1.10 ± 0.059 g y un porcentaje de $19.92 \pm 0.045\%$ y para el suero se obtuvo un promedio en masa de cenizas de 0.57 ± 0.072 g y un porcentaje de $6.30 \pm 0.073\%$.

Con respecto a la masa de cenizas obtenidas y su respectivo porcentaje del estiércol en época de verano e invierno y del suero, se puede observar que el estiércol obtenido en época de invierno posee valores más elevados que los otros dos; dicho porcentaje indica la cantidad de materia sólida que no es combustible. En muchos de los procesos en los cuales hay una combustión de biomasa es importante conocer dicho valor ya que en algunos casos esta puede llegar a ser utilizada. Lo importante es que el peso de las cenizas sea una pequeña cantidad de los sólidos totales ya que lo que se busca es que se produzca biogás, se quiere que la misma se volatilice. Si esto no ocurriera y hubiera más cenizas que sólidos volátiles, la conversión de sustrato a metano sería muy baja. Cabe mencionar que este análisis se realizó únicamente al estiércol que no se utilizó en el biodigestor; fue únicamente para su caracterización.

Como puede observarse existe una diferencia algo significativa entre el porcentaje de cenizas entre ambos estiércol así como en el porcentaje de humedad y sólidos volátiles también. Esto puede deberse a la temperatura en que la muestra fue tomada, a la hora del día en la que fue tomada, la alimentación del búfalo, la cantidad de agua que tomó durante el día así como la hora a la que la tomó, la cantidad de tiempo que se dejó la muestra en los patios antes de tomarla, etc.

Una parte de la caracterización fue determinar la concentración de Demanda Química de Oxígeno (DQO) para dos muestras de estiércol de búfalo: una obtenida en época de verano (con menos cantidad de humedad) y otra obtenida en época de invierno (mayor cantidad de humedad por la lluvia). Con los datos obtenidos de la DQO se logró realizar una estimación del potencial de generación de metano que se podría producir en un reactor anaeróbico, esto suponiendo que toda la materia orgánica de dicho excremento se va a degradar totalmente para la generación de metano; se estima lo que el excremento tiene como capacidad para generar metano (idealmente). Como se sabe esto no es cierto en la realidad ya que no se obtiene metano de toda la materia orgánica, pero esto sirve de referencia para el diseñador del digestor para ver lo que se puede lograr.

Las muestras se analizaron en dos diluciones que fueron a razón de 1/40 y 1/400, utilizando la técnica mencionada con anterioridad en el inciso 7.4. Además del análisis de estas muestras de estiércol fue necesario analizar cuatro soluciones patrón que tuvieran concentraciones de DQO conocidas para así poder realizar una curva patrón con la absorbancia (ver gráfico 1). Debido a esto fue que se hizo necesario hacer cuatro soluciones patrón utilizando ftalato ácido de potasio y agua destilada, estas tuvieron concentraciones de 625, 1250, 2500 y 5000 mg DQO/L. Con el análisis espectrofotométrico utilizado se obtuvo un rango de absorbancias entre 0.1852-0.5880, medidos a un λ de 600 nm para las muestras patrón. Ya con estos valores se procedió a realizar la gráfica mencionada con anterioridad a la cual se le realizó una regresión lineal la cual tuvo un R^2 de 0.9938 el cual es muy cercano a 1 por lo que se puede afirmar que esta regresión es adecuada para la representación de los datos obtenidos. La ecuación de la curva para esta regresión es $y=0.0002x+0.0167$.

Las absorbancias obtenidas de las muestras de estiércol en época de verano fueron de: 0.1331 para la dilución 1/400 y 0.4862 para la dilución 1/40, para una longitud de onda de 600 nm.

Matemáticamente la extrapolación de datos no es método muy confiable para la determinación de un punto existiendo error al considerar que la regresión lineal tendrá siempre el mismo comportamiento, por lo que el dato de absorbancia de 1/400 se descartó y se utilizó únicamente el de 1/40, que sí quedaba dentro del rango de la curva de calibración para encontrar la DQO que fue de 2345.5 mg DQO/L. Con esta concentración se procedió a encontrar el potencial de metano con la suposición que toda la materia orgánica se degrada para convertirse en metano y utilizando una relación estequiométrica con la cual se encontró que era de $0.0002438 \pm 0.0000126 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{g}$ de sólidos totales.

Ahora con la muestra de estiércol obtenida en época de invierno se utilizó la misma curva patrón y ya que se había visto que la dilución 1/400 no caía dentro del rango de la misma se procedió a realizar únicamente la dilución 1/40. Se obtuvo una absorbancia de 0.553 con la cual se procedió a calcular la DQO que fue de 2681.5 mg DQO/L y de igual manera que con el estiércol obtenido en época de verano se calculó también el potencial de metano con las mismas suposiciones obteniéndose así $0.0002046 \pm 0.000006 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{g}$ de sólidos totales.

Comparando los valores de DQO obtenidos experimentalmente con valores teóricos de estiércol de cerdo puede observarse que los valores son muy parecidos, siendo de este último de 2,640.8 mg DQO/L. Con esto puede verse que este indicador de contaminación que mide la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar materia orgánica degradable y biodegradable del estiércol de búfalo es muy parecida con la de la excreta de los cerdos, lo cual significa que la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica es una cantidad muy parecida. Como puede observarse la DQO para las dos estaciones del año es muy parecida y casi no varían los resultados por lo que puede decirse que la misma no afecta al resultado de la cantidad de oxígeno necesaria para la degradación de materia orgánica. Para haber sabido si la DQO disminuyó hubiera sido importante la medición de la DQO del estiércol luego del proceso de fermentación en el biodigestor piloto ya que con esto hubiera podido verse una reducción de la misma lo cual hubiera indicado que la actividad de los microorganismos así como las condiciones del ambiente anaerobio, fueron las responsables de la degradación, redujeron su actividad y con ello el consumo de oxígeno.

Para el suero se siguió el mismo procedimiento y se encontró que fue de 2280.5 mg O_2/L . Como puede observarse este valor se acerca mucho al encontrado para el estiércol en época de verano por lo que su potencial de metano será muy parecido mientras que se aleja del estiércol obtenido en época de invierno (siendo este el que tiene el menor potencial de metano). El potencial de metano para el suero fue de $0.0004316 \pm 0.000063 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{g}$ de sólidos totales.

Para comparar la materia orgánica biodegradable con los valores de DQO encontrados que también toman en cuenta la materia orgánica degradable fue que se procedió a sacar la Demanda Bioquímica de Oxígeno. Como era de esperarse el valor de DQO fue mayor al de la DBO debido a que muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente pero no biológicamente. El valor encontrado para el suero fue de 2091 ± 0.046 mg O₂/L y para el estiércol en época de invierno fue de 1992 ± 0.044 mg O₂/L. Como puede observarse estos valores son muy parecidos a los encontrados en la DQO debido a que el suero y el estiércol poseen pocos materiales que no son biodegradables por lo que la cantidad de oxígeno necesaria para oxidarlos va a ser pequeña. Como una ventaja de la DQO está que no necesita de cinco días para su análisis como la DBO pero sin embargo la primera no diferencia entre materia biodegradable y no biodegradable.

Con respecto a las proteínas, carbohidratos puede observarse que el suero tiene valores más altos de estos dos siendo de 5.75 ± 0.70 % y 74.42 ± 2.07 % respectivamente y el estiércol tiene valores de 4.87 ± 0.23 % y 59.27 ± 1.79 % respectivamente. Con esto puede observarse que se debería de tener un mayor potencial de metano con el suero ya que tiene más carbohidratos y proteínas los cuales son muy importantes en la primera etapa de la fermentación anaeróbica llamada hidrólisis ya que durante la misma la materia orgánica compleja como proteínas, carbohidratos y grasas son degradados a compuestos solubles o monómeros lo cual es el paso inicial para la degradación de sustratos orgánicos pues los microorganismos únicamente pueden utilizar materia orgánica soluble que pueda atravesar su pared celular. Debido a esto es que el proceso de hidólisis es el que proporciona los sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis depende de la composición del sustrato (porcentaje de carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas y pH. Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaerobia ya que además de ser una fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Con respecto al pH se obtuvo un valor de 7.34 ± 0.01 el cual no requirió neutralización debido a que se encontraba entre los rangos permitidos para trabajar en un biodigestor (6.6 – 7.7) y para el suero de leche de búfalo se obtuvo un valor de 4.63 ± 0.01 , el cual debido a tener un valor ácido si tuvo que neutralizarse previo a introducirlo en el biodigestor piloto. Cabe mencionar que los valores encontrados para el pH se obtuvieron de la muestra del 7 de agosto de 2013 y este análisis se llevó a cabo al mes que la muestra se encontraba en el laboratorio de Operaciones Unitarias refrigerada. El pH teórico del suero de leche de búfalo tiene un valor de 5.3 por lo que pudo haberse acidificado aún más debido al tiempo que se dejó en refrigeración.

Con las grasas cabe mencionar que el estiércol tuvo un mayor contenido de las mismas siendo este valor promedio de 16.25 ± 1.77 % y el suero con un valor promedio de 11.89 ± 1.53 %.

La degradación de los lípidos es importante ya que comienza con la ruptura de las grasas por acción de enzimas hidrolíticas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol. Con el nitrógeno amoniacal cabe mencionar que se obtuvo para el estiércol un valor promedio de 0.78 ± 0.04 g nitrógeno amoniacal/100 g de muestra y para el suero un valor promedio de 0.90 ± 0.11 g nitrógeno amoniacal/100 g de muestra. Hay que tener cuidado con que los valores de nitrógeno amoniacal no sean muy altos ya que pueden inhibir el crecimiento y desarrollo de los metanógenos lo cual no se quiere debido a que lo que se desea es producir más biogás.

Es importante el almacenamiento del estiércol de búfalo ya cuando se encuentra en los patios con el fin que no pierda sus propiedades. Este puede almacenarse en tanques de duralita (cemento) debido a que se desea una estructura a prueba de agua, con la cual se evita la pérdida de nutrientes, salida de malos olores etc. El tipo de almacenaje puede afectar fuertemente la supervivencia de patógenos, más o menos entre 4-5 meses.. Durante su almacenamiento el estiércol se ve afectado por cambios bioquímicos los cuales dependen principalmente de la temperatura, normalmente a menores temperaturas se logra conservar el sustrato sin llegar a puntos de congelamiento. En condiciones apropiadas de almacenaje las bacterias se mantienen vivas pero a medida que pasa el tiempo van decreciendo en número. También con un almacenaje adecuado se impide que el fósforo se pierda.

Para una correcta caracterización de la materia prima es necesario que ésta sea homogénea y determinar el tiempo que lleva en los patios, ya que si se tomó una muestra a las 12:00 horas y otra a las 15:00 horas existe una diferencia de tres horas por lo cual, en ese lapso de tiempo, pudo haber llovido o secado con el sol, provocando que la misma no sea representativa. Debido a esto es que existen diferencias en el porcentaje de humedad, nutrientes (como el nitrógeno que puede lavarse fácilmente con la lluvia o volatilizarse como amoniacal por calentamiento), lo cual afectaría los porcentajes de sólidos totales, sólidos volátiles y cenizas. Para evitar la pérdida de amoniacal durante el almacenaje sería necesario prevenir la circulación de aire sobre el lugar de almacenaje. También con esto se previene la filtración de agua dentro del sustrato, como la de lluvia. Esto podría evitarse usando una cubierta plástica. Es aconsejable recoger el estiércol a ciertas horas programadas del día para evitar esto.

Para asegurarse que la muestra obtenida fue representativa sería útil realizar los análisis de caracterización por lo menos de tres muestras tomadas a distintas horas para ver si los cambios en los resultados son significativos. La caracterización de estiércol debería llevarse a cabo durante época de invierno y época seca o con cambios climáticos drásticos. La composición del sustrato puede verse fuertemente afectada por el alimento consumido por los

búfalos así como la cantidad de agua tomada por los mismos. El contenido de nutrientes del estiércol también va a depender de la especie que lo produce, edad del animal, eficiencia digestiva, tipo de alimentación como se mencionó con anterioridad y el manejo al que ha sido sometido el estiércol desde su recolección y almacenamiento.

Con todo lo mencionado anteriormente, lo que debería hacerse es recoger el estiércol de los patios lo antes posible para evitar que bajo el sol pierda algunos de sus nutrientes que serán importantes para la digestión anaeróbica. En caso que haya llovido, no se debería utilizar ese estiércol para caracterización, ya que como se mencionó con anterioridad, habrá perdido algunos de sus nutrientes debido a la misma. Ya que el estiércol fue recogido este debe estar almacenado en tanques de duralita que deben estar en un lugar cuya temperatura se mantenga en niveles bajos (10 grados Celsius), esto con el fin de mantener la propiedades del mismo. A la hora de tomar la muestra para su análisis es necesario tomar muestras de varios lugares del tanque para asegurarnos que la muestra sea representativa.

C. Biodigestor piloto

El objetivo de este proyecto fue la obtención de biogás a partir del excremento de búfalo determinando las condiciones adecuadas para una producción eficiente, las cuales fueron relación de excremento/agua, temperatura del medio y tiempo de retención. Para lograr determinar estos objetivos se diseñó un biodigestor piloto en el cual se pudo controlar las variables como la temperatura y la relación de excremento/agua, este biodigestor fue útil para poder llevar a cabo todos los experimentos y se trabajó en corridas que duraban 30 días y de esta forma las tres variables principales se manipularon para la producción de biogás y determinar las condiciones de operaciones más adecuadas para disminuir el tiempo de producción de biogás.

El biodigestor diseñado contó con una recirculación de agua para asegurar que todo el medio se encontrara a una misma temperatura. Para calentar el agua, se utilizó un calentador eléctrico con termostato graduado a $40.00 \pm 0.01^\circ\text{C}$. La temperatura se midió todos los días para asegurar que la misma se mantuviera constante en el baño térmico ya que no se podía medir internamente por el diseño (al abrirlo se perderían las condiciones anaeróbicas). El agua servía para calentar los reactores colocados dentro del biodigestor. Los reactores contenían agua y excremento y se trabajó de forma anaeróbica. El biogás producido era atrapado en envases de PET, conectados mediante mangueras flexibles, esto para asegurar que el biogás no se escapara y se podía medir el volumen producido y acumulado del biogás por el desplazamiento de agua que inicialmente estaba en los envases. Los recipientes estaban calibrados para medir

el volumen de agua desplazado y de esta manera se observa el volumen de biogás producido al día.

Se debe tener en cuenta que el excremento utilizado también tenían un alto porcentaje de humedad (ver módulo "Caracterización de materias primas disponibles para la producción de biogás en finca Rama Blanca de Sipacate, Escuintla.") el cual fue de 85.58% (masa/masa y excremento en verano) y un porcentaje de sólidos de 14.42%. El porcentaje de proteínas fue de 4.87% para grasas de 16.25% y carbohidratos 59.27%. Estos valores son importantes ya que son la fuente de alimentación para que comience la primera fase de producción de biogás. La primera fase fue la hidrólisis que transforma las proteínas, grasas y carbohidratos a ácidos, azúcares y aminoácidos y posteriormente por acidogénesis y acetogénesis se transformen a CO_2 , H_2 y ácido acético. Estos compuestos son los alimentos de la metanogénesis en esta fase que se produce el metano. Los porcentajes de proteínas, grasas y carbohidratos no se encontraron datos teóricos por lo que el rendimiento de producción de biogás no se puede comparar con datos teóricos.

El balance de masa fue necesario ya que con este balance se conoce la cantidad de materia que entró al reactor y la cantidad de biogás producido. El reactor utilizado fue un tipo batch, la materia utilizada fue excremento y agua pero con una relación adecuada para una mejor producción de biogás, esta mezcla estaría dentro del reactor y no se tendrían entradas adicionales durante todo el proceso de producción de biogás. Se diseñó un reactor por lotes, de esta manera no se tienen entradas ni salidas del mismo.

El agua es necesaria para mantener un medio en el cual las bacterias puedan movilizarse y reproducirse. Este medio debería tener un pH neutro por que las bacterias que se producen en la metanogénesis únicamente pueden hacerlo en un rango de 6.4 a 7.7. Un cambio en el pH sería nocivo para estos microorganismos ya que no podrían desarrollarse y por consiguiente no podría darse la producción de metano, y el rendimiento sería bajo. La cantidad de agua que entra al biodigestor dependerá de la cantidad de excremento a ser utilizado. Se utilizó una relación de 1:4 (en Masa) es decir que por un kilogramo de excremento deberían agregarse 4 kilogramos de agua. Se utilizaron relaciones como 1:1, 1:2, 1:3, 1:0.5, para determinar cuál sería la relación adecuada para la producción de biogás. El excremento al inicio contó con un pH de 7.7, medido usando papel pH (debido a la naturaleza de la muestra y para no contaminar el electrodo del potenciómetro). Durante una corrida no era posible abrir un reactor y medir el pH debido a que se dejaba escapar el biogás generado y las condiciones ya no eran anaeróbicas. El único indicador era la producción de biogás. Al finalizar las corridas se volvió a medir el pH con papel para medir el pH y se encontró un pH de 7. Lo que es realmente

importante es que el excremento no entre al biodigestor con un pH menor a 6 porque no se tendrán las condiciones iniciales adecuadas para la producción de biogás. La eficiencia del biodigestor será de manera exponencial respecto al metano, ya que en las primeras reacciones se produce más CO_2 y ácido sulfhídrico y en la última reacción se producirá metano, por lo que la eficiencia de metano en los primeros días de producción de biogás será baja, hasta que se llegue a la metanogénesis esta eficiencia empezará a elevarse, según la teoría encontrada. Las condiciones de operación encontradas son para acelerar la reacción y que la producción sea más de metano y no de los otros gases presentes en el biogás como el CO_2 y ácido sulfhídrico ya que si se logran las condiciones para la metanogénesis se tendrá menos producción de CO_2 y ácido sulfhídrico, esto se logrará gracias a la temperatura.

Las temperaturas ideales según la teoría para lograr una producción de biogás adecuada, están por encima de los 30°C ya que a esta temperatura las bacterias mesofílicas y termofílicas son las que aumentan la producción de metano. En los experimentos realizados, se utilizó una temperatura por arriba de los 30°C para asegurar que en el ambiente del reactor crecieran este tipo de bacterias. El tiempo de retención de los sólidos en este punto es importante, ya que el medio en el que se trabaja se produce la metanogénesis, debe de seguir siendo alimentado con excremento. Si las bacterias no tienen un medio con alimentos para producir metano, estas bacterias dejan de alimentarse y posteriormente mueren, el tiempo de retención indica cada cuanto se debe limpiar o remover los sólidos disueltos en el reactor y agregar una nueva mezcla de excremento y agua, para mantener el medio y que siga la producción de metano. Si se limpia todo el reactor o se remueven todos los sustratos se obtendrá un tiempo de 15-20 días para que empiece de nuevo la producción de biogás, pero si se alimenta cada 15 días con una nueva mezcla de agua y excremento, la producción de biogás no se detendrá y se crea un proceso continuo.

Se empezó a trabajar con una relación 1:4, ya que en las literaturas consultadas, se describe como la relación adecuada para trabajar con ganado, en este caso se asumió que los búfalos tenían la misma composición en el excremento que las vacas. Además una relación 1:4 es la más conveniente para ser utilizada en un biodigestor del tipo tubular, para evitar estancamientos provocados por los sólidos en el excremento. Los resultados obtenidos utilizando esta relación (1:4) a una temperatura de 35°C , no demostraron una producción de biogás muy elevada respecto a las otras corridas como relación 1:1 y 2:1. La máxima producción obtenida en un tiempo de 30 días fue de 400mL, se esperaron 30 días porque en la finca Rama Blanca, es el tiempo esperado para que se produzca biogás en su biodigestor, por lo que se requiere un tiempo menor. Se utilizó agua tratada, libre de cloro y filtrada, para eliminar impurezas y eliminar el cloro presente en el agua para que este no matara a los organismos que

se encuentran en el estiércol, además el pH era importante para que no afectara el medio en el que se encuentra por lo que también se midió pH.

Con todas estas condiciones ya establecidas el resultado para una prueba de relación 1:4 fue de 400mL de biogás, se utilizó 0.5 ± 0.05 kg de excremento con 2.2 ± 0.05 kg de agua, por lo que se puede establecer un crecimiento de 0.8 ± 0.05 L de biogás por un kilogramo de estiércol, el rendimiento no se puede evaluar por que no se encontró en la literatura valores teóricos con los cuales pueden ser comparados. Este crecimiento de biogás debe de ser comparado con producción de biogás en 30 días a 35°C y asumir que en ambos caso el crecimiento es lineal. Este fue el resultado con menor rendimiento en producción de biogás. Como se puede evaluar, la relación de agua con excremento fue elevada, se utilizó 4 veces (en masa) más agua que excremento, por lo que hay un poco excremento para la alimentación de las bacterias y producción de biogás, se requiere de una buena relación para que se lleve a cabo la producción de biogás, el tiempo de retención también debe de ser menor, esto se debe a que en el medio hay poco alimento para las bacterias y estas primero deben de alimentarse para producir CO_2 y ácidos para posteriormente utilizarlo como alimento y producir el metano. Un factor que influyó fue el tipo de biodigestor utilizado, en la literatura consultada recomiendan tener una relación de 4:1 para un biodigestor tipo tubular pero el biodigestor utilizado fue tipo lotes o "batch", lo que provocó que el alimento para las bacterias estaba esparcido, por lo que en el volumen utilizado las bacterias tenían un medio muy grande con poca alimentación por que la mezcla estaba muy diluida y por el poco excremento utilizado. Se puede espera que después de 30 días la producción de biogás aumente, pero no se realizaron pruebas debido a que el tiempo de producción es mayor al tiempo en la finca Rama Blanca, se desea disminuir el tiempo de producción no aumentar dicho tiempo.

Se realizaron pruebas con una relación 1:1, usando 1.1 ± 0.05 kg de excremento con 1.1 ± 0.05 kg de agua siempre a una temperatura de 35°C . En esta prueba se observó una producción más acelerada en cuanto a la relación 1:4. En esta corrida también se utilizó un tiempo de retención de 30 días para poder compararlo con la relación 1:4. Esta relación mostró una producción acelerada, en el séptimo día el crecimiento era de 1500 mL de biogás producido, esto es 3 veces más en comparación a la relación 1:4. La producción de biogás primero se debe a que hay más excremento que en la relación 1:4 se utilizó el doble de excremento, además la mezcla 1:1 tiene menos agua por lo que la mezcla está concentrada de excremento y no de agua en comparación de la 1:4. El volumen que la relación 1:1 ocupó en el reactor, equivale al 75% en volumen, esto fue para que la presión del biogás generado, pudiera desplazar el agua en el recipiente en que se atrapó el biogás. Si se utiliza un reactor y se utiliza a un 50% de su capacidad en volumen, en ese reactor hay un más espacio para ser ocupado por el biogás y

necesitará una mayor cantidad de biogás para poder llegar a la presión del agua (atmosférica) y poder desplazarla, por eso se utilizó el 75% del volumen de los reactores para generar la presión necesaria para desplazar el agua lo más rápido posible y medir la producción de biogás al día. Los resultados obtenidos para la relación 1:1 muestran un factor de crecimiento de 3.64 ± 0.11 L de biogás producidos al día, lo más relevante de esta prueba, es que en los días 5 y 7 se dio un crecimiento exponencial que se mantuvo hasta el día 15 y luego, volvió a mostrar un crecimiento exponencial. Esta prueba fue la que se acercó más a la producción de biogás teórica, como se encontró en la literatura el crecimiento de biogás es exponencial, debe de pasar por las etapas de hidrólisis, acetogénesis y acidogénesis para poder llegar a la metanogénesis, cuando llega a esta última etapa mencionada la producción de metano aumenta exponencialmente, inicialmente se produce biogás pero con CO_2 en el cual se mantiene constante. Luego empieza con la producción de ácidos en este caso se forman H_2S se mantiene constante y al final la producción del metano que aumenta debido a las dos etapas anteriores que producen el alimento para la producción de metano. La producción total en esta relación 1:1 fue de 4L utilizando 1.1 ± 0.05 kg de estiércol con un tiempo de retención de 30 días utilizando una temperatura de 35°C . Para asegurar que el gas atrapado en las envases PET era biogás, se realizó una prueba de cromatografía de gases (Ver datos adjuntos en anexos) en la cual, se utilizaron dos alícuotas cada una de 0.5mL de biogás obtenidos, en la primera alícuota se encontró un rendimiento de metano del 93% con 2% de CO_2 y un rendimiento de 5% para H_2S para la segunda alícuota se tuvo un rendimiento de metano del 97% de CO_2 y un rendimiento menor al 0% y para H_2S se obtuvo de un 3%, estos resultados obtenidos están por encima de los rendimientos teóricos, pero aun no pueden ser comparados con datos de literatura por que no se mencionan las condiciones de operación además son pruebas a escala de planta piloto donde las variables son controladas de una mejor manera.

Para la relación 2:1 de excremento (búfalo)/agua se utilizó 0.7 ± 0.05 kg de excremento junto con 1.5 ± 0.05 kg de agua. En este caso la producción de biogás fue de 4.71 ± 0.12 L/kg de excremento y fue el mejor rendimiento de las relaciones experimentadas. Se observó que todo el excremento estaba por debajo del agua, a diferencia en la relación 1:1 el excremento podía flotar y estancarse en la parte de arriba, es normal que la materia con menos densidad a la del agua flote. En esta prueba todo el alimento para las bacterias está concentrado al igual que en la 1:1 pero se tiene un medio diluido y el excremento no se estanca. Las condiciones de temperatura y retención fueron las mismas en la relación 2:1 y 1:1, se varió únicamente la materia utilizada. A pesar que la relación 2:1 tiene el mayor factor de crecimiento pero produjo únicamente 3.3 ± 0.11 L a comparación de la relación 1:1 que se produjeron 4 L, pero el rendimiento de la relación 2:1 fue mejor en comparación de la 1:1 por lo que la relación 2:1 es la mejor relación para trabajar, se utiliza menos excremento y tiene un rendimiento mayor además con una relación 2:1 la mezcla

de excremento/agua es menos viscosa que la relación 1:1 por lo que la relación 2:1 es mejor para trabajar ya que es más fácil limpiar el biodigestor por la fluidez de la misma tomando este factor de limpieza, la relación 2:1 es la adecuada para trabajar. Una ventaja extra para la relación 2:1 es la cantidad de agua, debido a que esta caliente de una mejor manera a todo el excremento por consiguiente mejora la producción de biogás.

Se utilizó una relación 1:2 pero esta vez utilizando 1.1 ± 0.05 kg de excremento y 0.5 ± 0.05 kg de agua, en esta corrida de 30 días, no se produjo biogás. Las condiciones en las que trabajo este reactor, no fueron las adecuadas, el excremento no estaba diluido en la poca agua que se agregó por consiguiente las bacterias no tienen un medio por el cual desplazarse y encontrar alimento para producir el biogás. El proceso de producción de biogás es natural pero en condiciones naturales es un proceso lento, no se confirma que no produce biogás, pero se concluye que para un lapso de 30 días no es rentable tener una relación de dos partes de excremento con una parte de agua.

Establecidas la relación excremento/agua se procedió a variar la temperatura. Con las pruebas realizadas descritas anteriormente se hicieron pruebas variando la temperatura en donde se trabajó la temperatura ambiente y una temperatura arriba de los $35.00 \pm 0.01^\circ\text{C}$. Una vez establecida la relación a trabajar (1:1) se realizaron dos corridas en simultáneo para ver como la temperatura afecta en la producción de biogás. Como se mencionó anteriormente, la corrida con la relación 1:1 y con temperatura arriba de $30.00 \pm 0.01^\circ\text{C}$, mostró el mejor crecimiento nuevamente. Por otro lado, la de la relación 1:2, a temperatura ambiente, mostró una producción de 500mL de biogás contra 300mL. La temperatura fue un factor influyente pero con una relación de 1:4 la temperatura no afectó la producción de biogás, se realizaron pruebas con esta relación variando la temperatura y en ambos casos se tuvo una producción de 400mL, la baja eficiencia en este caso se debió a que no es la mejor relación de excremento/agua por la poca cantidad de sustratos para la producción por lo que la relación es la variable más importante a ser controlada y la temperatura es la segunda variable importante. Por otro lado el tiempo de retención se debe al tiempo esperado para que el excremento pierda todos los nutrientes para la producción de biogás, este tiempo se reduce mientras las otras variables estén controladas, si no son controladas de manera adecuada el tiempo de retención será mayor siempre se dará la producción de biogás, pero en un mayor tiempo.

D. Análisis de utilización de suero láctico

La finca "Rama Blanca", ubicada en Sipacate, Escuintla, Guatemala, se dedica a la crianza de búfalos para producir derivados lácticos. Esta producción trae consigo generación de

suero láctico, un subproducto que inicialmente se le daba como alimento a los cerdos del lugar, sin embargo, se suspendió la crianza de los mismos. Se analizó la factibilidad del uso de mezclas de suero láctico y estiércol de búfalo como materia prima para la producción de biogás en un nuevo biodigestor diseñado. Se trabajó con diferentes relaciones de suero láctico con una mezcla de agua y estiércol (50% m/m), para determinar cómo influye la presencia de suero láctico en la generación de biogás.

El suero láctico es una de las materias residuales disponibles en cantidades considerables (160L diariamente) en Rama Blanca. Existen muchos tipos de suero, dependiendo de la producción de queso de la que se obtuvo, sin embargo en el presente trabajo se utilizó suero láctico obtenido de la fabricación de requesón para todas las pruebas realizadas. A partir de ahora al hacer referencia al suero láctico de Rama Blanca se estará hablando sobre el suero obtenido como subproducto de la elaboración de requesón.

Con respecto a la utilización del suero, se analizó diferentes alternativas, sin embargo el principal problema encontrado en esta etapa del proceso se debe al tipo de suero láctico obtenido, ya que debido a que proviene de la elaboración de un queso de pasta hilada, se trata de un suero ácido con una alta concentración de minerales, los cuales lo hacen salado y limitan el número de aplicaciones posibles. En el caso del suero dulce, proveniente de la elaboración de quesos frescos, no se tiene el problema de los minerales, ya que permanecen en el queso y no en el suero. Esto le da una ventaja al suero dulce, ya que no tienen sabor, se adaptan fácilmente como base para algún sabor que se le agregue, por lo que se ha desarrollado un número mucho mayor de aplicaciones. Se ha investigado sobre la posibilidad de desmineralizar el suero ácido mediante la utilización de membranas (puede trabajarse con membranas de microfiltración, de ultrafiltración o de ósmosis inversa) sin embargo no se considera una opción viable para el caso de la finca Rama Blanca, ya que se trata de una tecnología factible para volúmenes altos de suero láctico, y los volúmenes que se manejan en la finca no son lo suficientemente grandes como para justificar la inversión.

Por otro lado, debido a la gran cantidad de búfalos en la finca (456 cabezas) también es muy grande la cantidad de excrementos que deben manejar diariamente. El excremento del ganado se utilizaba originalmente únicamente para compost, sin embargo, con el aumento del número de búfalos en la finca, aumentó también la cantidad de excremento, y la producción de compost por si sola ya no fue suficiente para darle uso a la totalidad de estiércol. Actualmente se calcula que la cantidad de excrementos generada diariamente se encuentra alrededor de las 4.84 toneladas, por lo que se ha vuelto un problema muy grande que es necesario manejar

adecuadamente, para no dañar el medio ambiente y para poder generar utilidades a partir de ello.

Con este objetivo, en Rama Blanca se llevó a cabo la instalación de un biodigestor de estructura flexible (tipo chorizo) que actualmente está en funcionamiento. El biogás generado en el biodigestor es utilizado únicamente en las dos estufas de la planta de lácteos. Este biodigestor es alimentado diariamente con 200 litros de estiércol con agua (se desconoce la relación que manejan) y tiene la capacidad de generar 57 metros cúbicos de biogás. No se tiene control sobre sus condiciones de operación, únicamente en el volumen de la alimentación, por lo que en algunas ocasiones no genera nada de biogás por periodos de hasta 15 días, y en otras ocasiones se genera muy poco biogás, por lo que no se puede satisfacer las necesidades energéticas en la planta de lácteos. El sistema de tubería instalado actualmente conecta el biodigestor directamente con las estufas de la planta de lácteos. Esta disposición no funciona adecuadamente, ya que dicha tubería tiene muchos accesorios que propician la caída de presión del biogás, por lo que muchas veces la llama obtenida en las estufas no es lo suficientemente fuerte o constante para mantener su funcionamiento, y deben recurrir a la utilización de gas licuado para trabajar. El problema principal de la utilización del biodigestor de empaque flexible en conjunto con dicha tubería y el desconocimiento respecto a la cantidad de biogás que generarán diariamente es que hay ocasiones en las que no tienen biogás, y en otras ocasiones que sí tienen, llega con muy poca presión a las estufas, haciendo más lentas las operaciones de la planta, por lo que generalmente trabajan con gas licuado y el biodigestor no es aprovechado.

Según la investigación realizada por Lasing, Botero & Martin (ver referencia en la Bibliografía), trabajar en la generación de biogás es una buena alternativa para países en vías de desarrollo con clima tropical, ya que existe la posibilidad de construir biodigestores simples pero funcionales, que no requieren un monitoreo continuo, y dado por la temperatura promedio que se maneja en todo el año, no es necesario contar con un sistema de calefacción del biodigestor, con lo que se logra economizar en la operación. En el caso de la finca Rama Blanca se ven cumplidas dichas características, contando con un clima dentro del rango de temperaturas mesofílicas de operación de biodigestores durante todo el año.

Fue debido a estas razones que se consideró la realización de un biodigestor que trabaje con los microorganismos del estiércol, y sea alimentado por los restos de biomasa degradable en el estiércol y el suero láctico para generar biogás. La razón por la que se decidió trabajar con estiércol y suero láctico como biomasa en el biodigestor fue porque son recursos disponibles localmente y materiales de desecho, por lo que la idea es darle uso a algo tradicionalmente considerado un residuo a la vez que se genera utilidades a partir de ello. En la revisión teórica realizada se encontró que algunos estudios indican que el estiércol de los búfalos tiene una baja

biodegradabilidad debido a la gran cantidad de componentes inorgánicos y fibras no digeribles en el sistema digestivo del animal. Es por esta razón que el rendimiento en la generación de metano utilizando como materia prima estiércol de rumiantes es bajo, por lo que conviene analizar el efecto que tiene la adición de suero láctico en el proceso.

En cuanto al suero láctico, es importante tomar en cuenta que se trata de un suero láctico muy degradado, ya que la leche de la que se obtuvo se utilizó primero para hacer queso y luego, ese suero obtenido se utilizó para producir requesón, dando como resultado el suero láctico disponible en Rama Blanca. Este suero tiene una menor concentración de proteínas y una mayor cantidad de minerales. Esto hay que considerarlo en la producción de biogás porque en los sueros que tienen una mayor concentración de minerales existe la posibilidad de que la acción de las bacterias metanogénicas se vea inhibida.

En cuanto a las consideraciones medioambientales es bueno analizar los efectos que tendrá la generación de metano (en el biogás), para determinar si su efecto será positivo o negativo. Uno de los puntos a favor de la generación de biogás es que reduce drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero al medio ambiente al compararlo con la utilización de combustibles fósiles

Se realizó pruebas a nivel laboratorio para determinar experimentalmente el efecto que tiene la presencia de suero láctico en un biodigestor funcionando a partir de estiércol de búfalo. Se trabajó con estiércol y agua, y no únicamente con estiércol, debido a que los microorganismos presentes en el estiércol necesitan un medio para poder trasladarse de un área específica a otra, en la que pueden encontrar una mayor cantidad de alimento, por ejemplo, cosa que pueden hacer gracias al agua, y que en el caso de que se tratara de estiércol sólido no sería posible. Al trabajar con una mezcla de agua y estiércol también se logra mejorar la homogeneidad de la solución en el biodigestor, con lo que se busca que las condiciones en todos los puntos del mismo sean lo más similares posibles. Una razón más, y posiblemente la más importante para justificar la adición de agua, es que el biogás generado puede subir a la superficie del biodigestor mucho más fácil en un medio fluido que en un medio sólido, en este las burbujas quedarían retenidas dentro del medio.

La relación de agua y estiércol con la que se trabajó fue de 50% de agua y 50% de estiércol (porcentajes en masa), dado a que Juan Carlos Rodas, dentro de las pruebas realizadas a nivel laboratorio de diferentes relaciones de estiércol y agua (trabajo de su módulo del megaproyecto) determinó que ésta es la relación que genera una mayor cantidad de biogás. A partir de ahora, cuando se haga referencia al término “mezcla” utilizada en el biodigestor se estará hablando sobre una mezcla de 50% en masa de agua y 50% de estiércol.

Se trabajó con un sistema mesofílico, en el que la temperatura de la biomasa dentro del biodigestor fue de 35°C, la cual se mantuvo constante durante el período de ejecución de pruebas, dado que, según la investigación realizada por Luis Fernández (ver referencia en el Marco Teórico), los biodigestores mesofílicos son los que resultan más económicos, ya que al no necesitar alcanzar una temperatura muy elevada tampoco necesitan mucha inversión energética para lograrlo. Por otro lado la temperatura ambiente en Sipacate, Escuintla (lugar en que se ubica la finca Rama Blanca) se encuentra dentro del rango de temperaturas mesofílicas (entre 15°C y 45°C), por lo que no requeriría ninguna inversión mantener funcionando el biodigestor en dicho rango. La información obtenida de la investigación realizada por Luis Fernández indica que la temperatura óptima para trabajar en el rango mesofílico es de 35°C en el interior del biodigestor, por lo que si se desea llegar a esta temperatura de operación sería necesaria una inversión energética, para subir de 27.3°C (temperatura promedio anual de Escuintla) a 35°C.

La teoría investigada indica que la adición de suero láctico dulce al estiércol mejora las condiciones de la metanogénesis, ya que el suero aporta la materia orgánica que carece el estiércol, como proteínas, carbohidratos y lípidos que alimentan a los microorganismos, lo que repercute en un aumento de la concentración de metano en el biogás producido. Una vez los microorganismos involucrados en la metanogénesis han logrado adaptarse a su medio, y se han estabilizado, es posible utilizar el suero láctico como alimento para dichos microorganismos. Este comportamiento trató de demostrar con las pruebas realizadas a nivel laboratorio, utilizando el suero láctico obtenido de la producción de requesón.

Se trabajó con cuatro relaciones de suero láctico y mezcla de estiércol con agua. Estas relaciones fueron, haciendo referencia primero al porcentaje de la mezcla y luego al suero, 80%-20%, 75%-25%, 66%-34%, 50%-50% y 34%-66%, todos porcentajes masa. Se seleccionó estos porcentajes para trabajar debido a que con ellos se logró abarcar la relación de suero láctico en el biodigestor desde una concentración baja hasta concentraciones altas, para así poder determinar el efecto del suero láctico en la cantidad y calidad del biogás generado. También se trabajó con un biodigestor al cual se alimentó únicamente con suero láctico, para comprobar si en el suero estaban presentes los microorganismos involucrados en la metanogénesis, o era necesario obtenerlos del estiércol. Todo se trabajó en triplicado para verificar la validez de los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos muestran claramente que a medida que aumenta la cantidad de suero láctico agregado al sistema, mayor es la cantidad de biogás generado, hasta alcanzar un punto (determinado en 50% de suero láctico en la alimentación) en el que la cantidad total de biogás generado disminuye.

En general se tuvo varias dificultades al operar de forma batch con biodigestores a escala laboratorio. El principal problema fue que no se contó con una forma de agitación adecuada. La teoría indica que es necesario agitar el contenido dentro de un biodigestor para poder homogeneizarlo y así mejorar su eficiencia, sin embargo fue imposible instalar un medio de agitación mecánica dentro del biodigestor, por lo que se debió hacer de forma manual agitando el recipiente de vidrio. La agitación manual no es un sustituto adecuado para la agitación mecánica, ya que la agitación mecánica es recomendado que se realice cada hora, pero por motivo de disponibilidad de tiempo y acceso al Laboratorio de Operaciones Unitarias, solo podía realizarse la agitación manual unas pocas veces al día, y los días festivos y los fines de semana no se agitó para nada debido a que no era posible acceder al Laboratorio. Las repercusiones de no contar con agitación fueron que en algunas ocasiones el estiércol sedimentó al fondo del biodigestor, mientras que el suero con el agua quedaron en la parte superior. Esto elimina la homogeneidad que se busca tener en el sistema. No se realizó un diseño que tuviera agitación debido a que se trabajó cuatro reactores simultáneamente, ya que fue necesario realizar 18 pruebas de 20 días cada una, y no se tuvo a disposición un medio mecánico de agitación para cada biodigestores trabajado.

En lo referente a la alimentación de los microorganismos, una vez han acabado con los nutrientes disponibles en la biomasa alimentada es necesario retirar dicha biomasa escasa de nutrientes y reemplazarla con una corriente nueva de alimentación, para que la generación de metano continúe, según recomiendan las fuentes bibliográficas investigadas. Por ésta razón es apropiado instalar un sistema de alimentación y purga a los biodigestores, e ir alimentándolos progresivamente, y extrayendo la biomasa que únicamente ocupa espacio y ya no aporta nutrientes a los microorganismos. Esto no pudo realizarse en los biodigestores a nivel laboratorio, por una parte debido a que para alimentar al sistema era inevitable la entrada de aire, lo cual afectaba el deseado funcionamiento anaerobio. Por otra parte, no se contó con una forma de purgar el sistema que no implicara retirar el tapón de hule encargado de sellar el biodigestor del aire del medio, y retirar la biomasa por dicha abertura representaría inevitablemente que el sistema se volviera aerobio. Por estas razones se decidió ingresar la totalidad del suero láctico a utilizar en cada sistema en la única alimentación realizada al momento de inicio de operaciones del biodigestor, con lo que se logra conservar un sistema anaerobio y a la vez se pone la totalidad de los nutrientes que se desea evaluar en cada prueba a disposición de los microorganismos involucrados en la metanogénesis. Otra razón para trabajar los biodigestores como un sistema cerrado fue para poder determinar la razón de generación de biogás por unidad de biomasa alimentada, ya que de esta forma se conoce la masa utilizada en la alimentación y con el volumen de biogás generado es fácil determinar dicha razón.

Otra dificultad encontrada al operar con los biodigestores a nivel del laboratorio fue que no se pudo monitorear el comportamiento del pH del sistema durante su operación. Es importante controlar dicha variable ya que durante la etapa de fermentación se generan alcoholes y ácidos grasos volátiles que pueden cambiar la acidez del medio, y se encontró en la revisión literaria que cantidades grandes de ácidos grasos inhiben la actividad de los microorganismos metanógenos. Este es un problema mayor al de la agitación y la alimentación progresiva, ya que si la acidez del medio inhibe la generación de metano, la operación del biodigestor pierde sentido. Por esa razón es importante llevar un control estricto de la acidez del sistema, y neutralizarlo si es necesario, para mantenerlo dentro de un rango de 6.4 y 7.6, el rango en el que se logra que todos los microorganismos involucrados en las cuatro etapas de la metanogénesis trabajen adecuadamente. Este análisis no pudo realizarse dado que para extraer una muestra era necesario quitar el tapón de hule que funciona como sello del sistema, y al quitarlo se perdería el medio anaerobio.

Se decidió trabajar con los biodigestores alimentados desde el principio con la cantidad total de biomasa que tendrían, y sellados al medio ambiente para permitir el desarrollo de un medio anaerobio. Los resultados obtenidos al trabajar con el biodigestor que fue alimentado solamente con suero láctico mostraron una generación de gas casi nula. En dos de las pruebas realizadas se generó aproximadamente 100mL de biogás mientras que en la tercera prueba se obtuvo únicamente 50mL. En base a estos resultados se puede concluir que en el suero láctico no se encuentran presentes los microorganismos metanógenos necesarios para la generación de biogás, es necesario obtenerlos de otra fuente. En este caso el estiércol servirá para inocular el biodigestor.

Los resultados obtenidos con las demás relaciones trabajadas muestran cierta tendencia que permite interpretar que a medida que aumenta la cantidad de estiércol en el biodigestor, la cantidad de gas generada es mayor, hasta llegar a un punto en el que dicha cantidad es muy alta, por lo que el poco porcentaje de suero agregado ya no se da abasto para cumplir con las demandas alimenticias de los microorganismos. La producción de biogás utilizando únicamente suero láctico fue muy pobre, prácticamente cero. En la proporción de 66% de suero y 34% de mezcla se puede observar que la generación de biogás es mayor, pero aún muy pobre, siendo 0.193 ± 0.013 litros de biogás por cada kilogramo de alimentación. Los resultados del trabajo con la relación de 50% de suero y 50% de mezcla muestran un leve aumento en el volumen de gas generado en comparación con la relación anterior, 0.292 ± 0.025 L/kg sin embargo éste continúa siendo muy bajo como para considerarlo una opción viable. La relación trabajada que aportó los mejores resultados fue la que contuvo 34% de suero y 66% de mezcla, en la que se puede ver que la cantidad de biogás generada fue 1.247 ± 0.314 litros de biogás por cada kilogramo de alimentación. En la relación de 25% de suero láctico y 75% de mezcla de estiércol y agua se

observa un descenso en la cantidad de biogás generado, que fue $1.098 \pm 0.040 \text{L/kg}$. Es en este punto en el que se considera que la carga microbiana fue mayor a la que la alimentación pudo satisfacer, por lo que, al no contar con más nutrientes para continuar con la metanogénesis, únicamente los microorganismos que tuvieron acceso a los nutrientes pudieron generar biogás, causando un descenso en el rendimiento del biodigestor. Finalmente los resultados obtenidos para la relación formada por el 20% de suero y 80% de mezcla se ve que la generación de biogás ha descendido considerablemente con respecto a la relación anterior, un descenso mayor al 30% con respecto al resultado obtenido trabajando con 25%-75%, siendo $0.803 \pm 0.176 \text{L/kg}$. Este resultado respalda la idea de que los microorganismos se quedaron sin nutrientes para degradar, por lo que a falta de materia prima, el volumen obtenido de biogás debió disminuir también.

El comportamiento típico de una generación de biogás se obtuvo en todas las gráficas realizadas. En los gráficos 1 al 5 se puede apreciar claramente la tendencia ascendente del gas generado por kilogramo de alimentación contra el número de días que se operó. Todos los gráficos realizados con diferentes relaciones de suero láctico y mezcla de agua y estiércol muestran el mismo comportamiento. En la bibliografía investigada se mencionan varias etapas en el desarrollo de los microorganismos, entre las que se encuentran la etapa de adaptación, la aceleración positiva, la aceleración negativa y la fase estacionaria. Con las pruebas realizadas en el laboratorio (ver Gráfico No.2 al Gráfico No.7) se pudo determinar dichas etapas asociadas a la generación de biogás. Durante los primeros días se observó la etapa de adaptación, en la que los microorganismos generan muy poco biogás dado a que es un nuevo medio el que los rodea (causado por la presencia de suero láctico). Seguidamente se distingue la aceleración positiva, etapa en la que los microorganismos crecen aceleradamente, lo cual repercute en una acelerada generación de biogás. Esta etapa se distingue en las gráficas de razón de generación de biogás con respecto a los días de producción dado que allí la pendiente de la curva es mayor. A continuación es la aceleración negativa, en el que la razón de generación de biogás disminuye, dado que los microorganismos se comienzan a estabilizar porque la cantidad de nutrientes disponibles es menor. Al llegar a este punto, la población microbiana ha crecido de tal manera que la cantidad de nutrientes disponibles ya no es tan abundante como era anteriormente, por lo que la actividad microbiana comienza a disminuir, lo cual pudo determinarse a nivel macroscópico mediante el volumen generado de biogás. Finalmente se llegó a una fase estacionaria, en la que la generación de biogás cesó completamente, debido a que ya no hubo nutrientes disponibles para alimentar a los microorganismos involucrados en la metanogénesis.

Para determinar la presencia de metano en el biogás generado se trabajó con el equipo de cromatografía de gases en el laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Se analizó una muestra del gas generado utilizando 50% de suero

láctico y 50% de mezcla, y una muestra del biogás obtenido utilizando una relación de 34% de suero láctico y 66% de mezcla de estiércol y agua. La cromatografía que se realizó a la muestra alimentada con $50.00 \pm 0.03\%$ de suero se determinó una concentración aproximada de metano de 0.18%, 12.88% de dióxido de carbono, 50.76% de ácido sulfhídrico. En el cromatograma realizado para la muestra de biogás obtenido con una alimentación de $66.00 \pm 0.03\%$ de suero, se determinó un porcentaje aproximado de metano de 0.32%, 83.17% de CO_2 y 8.55% de H_2S . Dicho análisis fue realizado matemáticamente, mediante un porcentaje de áreas de los picos registrados con la cromatografía (ver cromatogramas en Anexos).

El biogás generado fue recibido en botellas de jugo, dicha botella no tenía ninguna información sobre su composición, por lo que se consideró la posibilidad de que el tipo de material no fuera el indicado para la captación de metano y estuviera permitiendo que dicho gas se fugara. Para comprobar si el material de la botella era tereftalato de polietileno (PET) se realizó un análisis en espectrofotometría IR a una muestra de la botella de jugo utilizada y a una botella de PET utilizada para gaseosas. El resultado de este análisis mostró que ambas botellas están hechas del mismo material, es decir, la botella de jugo también es de PET, por lo que no habría razón para creer que se está fugando el metano del biogás (ver Figura No.9 y Figura No.10 en la sección de Anexos). En conclusión, este resultado indica que de hecho el biodigestor está generando biogás, pero dicho biogás es inútil, ya que su porcentaje de metano es 0%.

Este problema puede deberse a varias razones. En el caso específico de los búfalos, su estiércol tiene una baja biodegradabilidad debido a la gran cantidad de componentes inorgánicos y fibras no digeribles presentes en su sistema digestivo, debido principalmente por su dieta, y los búfalos de la finca Rama Blanca se alimentan, entre otras cosas, de caña de azúcar, una planta muy fibrosa. Puede ser que los microorganismos fueron incapaces de obtener los nutrientes presentes en el estiércol debido a la alta cantidad de fibras, y los nutrientes obtenidos del suero láctico no bastaron para generar metano. Este porcentaje de metano también pudo deberse a que el suero láctico utilizado para la alimentación del biodigestor tuvo una alta concentración de minerales, lo cual afecta la actividad de las bacterias metanogénicas, por lo que no se logró generar metano, el biogás únicamente estuvo compuesto principalmente por dióxido de carbono y ácido sulfhídrico. La cantidad de minerales en el suero láctico no pudo determinarse debido a que el equipo de absorción atómica del Laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado no estuvo a disposición, ya que uno de sus componentes estuvo en mal estado, pero se puede asumir que el suero láctico utilizado tuvo una alta concentración de minerales dado que proviene de la elaboración de queso inicialmente y posteriormente de requesón, se encuentra carente de nutrientes y alto en minerales, los cuales permanecen en el suero.

Otra posible causa de que no se haya generado metano en el biodigestor es debido a la acidez del sistema, ya que si los microorganismos se encuentran en un medio con un pH muy bajo, la actividad de los microorganismos metanógenos se inhibe, con lo que solo se lograría generar ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y trazas de otros gases, razón por la cual es recomendable monitorear el pH en los biodigestores. Agregar la totalidad del suero láctico que se manejaría en cada una de las proporciones trabajadas de una sola vez puede haber causado un shock a los microorganismos, debido al cambio drástico de su medio, por lo que muchos no se adaptarían y la metanogénesis no se llevaría a cabo, únicamente la acidogénesis y la acetogénesis. También puede ser un problema causado por la temperatura a la que se trabajó en los biodigestores, ya que se trabajó a una temperatura constante de 35°C, sin embargo, existe investigaciones que indican que la metanogénesis se ve favorecida en mayor medida cuando se trabaja con un biodigestor termofílico, a una temperatura aproximada de 55°C.

Los microorganismos metanógenos tardan cierto tiempo en adaptarse a las condiciones del nuevo medio al que se les expone, razón por la cual al principio de la operación no se detecta la producción de biogás. Una vez se han adaptado al medio comienzan a digerir los nutrientes y a generar biogás a un ritmo más o menos constante. Dado a los problemas experimentados al trabajar con un sistema cerrado, se realizó pruebas utilizando un sistema semi-continuo, el cual fue alimentado periódicamente (cada dos días) con suero láctico y se mantuvo a una temperatura de 55°C. Dicha temperatura es la temperatura óptima del rango termofílico (50°C a 80°C), en la cual la literatura indica que la generación de biogás se acelera y se favorece la metanogénesis. En cuanto a la alimentación periódica de suero láctico al sistema, dado que los microorganismos tardan cierto tiempo en adaptarse a un nuevo medio, con esta alternativa son expuestos progresivamente al nuevo sustrato de alimentación, ayudando a que los microorganismos se adapten al mismo y evitando el shock que se experimenta al cambiarlo drásticamente.

El sistema semi-continuo constó de dos erlenmeyers conectados a través de una manguera, y una manguera para extraer agua desplazada hacia una probeta (ver imágenes en Anexos). El primer erlenmeyer funcionó como biodigestor, en el cual se agregó 100.00±0.01g de estiércol y 100.00±0.01g de agua, y cada dos días se alimentó con 10.00±0.01g de suero láctico (5% de la masa original en el biodigestor). La alimentación se realizó a través de una manguera sellada, la cual se abrió únicamente en el momento de realizar la alimentación, para mantener un medio anaerobio dentro del biodigestor. El segundo erlenmeyer estuvo lleno de agua, y a medida que se generaba biogás, éste empujaba el agua del segundo erlenmeyer a través de una manguera hacia una probeta, en la que se midió el volumen generado de biogás. Con este sistema se logró disminuir el tiempo perdido en la operación, ya que solo se tuvo que pasar por

la fase de adaptación una vez, y se continuó trabajando de forma continua mediante la alimentación con suero láctico, una vez los organismos estuvieron adaptados.

Se obtuvo biogás desde el primer día de operación (ver Gráfico No.8) por ser un sistema termofílico de rápida generación de biogás. Al analizar este biogás, obtenido utilizando $9.09 \pm 6.47 \times 10^{-5}\%$ de suero láctico en el biodigestor, con cromatografía de gases se determinó que aproximadamente el 35.27% fue metano, 14.44% fue dióxido de carbono y 50.29% fue ácido sulfhídrico. Se analizó de igual forma el biogás obtenido luego de una semana de operación, obtenido con una alimentación en el biodigestor de $13.04 \pm 7.61 \times 10^{-5}\%$ de suero láctico, y se determinó que el porcentaje de metano en éste fue de 6.01%, 86.83% de CO_2 y 7.16 de H_2S . En la segunda semana de operación del biodigestor se determinó que el biogás generado utilizando $20.00 \pm 9.16 \times 10^{-5}\%$ de suero se compuso de 0.296% de metano, 40.17% de dióxido de carbono y 59.53% de ácido sulfhídrico. Finalmente, en la tercera semana de operación, utilizando $25.93 \pm 9.42 \times 10^{-5}\%$ de suero láctico se obtuvo un biogás compuesto por 0.380% de metano, 94.38% de dióxido de carbono y 5.24% de ácido sulfhídrico.

Este aumento en la cantidad de dióxido de carbono, y la disminución en la cantidad de metano pudo deberse a que la acidez del suero afectó a las bacterias metanogénicas, sin embargo, se determinó el pH del suero láctico utilizado en 4.624 ± 0.001 , por lo que en todas las alimentaciones de suero láctico realizadas al biodigestor operado de forma intermitente fueron neutralizadas previamente utilizando bicarbonato de sodio. A pesar de alimentar el sistema con suero láctico neutralizado, aún así se vio inhibida la generación de metano. La razón para ésta disminución en la concentración de metano en el biogás puede ser que el suero láctico utilizado haya estado muy degradado (ya que el suero láctico obtenido a partir de la producción de requesón cuenta con pocas proteínas, en su mayoría son minerales) y no haya aportado nutrientes al sistema, sino al contrario, haya disminuido la concentración de nutrientes disponibles para los microorganismos metanógenos.

El suero láctico utilizado en las pruebas se obtuvo como subproducto de la producción de requesón, es decir, inicialmente se había hecho queso con la leche, y del suero obtenido se produjo requesón, dejando como subproducto el suero láctico utilizado. Este suero láctico se encuentra carente de proteínas, carbohidratos y grasas, ya que la mayoría de ellas se quedó en el queso y en el requesón fabricado, dejando minerales presentes en una alta concentración en él. Una posible explicación al comportamiento determinado en las pruebas realizadas de generación de biogás utilizando suero láctico como alimento al biodigestor funcionando a base de estiércol de búfalo es que el suero láctico tuvo una cantidad baja de nutrientes para las bacterias metanogénicas y una alta concentración de minerales, lo cual afecta el crecimiento microbiano, que a su vez repercute en la producción de metano. Es por esta razón que se observa que a

medida que aumenta la cantidad de suero láctico utilizada en el biodigestor, disminuye la concentración de metano en el biogás generado. A esta conclusión se llegó analizando únicamente información teórica, y no con resultados experimentales, debido a que el equipo de absorción atómica de la Universidad del Valle de Guatemala no estuvo en condiciones de utilizarse.

Estos resultados muestran que, trabajando con bajas concentraciones de suero láctico, la generación de metano en el biogás aún se da en cantidades apreciables, sin embargo, a medida que la cantidad de suero láctico aumenta en la proporción, la concentración de metano en el biogás generado desciende, hasta llegar al punto en que su presencia es nula. Uniendo éstos resultados con los obtenidos al trabajar con los obtenidos trabajando con los biodigestores batch, se puede concluir que no es recomendable la utilización de suero lácteo en el biodigestor, ya que la mayor cantidad de metano determinado en el biogás, 35.27%, aún es muy bajo para poder ser inflamable, es necesario tener un mínimo de 40% de metano en el biogás para poder utilizarlo como combustible.

Se analizó la posibilidad de utilizar diferentes materias orgánicas residuales como alimentación en el biodigestor, sin embargo esto no fue posible debido a que los únicos dos materiales residuales disponibles en cantidades representativas en Rama Blanca son el estiércol y el suero láctico. Originalmente existía la disponibilidad de trabajar con aceite residual del proceso de fabricación de aceite de palma de la finca “Las Palmas”, sin embargo en el presente año dicha finca compró un biodigestor, el cual fue diseñado para funcionar alimentado con el aceite residual y ya se encuentra en funcionamiento, por lo que ya no se contó con la alternativa de utilizarlo en el biodigestor de Rama Blanca.

E. Diseño del biodigestor

El objetivo de este trabajo fue diseñar un biodigestor para la producción de biogás a partir de excremento de búfalo para su construcción e instalación en la finca Rama Blanca de Sipacate, La Gomera Escuintla. Por lo tanto el dimensionamiento del biodigestor está sujeto al espacio y materias primas disponibles y a los usos que se le desee dar.

Debido a que en un biodigestor ocurre una reacción química, es que se le puede llamar reactor, el diseño de un reactor se realiza con ecuaciones de diseño, las cuales requieren de la cinética de reacción. Se calculó una cinética de reacción a partir de los datos de los módulos “Producción de biogás a partir de excremento de búfalo determinando las condiciones de operación: temperatura, relación excremento/agua y tiempo de retención de sólidos, para condiciones del biodigestor en la finca Rama Blanca” y “Evaluación del uso de suero lácteo y las

posibles materias orgánicas disponibles en mezclas con estiércol de búfalo para su utilización en el biodigestor de la finca Rama Blanca"; sin embargo en el segundo, el gas que se obtuvo se analizó por cromatografía y su contenido de metano es muy bajo por lo que en este trabajo no se utilizaron los datos obtenidos en éste módulo porque el metano es el componente del biogás que se quiere debido a su poder energético.

La dificultad con el dimensionamiento a partir de ecuaciones de diseño fue que la materia prima era estiércol, por lo que no se puede obtener una ecuación para el sustrato y por lo tanto no se puede plantear una ecuación química de reacción ni hacer un mecanismo químico para la reacción que está sucediendo. Sin embargo el proceso de metanogénesis es un proceso enzimático por lo que los resultados se pueden ajustar y comparar de acuerdo a un modelo previamente establecido que es el modelo de Michaelis-Menten. Acorde a este modelo se graficó la concentración de metano contra velocidad de reacción (Figura 8) y lo que se esperaba obtener es una gráfica logarítmica. Cómo se puede observar no se obtuvo la gráfica deseada, sin embargo se observó que la curva se puede segmentar y de esta forma se tienen cuatro regiones que en primera instancia parecen tener forma de gráfica logarítmica. Entre las cuatro regiones hay secciones en las que la velocidad de reacción es muy baja, incluso cero, estas secciones pueden ser periodos de adaptación para los microorganismos. El estiércol tiene carbohidratos, proteínas y grasas que son en un principio el alimento de los microorganismos por lo que cada pico puede deberse a la producción de gas luego de un periodo de adaptación, por ejemplo puede ser que la adaptación ocurra para que el alimento sean lípidos y proteínas entonces se tiene una producción de gas hasta que los lípidos y proteínas se agoten, cuando esto ocurre se tiene un periodo de adaptación para que el alimento ahora sean carbohidratos y se produce gas hasta que éstos se agoten y así sucesivamente; para esto también debe tomarse en cuenta que a medida que ocurre la reacción se crean alcoholes y ácidos que también sirven de alimento. A cada uno de los segmentos se le aplicó regresión logarítmica y se mostró su valor de R^2 (Figura 9) los cuales fueron 1, 0.8416, 0.9319 que son bastante altos aunque se esperaría tener valores muy cercanos al 0.99 para asegurar el comportamiento esperado, en los dos casos que el valor es de 1 se debe a que sólo se tienen dos puntos por lo tanto no se tienen suficientes datos para tener la cantidad suficiente de puntos en estas secciones y así poder concluir si el comportamiento es logarítmico o no, es decir que aunque el R^2 es igual a 1 no se puede concluir que en ese segmento se tenga un comportamiento logarítmico. Otro punto de problemática que se tiene para realizar el diseño por éste método, es que la serie de datos de la que se obtuvo concentración y la velocidad de reacción es única, es decir que no son datos obtenidos de pruebas en triplicado, debido a que las demás pruebas tuvieron dificultades y no generaron la misma cantidad de biogás, esto evita la posibilidad de realizar análisis estadístico para respaldar los resultados. Con un diseño a partir de ecuaciones se logra predecir lo que sucederá, por lo

que es importante realizar la experimentación controlando y modificando las variables. El pH es una variable dentro de éste proceso que es determinante, y a pesar de que el pH inicial está dentro del rango que es bueno para el proceso de metanogénesis es necesario incluirlo como variable en la cinética, debido a que es un factor que inhibe si no está dentro del rango, pero por la metodología y forma de realizar las pruebas no se pudo controlar, por lo que si se lograra tener una cinética le faltaría el efecto del pH. Por estas razones es que no se utilizaron ecuaciones de diseño ni se calculó una cinética de reacción para el biodigestor. Cómo el pH no se tomó en cuenta para el diseño, es necesario que al estiércol que se usará para la mezcla que se alimentará al biodigestor se le mida el pH porque si no está dentro del rango puede ser perjudicial para el proceso.

Otra forma de diseñar un biodigestor es a partir de la DQO o DBO de la materia prima que se tenga. En este trabajo el diseño se hizo utilizando el valor de DBO de $1,992.0000 \pm 0.0439$ mg/L ya que éste es indicador de la materia orgánica biodegradable, es decir que se degrada por procesos naturales, por lo tanto utilizando este valor en lugar del de DQO se tiene una mejor aproximación. Para el diseño se asume una conversión del 80% del potencial de generación calculado a partir del DBO, debido a que a pesar de que en las pruebas no se produzca más biogás luego de 30 días realmente no se ha agotado todo el sustrato, es por esto que a nivel industrial muchas veces se diseña una recirculación de los lodos que salen del biodigestor.

Se realizaron los cálculos de acuerdo a cuatro criterios. El primer criterio fue de acuerdo al espacio disponible, este se realizó pensando en colocar dos biodigestores y con éste resultado se puede tener una idea de la capacidad de generación que se puede llegar a tener, la cual estaría alrededor de los $10,586.58 \text{ m}^3/\text{día}$ para cada uno de los biodigestores. Para la realización de una planta de ésta magnitud se debe de aumentar la cantidad de búfalos, ya que la materia prima que debe de alimentarse es mucho mayor a la que se tiene actualmente, por esta razón no es viable ni lógico pensar en una construcción inmediata de biodigestores de este tamaño, pero nos da una idea de la máxima capacidad que la finca tiene de acuerdo al espacio.

Luego de dimensionar en base al espacio surgió el segundo criterio que es de acuerdo a la materia prima. La asunción más importante para la realización de los cálculos es que todo el estiércol que se genera todos los días se utilizará para alimentar y que la cantidad generada todos los días es constante. El cálculo se realizó en base a $4,840 \text{ kg}$ de estiércol diarios que es un dato obtenido de la finca Rama Blanca. La cantidad de biogás que se produciría sería de $1,025.94 \text{ m}^3$ por día. Actualmente de acuerdo a la materia prima disponible esta es la máxima capacidad de producción de biogás de la finca. El volumen del biodigestor necesario sería de 364.34 m^3 que es el más grande que el necesitado de acuerdo a los demás criterios pero que al compararlo con el volumen obtenido de acuerdo al espacio disponible no representa problema

de falta de espacio. El problema con este es buscar cómo desechar o qué hacer con el efluente de lodos que sale del biodigestor, éste es un problema ambiental. Otra dificultad es que se produciría más biogás del que la finca puede consumir por lo que se deberá de pensar en otros usos, ya que de nada sirve producir biogás para luego liberar a la atmósfera por causa de no encontrarle o definirle aplicaciones y de generar en exceso.

El tercer criterio surgió de la necesidad de buscarle uso a los lodos del efluente y también surge del módulo *“Aprovechamiento de los Residuos del Biodigestor productor de biogás, diseñado para la Finca Rama Blanca, por medio de Compostaje”*. Según este módulo es necesario que esté disponible una masa de estiércol igual a la masa de lodos que salga del biodigestor, porque para la realización de un compost adecuado se necesita mezclar en partes peso iguales el efluente, que está bajo en nutrientes, con el estiércol que es rico en alimento para el proceso de compostaje a través de lombrices (lombricompost). La generación de biogás sería de 1,025.94 m³/h y el volumen del biodigestor necesario es de 153.77 m³. Este criterio tiene como fin y está sujeto a la suposición de que todo el efluente será utilizado para compostaje, al igual que en el criterio de la materia prima se genera más biogás del que se utiliza en la finca y como se mencionó no es útil hacer esto y además el gas metano es un gas de efecto invernadero más dañino para la capa de ozono que el dióxido de carbono por lo que producirlo para no usarlo también tiene un impacto ambiental negativo.

Como en los dos últimos criterios no se tuvo uso para el biogás generado se puede pensar en un cuarto criterio que es de acuerdo al uso, éste va de respaldado por el módulo *“Selección de metodología para el correcto almacenamiento y uso de biogás a partir de las condiciones de operación del proceso propuesto a Finca Rama Blanca, Sipacate, Guatemala”*. Conforme al módulo se necesita 515m³/día de biogás para satisfacer el uso actual en estufas y para colocar una micro turbina generadora. En base a este caudal necesario se calculó el volumen del biodigestor necesario y éste es de 77.19 m³. Bajo este criterio se tiene un uso para el biogás producido y sigue siendo posible la realización de compost con el efluente. Por estas razones es que los planos y el diseño del biodigestor están sobre este criterio.

Para la realización del diseño del biodigestor se utilizó el volumen, calculado para contener la los residuos orgánicos necesarios para la producción del biogás requerido, como principal factor de diseño. El volumen calculado se dividió en dos ya que se está proponiendo hacer dos biodigestores por si en algún momento se tiene problema con alguno de los dos. De esta forma al fallar uno o al hacer mantenimiento se tendrá otro en funcionamiento, el cual es capaz de producir la mitad del gas con lo cual se cubre la demanda diaria de biogás de las estufas y se puede utilizar la micro turbina generadora cada dos días. Para evitar las acumulaciones, el biodigestor no debe tener esquinas, ya que al tener acumulaciones el

volumen efectivo del biodigestor disminuye, por lo tanto se tendrá un menor tiempo de retención y esto implica una menor producción de biogás. El problema de acumulaciones se soluciona con limpieza, sin embargo al limpiar las áreas que retienen sólidos se debe hacer limpieza de todo el biodigestor lo que implica detener todo el proceso lo cual representaría tener equipos parados además del tiempo para que el biodigestor vuelva a producir biogás. En base a lo anterior se diseñó el biodigestor con inclinaciones para que no tenga esquinas, cabe mencionar que el volumen que el biodigestor pierde por agregar inclinaciones en las esquinas fue tomado en cuenta y compensado en el diseño. En el biodigestor se incluyen desviaciones de concreto las cuales se hacen con el propósito de favorecer la agitación la cual permite una distribución uniforme y favorece la metanogénesis. Además en cada una de las desviaciones se deja una sección (como ventana) para mejorar el movimiento del sustrato dentro del biodigestor. Al igual que con las inclinaciones en las esquinas las adiciones o pérdidas de volumen fueron tomadas en cuenta. El otro factor tomado en cuenta fue que la carga tuviera una altura mayor que la salida, esto es de suma importancia ya que es lo que garantiza que la mezcla excremento agua fluya en la dirección deseada. Además de considerar la diferencia de altura entre la carga y descarga del biodigestor, se decidió diseñarlo con una inclinación de 5° , para asegurar que la mezcla estiércol agua fluya en la dirección deseada. El ángulo fue elegido en base al *“Manual de diseño y manejo de biodigestores de bajo costo”*, en donde la estructura se construye con una inclinación entre 3° y 7° , se eligió el ángulo intermedio que equivale a una altura extra del lado de la descarga de 0.88 m. La descarga del biodigestor se realiza de manera continua por lo que para recolectarla se deberá dejar recipientes la reciban y luego transportarla al área de compost, otra forma sería construir un canal con inclinación en la salida de los biodigestores que dirija los efluentes al área deseada. Para colocar la altura de la salida se tomó en cuenta que esta estuviera colocada de tal manera que exista el 20% de seguridad libre y recomendado dentro del biodigestor. Otra característica es que el largo total es de 12.92m mientras que el ancho y el alto son de 2.70m y 1.65m respectivamente; el largo es mucho mayor que las otras dos dimensiones, esto se debe a que se desea tener mucha más área superficial y alturas bajas para que el biogás no tenga grandes dificultades en subir y acumularse en la parte de arriba, de otra forma es posible que el biogás no pueda superar la biomasa que tenga sobre él y por lo tanto se liberará al salir en el efluente y ya no sería recolectado. Esta consideración se debe sobre todo a la falta de agitación dentro del sistema. El volumen efectivo de cada biodigestor es de 38.85 m^3 , que es muy cercano al valor calculado de 38.60 m^3 . El espacio total obtenido con la mayor magnitud en cada dimensión y que toma en cuenta 0.15 m de espesor de pared es de 65.81 m^3 .

Pensando en la limpieza del biodigestor el diseño incluye una tubería de 6 pulgadas en la parte inferior del biodigestor. Con lo que es posible descartar toda la carga orgánica que el biodigestor contenga, por el mismo efecto de gravedad que la inclinación de 5° provoca.

El material elegido para la fabricación del biodigestor es concreto reforzado, este material fue elegido por su durabilidad, porque se puede moldear antes de endurecer lo cual permite que adopte la forma deseada, otra característica importante es su resistencia al fuego porque al generar gases combustibles es importante evitar que entren en contacto con fuego no controlado ya que se tienen riesgos de explosión. También el concreto reforzado es muy poco propenso a agrietarse lo cual es ideal para el proceso ya que se evitan las entradas de aire al sistema lo cual provocaría un sistema no anaerobio y por lo tanto no se generaría biogás.

La construcción del biodigestor puede realizarse con formaletas en la estructura. En cuanto al techo también puede ser del mismo material pero tomando en cuenta columnas para que el biodigestor lo soporte. Debido a la inclinación, el piso debe de hacerse con mucho cuidado, poniendo atención en la consistencia del concreto, para que este tenga la misma resistencia.

Para el cálculo del costo de construcción del biodigestor se ingresó a la página web de la municipalidad de Guatemala y se descargó de la sección "*LEYES Y REGLAMENTOS APLICABLES PARA LA AUTORIZACIÓN DE FRACCIONAMIENTOS, OBRAS Y USOS DEL SUELO*" y sub sección "*COSTOS POR METRO CUADRADO DE CONSTRUCCIÓN Y TASAS PARA LA AUTORIZACIÓN DE FRACCIONAMIENTOS, OBRAS Y USOS DEL SUELO*" el acuerdo COM-012-04 (anexo D), en donde se fijan los costos por metro cuadrado de construcción y se contemplan interés para el cálculo en años siguientes al en que el acuerdo fue firmado, que es 2004. El área de construcción del biodigestor es 31.65 m² pero en el acuerdo COM-012-04 no existe específicamente levantado de concreto, por lo que se tomó el precio de una construcción de menos de 6 metros de altura que es de Q.700.00 por m², por lo tanto el precio sería de Q.22,153.39 pero el acuerdo contempla un interés del 4.5% anual por lo que el precio es de Q.32,922.05 por cada uno, lo que en total es una inversión sólo en construcción de Q.65,844.09.

Además del biodigestor es necesario un tanque antes de éste, para la mezcla del agua con el excremento (tabla No. 7), por lo que se realizó el cálculo del volumen efectivo que éste debería tener, el cual es de 1.05 m³. El volumen fue calculado para hacer únicamente un llenado y con este alimentar uno de los dos biodigestores por lo que el tanque deberá llenarse y vaciarse 2 veces por día para alimentar cada uno de los dos biodigestores. El volumen que ocuparía el tanque de mezclado es de 1.77 m³ considerando un volumen de seguridad del 20% del volumen efectivo y un espesor de pared de 0.15 cm. El material elegido para la construcción de éste tanque de mezclado es concreto para darle la forma cilíndrica del diseño. También se debe

considerar un agitador para realizar homogenizar la mezcla agua-estiércol, éste debe ser de 1/3 Hp por el volumen de la mezcla y por ser de consistencia lodosa. Para el transporte del tanque de mezclado al biodigestor se necesitará tubería, el material utilizado deberá ser PVC pues es la tubería menos costosa y la materia prima lo permite. Se recomienda que una tubería para lodos no sea menor a 6", por lo que este es el diámetro elegido para este tramo. En esta parte también se necesitarán válvulas de compuerta que permitan llenar el tanque y realizar la mezcla, y que permitan dirigir el flujo hacia cualquiera de los dos biodigestores. Para esto las válvulas deberán ser también de 6" y se eligen de compuerta ya que no es necesario regular el caudal de alimentación de los biodigestores.

Después de formado, el biogás debe almacenarse. Se calculó el tamaño del tanque de almacenamiento en base a que tenga capacidad para almacenar lo producido en un día, que tenga una presión interna de operación de 400 kPa de acuerdo con el módulo "*Diseño de un sistema de purificación y extracción del biogás producido en finca Rama Blanca*" y que esté a la temperatura de operación que es la temperatura ambiental que se tomó de 35°C. Se recomienda que para gases la mejor forma de almacenamiento es en un contenedor esférico o cilíndrico con los extremos esféricos en vez de planos, se propone una esfera debido al gran volumen a almacenar. El volumen del almacenamiento debe ser de 66.28 m³ lo cual es el volumen generado a la presión deseada, se logra tener este volumen con una esfera de diámetro 5.02 m. Para elegir el material para fabricar el contenedor es necesario tomar en cuenta que no debe dejar pasar el gas, que no reaccione con él y quizá el factor más importante es que pueda resistir la presión de operación. Según Walsh, J. cuando se trabaja a presiones pequeñas menores a los 50 psi el material de almacenamiento puede ser bolsas flexibles, caucho y plásticos; cuando se trabaja con presión entre 50 y 200 psi, que es el caso ya que 400 kPa son 58 psi, se debe utilizar plásticos reforzados y al operar con más de 200 psi se debe almacenar en tanques de metales. El material elegido para el almacenamiento es plástico reforzado con fibra de vidrio porque es un material ligero, fácil de moldear, fuerte y es resistente a la corrosión y el desgaste. Para dirigir el biogás del biodigestor al tanque de almacenamiento es necesario un sistema de tuberías. Se propone que la tubería sea de una pulgada pues este es el diámetro que se utilizará para la extracción y transporte del biogás según el módulo que se encargó de esa parte, y que la tubería sea de PVC por ser resistente a la corrosión y por su precio. Se necesitarán colocar válvulas de globo en la tubería, que son necesarias para cerrar la alimentación al tanque durante periodos de paro o mantenimiento. Un aspecto muy importante a considerar es que al ser un tanque a presión necesita un manómetro para medir la presión interna y una válvula de alivio la cual debe dirigir el biogás a un quemador lo cual convertirá el metano en dióxido de carbono que es menos dañino para el ambiente.

F. Extracción y purificación del biogás

El objetivo principal de este trabajo consistió en diseñar un sistema de extracción y purificación de biogás para su posterior uso, a través de los componentes que éste presente. Para llevar a cabo dicho diseño se partió de una composición teórica (ver tabla # 21) en la cual se puede observar que los componentes principales son metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), y ácido sulfhídrico (H_2S).

La purificación del biogás varía dependiendo el uso que se le dé al mismo, debido a que ciertos procesos tales como, el uso de biogás para combustible tendrá diferentes requerimientos al uso de del biogás para microturbinas (ver figura No.1 y tabla No. 2). En la finca Rama Blanca, el biogás producido se utilizará para la producción de lácteos y para la generación de energía eléctrica a través de una microturbina. Actualmente en la finca Rama Blanca se utilizan estufas para la producción de diferentes tipos de quesos. Dichas estufas trabajan con dos tipos de gases combustibles, propano y el biogás generado en la propia finca. Sin embargo el biogás generado actualmente no cubre el total de la producción, ya que solo se tienen disponibles 57m^3 de biogás, lo cual solo alcanza para 6 días de producción, trabajando cuatro horas diarias. Cabe mencionar que el biogás utilizado no pasa por ningún proceso de purificación, lo cual merma el poder calorífico del biogás y se tiene una combustión ineficiente. Esto también produce que, a través de la combustión del ácido sulfhídrico (H_2S), se genere óxido de azufre, el cual es un gas altamente contaminante ya que promueve la generación de lluvia ácida.

Para establecer el proceso de purificación del biogás producido en el nuevo biodigestor, se tomó en cuenta el uso que se le va a dar a éste, ya que como se mencionó anteriormente, el proceso de purificación depende del uso que se le dé al biogás. En este caso, el biogás se utilizará en:

- Una estufa para la producción de lácteos como gas combustible
- Una microturbina Capstone® CR-331033D para la generación de energía eléctrica. (ver Figura No. 18)

Como se puede observar en la Tabla No. 2, el proceso de combustión del gas en una estufa convencional y la generación de energía eléctrica en una microturbina solo necesitan un biogás que pase por un proceso de desulfurización. Es necesario mencionar que la eliminación del dióxido de carbono del biogás para aumentar la eficiencia de combustión no es factible para estos usos (estufas y microturbina) debido a su alto costo. La eliminación del dióxido de carbono solo aumentaría la eficiencia de combustión en las estufas, más no generaría ninguna diferencia en la microturbina.

Para la eliminación del ácido sulfhídrico se utilizará el proceso de absorción a partir de óxido férrico (ver Ecuación No. 1). Se eligió este método debido a cuatro diferentes factores:

- Su alta eficiencia (85-90%).
- Los pellets de óxido férrico se pueden regenerar.
- Es el método más utilizado en las plantas de biogás de pequeña escala.
- Su bajo costo a comparación de los otros métodos.

A partir de la composición volumétrica del biogás (ver Tabla No. 19) se obtuvo la concentración del ácido sulfhídrico en partes por millón volumétricas, 20,000 ppmV y partes por millón, 27.2 ppm (ver Cálculo No. 6). Con estas concentraciones y a partir de la tabla No. 2 y las especificaciones de la turbina Capstone® CR-331033D (ver anexo) se puede ver que el biogás generado cumple con los requisitos para ser utilizado en la microturbina sin ningún proceso de purificación, ya que la concentración de ácido sulfhídrico debe ser menor a 70,000 ppmV. Sin embargo esto no cumple para las estufas que necesitan una concentración menor a 10 ppm.

Para remover el ácido sulfhídrico, se cotizó un filtro desulfurizador a la empresa SAIGUA S.A. de Guatemala. El desulfurizador a cotizar tiene que ser capaz de tratar un caudal de 96m³/día. La información que brindó la empresa indica que el desulfurizador más adecuado es el PX-25L Puxin®, el cual contiene 25 kilos de óxido férrico capaz de tratar hasta 5000 m³ de biogás (ver Figura No. 15). Según los datos del proveedor cada desulfurizador Puxin® trata 200 m³ de biogás por 1 kilo de óxido férrico, con una eficiencia del 90%. Si aplicamos esta relación a un caudal de 24 m³/h se tiene que consumirá 0.59 kg de ácido sulfhídrico de los 0.65 kg presentes en dicho caudal, dejando un remanente de 0.065 kg, lo que equivale a 2.72 ppm (ver cálculos 8 y 9). Con el uso de este desulfurizador se garantiza que se cumplan los parámetros establecidos para el uso del biogás en estufas. Los pellets de óxido férrico del desulfurizador reaccionan con el ácido sulfhídrico presente en el biogás formando sulfuro de hierro (ver ecuación No.1). Cabe mencionar que el óxido férrico que reaccionó se puede regenerar mediante la combustión del sulfuro de hierro. Es necesario tomar en cuenta que cada vez que se regeneran los pellets, pierden capacidad de absorber el ácido sulfhídrico, por lo que es necesario cambiar los pellets viejos por unos nuevos cada año.

Para llevar a cabo el sistema de tuberías, primero se determinó el material de la tubería. Se eligió PVC, ya que a diferencia de las tuberías metálicas, esta no se corroe debido a la presencia de ácido sulfhídrico, es fácil de instalar, posee un bajo costo y resiste adecuadamente a la presión de trabajo. Su única desventaja es que con el tiempo se va degradando debido a la

exposición a los rayos UV. Para determinar el diámetro de la tubería se partió del caudal que se necesitaba para hacer funcionar la microturbina, $21 \text{ m}^3/\text{s}$, y de la velocidad lineal del gas, la cual se asumió que era la del aire a una presión de 400 kPa (58.01 psi), 15 m/s, con estos datos se determinó que el diámetro de la tubería tendría que ser de 23.78 mm (0.9362") (ver cálculo No 10). Como no se encuentran tuberías de este diámetro en el mercado, se eligió la tubería que tuviese el diámetro mayor más cercano, en este caso sería una tubería de 1 " (25mm) de PVC catálogo 40 con una presión de trabajo máximo de 160 PSI. Se eligió el catálogo 40 debido a que es el más comercializado y fácil de encontrar. En cuanto a la presión de operación máxima, se eligió la menor ya que el biogás sale de la esfera de almacenamiento a una presión de 400 kPa, la cual equivale a aproximadamente 60 PSI. Con la tubería a utilizar, se determinó el tipo de válvula que se aplicaría al sistema, la válvula elegida fue una válvula de bola ya que permite que la apertura y el cierre de la misma sea fácil, además cuando está completamente abierta permiten una circulación directa con una pérdida de carga mínima.

Con el tipo de tubería y la válvula a usar, se procedió a determinar la caída de presión para el sistema de tuberías, tanto para las tuberías que transportan el gas a la estufa, como las tuberías que transportan el gas a la microturbina. La longitud del sistema de tuberías que va hacia la estufa se determinó a partir de la diferencia de altura entre la estufa y la salida del biogás del recipiente de almacenamiento y la distancia que tiene que recorrer la tubería para llegar al área de producción, con estos aspectos se determinó una distancia de 60 m. Esta distancia se obtuvieron a partir de la información brindada por el personal de la finca (ver tabla No. 22). Para determinar la longitud del sistema de tuberías hacia la microturbina se realizó de la misma manera, obteniendo una longitud de 18.7m (38.4 ft). La turbina se encontrará a una distancia de 10m de la esfera de almacenamiento esta distancia se determinó a partir de las reglas de seguridad OSHA, la cual indica que las áreas de proceso deben de estar separadas por un mínimo de 6 m, con el fin de permitir el ingreso de camiones contra incendios. Así mismo a partir de la configuración del terreno se determinaron también los accesorios a utilizar (ver tabla No. 11). Se utilizarán codos de 90° para dirigir las tuberías, nueve de estos codos serán para el sistema de tuberías que va hacia el área de producción de lácteos (ver tabla No. 22) y dos codos serán utilizados para el sistema de tuberías que va hacia la microturbina (ver tabla No.23). También se utilizará una "T" para separar el flujo que va hacia las estufas y hacia la microturbina.

Cabe mencionar que el sistema de tuberías que va hacia la estufa contiene una reducción de diámetro para que la manguera de gas de la estufa se conecte con la tubería del biogás sin ningún inconveniente. La reducción es de 1" a $\frac{1}{2}$ ". El desulfurizador se encontrará antes de la reducción. Con estos datos se procedió a calcular la caída de presión a través de la

ecuación de Bernoulli. Para esto se determinaron la pérdida de fricción para cada uno de los sistemas de tuberías, con el fin de determinar la presión al final de las mismas.

La presión al final del sistema de tuberías para la turbina es de 395.70 kPa (57.5 psi), esta presión no cumple con la presión de entrada a la microturbina, la cual debe de estar en un rango de 412-483 kPa (59.7-70.1 psi), por lo que es necesario instalar un compresor para llegar a dicha presión y obtener un funcionamiento pleno de la turbina el compresor a utilizar será de marca Kaeser® modelo SX5 (ver figura No 14). La presión final del sistema de tuberías para la estufa es menor debido a que la distancia recorrida por el biogás es mayor y contiene mayores pérdidas de fricción debido a que tiene mayor cantidad de accesorios y posee una pérdida de fricción adicional por la reducción del diámetro. La presión calculada fue de 389.12 kPa (56.43 psi), con esta presión no existe ningún problema, ya que la estufa contiene un regulador de presión que soporta hasta 100 PSI (689.47 kPa), por lo que se cumplen los requerimientos de la misma.

Por último se determinó el costo de inversión aproximado del sistema de purificación y extracción, este fue de Q. 69,070.95, el cual no incluye el costo de mano de obra. Es necesario tomar en cuenta que los pellets que contiene el desulfurizador hay que cambiarlos cada 6 meses, sabiendo que cada kilogramo de óxido férrico cuesta Q.35.00, por lo que cada medio año se tendría un costo de Q.875.00 ya que el desulfurizador es de 25 kilos de óxido férrico. A partir del caudal se determinó que el óxido férrico se satura a los dos meses de uso, sin embargo este se puede regenerar dos veces sin que la pérdida de eficiencia sea significativa.

G. Demanda energética actual

Para poder determinar la metodología de uso para el biodigestor es necesario saber la demanda energética actual de la finca de las diferentes fuentes que se utilizan. Se realizó esta auditoría energética y se calculó el volumen de biogás necesario para cubrir al 100% la misma. La conversión a m³ de biogás se hizo utilizando el poder calorífico del mismo, 5335 kcal/m³, valor tomado de la literatura.

El ciclo de reproducción del búfalo le permite tener solamente una cría al año, esta administración es óptima para el mayor aprovechamiento de producción de leche. Se estima que una búfala produce 1000kg de leche por periodo de lactancia. Este producto es bien aprovechado por la finca, pues a partir de él funciona una Planta de Lácteos dentro de la misma finca. Aquí se utiliza gas propano para la cocción de quesos. En promedio se deben mantener

dos hornillas encendidas durante 4 horas. La finca compra semanalmente un tambo de 25 lbs. Al 18 de octubre de 2013 el precio a nivel departamental de un tambo de 25 lbs es de Q.130.00.

Para la elaboración de quesos el ingrediente principal es la leche, la cual se obtiene por medio del ordeño mecánico. El ordeño se realiza por medio de la creación de un vacío intermitente el cual es accionado por una bomba que cuenta con un motor eléctrico. El consumo eléctrico de la finca es de 16, 254 kWh mensuales promedio, aunque gran parte es utilizada para el ordeño también se cuenta con un sistema de aire acondicionado, alumbrado eléctrico en las oficinas administrativas y una casa patronal que se encuentra dentro del complejo, todos estos consumiendo energía eléctrica constantemente. El monto de la factura eléctrica mensual promedio es de Q.41, 748.00.

Paralelamente dentro de Rama Blanca se produce sal a partir de salinas. Para realizar la extracción de agua del mar se utilizan tres motores diesel con bombas que trabajan las 24 horas del día y consumen en promedio 660 galones de diesel semanalmente. El precio del diésel al 14 de octubre de 2013 es de Q.31.21 por galón según el Ministerio de Energía y Minas.

A partir de los requerimientos descritos anteriormente la finca gasta un promedio de Q. 124, 687.00 mensualmente. Este es el impacto económico, por otro lado se tiene un impacto ambiental por cada uno de los combustibles. Tomando factores de emisión determinados por la Oficina Catalana del Cambio Climático se calculó un estimado de emisiones de CO₂ mensual de 32, 316kg de CO₂.

H. Metodología seleccionada para el uso/ aplicación del biogás

De acuerdo a la revisión teórica realizada existen diferentes aplicaciones para el biogás. Las opciones de utilización, sin tener que recurrir al enriquecimiento del biogás son: combustión directa, cogeneración y generación de energía eléctrica. El análisis se enfocó principalmente en estas tres opciones. Se dejaron fuera las otras opciones por tener un enfoque de optimización a las condiciones actuales de operación y reducción de la factura energética.

La aplicación más simple es la combustión directa, la cual se puede aplicar en las dos hornillas que se encuentran dentro de la planta de producción de quesos, el uso promedio de las mismas es de 4 horas diarias de lunes a viernes. Para este arreglo es necesario llevar el biogás desde el punto de generación y almacenamiento a la conexión del gas propano en las estufas por medio de tubería PVC de 2" de diámetro, proporcionar una llave de paso para el desplazamiento, asegurar que se está proporcionando la pureza requerida del biogás y conectar a la estufa. Es necesario tener una concentración de metano mayor al 45% para poder tener una

llama, pero también es necesario contar con biogás con bajo porcentaje de CO_2 y H_2S para tener una combustión óptima. Dado que el H_2S es un gas cancerígeno, para resguardar la comida, se tendrá un desulfurizador previo a la entrada del biogás a la hornilla. Se ha seleccionado un desulfurizador marca Puxin modelo PX 25L con capacidad de purificar 5000m^3 éste cuenta con pellets de óxido ferrico cambiables. De acuerdo al flujo establecido el cambio se deberá realizar cada 60 días para garantizar la purificación máxima.

Al comparar el poder calorífico del gas propano comercial $28,000\text{ kcal/m}^3$ y el biogás 5300 kcal/m^3 se ve la superioridad del combustible derivado del petróleo. Por lo mismo es necesario modificar el agujero del inyector al quemador ampliando su diámetro 2 o 3 veces. Realizar esto permitirá a finca Rama Blanca continuar utilizando sus estufas actuales, y no incurrir en gastos por compra de equipo (estufas de biogás).

Aparte de la combustión en las hornillas es posible utilizar el biogás para los motores de las salinas. Los motores Diesel no pueden ser completamente independientes pero si se puede sustituir hasta el 70% de su consumo. Para poder hacer uso del biogás en estos motores es necesario incorporar una conexión al motor por donde ingresa el biogás a la cámara de combustión del motor. Para poder obtener la mayor eficiencia del motor es necesario tener un bajo contenido de CO_2 en el biogás, sino la combustión no será completa. Por lo mismo es necesario colocar una torre de absorción para la remoción de CO_2 y un desulfurizador. Al realizar la evaluación a las otras metodologías se pudo definir que es menor la inversión en otros equipos y es más fácil el mantenimiento y operación del equipo por lo que no se tomará esta opción como la principal metodología de aplicación.

Para la cogeneración de energía eléctrica y energía térmica se toma el biogás producido en un biodigestor y se quema en un motor de combustión, el calor generado se utiliza para mover una turbina que a su vez alimenta a un generador. Es necesario conocer las características de salida del biogás para poder determinar si es necesario un desulfurizador o algún tratamiento de impurezas. Dado que las pruebas piloto conducidas en el Laboratorio de la Universidad del Valle no arrojaron resultados consistentes se tomaron como parámetros de salida una composición volumétrica de 70% metano, 27% dióxido de carbono, 2% ácido sulfídrico y un 1% de trazas de otros gases. Esta es la composición media obtenida en estudios previos durante la realización de biogás a partir de estiércol de animales porcinos, se comparó con estos animales pues los análisis de DQO y DBO realizados a la materia prima arrojaron resultados parecidos al estiércol porcino.

Capstone Turbines es una empresa reconocida a nivel mundial como líder en la tecnología para la cogeneración, esta empresa es originaria de California Estados Unidos y es

miembro de la Agencia de Protección al Medio Ambiente de EE.UU. Se cotizó una microturbina con capacidad de producir 30 kWh, que requiere de un flujo de 20.61 m³/h. Con esta energía es posible cubrir la demanda actual que asciende a los 16, 254 kWh en un mes. La inversión inicial es de \$. 65,000.00, esta inversión se recupera en 1.7 años como se explicará en la sección de evaluación económica para el modelo C30 de la marca mencionada. Con la implementación de esta microturbina se pretende eliminar el uso de energía eléctrica de la red de distribución pública. Capstone Turbines ofrece asesoría e instalación del equipo, la operación de la turbina no requiere de personal dedicado solamente a esta tarea, y el biogás que se contempla como resultado final cumple con los requerimientos de la ficha técnica. Por esto se recomienda dar mayor importancia a esta opción. Más adelante se analizará el flujo de caja en esta inversión.

Por último analizaremos la generación de energía eléctrica que es posible realizarla por medio de dos flujos de operación diferentes, ya sea por un motor de Otto sencillo o por medio de una turbina. La posibilidad de generar energía eléctrica por medio de un motor de Otto se dejó de lado por la existencia de los motores de las salinas. Estos motores trabajan actualmente durante 24 horas y son prioritarios para la extracción de agua de mar y para el negocio, pues la venta de sal genera ingresos significativos para Rama Blanca. Por lo mismo esta metodología se ve desplazada y en todo caso se daría mayor importancia al uso de biogás en los motores de las salinas; pero como se discutió previamente esto requiere una inversión en un sistema de remoción de CO₂ y desulfurizador; lo cual requiere una mayor inversión de capital. Por otro lado es posible generar energía eléctrica por medio de turbinas. Al comparar esta oportunidad versus la cogeneración propuesta anteriormente se observó que técnicamente el uso de turbinas requiere de un mayor espacio para la instalación y un mayor flujo de alimentación. Las turbinas requieren infraestructura más desarrollada pues deben estar bajo techo, son de mayor tamaño y por lo mismo requieren de mayor extensión territorial. Al comparar la cogeneración por medio de microturbinas versus la generación en turbinas se observa una mayor viabilidad y rápida implementación en la metodología de la cogeneración. La metodología seleccionada se reduce a la cogeneración de energía eléctrica y gracias al exceso de biogás obtenido es posible utilizarlo en las hornillas para sustituir el gas propano.

I. Evaluación económica

Para evaluar la viabilidad del proyecto se realizó el flujo de caja capturando como utilidades los ahorros que se generan a partir del uso del biodigestor tomando en cuenta la inversión requerida. El biogás será utilizado para la cogeneración de energía, con una microturbina de 30kWh marca Capstone modelo C30. Al revisar el consumo total de 16,254 kWh y dividirlo dentro de un mes se puede observar que es factible cubrir el requerimiento energético

de la finca. Es importante notar que la turbina estará entregando 30kWh, por lo mismo si el requerimiento de la finca es mayor en algún lapso corto de tiempo se deberá recurrir a la energía eléctrica del distribuidor público. Es necesario evaluar la posibilidad de adquirir una turbina de mayor capacidad, 65kWh por ejemplo pero esto implica un aumento del 50% en el costo de la turbina. Aparte de esta aplicación, que es la principal, se reemplazará el gas propano utilizado en la cocina por biogás. Desde el punto de vista económico existen dos grandes ahorros: se suprime la factura de la energía eléctrica y se independiza la cocina del gas propano. Para poder capturar esto se realizó una revisión de histórico de datos tanto en el costo del gas como en el costo de la energía eléctrica en el último año. Para la energía se observó un incremento promedio del 7% anual, mientras que en el gas se observó un incremento del 50% anual. Estos valores se aplicaron como tasas de incremento en el flujo de caja.

La inversión requerida se puede desglosar en dos grupos, inversión en infraestructura donde se encuentra la construcción del biodigestor y la infraestructura techada para la colocación del equipo (microturbina, compresor y transformador). Para esta inversión, según la teoría de Ingeniería de Proyectos las construcciones es posible depreciarlas con una vida útil de 40 años. El resto de la inversión va orientado a maquinaria, donde se encuentran cuatro equipos base: microturbina, compresor, transformador y desulfurizador. Para los cuatro se cuenta con una cotización reciente. Para el cálculo de la depreciación se realizó de forma lineal a diez años y se le asignó al equipo un valor de rescate del 20% por ser nuevos y representar una gran inversión, la infraestructura se depreció a 0. Los costos variables son las materias primas, dado que el estiércol no representa para ellos ningún gasto, sólo se consideró el agua. De acuerdo a la mezcla de alimentación se requiere alrededor de una tonelada métrica diaria; tomando una densidad de 1000kg/m^3 , 1 tonelada métrica equivale a 1 m^3 de agua designando un costo de $\text{Q.}5.6/\text{m}^3$ se obtuvo el costo variable y para el flujo a 10 años se aplicó un incremento del 10% sobre el valor actual. Los costos fijos constan de tres valores, la compra de pellets de repuesto para el desulfurizador, el cual debe ser cambiado aproximadamente cada 60 días, el salario de una persona la cual será la encargada de monitorear parámetros de operación y operar el equipo; y un monto de $\text{Q}10,000.00$ anuales destinados al mantenimiento del equipo. Se estimó una inflación constante del 2% para el pronóstico a 10 años de este valor. Al observar el flujo de caja obtenido se puede observar que la inversión se recupera en 1.7 años lo cual lo hace una inversión rentable para la empresa. Indicadores importantes para la evaluación de proyectos son la VAN y TIR. VAN representa el Valor actual neto que representa el excedente a obtener a partir de la rentabilidad deseada. Se calculó con una rentabilidad del 15%, que es más de lo que ofrecen los bancos actualmente y se obtuvo un valor de $\text{Q. }1,906638.00$. Por otra parte la TIR expresa la rentabilidad real y esta tiene un valor de 67.8%, valor que sobrepasa lo esperado.

Gracias a estos resultados positivos es recomendable evaluar la posibilidad de comprar una turbina de 65kWh o dos de 30kWh para que Rama Blanca pueda libremente utilizar su equipo eléctrico sin limitantes de saturación del sistema. Importante a considerar en este análisis que las características del flujo no son las mismas, el flujo se duplica y también el valor de H₂S es más restringido por lo que sería necesario colocar un desulfurizador.

J. Diagrama de flujo del proceso

A partir de la selección de una metodología se desarrolló el diagrama de flujo del sistema. A partir de la materia prima que consta de aproximadamente 1 tonelada métrica de estiércol y 1 tonelada métrica de agua se alimenta el biodigestor. En este punto se genera biogás que cumple con las siguientes características, su composición volumétrica se desglosa de la siguiente manera 70% metano, 28% CO₂ y una concentración de H₂S menor a 70,000 ppm. Se cuenta con una esfera de almacenamiento de material flexible. Este biogás pasa a ser materia prima para el proceso de generación de energía eléctrica. Un compresor marca Kaeser de tornillo modelo SX5 toma el flujo de 21 m³/h a una presión de 396kPa y lo entrega a 450kPa. Esta presión cumple con las especificaciones de entrada de la Microturbina Capstone modelo C30, esta entrega 30kWh de energía en un sistema trifásico con una frecuencia de 60 Hz y un voltaje de 400 - 480V. Esta energía debe llevarse a un voltaje utilizable por la finca, por lo tanto se hace pasar por un transformador trifásico seco marca Jefferson Electrics con un voltaje secundario de 240V, este ya es manejable para convertirse a 110V. Por último se realiza la conexión a un panel eléctrico el cual se encarga de distribuir esta energía al sistema eléctrico de finca Rama Blanca. Para la combustión del biogás este se toma del punto de almacenamiento y se lleva por medio de tubería PVC al desulfurizador marca Puxin modelo PX 25L el cual remueve H₂S, para resguardar la integridad de los alimentos y entrega el biogás purificado al regulador de las hornillas de cocción de la planta de lácteos.

Plano de disposición del sistema

La disposición del sistema se realizó en base al terreno que Rama Blanca piensa destinar para la ubicación de este equipo, el cual cuenta con un área de 3000m².

A partir del requerimiento de biogás las dimensiones físicas del biodigestor son 12 m de largo y 2m de ancho. Se contará con dos de estos colocados en paralelo. El tanque de recepción de la mezcla el cual se dimensionó con un volumen de 1m³, se colocó entre ambos digestores para facilitar la distribución de la materia prima. A pesar que la generación se da en el biodigestor el almacenamiento se hará en una esfera la cual es

alimentada por ambos y cuenta con un diámetro de 5m. De este punto de almacenamiento se alimenta el compresor el cual se encuentra a una distancia de 10m del punto de entrega se definió esta distancia pues la conversión del biogás a energía eléctrica y la generación se consideran como dos procesos diferentes y de acuerdo a las reglas de seguridad OSHA las áreas de proceso deben estar separadas por un mínimo de 6 m para permitir el ingreso de camiones contra incendios.

Observando detenidamente el proceso de generación se transportará por medio de tubería PVC el biogás al compresor de este pasará a la turbina y por último al transformador. Las especificaciones de la turbina proporcionadas por el proveedor indican que están requiere tener por lo menos 1m libre a su alrededor para evitar calentamiento y facilitar el mantenimiento de la misma. En el layout propuesto se han dado 2m de espaciamiento. Los tres equipos mencionados anteriormente se encontrarán dentro de un cuarto cerrado, primera para protegerlos de las condiciones climáticas y segundo para evitar su calentamiento. El transformador por ser de tipo seco puede alcanzar una temperatura de hasta 150°C, por lo mismo debe situarse dentro de un cuarto cerrado. Desde el punto de entrega del transformador se hace la conexión a un panel eléctrico el cual es el punto de conexión al sistema eléctrico de la finca. Opuesto al terreno se encuentra la planta de lácteos, donde se debe llevar biogás para el uso en las estufas. El sistema de distribución será por medio de tuberías de PVC y previo al ingreso a la estufa se encuentra el desulfurizador.

K. Utilización de residuos sólidos del biodigestor – compostaje

A raíz de la producción de energía usando este biodigestor se tiene otro problema, la generación de residuos sólidos con bajos niveles de nutrientes, que si son agregados de forma directa al suelo, no le brindarían ningún beneficio de nutrientes y hasta podría traer consecuencias negativas. Según el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, el abandonar estos residuos en el campo es una práctica no recomendable ya que promueve la generación y propagación de plagas, y por consecuencia, la propagación misma de enfermedades, no sólo para la vida vegetal y animal del área sino también para los humanos que viven en los alrededores. Tampoco la quema de dichos residuos es recomendada bajo circunstancia alguna ya que la combustión de los mismos provoca gases tóxicos que son absorbidos por la atmósfera y provoca efectos negativos sobre la misma. También estos gases son peligrosos para la salud de las personas, especialmente para la salud de los niños.

Es por estas razones que se estudió la posibilidad de hacer algún tipo de tratamiento para que los residuos sólidos no generaran problemas en la finca y que a su vez, se obtuvieran beneficios tangibles por ello. Se estudiaron las formas más adecuadas para la disposición de los residuos sólidos, siendo el compostaje el más adecuado para esta situación. Se eligió el compostaje ya que es una forma amigable con el ambiente de tratar los residuos sólidos orgánicos (éstos son los tipos de residuos que obtenemos del biodigestor), y que además genera un beneficio para la finca ya que produce abono orgánico que puede ser utilizado en los pastos que alimentan a los búfalos generadores de estiércol. Con esto, lo único que se estaría haciendo es apresurando el ciclo normal de la naturaleza, sacándole el mejor aprovechamiento en cada parte de ese ciclo.

Según el Instituto Cornell de Manejo de Desechos (CWMI), existen diferentes sistemas o formas de hacer el compostaje. Para este estudio se eligieron los dos que, por las condiciones de la materia prima disponible y los requerimientos de la finca, se identificaron que eran los más adecuados. Los dos métodos de compostaje en cuestión fueron el de aireación y el de lombricultura. El primero fue elegido ya que es una forma de descomponer los desechos sólidos de una forma efectiva, sin necesidad de mucho gasto económico. Lo único que se necesita es una caja donde depositar los residuos y que esté en contacto directo con el aire. Para las pruebas realizadas, se prefirió abrir agujeros en la caja compostera, ya que según la literatura, estos agujeros fomentan el ingreso de oxígeno en la mezcla y hacen que la composición sea más rápida y efectiva.

La lombricultura se eligió como segundo método de compostaje a estudiar ya que según la revisión bibliográfica, este compostaje requiere poco mantenimiento y produce un compost con la mejor composición de nutrientes y en mayor cantidad que cualquier otro. También requiere de poco mantenimiento ya que las lombrices hacen todo el labor de descomposición sin necesidad de ningún tratamiento adicional. Esto significa para la finca menores gastos de mano de obra y mayores beneficios con respecto a la nutrición de los suelos.

Según Schuldt (2006) en el estiércol viven de forma abundante las bacterias, los protozoarios, las microalgas y los hongos adecuadamente madurados que sirven como alimento para las lombrices, y es por esto que lo hace un medio básico por excelencia para este tipo de compostaje. Además de resolver el problema con los desechos del biodigestor, con la lombricultura se obtiene el beneficio de las mismas lombrices. Se dice que es un beneficio ya que las lombrices se reproducen de forma rápida y pueden ser aprovechadas económicamente si se comercializan en el área.

Para ambos métodos, se utilizó el estiércol residual del biodigestor que se hizo a nivel laboratorio. Se trató de igualar las condiciones para ambos métodos de compostaje para que los

resultados obtenidos se pudieran comparar entre sí y de esta forma determinar cuál de los dos era mejor. Los resultados de los análisis de cada método se compararon con los resultados de los análisis del estiércol residual sin tratamiento para determinar el porcentaje de mejora de cada uno de los nutrientes.

Para el caso del nitrógeno, se observó un decremento de los niveles de concentración del mismo. Para el compostaje por medio de aireación, se tuvo una disminución del 71% de la concentración de nitrógeno mientras que para el compostaje de lombricultura, se obtuvo una disminución de tan solo 16%. Esta disminución es característica del proceso de compostaje según lo expone Joaquín Moreno en su libro "Compostaje" (2007). Se debe a que durante este proceso se dan tres reacciones químicas donde interviene el nitrógeno y dónde es convertido en macromoléculas que luego son drenadas junto con el agua. Esta pérdida también se da por la volatilización del amoníaco según lo afirma este mismo autor.

Para los otros dos nutrientes primarios, el fósforo y el potasio, sí se observaron cambios significativos en sus niveles de concentración para ambos sistemas de compostaje. Para el compostaje con aireación, se obtuvo un aumento del 608% para el fósforo y un aumento del 221% para el caso del potasio. Para el compostaje por medio de lombricultura, se obtuvieron aún mejores resultados. El fósforo aumentó en un 717% y el potasio en un 393%. Con estos resultados se puede decir que la etapa de maduración se dio de forma exitosa, ya que se ve un aumento claro de los nutrientes primarios contenidos en la materia orgánica, que en este caso son los residuos del biodigestor. Estos resultados también nos indican que ambos sistemas de compostaje podrían beneficiar de forma significativa los cultivos a los cuáles sean agregados.

En el caso de los nutrientes secundarios, también se obtuvo un aumento en la concentración de los mismos después del compostaje. Para el calcio, se obtuvo un incremento del 580% y 1749% para el sistema de aireación y lombricultura respectivamente. Mientras que para el magnesio, se obtuvo para el compostaje de aireación, un aumento del 281% y para el compostaje por lombricultura un aumento del 586%. Según Macz (2013), con los altos niveles de calcio, se puede garantizar la integridad y permeabilidad de las células vegetales de los cultivos a los que se les va a añadir este abono.

Para los denominados micronutrientes también se obtuvieron resultados positivos en ambos sistemas de compostaje. El hierro fue el nutriente que más aumento tuvo de todos los analizados con un 11100% de aumento en el compostaje de aireación y un 11700% en el compostaje de lombricultura. El cobre incrementó en el sistema aireado un 1400% y en el sistema de lombricultura un 1733%. Para el caso del Manganeseo, el aumento fue de 3189% y 3281% para la aireación y lombricultura respectivamente. Por último, el cinc tuvo un aumento del 352% para el compostaje por aireación y un 1094% para el compostaje por lombricultura. Con

estos incrementos en la concentración, se puede garantizar que ambos procesos de compostaje fueron efectivos y que el humus obtenido a partir de ellos se puede utilizar en los cultivos de la finca y éste proveerá a la planta estos micronutrientes necesarios para el transporte de electrones y para la activación de enzimas.

Para cada uno de los sistemas de compostaje construidos, se hizo un balance de materia para determinar qué cantidad de la mezcla inicial se obtuvo como humus y así determinar cuál de los dos tenía mejor rendimiento. Para el sistema con aireación, se hizo una mezcla inicial con una masa total de 10.81kg. De esta mezcla, el 32% estaba compuesto por residuos del biodigestor y excremento de búfalo. El resto era materiales inertes los cuales le dan soporte y consistencia a la mezcla y sirve como parte del proceso de degradación de los componentes orgánicos. Para este caso, se obtuvo 6.7kg de humus (humus es el material que puede ser utilizado como abono orgánico) el cual representa el 62% del peso inicial de la mezcla. Esto significa que la masa se redujo en un 38%, que se contabilizan como pérdidas del sistema.

Para el sistema de lombricultura, se hizo una mezcla inicial de 12.81kg, la cuál contenía exactamente el mismo contenido de materia orgánica y material inerte que para el sistema con aireación. La única diferencia fue que se agregaron 2.00kg de materia inerte más la cual contenía a las lombrices que servirían para el proceso de degradación. Al final, se obtuvo 8.80kg de humus el cual representa el 69% de la mezcla inicial. El 31% de la masa se considera de igual forma como pérdidas de materiales en el sistema. Estas pérdidas son debidas a la formación de CO₂ que se produce en la etapa Mesófila cuando se da la acidificación de la materia y la degradación de fracciones de carbono débiles, según Álvarez, (2009). También hay que tomar en consideración el hecho de que los residuos orgánicos utilizados tienen inicialmente un contenido muy elevado de agua que pudo haber sido drenado en los agujeros que contenía la caja compostera debido al proceso de aireación.

Para realizar este estudio, se utilizó excremento proveniente de la finca y excremento utilizado en el biodigestor piloto colocado en la universidad. Esta mezcla se utilizó para proveer el material orgánico para descomponer. Se eligió una proporción de 1:1 en peso, ya que el estiércol salido del biodigestor tenía un nivel muy alto de humedad, lo que lo hacía una sustancia casi líquida. El estiércol de finca, se utilizó con el fin de darle más consistencia al estiércol residual, para que las composteras pudieran manejarse sin problemas. También de esta forma, se garantiza el uso de la mayor cantidad de desechos sólidos con el fin de solucionar los problemas actuales de la finca. Tomando en cuenta que el material orgánico de las composteras no tiene costo alguno, se realizó un análisis de los costos de este estudio. Para el método de aireación se tuvo un costo de Q. 353.37. Para el método de lombricultura, se tuvo un costo total de Q.775.37. Para ambos métodos, se consideró el costo de la tierra a utilizar, sin embargo ésta

se podría conseguir en la finca y no tener costo alguno. El método de lombricultura tuvo un costo más elevado, ya que se tuvo que comprar las lombrices. Sin embargo, este gasto sólo se tendría que hacer inicialmente, cuando inicie el proyecto, ya que las lombrices se reproducen y no hay necesidad de volver a comprar.

Por último, se hizo una comparación entre los dos sistemas estudiados para determinar cuál debería de ser utilizado según las necesidades de la finca. Como fue mencionado anteriormente, el método de aireación tuvo un rendimiento del 62% mientras que el método de lombricultura tuvo un 69%. Esto significa que el método de lombricultura es el más apropiado para esta aplicación ya que se requiere obtener la mayor cantidad de abono orgánico para ser utilizado en los cultivos de la finca. También se puede sustentar esta decisión, observando el comportamiento del contenido de nutrientes para cada uno de los sistemas. El sistema de compostaje por lombricultura tuvo aumentos mayores para todos los nutrientes analizados por lo que demuestra que no solo se obtiene en mayor cantidad, si no que se obtiene también una mejor calidad de abono orgánico para los cultivos. Se recomienda aplicar este abono a los pastos con los cuales son alimentados los búfalos.

IX. CONCLUSIONES

1. Se determinó que el sustrato con un mayor potencial de metano fue el suero de leche de búfalo con un valor de $0.0004316 \pm 0.000063 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{g}$ de sólidos totales, seguido del estiércol obtenido en época de verano con un valor de $0.0002438 \pm 0.0000126 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{g}$ de sólidos totales y finalmente el estiércol obtenido en época de invierno con un valor de $0.0002046 \pm 0.000006 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{g}$ de sólidos totales.
2. Se determinó que el sustrato en el cual requieren de más oxígeno los microorganismos para oxidar la materia orgánica degradable y biodegradable fue el estiércol obtenido en época de invierno con un valor de 2681.5 mg de O_2/L , seguido del estiércol obtenido en época de verano con un valor de 2347.5 mg de O_2/L y finalmente el suero con un valor de 2280.5 mg de O_2/L .
3. Se determinó que el sustrato en el cual requieren de más oxígeno los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable fue el estiércol obtenido en época de invierno con un valor de 1992 mg de O_2/L seguido del suero con un valor de 2091 mg de O_2/L .
4. Se determinó que el sustrato con mayor porcentaje de nitrógeno amoniacal, porcentaje de proteínas y porcentaje de carbohidratos fue el suero con valores de 0.90 ± 0.11 , 5.75 ± 0.70 y 74.42 ± 2.07 respectivamente seguido del estiércol con valores de 0.78 ± 0.04 , 4.87 ± 0.23 y 59.27 ± 1.79 .
5. El pH del suero de leche de búfalo debe neutralizarse ya que tiene un valor ácido de 4.63 ± 0.01 mientras que el del estiércol de búfalo no debe neutralizarse pues se encuentra en un valor muy cercano al neutro, siendo este valor de 7.34 ± 0.01 .
6. De las cinco formulaciones de suero láctico y mezcla de agua y estiércol (50%-50% m/m) trabajadas, la que generó una mayor cantidad de biogás fue 66% de mezcla y 34% de suero láctico, con una razón de 1.247 ± 0.314 litros de biogás por kilogramo de biomasa en el biodigestor, logrado luego de 17 días de operación.
7. Los resultados experimentales muestran que la cantidad de metano en el biogás generado por unidad de masa contenida en el biodigestor aumenta al utilizar bajas concentraciones de suero láctico en la alimentación, obteniendo un máximo de 35.27% de metano al trabajar con $9.09 \pm 6.47 \times 10^{-5}\%$ de suero láctico en el biodigestor, disminuyendo a 6.01% al trabajar con

- 13.04±7.61x10⁻⁵% de y llegando a prácticamente 0% de metano a partir de 20.00±9.16x10⁻⁵% de suero láctico.
8. La mayor cantidad de metano determinada en los biodigestores trabajados fue obtenida utilizando 9.09±6.47x10⁻⁵% de suero láctico en el biodigestor, la cual fue aproximadamente 35.27%, determinado con cromatografía de gases.
 9. De acuerdo con los resultados obtenidos, la utilización de suero láctico de la producción de quesos en el biodigestor no es viable, ya que incluso la mayor cantidad de metano determinado en el biogás obtenido (35.27% de metano, obtenido al usar 9.09±6.47x10⁻⁵% de suero láctico en el biodigestor) aún es muy pobre y el biogás no es inflamable.
 10. No se contó actualmente con otras materias primas orgánicas disponibles en Rama Blanca para poder integrar al biodigestor, ya que los únicos residuos disponibles en cantidades significativas en la finca son suero láctico y estiércol
 11. La temperatura adecuada para una producción es de 35°C contra temperatura ambiente. Con una mayor temperatura se crea el medio para las bacterias mesofílicas.
 12. La relación más eficiente de las relaciones evaluadas para la producción de biogás fue de 1:1 en masa de excremento de búfalo con agua, en la relación 1:1 la producción de biogás comienza a los 7 días pero aumenta de manera exponencial a los 15 días para obtener una producción de 4.71±0.12 L/ kg que fue mejor eficiencia obtenida en todas las corridas.
 13. La variable principal a ser controlada es la relación de excremento/agua, si la mezcla está muy diluida se tendrá baja eficiencia en la producción de biogás. La mejor eficiencia es 1:1 en masa de excremento de búfalo con agua si se diluye como en la relación 1:4 la eficiencia baja. Las eficiencias fueron, para la relación 1:1 fue de 4.71±0.12L/ kg la mejor y la peor eficiencia fue de 0.8±0.05L para la relación de 1:4.
 14. El tiempo de retención de sólidos es de 30 días, como se observó (Gráfico No.2 y 3) en los resultados aproximadamente a los 7 días inicia la generación de biogás, se da un aumento en la producción a los 20 días y después de los 30 días la producción se detiene.
 15. El pH es importante que sea medido antes de entrar al biodigestor, este debe estar por encima de los 6.5 a 7.7, un pH menor a este puede ser nocivo para las bacterias y no tendrán un medio adecuado para desarrollarse.

16. De acuerdo a los balances de masa realizados para cada relación, la relación 1:1 tiene una mayor producción en masa de biogás, por lo que es la mejor relación trabajando a 35.00°C, con el resto de relaciones evaluadas.
17. Según los datos experimentales de producción de biogás a partir de estiércol de búfalo obtenidos, no se pudo realizar un modelo de cinética de reacción, por lo que el diseño del biodigestor no se hizo con ecuaciones de diseño de reactores.
18. El diseño del biodigestor se realizó en base a datos experimentales: demanda biológica de oxígeno estiércol de 1992.00 mg/L, tiempo de retención de 30 días y relación excremento agua 1:1 en peso.
19. La carga del biodigestor debe de ser en relación 1:1 masa agua/estiércol: para la producción de 515 m³/día de biogás, la alimentación debe ser 1,025.43 kg/día de los componentes.
20. El volumen de cada uno de los dos biodigestores propuestos para la producción de 515.00 m³/día de biogás, que supla los requerimientos de la micro turbina (504 m³/h) y de las estufas (7.14m³/h) es de 38.60 m³ efectivos.
21. El material de construcción del biodigestor debe ser concreto reforzado, debido a sus características de alta resistencia a la compresión, tensión, durabilidad, resistencia al fuego, la capacidad para ser moldeable y reducción de grietas.
22. El precio de construcción de cada biodigestor de volumen de 61.81 m³ y con área de 30.72 m² diseñado es de Q32,922.05.
23. Se aplicará una desulfurización como proceso para la purificación del biogás para su posterior uso como gas combustible para la producción de productos lácteos.
24. La concentración inicial del biogás es de 20,000 ppmV (partes por millón volumétricas) por lo que, para la generación de energía eléctrica en la microturbina, no es necesario un proceso de purificación.
25. La purificación del biogás se realizará a partir de un filtro hecho a base de pellets óxido férrico PX-25L Puxin®, el cual tiene la capacidad de tratar un flujo de 96 m³/h.

26. La tubería será de PVC debido principalmente a su bajo costo y a su resistencia a la corrosión. La tubería a utilizar será de un diámetro de 1" catalogo 40 ya que cumple con los requerimientos del proceso.
27. La población de búfalos es estable en el tiempo, pues la finca no cuenta actualmente con la extensión territorial necesaria para aumentar el número de cabezas en el hato. A partir de la población actual se definió una generación de 2.77 toneladas métricas de estiércol diarias.
28. De acuerdo a la producción de biogás diaria se definió como mejor metodología de aplicación la cogeneración por medio de una microturbina Capstone modelo C30 con una capacidad de 30 kWh y la combustión directa del biogás en sustitución del uso de propano para la reducción de la factura energética de la finca.
29. El equipo auxiliar seleccionado consiste en un compresor de tornillo marca Kaeser modelo SX5 y un transformador marca Jefferson Electric trifásico seco 220/480V. Para la purificación del biogás se seleccionó un desulfurizador marca Puxin modelo PX 25L con una capacidad de 5000 m³ por pellets.
30. El diagrama de flujo se dispuso de tal forma que el flujo de biogás cumple con las especificaciones técnicas de los equipos principales.
31. A partir del equipo seleccionado se determinó una inversión de Q. 700,889.29 para la finca, el análisis económico del proyecto generó los siguientes resultados TIR de 67.8% y una VAN de Q.1,906,638.00. El periodo de recuperación de la inversión es de 1.7 años
32. Según el estudio realizado, las mejores opciones para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en el biodigestor de producción de biogás son el compostaje por medio del método de aireación y el compostaje por medio del método de lombricultura. Según los resultados de los análisis de suelo realizados a los residuos del biodigestor piloto, la composición de nitrógeno total fue de 8.96g/kg, de fósforo fue de 220.33mg/kg, de potasio fue de 626.25mg/kg, de calcio fue de 348.75mg/kg, de magnesio fue de 157.50mg/kg, de hierro fue de 25.00mg/kg, de cobre fue de 0.90mg/kg, de manganeso fue de 4.85mg/kg y de cinc fue de 4.65mg/kg.
33. Se determinó que la opción más recomendable era la de hacer una mezcla con una relación de 1:1 en peso, mezclando residuos del biodigestor con estiércol de búfalo sin utilizar, ya que éste era el desecho orgánico más significativo (por cantidad) de la finca.

34. El método de compostaje por aireación tuvo un rendimiento del $62\pm 0.13\%$ mientras que el método de compostaje por lombricultura tuvo un mejor rendimiento con un $69\pm 0.13\%$.
35. Según los resultados de los análisis de abono orgánico realizados al humus obtenido por cada método de compostaje, se obtuvieron los siguientes resultados: Para el método de aireación, la composición de nitrógeno total fue de 2.59g/kg, de fósforo fue de 1560mg/kg, de potasio fue de 2010mg/kg, de calcio fue de 2370mg/kg, de magnesio fue de 600mg/kg, de hierro fue de 2800mg/kg, de cobre fue de 13.5mg/kg, de manganeso fue de 159.5mg/kg y de cinc fue de 21mg/kg.
36. Para el método de lombricultura, la composición de nitrógeno total fue de 7.55g/kg, de fósforo fue de 1800mg/kg, de potasio fue de 3090mg/kg, de calcio fue de 6450mg/kg, de magnesio fue de 1080mg/kg, de hierro fue de 2950mg/kg, de cobre fue de 16.5mg/kg, de manganeso fue de 164mg/kg y de cinc fue de 55.5mg/kg.
37. De acuerdo a la composición final del abono obtenido, éste se puede utilizar para los cultivos de la finca y sobre todo, para el pasto del alimento de los búfalos.

X. RECOMENDACIONES

1. Haber realizado el resto de análisis como la Demanda Bioquímica de Oxígeno, proteínas, grasas y carbohidratos para el estiércol obtenido en época de verano para así poder comparar los datos con el estiércol obtenido en época de invierno.
2. Homogenizar la muestra antes de realizar cualquier análisis físico químico ya que esto puede causar discrepancias en los resultados, por lo cual se obtendrán datos erróneos.
3. Analizar lo antes posibles las muestras de sustrato para así evitar que pierdan alguna propiedad o algún componente esencial para el funcionamiento del biodigestor.
4. Realizar todos los análisis fisicoquímicos en triplicado para asegurarse que los resultados tengan precisión y los resultados obtenidos son correctos.
5. Realizar un estudio de cómo afecta la alimentación de los búfalos al potencial de metano.
6. Recoger el estiércol de los patios lo antes posible para evitar que bajo el sol pierda algunos de sus nutrientes que serán importantes para la digestión anaeróbica.
7. Ya que el estiércol fue recogido este debe estar almacenado en tanques de concreto que deben estar en un lugar cuya temperatura se mantenga en niveles bajos (10 grados Celsius), esto con el fin de mantener la propiedades del mismo.
8. Se recomienda que en el momento que entren los repuestos del equipo de absorción atómica del instituto de investigaciones se lleven a cabo los análisis de minerales de los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo
9. Determinar el pH de la solución que se analizará en los biodigestores a escala laboratorio ya que esta variable influye considerablemente en el desempeño de los microorganismos, y por ende, en la generación de metano. Instalar una descarga en el biodigestor para tener un fácil acceso a muestras de la biomasa y poder analizar su pH.
10. Al trabajar con reactores a escala laboratorio como los usados en este estudio, se recomienda usar un mínimo de cinco, para agilizar la obtención de resultados, ya que

cada sistema debe monitorearse durante al menos 15 días y al trabajar con pocos digestores el tiempo empleado para realizar las pruebas se alarga considerablemente.

11. Utilizar recipientes adecuados para la captación del biogás generado, es importante que éstos recipientes sean permeables para que no permitan el escape de algún componente del biogás o el ingreso de otros gases, ya que para analizar la calidad del biogás producido es necesario conocer todos los compuestos presentes en las cantidades que se producen, sin alteraciones.
12. Incorporar un sistema de agitación mecánica a los biodigestores de prueba, ya que esto permite que se liberen burbujas de biogás atrapadas en el medio, y a la vez ayuda a distribuir de manera uniforme la cantidad de nutrientes disponibles.
13. Implementar un mecanismo de alimentación y descarga al biodigestor para operarlos en forma continua. De esta forma se podría agregar nutrientes al sistema cuando la generación de metano disminuya, y retirar la biomasa carente de nutrientes. La alimentación y descarga deben poderse realizar de forma simple y que no altere el ambiente anaerobio del medio.
14. Utilizar un analizador digital de la concentración de metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico, principalmente, que trabajen en el rango adecuado de sensibilidad para determinar con mayor exactitud la composición del biogás analizado, ya que trabajar con cromatogramas y utilizar el área de cada pico para determinar indirectamente su concentración no es un método muy exacto
15. Se recomienda evaluar a temperaturas mayores todas las corridas, a 40°C y 50°C. Se deberá realizar un análisis económico sobre el aumento de la temperatura y si es viable trabajar a esas condiciones.
16. Las condiciones anaeróbicas son importantes por lo que no es recomendable abrir los reactores durante las corridas a ser realizadas, se tendrá pérdida de biogás además de dichas condiciones anaeróbicas.
17. Los reactores que contienen la mezcla de excremento/agua, deben de ser agitados, la agitación ayuda a que el excremento no se estanque en las partes más profundas del reactor, al agitarlos los alimentos para las bacterias se mueven por todo el medio y es más fácil la producción de biogás.

18. Cuando se realice una corrida, utilizar reactores pequeños simulando las condiciones anaeróbicas, de temperatura y relación de excremento/agua para luego poder medir el pH y ver como este varía durante toda la producción de biogás.
19. Realizar pruebas de cromatografía de gases para determinar la cantidad de metano en el biogás y obtener una eficiencia del proceso de generación del mismo
20. Diseñar un sistema para realizar pruebas de generación de biogás con agitación, que permita la medición de características del sustrato, como pH, para así poder realizar un mejor modelo de la cinética de reacción y poder diseñar en base a éste.
21. Al momento de la construcción del biodigestor es necesario tomar en cuenta que es un área muy cercana al mar por lo que al hacer excavación se debe tomar las consideraciones necesarias para evitar contratiempos.
22. Analizar la DBO de las aguas de limpieza dentro de la finca para utilizarlas en lugar de agua limpia o utilizar esta agua en las pruebas, con una carga extra de DBO se debería incrementar la generación de metano, se aprovecharía agua que actualmente es desecho y se utilizaría menos o incluso nada de agua limpia lo cual reduciría los costos por consumo de agua.
23. Evaluar la posibilidad y la forma adecuada de agregar agitadores para homogenizar de mejor manera el sustrato dentro del biodigestor, se recuerda que la agitación debe ser lenta para no destruir el medio que está realizando la digestión y los agitadores deben de estar instalados de tal forma que no permitan el ingreso de aire dentro del biodigestor, además de ser de un material que no provoque cambios en la reacción.
24. Evaluar la posibilidad de implementar el sistema de compostaje a la salida del biodigestor para evitar la necesidad de transportar el efluente; para esto es ideal estudiar y aplicar métodos de compostaje continuo.
25. Analizar otros usos para el excremento ya que se producen 4,840 kg por día de los cuales 1,025.43 kg se utilizarían para alimentar los biodigestores, 1,404.15 kg para la realización de compostaje, con lo que quedan 2,410.42 kg que de igual forma generarán metano, el cual irá directamente a la atmósfera.

26. Diseñar todos los componentes del sistema de generación de metano, cómo el tanque de agitación y el tanque de almacenamiento.
27. Se recomienda medir y monitorear la concentración de ácido sulfhídrico constantemente de modo que se verifique que el desulfurizador esté operando de la manera adecuada. Cuando la concentración de ácido sulfhídrico aumente se recomienda regenerar los pellets.
28. Se recomienda la capacitación del personal encargado del sistema de extracción y purificación del biogás con el fin de revisar las condiciones y el buen funcionamiento del mismo.
29. Se recomienda realizar un estudio de costo-beneficio para la automatización del proceso, con el fin de tener un mejor control sobre éste.
30. Se recomienda realizar un estudio técnico-económico para la remoción del dióxido de carbono (CO₂) presente en el biogás, con el fin de tener una combustión más eficiente.
31. Se recomienda llevar a cabo un estudio técnico para comparar las ventajas y desventajas del uso de viruta de hierro en lugar de pellets de óxido férrico.
32. Se recomienda analizar la viabilidad económica de implementar dos microturbogeneradores para cumplir con la demanda energética de la finca de forma más holgada.
33. Se recomienda cotizar equipo en reventa y evaluar si la rentabilidad del proyecto incrementa con esta compra.
34. Se recomienda medir la capacidad calorífica del biogás generado por medio de una bomba calorífica para garantizar el cumplimiento con las especificaciones de entrada de la turbina y el funcionamiento eficiente de la misma.
35. Se recomienda caracterizar el biogás obtenido por medio de análisis establecidos en la norma ASTM, estos podrán dar valores certeros sobre el producto final y definirán si el equipo seleccionado cumple con lo requerido o si es necesario incorporar equipos auxiliares.

36. Se recomienda conducir una evaluación eléctrica para determinar el costo y forma de conexión necesario al sistema.
37. Se recomienda evaluar la automatización del sistema de generación propuesto, así como la incorporación de instrumentación de control para evitar la variabilidad en el flujo de la operación
38. Tener un control exhaustivo de los parámetros claves (temperatura, humedad y pH) para identificar correctamente las diferentes etapas del compostaje.
39. Utilizar el método de aireación con algún tipo de ventilación controlada con el fin de tener los flujos de aire constantes y homogéneos por toda la mezcla.
40. Realizar un volteo en la pila de compostaje para ambos métodos cada dos días con el fin de promover el ingreso de aire dentro de la mezcla. Para el método de lombricultura, este volteo se puede hacer una vez por semana.
41. Realizar un análisis de humedad a la mezcla inicial para ambos casos, para obtener un balance de masa más acertado, conociendo la cantidad de agua que se perdió.
42. Hacer análisis de abono orgánico luego de un mes de inicio de la compostera, para determinar cuánto cambia su composición con respecto al tiempo.
43. Hacer un estudio para determinar cada cuanto es óptimo alimentar a las lombrices para que éstas se reproduzcan y produzcan la mayor cantidad de humus para utilizarlo como abono orgánico.
44. Analizar de forma económica, alguna forma para comercializar el abono orgánico producido por las composteras a partir de estiércol de búfalo.
45. Analizar de forma económica la comercialización de las lombrices de tierra, como una fuente alterna de ingresos para la finca.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Adrian, J.; Potus, J.; Poiffait, A.; Dauvillier, P.: "Análisis nutricional de los alimentos", Ed. Acribia, 2000, pag. 41-43.
- AIDG. (2008). *Saving a Guatemalan Community Thousands in Energy Costs*. Recuperado en Agosto de 2013, de AIDG Success Stories: <http://www.aidg.org/impact/aidg-outreach-success-stories>
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., y otros. (2008). *Biogas Handbook*. (U. o. Esbjerg, Ed.) Denmark.
- Almaguar, Y. (Agosto de 2007). *El búfalo, una opción de la ganadería*. Recuperado el 6 de Julio de 2013, de REDVET: http://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/razas_de_bufalos/99-opcion.pdf
- Alvarado, C. (01 de Diciembre de 2007). *Búfalos transforman el paisaje de la Costa Sur*. El Periódico.
- Álvarez, J. (2009). *Manual de Compostaje para Agricultura Ecológica*. Documento electrónico disponible en: http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/agricultura_ecologica/Manual%20compostaxe.pdf
- Angenent, L. R., Lorusso, M. L., & Barakat, A. (2004). «Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater». *TRENDS in Biotechnology*, 22 (9): 477 – 485.
- AOAC International: "Official Methods of Analysis". 17. ed. Gaithersburg, USA, 2000.
- APPA (2013). *¿Qué es la Biomasa?* Documento electrónico disponible en: http://www.appa.es/04biomasa/04que_es.php
- Arellano, J. (2002). *Introducción a la Ingeniería Ambiental*. México D.F. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. Documento electrónico disponible en: http://books.google.com.gt/books/about/Introducción_a_la_ingenier%C3%ADa_ambiental.html?id=Jdh2ZUSR9JQC&redir_esc=y
- Arias, C; et. Al. (2011). *Prototipo de Biodigestor para aguas residuales para la generación de biogás*. Megaproyecto Universidad del Valle de Guatemala. Pp. 263.
- Arrecis Cabrera, H.(2007). *Válvulas PVC. Guatemala*. Tesis de la Universidad San Carlos de Guatemala. 98 Pp.
- Atares, L. 2009. *Determinación de la densidad de un líquido con el método del picnómetro*. Obtenido el 25 de julio de 2013, de: <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12655/11.%20Art%C3%ADculo%20docente>.

%20Determinación%20de%20la%20densidad%20de%20un%20l%20C3%ADquido%20con%20el%20método%20del%20picnómetro.pdf?sequence=1

- Barnett, A et al. 1978. *Biogas technology in the third world*, Otawwa, Canada, pag 51.
- Bermúdez, J; Canovas, A; Iborra, J. 1988. *La digestión anaerobia*. Obtenido el 5 de mayo de 2013, de: <http://books.google.com.gt/books?id=dLR2fQTu9fMC&printsec=frontcover&dq=digestion+anaerobia&hl=es&sa=X&ei=yJaGUZvRPJDm9gSu34CYCw&ved=0CDAQ6AEwAA>
- Biogas Utilization Handbook. (1988). *Engineering Technology Branch, environment, health and Safety Division*. U.S Department of Energy. Atlanta, Georgia, U.S.A
- Bragachini, M., Urrets, G., Ustarroz, F., & Bragachini, M. (2008). *El Biogás*. Recuperado el 8 de Agosto de 2013, de Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria: <http://inta.gob.ar/documentos/manual-para-la-produccion-de-biogas>
- Bringezu, Stefan, et al. *Evaluación de biocombustibles*. http://www.unep.org/pdf/Assessing_Biofuels_sp.pdf [10 de Noviembre de 2012]
- Campos, E; Elias, X; Flotats, X. 2012. *Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje*. Obtenido el 4 de mayo de 2013; de: <http://books.google.com.gt/books?id=sAOTHkOK9CUC&printsec=frontcover&dq=digestion+anaerobia&hl=es&sa=X&ei=yJaGUZvRPJDm9gSu34CYCw&ved=0CDkQ6AEwAg#v=onepage&q=digestion%20anaerobia&f=false>
- Capstone Turbine Corporation. (2013). *Capstone Microturbines*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2013, de http://www.capstoneturbine.com/_docs/datasheets/CR30_331033F_lowres.pdf.
- Carrillo, L. 2003. *Microbiología Agrícola*. Obtenido el 23 de septiembre de 2013, de: <http://www.unsa.edu.ar/matbib/micragri/micagricap5.pdf>
- Castro, O. (2003). *Evaluación del Comportamiento Reproductivo con Base al Intervalo entre Parto de Hembras de Búfalos de Agua (Bubalus Bubalis) en el Municipio de Panzos, Alta Verapaz*. Universidad San Carlos de Guatemala, Zootecnia, Guatemala.
- CENCICAÑA. (Junio de 2004). *Recopilación de la Información de los Simposios de Análisis de la Zafra 1997 - 2003*. Area de Cogeneración. Boletín Estadístico .
- Cervantes, R. 2002. *Diseño de un biodigestor para la producción de biogás en una vivienda*. Tesis profesional, DIMA, Universidad Autónoma de Chapingo.
- Chang, R. (2007). *Química*. México: Mc Graw Hill.
- CNEE. (2012). *El Contexto de la Energía Renovable en Guatemala y la Matriz Energética del País*. Recuperado el Agosto de 2013, de Normas y Estudios Eléctricos: <http://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/>
- Collazo, Marcos. *Biogás*. http://www.altercexa.eu/images/archivos/Areas%20Tematicas/Biogas/Biogas_-_ES_-_Biogas.pdf [15 de Febrero de 2013]

CWMI, Cornell Waste Management Institute (2012). *¿Cuál sistema de compostaje es mejor para mi?* Documento electrónico disponible en: <http://cwmi.css.cornell.edu/whichcompostingsystemspanish.pdf>

Deublein, D. y Steinhauser A. 2008. *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Alemania: WILEY-VCH. 443 págs.

Ecodes, (2011). *Una Guía de Ecodes Acercará a los Consumidores a una Visión Más Sostenible de Comprar*. Documento electrónico disponible en: <http://www.consumoresponsable.org/2010102861/una-guia-de-ecodes-acercara-a-los-consumidores-una-vision-mas-sostenible-de-comprar>

Eisenmann Corporation. *Biogas Technology*. www.eisenmann.com/usa [30 de Octubre de 2012]

Elias, J. 2012. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Obtenido el 23 de septiembre de 2013, de: http://books.google.com.gt/books?id=qYmL8Q10TYcC&pg=PA666&lpg=PA666&dq=dqo+estiercol+de+cerdo&source=bl&ots=F9az21kXmJ&sig=J_NpHiH_VXzrF6m3KpAmHkhtc vk&hl=es&sa=X&ei=-5JUtKhD6rB4AP5toDIDA&ved=0CDQQ6AEwATgU#v=onepage&q=dqo%20estiercol%20de%20cerdo&f=false

Enviaseo, (2013). *Contaminación Ambiental Causada por los Residuos Sólidos*. Documento disponible en: <http://enviaseo.gov.co/content/40/img/Contaminacion%20ambiental.pdf>

EPA, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, (2013) *El Reciclaje*. Documento electrónico disponible en: <http://www.epa.gov/espanol/reciclajefaq.html>

Estrada, J. 2001. *Pastos y Forrajes*. Obtenido el 23 de septiembre de 2013, de: http://books.google.com.gt/books?id=qhbLgdouyJkC&pg=PA112&lpg=PA112&dq=dqo+estiercol&source=bl&ots=EBJWoQo5Wp&sig=90Ow3s9BINIdSrt4IRdJpAVNN-8&hl=es&sa=X&ei=8AM_Ur7OKYbU9QSUxICACw&ved=0CFIQ6AEwBA#v=onepage&q=dqo%20estiercol&f=false

Fernández, Luis. 2008. *Caracterización cinética de la degradación anaerobia termofílica seca de la forsu. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo*. Tesis Universidad de Cádiz. Cádiz.: Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente. 442 págs.

Fontaine, G. (2008). *La Guerra del Fuego: Políticas Petroleras y Crisis Energética en Latino América*. Editorial Flacso Ecuador. Documento electrónico disponible en: http://books.google.com.gt/books?id=xmNNxRZGtCIC&pg=PA23&dq=problemas+energeticos+mundiales&hl=es&sa=X&ei=YZDIUdjHPj94APd7YCQBQ&redir_esc=y#v=onepage&q=problemas%20energeticos%20mundiales&f=false

Franchi, Oscar. *Suero de leche, propiedades y usos. Innovación en la industria láctea*. <http://www.scribd.com/doc/47261459/Suero-de-leche-propiedades-y-usos> [21 de Septiembre de 2013]

- Franco, M. (2009). *Estudio para el Manejo de Residuos Agropecuarios y Agroindustriales en Centroamérica. Manejo de Residuos* (pág. 96). PA Consulting Group.
- García, B. 2010. *Calibración de un potenciómetro*. Obtenido el 12 de junio de 2013, de: <http://calibraciondeinstrumentosgg.blogspot.com/2011/11/ph-metro-potenciometro.html>
- Girón, E. (26 de Junio de 2010). *Carne de Búfalo gana Mercado en Zona Costera*. Prensa Libre .
- Grisales, K. 2012. *Manual para el análisis de aguas residuales*. Obtenido el 25 de junio de 2013, de: <http://es.scribd.com/doc/88734524/37/DEMANDA-QUIMICA-DE-OXIGENO-DQO---METODO-Nº-5220>
- Grasselli, Mariano, et al. 1997. *¿Qué hacer con el suero del queso?*. <http://www.cienciahoy.org.ar/hoy43/queso1.htm> [30 de Octubre de 2013]
- Guardado, J. (2007). *Diseño y Construcción de plantas de biogás sencillas*. Editorial CubaSolar. La Habana, Cuba.
- Gutiérrez, A. (2010). *Estudio de Viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. Cap. 4. Uso en redes de Gas Natural. PSE Probiogas. Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España*. Madrid, España.
- Gutiérrez, G., Moncada, I., Meza, M., Fuentes, F., Balderas, J., & Gortáres, P. (2012). *Biogás: Una alternativa ecológica para la producción de energía*. Ideas CONCYTEG , 881-884.
- Hilbert, J. 2012. *Manual del biogás*. Obtenido el 14 de mayo de 2013, de: https://www.google.com.gt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&ved=0CDEQFjAB&url=http%3A%2F%2Finta.gob.ar%2Fdocumentos%2Fmanual-para-la-produccion-de-biogas%2Fat_multi_download%2Ffile%2FManual%2520para%2520la%2520producci%25C3%25B3n%2520de%2520biog%25C3%25A1s%2520del%2520IIR.pdf&ei=MyyoUbeVFlmE9gTkilG4BA&usg=AFQjCNGXvBw98QeQa_VSkFAJPfU9J0lfaQ&sig2=8fM6prHsJCWC3sA2XeSl-g&bvm=bv.47244034,d.eWU
- Huertas, J. Giraldo, N. & S. Izquierdo. (2011). *Removal of H₂S and CO₂ from Biogas by Amine Absorption*. Automotive Engineering Research Center-CIMA. Tecnológico de Monterrey. Nuevo León, México. Obtenido de: http://cdn.intechopen.com/pdfs/22869/InTech-Removal_of_h2s_and_co2_from_biogas_by_amine_absorption.pdf
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 2007. *Biomasa: digestores anaerobios*. Madrid. Departamento de Energía. 43 págs.
- Janis, J. 2011. *Biogas production from cheese whey in two phase anaerobic digestion*. Obtenido el 23 de septiembre de 2013, de: http://tf.llu.lv/conference/proceedings2011/Papers/069_Jasko.pdf
- Jiménez, G. B. (Julio de 2010). *Bondades Ecológicas del Búfalo de Agua: Camino hacia la Certificación* Recuperado el 14 de Julio de 2013, de Universidad de Costa Rica: http://zootecnia.ucr.ac.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=61

- Jongersen, P. (2009). *Biogas Green Energy*. Aarhus University . Denmark: Digisource Denmark A/S.
- Kaltwasser, B. 1980. *Biogas*; Wiesbaden, FRG, pag 35-36
- Kirk, R. & D. Othmer. (1962). *Enciclopedia de Tecnología Química*. Vol. VIII. Editorial UTEHA. México. Pp. 737-760
- Kohl, A. and R. Neilsen (1997). *Gas Purification*. Golf Publishing Company, Houston, Texas: 1395 p.
- Lara, S. 2011. *Diseño de un biorreactor y conducción del biogás generado por las excretas de ganado vacuno, estación Tunshi-Espoch*. Obtenido el 23 de septiembre de 20013, de:
- Lasing, S.; Botero, R. y Martin, J. 2008. «*Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters*». *Bioresource Technology*. 99 (13): 5881-5890
- Lasing, S.; Viquez, J.; Martínez, H.; Botero, R. y Martin, J. 2008. «*Quantifying electricity generation and waste transformation in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system*». *Ecological Engineering* 34 (4): 332-348.
- Macz, O. (2013). *Nutrición Vegetal*. Empresa Multinacional YARA.
- Magaña, Luis, et al. 2011. «*Tratamiento anaerobio de desechos lácticos y estiércol de cabra*». *Ingeniería e Investigación*. 31 (1): 93-98
- Magram. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España. *Producción y Consumo Sostenible y Residuos Agrarios*. Documento electrónico disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/Residuos_agrarios_tcm7-232332.pdf
- Mantra, (2013). *Residuos Orgánicos e Inorgánicos*. Documento electrónico disponible en: <http://www.mantra.com.ar/contecologia/organicoseinorganicos.html>
- Maramba, F. 1978. *Biogas and waste recycling*. The Phillipine Experinede; Metro Menila, Philliipines, pag 43.
- Marchaim, U. 1992. *Biogas, processes for sustainable development*. FAO, Roma, pag 232.
- McCabe, Warren; J. Smith & P. Harriott. (2007). *Operaciones Unitarias en ingeniería química*. 7ma Edición. McGraw Hill. México D.F. Pp. 1189.
- McKinsey, S. (2003). *Removal of Hydrogen Sulfide from biogas using cow-manure compost*. Universidad de Cornell. Estados Unidos. Obtenido de: <http://www.green-trust.org/AI%20Rutan/MS-Thesis-Steve-Zicari.pdf>
- Mejía, O. 2008. *Informe sobre método soxhlet*. Obtenido el 10 de septiembre de 2013, de: <http://www.slideshare.net/bibliojengibre/mtodo-soxhlet-en-alimentos>
- Mitat, A. (25 de Agosto de 2010). *Antecedentes y perspectiva de la actividad bufalina en el trópico*. Recuperado el 15 de Julio de 2013, de http://zootecnia.ucr.ac.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=61.

- Monreal, Carlos. *La utilización de los residuos agrícolas y otros desechos para la producción de bioenergía*. <http://www.chile.ca/documents/BiomassEnergy.pdf> [23 de Febrero de 2013]
- Moreno, J. (2007). *Compostaje*. Editorial Grupo Mundi Prensa. Documento electrónico disponible en:
http://books.google.com.gt/books?id=APuzwas6rrcC&printsec=frontcover&dq=compostaje&hl=es&sa=X&ei=0UXnUcOfNYKe9QTc2oGACg&redir_esc=y#v=onepage&q=compostaje&f=false
- Morrison, R. (1987). *Química Orgánica*. Editorial Pearson. Documento electrónico disponible en:
<http://books.google.com.gt/books?id=N0kLiQ-fnjgC&pg=PA39&dq=metano&hl=es&sa=X&ei=hRnmUdO3Ecew4APYuDwBA&ved=0CFgQ6AEwCQ#v=onepage&q&f=false>
- Nasir, I. M.; Mohd, T.I. y Omar, R. 2012. «*Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review*». *Eng. Life Sci.* 12 (3): 258-269
- Nielsen, S.: "*Food Analysis*", Ed. Kluwer Academic/Plenum Publ, 2003, p.g. 131-142
- Ningbo EBM® Plastic Co. (2013) *Fabricantes de accesorios de PVC*. Ningbo City, China. Obtenido de: <http://www.ebmplastic.com/>
- Ortega, J. (2008). *El Biogás limpio como fuente de energía renovable*. Ingeniería y Tecnología de Medio Ambiente.
- OSHA (2013). *Occupational Safety and Health Administration Hazardous Pollutants List*. U.S Department of Labor. Washington, D.C. Obtenido de: www.osha.gov.
- Pastrana, Lorenzo. *Suero de leche ¿residuo o recurso?*.
<http://www.inti.gob.ar/lacteos/pdf/pastrana1.pdf> [20 de Septiembre de 2013]
- Perry, R. & D. Green. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. McGraw Hill. 7ma Edición. Vol. I, II, III, IV. Madrid, España.
- Potus, J. 2000. *Análisis nutricional de los alimentos*. Ed. Acribia. pag. 41-43
- Puigjaner, L. (2011). *Syngas From Waste, Emerging Technologies*. Editorial Springer. New York, USA.
- RAE, (2013). *Basura*. Documento electrónico disponible en:
<http://lema.rae.es/drae/?val=basura>
- Rainforest Alliance. (7 de Agosto de 2012). *Guatemala tiene la primera finca ganadera de Centroamérica certificada* Rainforest Alliance. Obtenido de <http://www.rainforest-alliance.org/es/newsroom/news/guatemala-finca-ganaderia-certificada>.
- Ramírez, J. A. Vela. Julio 2013. *Aprovechamiento Industrial de Lactosuero*. Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, C.A. Email: cursosjsr@gmail.com. Tel.: (57) 300 652 95 62

- Roldán, J. (2008). *Fuentes de Energía*. Editorial Paraninfo. Documento electrónico disponible en: http://books.google.com.gt/books?id=1VSdl7o_t2kC&printsec=frontcover&dq=fuentes+alternas+de+energia&hl=es&sa=X&ei=6JPIUd_GJZei4APTsiDADw&redir_esc=y#v=onepage&q=fuentes%20alternas%20de%20energia&f=false
- Sánchez, F., Santines, J., Vicente, G., & Villar, S. (2006). *Situación Actual de la Producción de biogás y de su aprovechamiento*. Fundación Madrid para el Conocimiento. Madrid: Fundación Madrid para el Conocimiento.
- Santambrosio, Eduardo. *Catedra Biotecnológica*. http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_ano/biotecnologia/DBO.pdf [30 de Septiembre de 2013]
- Schriewer Biogas Consulting. 2013. *Estrategias, conceptos y conocimiento en energía renovable del biogás*. Ornbaum. <http://www.schriewer-biogas-consulting.com/SBC2010es/> [1 de Marzo de 2013]
- SCS Engineers. (2005). *Informe de la Prueba de Extracción y estudio de Pre-Viabilidad para la recuperación de Biogás en el Relleno Sanitario el Trebol Ciudad de Guatemala*, Guatemala. United States Environmental Protection Agency, Guatemala.
- Sixsmith, T. & R. Hanselka. (1997). *Handbook of thermoplastic piping system design*. Marcel Dekker Inc. New York, U.S.A. Pp. 686
- Skoog, D; West, D, Holler, J; Crouch, S. 2010. *Fundamentos de química analítica*. Octava edición. México, Cenage Learning. 1055 págs.
- Skoog, Douglas; D. West y F. James. 2001. *Fundamentos de Química Analítica*. 7ª ed. Madrid. McGraw-Hill. 472 págs.
- Soetaert, W. & E. Vandamme. (2009). Biofuels. Chapter 10, "*Biomass Digestion to Methane in Agriculture: A successful pathway for the energy production and waste treatment worldwide*". Editorial Wiley. India. Pp. 171-195
- Soetaert, W., & Vandamme, E. (2009). *Biofuels*. New Delhi, India: Wiley Series.
- Soil, J. 2013. *Chemical characterization of fresh and composted livestock manures*. Obtenido el 13 de septiembre de 2013, de: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-95162013000100011&script=sci_arttext
- Superintendencia de Bancos. (2011). Sector Azucarero - *Análisis de Sectores Económicos*. Superintendencia de Bancos, Guatemala.
- Toro, R. V. (08 de Junio de 2013). *Búfalos versus Bovinos*. Recuperado el 13 de Agosto de 2013, de El Meridiano de Córdoba: http://www.elmeridianodecordoba.com.co/index.php?option=com_k2&view=item&id=34079:búfalos-vs-bovinos&Itemid=126
- Valencia, Jaime. *El Suero de Quesería y sus posibles aplicaciones. Parte 1/3*. http://www.catedu.es/ctamagazine/images/stories/noticias/Mayo2008/mlc023_suero.pdf [20 de Octubre de 2012]

- Varnero, M. Carú, M. Galleguillos, K. & P. Achondo. (2011). *Tecnologías disponibles para la purificación de Biogás usado en la Generación eléctrica*. Universidad de Chile Facultad de Ciencias Agrónomicas. Santiago, Chile.
- Viquez, J. *Remoción del sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el biogás*. ECAG N°53, 16-21 (2010).
Obtenido de:
<http://www.viogaz.com/downloads/Remocion%20de%20H2S%20en%20el%20biogas.pdf>
- Viroglio, Mario. *Producción más limpia en la industria láctea*.
http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/UPLCS/File/Presentaciones_Seminario%20Abril2009/Sr.%20Mario%20Viroglio%20-%20Produccion%20ms%20Limpia%20en%20la%20industria%20lctea.pdf [30 de Septiembre de 2013]
- Weilland, P. (2009). *Biogas production: current state and perspective*. . *Biotechnol* (85), 849 - 860.
- Wellinger, A. and A. Linberg (2000). *Biogas Upgrading and Utilization* - IEA Bioenergy Task 24. International Energy Association, Paris, France. Pp. 20. Obtenido de: http://www.iea-biogas.net/_download/publi-task37/Biogas%20upgrading.pdf
- Zimmermann, M. & H. Muche. (1985). *Purification of Biogas*. GATE-GTZ- Lengericher Handelsdruckerei. Alemania. Obtenido de:
http://www.pssurvival.com/ps/biogas/The_Purification_Of_Biogas_Helmut_1985.pdf

XII. APÉNDICE

A. Módulo de caracterización de materias primas

1. Cálculos de muestra

- a. Cálculo 1: Obtención de sólidos totales (gramos) en muestra de estiércol 1, obtenida en época de invierno.

$$\text{sólidos totales} = \text{masa crisol} + \text{estircol (horno 70 celsius)} - \text{masa crisol (sin nada)}$$

$$\text{Sólidos totales} = 115.10 \text{ g} - 109.07 \text{ g}$$

$$\text{Sólido totales} = 6.03 \text{ g}$$

Se efectuó el mismo cálculo para el estiércol obtenido en época de verano y para el suero.

- b. Cálculo 2: Obtención del porcentaje de sólidos totales en muestra de estiércol 1, obtenida en época de invierno.

$$\% \text{sólidos totales} = \frac{\text{masa sólido totales (g)}}{\text{masa estiércol utilizada (g)}} * 100$$

$$\% \text{sólido totales} = \frac{6.03 \text{ g}}{30.86 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{sólidos totales} = 19.54 \%$$

Se hizo el mismo cálculo para el estiércol obtenido en época de verano y para el suero.

- c. Cálculo 3: Obtención de la humedad (gramos) en muestra de estiércol 1, obtenida en época de invierno.

$$\text{humedad} = (\text{masa crisol} + \text{masa estiércol}) - (\text{masa crisol} + \text{masa estircol luego de horno a 70 celsius})$$

$$\text{humedad} = 139.93 \text{ g} - 115.10 \text{ g}$$

$$\text{humedad} = 24.83 \text{ g}$$

Se efectuó el mismo cálculo para el estiércol obtenido en época de verano y para el suero.

- d. Cálculo 4: Obtención del porcentaje de humedad en muestra de estiércol 1, obtenida en época de invierno.

$$\% \text{humedad} = \frac{\text{humedad (g)}}{\text{masa estiércol utilizada (g)}} * 100$$

$$\% \text{humedad} = \frac{24.83}{30.86} * 100$$

$$\% \text{humedad} = 80.46\%$$

Se hizo el mismo cálculo para el estiércol obtenido en época de verano y para el suero.

- e. Cálculo 5: Obtención de cenizas (gramos) en muestra de estiércol 1, obtenida en época de invierno.

$$\text{cenizas} = (\text{masa crisol} + \text{masa estircol luego de mufla a 600 celsius})(g) - \text{masa crisol (g)}$$

$$\text{cenizas} = 111.01 \text{ g} - 109.07 \text{ g}$$

$$\text{cenizas} = 1.94 \text{ g}$$

Se llevó a cabo el mismo cálculo para el estiércol obtenido en época de verano y para el suero.

- f. Cálculo 6: Obtención del porcentaje de cenizas en muestra de estiércol 1, obtenida en época de invierno.

$$\% \text{humedad} = \frac{\text{cenizas (g)}}{\text{masa estiércol utilizada (g)}} * 100$$

$$\% \text{humedad} = \frac{1.94 \text{ g}}{30.86 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{humedad} = 6.29\%$$

Se ejecutó el mismo cálculo para el estiércol obtenido en época de verano y para el suero.

- g. Cálculo 7: Obtención de sólidos volátiles (gramos) en muestra de estiércol 1, obtenida en época de invierno.

sólidos volátiles

$$= (\text{masa crisol} + \text{masa estiércol luego de horno a } 70 \text{ celsius})(g) - (\text{masa crisol} + \text{masa estiércol luego de mufla a } 600 \text{ celsius})(g)$$

$$\text{sólidos volátiles} = 115.10 \text{ g} - 111.01 \text{ g}$$

$$\text{sólidos volátiles} = 4.09 \text{ g}$$

Se efectuó el mismo cálculo para el estiércol obtenido en época de verano y para el suero.

- h. Cálculo 8: Obtención del porcentaje de sólidos volátiles en muestra de estiércol 1, obtenida en época de invierno.

$$\% \text{humedad} = \frac{\text{sólidos volátiles (g)}}{\text{masa estiércol utilizada (g)}} * 100$$

$$\% \text{humedad} = \frac{4.09 \text{ g}}{30.86 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{humedad} = 13.25\%$$

Se llevó a cabo el mismo cálculo para el estiércol obtenido en época de verano y para el suero.

- i. Cálculo 9: Obtención de la densidad del suero. Se realizó este cálculo para la corrida 1.

$$\text{densidad} = \frac{(\text{masa picnómetro con suero} - \text{masa picnómetro vacío})(g)}{\text{volumen (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{densidad} = \frac{(45.56 - 20.51)(g)}{25 \text{ cm}^3}$$

$$\text{densidad} = 1.002 \frac{g}{\text{cm}^3}$$

Se efectuó el mismo cálculo para las otras dos corridas de suero.

- j. Cálculo 10: Obtención de la densidad del estiércol. Se llevó a cabo este cálculo para la corrida 1.

$$densidad = \frac{((volumen\ beaker + estiércol) - (volumen\ beaker\ con\ agua))(g)}{(volumen\ final - volumen\ inicial)(mL)}$$

$$densidad = \frac{133.21\ g - 112.64\ g}{80\ mL - 60\ mL}$$

$$densidad = 1.028 \frac{g}{mL}$$

Se generó el mismo cálculo para las otras dos corridas de estiércol.

- k. Cálculo 11: Conversión de concentración de mg O₂ a mg DQO. Ejemplo realizado para la concentración de 5000 mg O₂/L.

$$5000 \frac{\text{mg ftalato}}{\text{L}} * 1.176 \frac{\text{mg O}_2}{\text{mg ftalato}} = 5880 \frac{\text{mg DQO}}{\text{L}}$$

Se hizo para el resto de concentraciones.

- l. Cálculo 12: Cálculo de DQO utilizando ecuación de la recta de regresión lineal y absorbancia para la solución 1:40 la cual es de 0.4862. Se realizó para el estiércol obtenido en época de verano.

$$0.4862\ \text{nm} = 0.0002 * x + .0167$$

$$x = 2347.5 \frac{\text{mg DQO}}{\text{L}}$$

- m. Cálculo 13: Cálculo del potencial de metano a partir del valor de DQO y la dilución de 1:40. Se realizó para el estiércol obtenido en época de verano.

$$2347.5 \frac{\text{mg O}_2}{\text{L}} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} * \frac{1 \text{ mol O}_2}{32 \text{ g O}_2} * \frac{1 \text{ mol CH}_4}{2 \text{ mol O}_2} * \frac{22.41 \text{ L}}{1 \text{ mol CH}_4} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 0.0008219 \frac{\text{m}^3 \text{ metano}}{\text{L}}$$

$$39 \frac{\text{L}}{1 \text{ Kg estiercol}} * 0.0008219 \frac{\text{m}^3}{\text{L}} = 0.03516 \frac{\text{m}^3 \text{ metano}}{1 \text{ kg estiercol}} * \frac{38.41 \text{ g estiercol}}{5.54 \text{ g sólidos Totales}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$= 0.0002438 \pm .0000126 \frac{\text{m}^3 \text{ CH}_4}{\text{g Sólidos Totales}}$$

Se efectuó el mismo cálculo para el suero.

- n. Cálculo 14: Cálculo de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Se hizo para el sustrato suero.

$$DBO = \frac{\left(\text{mg} \frac{\text{O}_2}{\text{L}} \right) i - \left(\text{mg} \frac{\text{O}_2}{\text{L}} \right) f}{\frac{\text{mL dilución}}{\text{volumen vial DBO}}} * \text{mL dilución}$$

$$DBO = \frac{\left(7.08 \text{ mg} \frac{\text{O}_2}{\text{L}} \right) - \left(0.11 \text{ mg} \frac{\text{O}_2}{\text{L}} \right) f}{\frac{100 \text{ mL}}{300 \text{ mL}}} * 100$$

$$DBO = 2,091 \text{ mg} \frac{\text{O}_2}{\text{L solución}}$$

Se llevó a cabo el mismo cálculo para el estiercol.

- o. Cálculo 15: Cálculo del nitrógeno amoniacal. Se generó para la primera muestra de suero. Se realizó en duplicado.

$$N \text{ amoniacal} = \frac{\text{mL HCl consumidos} * \text{Normalidad} * \text{masa nitrógeno} * 100}{\text{masa muestra}}$$

$$N \text{ amoniacal} = \frac{1.4 \text{ mL HCl} * 0.105 \frac{\text{equivalentes}}{\text{mL}} * 0.014 \frac{\text{gramos N}}{\text{equivalente}} * 100}{0.4201 \text{ g muestra}} = 0.9788 \frac{\text{g Nitrógeno}}{100 \text{ g muestra}}$$

Se realizó el mismo cálculo para el estiercol.

- p. Cálculo 16: Cálculo del porcentaje de proteínas partiendo del cálculo de nitrógeno amoniacal. Se realizó para el suero. Factor K para leche y suero de 6.38

$$\text{Porcentaje de proteína} = \frac{g \text{ Nitrógeno}}{100 g \text{ muestra}} * \text{factor } K$$

$$\text{Porcentaje de proteína} = 0.9798 \frac{g \text{ Nitrógeno}}{100 g \text{ muestra}} * 6.38$$

$$\text{Porcentaje de proteína} = 6.2509 \%$$

Se llevó a cabo el mismo cálculo para el estiércol.

- q. Cálculo 17: Cálculo del porcentaje de carbohidratos contenidos en las muestras de estiércol de búfalo y suero de queso. Se efectuó para el promedio del suero.

$$\% \text{carbohidratos} = 100\% - \% \text{sólidos volátiles} - \% \text{proteínas} - \% \text{grasas} - \% \text{cenizas}$$

$\% \text{carbohidratos}$

$$= 100\% - 7.43\% \text{sólidos volátiles} - 5.75\% \text{proteínas} - 11.89\% \text{grasas} - 0.5\% \text{cenizas}$$

$$\% \text{carbohidratos} = 74.42 \%$$

Se generó el mismo cálculo para el estiércol.

2. Análisis de error

- a. Cálculo 18: Incertidumbre de una suma. Ejemplo para el cálculo para los gramos de humedad obtenidos en la muestra 1 de suero.

$$S_y = \pm \sqrt{S_a^2 + S_b^2 + S_c^2}$$

$$S_y = \pm \sqrt{0.01^2 + 0.01^2} = \pm 0.014 g$$

Cálculo utilizado para todas las sumas y restas efectuadas en los cálculos del presente reporte.

- b. Cálculo 19: Incertidumbre de una multiplicación. Ejemplo para el cálculo del porcentaje de cenizas en la muestra 1 de suero.

$$S_y = y \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{A}\right)^2 + \left(\frac{b}{B}\right)^2 + \left(\frac{c}{C}\right)^2}$$

$$S_y = 0.53 \text{ g} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.014 \text{ g}}{0.59 \text{ g}}\right)^2 + \left(\frac{0.014 \text{ g}}{110.57 \text{ g}}\right)^2} = \pm 0.013\%$$

Utilizado en todas las multiplicaciones y divisiones generadas en el presente reporte.

- c. Cálculo 20: Media de datos. Ejemplo para la media de densidades del suero.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

$$\bar{x} = \frac{(1.024756 + 1.02604 + 1.025104) \text{ g/cm}^3}{3} = 1.025 \pm \text{ g/cm}^3$$

Se utilizó de la misma forma para todas las medias estimadas en los cálculos.

- d. Cálculo 21: Desviación estándar de una media. Ejemplo para la media de las densidades de suero

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N}}{N - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{(1.024756^2 + 1.02604^2 + 1.02510^2) - \frac{(1.024756 + 1.02604 + 1.02510) \text{ g}}{3}}{4}} = \pm 0.001 \text{ g/cm}^3$$

Efectuado de la misma manera para todas las medias calculadas.

Tabla 69 : Sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para las tres muestras de suero.

	Muestra 1			Muestra 2			Muestra 3		
sólidos totales (g)	9.11	±	0.01	7.72	±	0.01	10.38	±	0.01
sólidos totales (%)	8.24	±	0.01	6.53	±	0.01	9.02	±	0.01
humedad (g)	101.46	±	0.01	110.50	±	0.01	104.66	±	0.01
humedad (%)	91.76	±	0.02	93.47	±	0.02	90.98	±	0.02
cenizas (g)	0.59	±	0.01	0.49	±	0.01	0.63	±	0.01
cenizas (%)	0.53	±	0.01	0.41	±	0.01	0.55	±	0.01
sólidos volátiles (g)	8.52	±	0.01	7.23	±	0.01	9.75	±	0.01
sólidos volátiles (%)	7.71	±	0.01	6.12	±	0.01	8.48	±	0.01

Tabla 70: Sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para las tres muestras de estiércol obtenido en época de invierno.

	Muestra 1			Muestra 2			Muestra 3		
sólidos totales (g)	6.03	±	0.01	6.05	±	0.01	6.36	±	0.01
sólidos totales (%)	19.54	±	0.05	19.64	±	0.05	19.65	±	0.04
humedad (g)	24.83	±	0.01	24.76	±	0.01	26.01	±	0.01
humedad (%)	80.46	±	0.06	80.36	±	0.06	80.35	±	0.06
cenizas (g)	1.94	±	0.01	1.94	±	0.01	2.09	±	0.01
cenizas (%)	6.29	±	0.05	6.30	±	0.05	6.46	±	0.04
sólidos volátiles (g)	4.09	±	0.01	4.11	±	0.01	4.27	±	0.01
sólidos volátiles (%)	13.25	±	0.05	13.34	±	0.05	13.19	±	0.04

Tabla 71: Sólidos totales, volátiles, cenizas y humedad para las tres muestras de estiércol obtenido en época de verano.

	Muestra 1			Muestra 2			Muestra 3		
sólidos totales (g)	5.38	±	0.01	5.87	±	0.01	5.37	±	0.01
sólidos totales (%)	14.31	±	0.04	14.54	±	0.04	14.42	±	0.04
humedad (g)	32.21	±	0.01	34.51	±	0.01	31.88	±	0.01
humedad (%)	85.69	±	0.05	85.46	±	0.05	85.58	±	0.05
cenizas (g)	1.06	±	0.01	1.17	±	0.01	1.08	±	0.01
cenizas (%)	2.82	±	0.04	2.90	±	0.04	2.90	±	0.04
sólidos volátiles (g)	4.32	±	0.01	4.70	±	0.01	4.29	±	0.01
sólidos volátiles (%)	11.49	±	0.04	11.64	±	0.04	11.52	±	0.04

Tabla 72: Nitrógeno amoniacal y proteínas para las dos muestras de estiércol obtenidos en época de invierno

Muestra 1	0.81	±	0.77	g N amoniacal/100 g muestra
	5.04	±	0.77	% proteínas
Muestra 2	0.75	±	0.72	g N amoniacal/100 g muestra
	4.71	±	0.72	% proteínas

Tabla 73: Nitrógeno amoniacal y proteínas para la primera muestra de suero de leche de búfalo

Muestra 1	0.98	±	0.93	g N amoniacal/100 g muestra
	6.25	±	0.93	% proteínas
Muestra 2	0.82	±	0.79	g N amoniacal/100 g muestra
	5.26	±	0.79	% proteínas

Tabla 74: Datos de placa de la mufla

Marca	Furnance Thermolyne
Modelo	62700
Rango	0-1500 °C
Incertidumbre	±1 °C

Ilustración 20 Mufla utilizada para volatilizar la materia combustible de los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Tabla 75: Datos de placa del horno

Marca	Fischer Scientific
Modelo	Isotemp 500 series
Rango	0-150 °C
Incertidumbre	±0.5 °C

Ilustración 21 Horno utilizado para quitar la humedad de los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Tabla 76: Datos de placa de la balanza analítica

Marca	Sartorius
Modelo	BP 4100S
Rango	0-4100 g
Incertidumbre	±0.01 g

Ilustración 22 Balanza analítica utilizada para el peso de sólidos totales y cenizas del suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo.



Tabla 77: Datos de placa del potenciómetro

Marca	Fischer Scientific
Modelo	AB15 Plus
Rango	0-14
Incertidumbre	± 0.001

Ilustración 23 Potenciómetro utilizado para medición del ph de suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Tabla 78: Datos de placa del espectrofotómetro

Marca	Shimadzu UV mini
Modelo	1240
Rango	190-1100 nm
Incertidumbre	± 0.0001 nm

Ilustración 24 Espectrofotómetro utilizado para la Demanda Química de Oxígeno del suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Tabla 79: Datos de placa del extractor Soxhlet

Marca	Electrothermal
Modelo	Series Electromantles
Rango	15-450 °C
Incertidumbre	±0.05

Ilustración 25 Soxhlet utilizado para la extracción de grasa de los dos sustratos utilizados: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Tabla 80: Datos de placa digestor Kjeldahl

Marca	Labconco
Modelo	2123-01
Rango	-
Incertidumbre	-

Ilustración 26 Digestor Kjeldahl para la digestión y destilación de los dos sustratos: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



Tabla 81: Datos de placa del medidor multipropósito la mufla

Marca	Hach
Modelo	HQ40d
Rango	-
Incertidumbre	± 0.01

Ilustración 27 Multipropósito utilizado para medir el oxígeno disuelto de los dos sustratos utilizados: suero de leche de búfalo y estiércol de búfalo



B. Módulo de utilización de suero láctico en el biodigestor

1. Datos calculados

Tabla 82: Volumen promedio de biogás generado por kilogramo de biomasa alimentada, utilizando diferentes proporciones de mezcla (50% m/m de agua y 50% m/m de estiércol) y de suero láctico. Se reporta el valor promedio calculado a partir de los datos obtenidos en las tres pruebas realizadas para cada formulación.

	80% mezcla /20% suero	75% mezcla / 25% suero	66% mezcla / 34% suero	50% mezcla / 50% suero	34% mezcla / 66% suero	100% suero
Día	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)
0	0	0	0	0	0	0
1	0.110±0.058	0.029±0.013	0.116±0.060	0.058±0.051	0.074±0.026	0.007±0.012
2	0.269±0.124	0.073±0.025	0.239±0.178	0.132±0.021	0.126±0.026	0.013±0.011
3	0.458±0.305	0.154±0.022	0.456±0.185	0.180±0.035	0.156±0.022	0.019±0.001
4	0.517±0.298	0.294±0.051	0.662±0.125	0.230±0.018	0.157±0.022	0.025±0.010
5	0.573±0.280	0.411±0.102	0.737±0.145	0.230±0.018	0.157±0.022	0.038±0.002
6	0.665±0.216	0.558±0.092	0.799±0.100	0.261±0.018	0.178±0.022	0.038±0.002
7	0.665±0.205	0.734±0.067	0.906±0.091	0.268±0.008	0.178±0.022	0.038±0.002
8	0.709±0.152	0.805±0.049	0.958±0.132	0.268±0.008	0.185±0.013	0.038±0.002
9	0.731±0.124	0.849±0.049	0.987±0.180	0.268±0.008	0.185±0.013	0.050±0.020
10	0.761±0.106	0.954±0.051	1.051±0.271	0.292±0.025	0.185±0.013	0.050±0.020
11	0.767±0.116	1.043±0.102	1.052±0.270	0.292±0.025	0.193±0.013	0.050±0.020
12	0.778±0.135	1.098±0.040	1.075±0.289	0.292±0.025	0.193±0.013	0.050±0.020
13	0.793±0.159	1.098±0.040	1.137±0.386	0.292±0.025	0.193±0.013	0.050±0.020
14	0.803±0.176	1.098±0.040	1.142±0.381	0.292±0.025	0.193±0.013	0.050±0.020
15	0.803±0.176	1.098±0.040	1.194±0.347	0.292±0.025	0.193±0.013	0.050±0.020
16	0.803±0.176	1.098±0.040	1.239±0.325	0.292±0.025	0.193±0.013	0.050±0.020
17	0.803±0.176	1.098±0.040	1.247±0.314	0.292±0.025	0.193±0.013	0.050±0.020
18	0.803±0.176	1.098±0.040	1.247±0.314	0.292±0.025	0.193±0.013	0.050±0.020
19	0.803±0.176	1.098±0.040	1.247±0.314	0.292±0.025	0.193±0.013	0.050±0.020
20	0.803±0.176	1.098±0.040	1.247±0.314	0.292±0.025	0.193±0.013	0.050±0.020

Tabla 83: Razón de biogás generado utilizando una alimentación intermitente de 10g de suero láctico a un biodigestor con 100g de agua y 100g de estiércol.

Día	Suero láctico en el biodigestor (%) (m/m)	Volumen total (L)	Razón de biogás (L/kg)
0	$4.76 \pm 4.77 \times 10^{-5}$	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
3	$9.09 \pm 6.47 \times 10^{-5}$	0.070 ± 0.001	0.318 ± 0.003
4	$9.09 \pm 6.47 \times 10^{-5}$	0.193 ± 0.001	0.877 ± 0.003
5	$13.04 \pm 7.61 \times 10^{-5}$	0.202 ± 0.001	0.878 ± 0.004
6	$13.04 \pm 7.61 \times 10^{-5}$	0.332 ± 0.001	1.443 ± 0.005
7	$16.67 \pm 8.48 \times 10^{-5}$	0.402 ± 0.001	1.675 ± 0.005
10	$20.00 \pm 9.16 \times 10^{-5}$	0.539 ± 0.001	2.156 ± 0.005
11	$20.00 \pm 9.16 \times 10^{-5}$	0.539 ± 0.001	2.156 ± 0.005
12	$23.08 \pm 9.71 \times 10^{-5}$	0.669 ± 0.001	2.573 ± 0.005
13	$23.08 \pm 9.71 \times 10^{-5}$	0.799 ± 0.001	3.073 ± 0.005
14	$25.93 \pm 9.42 \times 10^{-5}$	0.900 ± 0.001	3.333 ± 0.006
17	$28.57 \pm 1.06 \times 10^{-4}$	1.040 ± 0.002	3.714 ± 0.006
18	$28.57 \pm 1.06 \times 10^{-4}$	1.113 ± 0.002	3.975 ± 0.006

Tabla 84: Razón de biogás generado utilizando 80% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 20% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.

Día	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	80% mezcla / 20% suero (2.27kg)	80% mezcla / 20% suero (2.27kg)	80% mezcla / 20% suero (2.27kg)
	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)
0	0	0	0
1	0.044 ± 0.022	0.132 ± 0.022	0.154 ± 0.022
2	0.176 ± 0.022	0.220 ± 0.022	0.410 ± 0.022
3	0.220 ± 0.022	0.352 ± 0.022	0.802 ± 0.023
4	0.264 ± 0.022	0.441 ± 0.022	0.846 ± 0.023
5	0.317 ± 0.02	0.529 ± 0.023	0.872 ± 0.023
6	0.441 ± 0.022	0.683 ± 0.023	0.872 ± 0.023
7	0.463 ± 0.022	0.661 ± 0.023	0.872 ± 0.023
8	0.573 ± 0.023	0.683 ± 0.023	0.872 ± 0.023
9	0.639 ± 0.023	0.683 ± 0.023	0.872 ± 0.023
10	0.661 ± 0.023	0.749 ± 0.023	0.872 ± 0.023
11	0.661 ± 0.023	0.749 ± 0.023	0.890 ± 0.023
12	0.661 ± 0.023	0.749 ± 0.023	0.925 ± 0.023
13	0.661 ± 0.023	0.749 ± 0.023	0.969 ± 0.024
14	0.661 ± 0.023	0.749 ± 0.023	1.000 ± 0.024
15	0.661 ± 0.023	0.749 ± 0.023	1.000 ± 0.024

Gráfica22: Crecimiento acumulado de biogás trabajando con una relación de 80% de mezcla de estiércol y agua (50% m/m) y 20% de suero láctico, en las tres pruebas realizadas

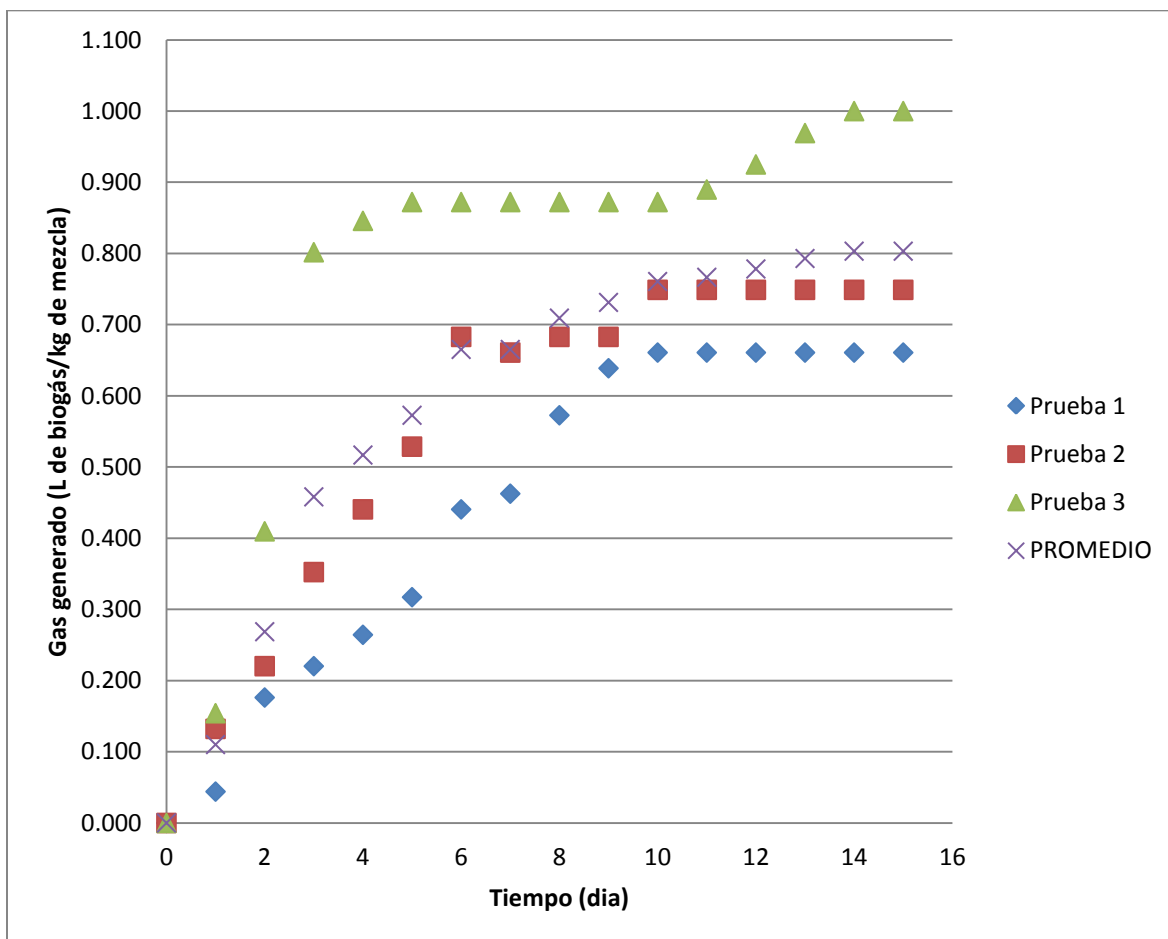


Tabla 85: Razón de biogás generado utilizando 75% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 25% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	75% mezcla / 25% suero (2.27kg)	75% mezcla / 25% suero (2.27kg)	75% mezcla / 25% suero (2.27kg)
Día	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)
0	0	0	0
1	0.022±0.022	0.044±0.022	0.022±0.022
2	0.044±0.022	0.088±0.022	0.088±0.022
3	0.132±0.022	0.154±0.022	0.176±0.022
4	0.264±0.022	0.264±0.022	0.352±0.022
5	0.352±0.022	0.352±0.022	0.529±0.023
6	0.529±0.023	0.485±0.022	0.661±0.023
7	0.793±0.023	0.661±0.023	0.749±0.023
8	0.828±0.023	0.749±0.023	0.837±0.023
9	0.872±0.023	0.793±0.023	0.881±0.023
10	0.925±0.023	0.925±0.023	1.013±0.024
11	1.101±0.023	0.925±0.023	1.101±0.024
12	1.137±0.024	1.057±0.024	1.101±0.024
13	1.137±0.024	1.057±0.024	1.101±0.024
14	1.137±0.024	1.057±0.024	1.101±0.024
15	1.137±0.024	1.057±0.024	1.101±0.024

Gráfica 23: Crecimiento acumulado de biogás trabajando con una relación de 75% de mezcla de estiércol y agua (50% m/m) y 25% de suero láctico, en las tres pruebas realizadas

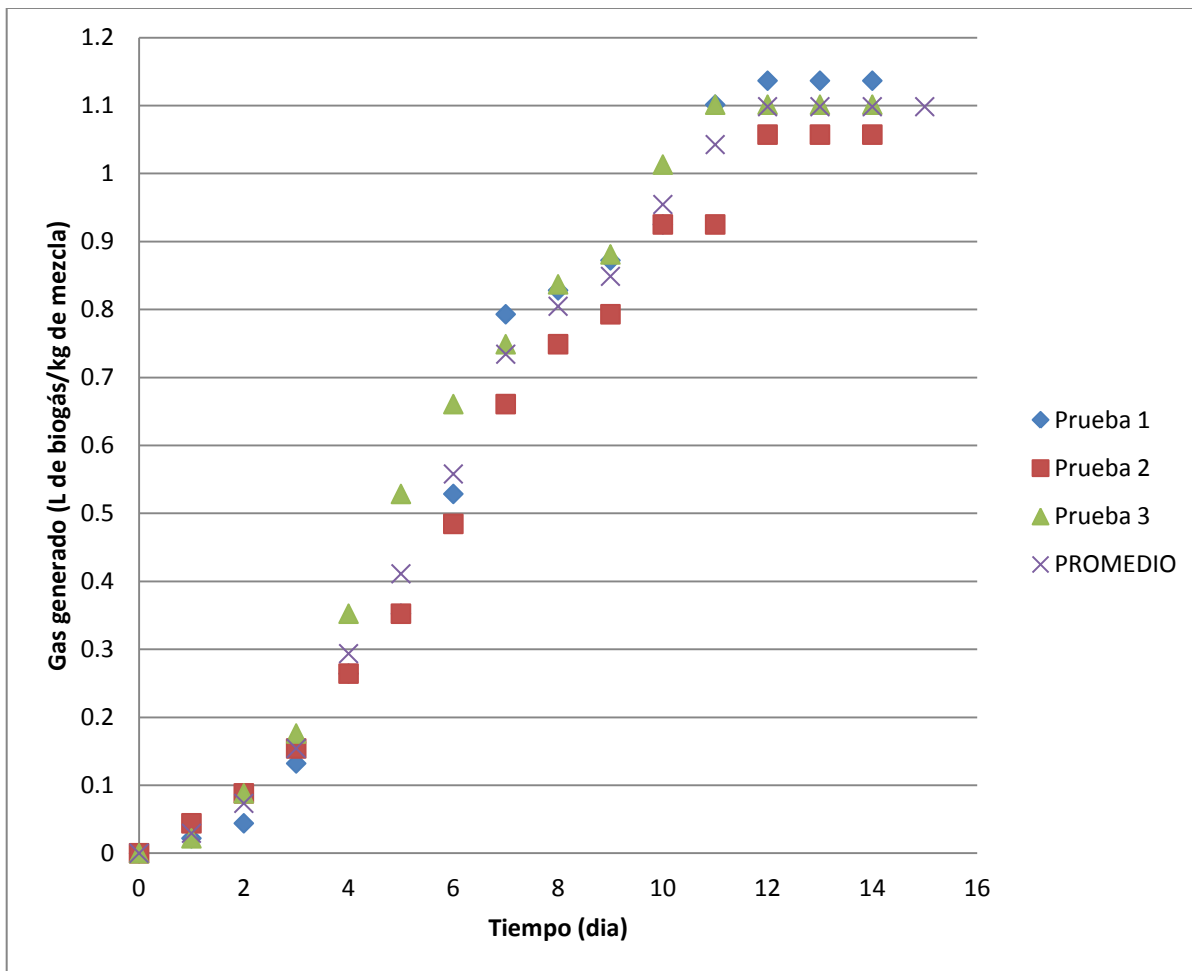


Tabla 86: Razón de biogás generado utilizando 66% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 34% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.

	Prueba 1 66% mezcla / 34% suero (0.68kg suero, 1.36kg mezcla)	Prueba 2 66% mezcla- 34% suero (0.76kg suero, 1.52kg mezcla)	Prueba 3 66% mezcla- 34% suero (0.76kg suero, 1.52kg mezcla)
Día	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)
0	0	0	0
1	0.049±0.025	0.167±0.022	0.132±0.022
2	0.098±0.025	0.180±0.022	0.439±0.022
3	0.294±0.025	0.417±0.022	0.658±0.023
4	0.539±0.025	0.658±0.023	0.789±0.023
5	0.588±0.025	0.746±0.023	0.877±0.023
6	0.686±0.025	0.833±0.023	0.877±0.023
7	0.833±0.026	0.877±0.023	1.009±0.024
8	0.833±0.026	0.943±0.023	1.096±0.024
9	0.833±0.026	0.943±0.023	1.184±0.024
10	0.850±0.026	0.943±0.023	1.360±0.025
11	0.853±0.026	0.943±0.023	1.360±0.025
12	0.858±0.026	0.965±0.024	1.404±0.025
13	0.868±0.026	0.965±0.024	1.579±0.026
14	0.882±0.026	0.965±0.024	1.579±0.026
15	0.907±0.026	1.096±0.024	1.579±0.026
16	0.907±0.026	1.206±0.024	1.579±0.026
17	0.956±0.026	1.206±0.024	1.579±0.026

Gráfica 24 Crecimiento acumulado de biogás trabajando con una relación de 66% de mezcla de estiércol y agua (50% m/m) y 34% de suero láctico, en las tres pruebas realizadas

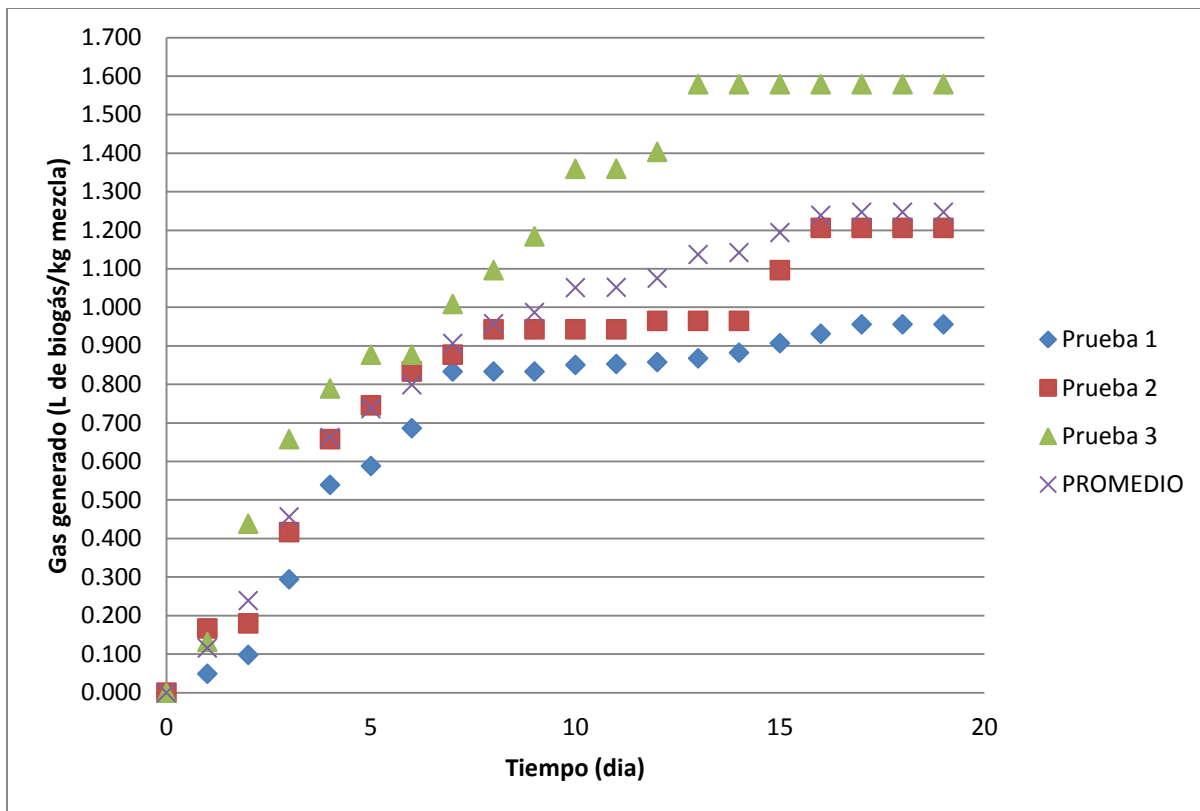


Tabla 87: Razón de biogás generado utilizando 50% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 50% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.

	Prueba 1 50% mezcla / 50% suero (1.14kg suero, 1.14kg mezcla)	Prueba 2 50% mezcla / 50% suero (0.90kg suero, 0.90 kg mezcla)	Prueba 3 50% mezcla / 50% suero (1.14kg suero, 1.14kg mezcla)
Día	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)
0	0	0	0
1	0.088±0.022	0	0.088±0.022
2	0.154±0.022	0.111±0.028	0.132±0.022
3	0.219±0.022	0.167±0.028	0.154±0.022
4	0.219±0.022	0.250±0.028	0.219±0.022
5	0.219±0.022	0.250±0.028	0.219±0.022
6	0.241±0.022	0.278±0.028	0.263±0.022
7	0.263±0.022	0.278±0.028	0.263±0.022
8	0.263±0.022	0.278±0.028	0.263±0.022
9	0.263±0.022	0.278±0.028	0.263±0.022
10	0.263±0.022	0.306±0.028	0.307±0.022
11	0.263±0.022	0.306±0.028	0.307±0.022
12	0.263±0.022	0.306±0.028	0.307±0.022
13	0.263±0.022	0.306±0.028	0.307±0.022
14	0.263±0.022	0.306±0.028	0.307±0.022
15	0.263±0.022	0.306±0.028	0.307±0.022
16	0.263±0.022	0.306±0.028	0.307±0.022

Gráfica 25: Crecimiento acumulado de biogás trabajando con una relación de 50% de mezcla de estiércol y agua (50% m/m) y 50% de suero láctico, en las tres pruebas realizadas

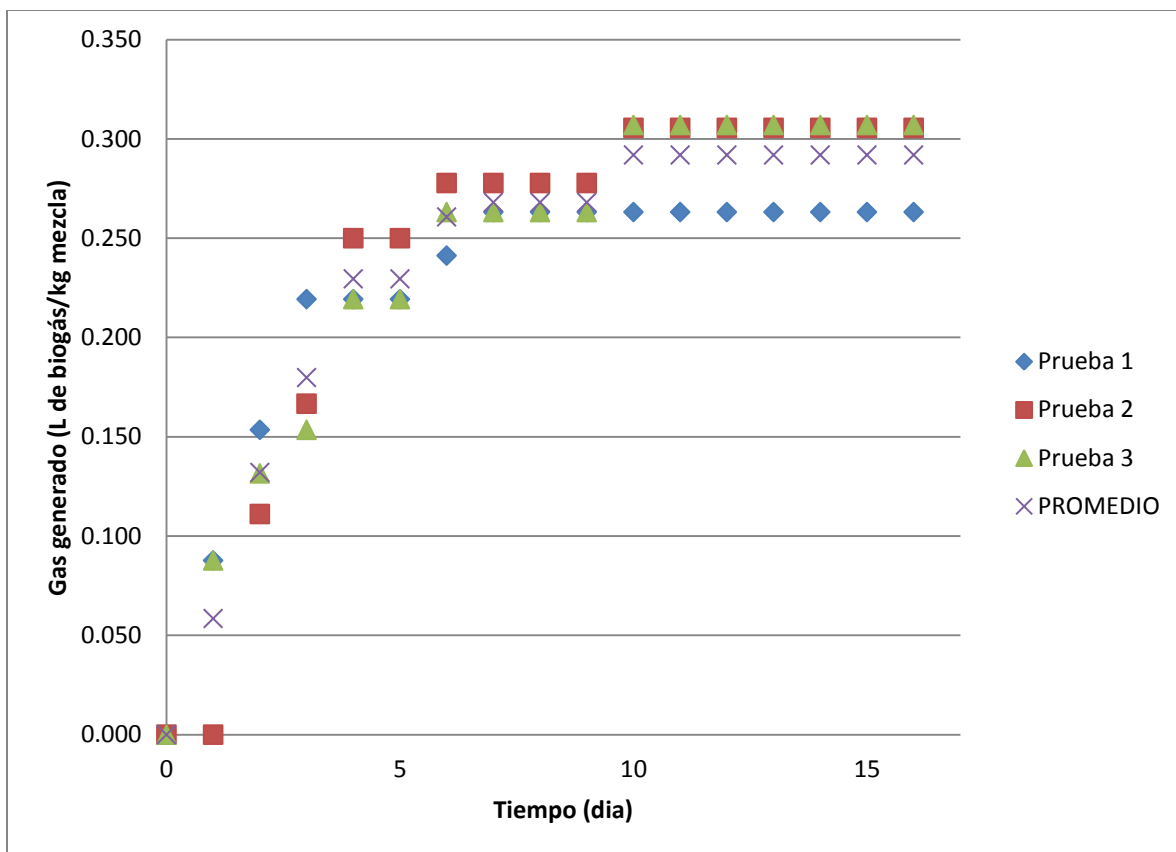


Tabla 88: Razón de biogás generado utilizando 34% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 66% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	34% mezcla / 66% suero (1.5kg suero, 0.75kg mezcla)	34% mezcla / 66% suero (1.5kg suero, 0.75kg mezcla)	34% mezcla / 66% suero (1.5kg suero, 0.75kg mezcla)
Día	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)
0	0	0	0
1	0.089±0.022	0.089±0.022	0.044±0.022
2	0.111±0.022	0.1556±0.022	0.111±0.022
3	0.156±0.022	0.178±0.022	0.133±0.022
4	0.160±0.022	0.178±0.022	0.133±0.022
5	0.160±0.022	0.178±0.022	0.133±0.022
6	0.178±0.022	0.200±0.022	0.156±0.022
7	0.178±0.022	0.200±0.022	0.156±0.022
8	0.178±0.022	0.200±0.022	0.178±0.022
9	0.178±0.022	0.200±0.022	0.178±0.022
10	0.178±0.022	0.200±0.022	0.178±0.022
11	0.178±0.022	0.200±0.022	0.200±0.022
12	0.178±0.022	0.200±0.022	0.200±0.022
13	0.178±0.022	0.200±0.022	0.200±0.022
14	0.178±0.022	0.200±0.022	0.200±0.022
15	0.178±0.022	0.200±0.022	0.200±0.022
16	0.178±0.022	0.200±0.022	0.200±0.022

Gráfica 26: Crecimiento acumulado de biogás trabajando con una relación de 34% de mezcla de estiércol y agua (50% m/m) y 66% de suero láctico, en las tres pruebas realizadas

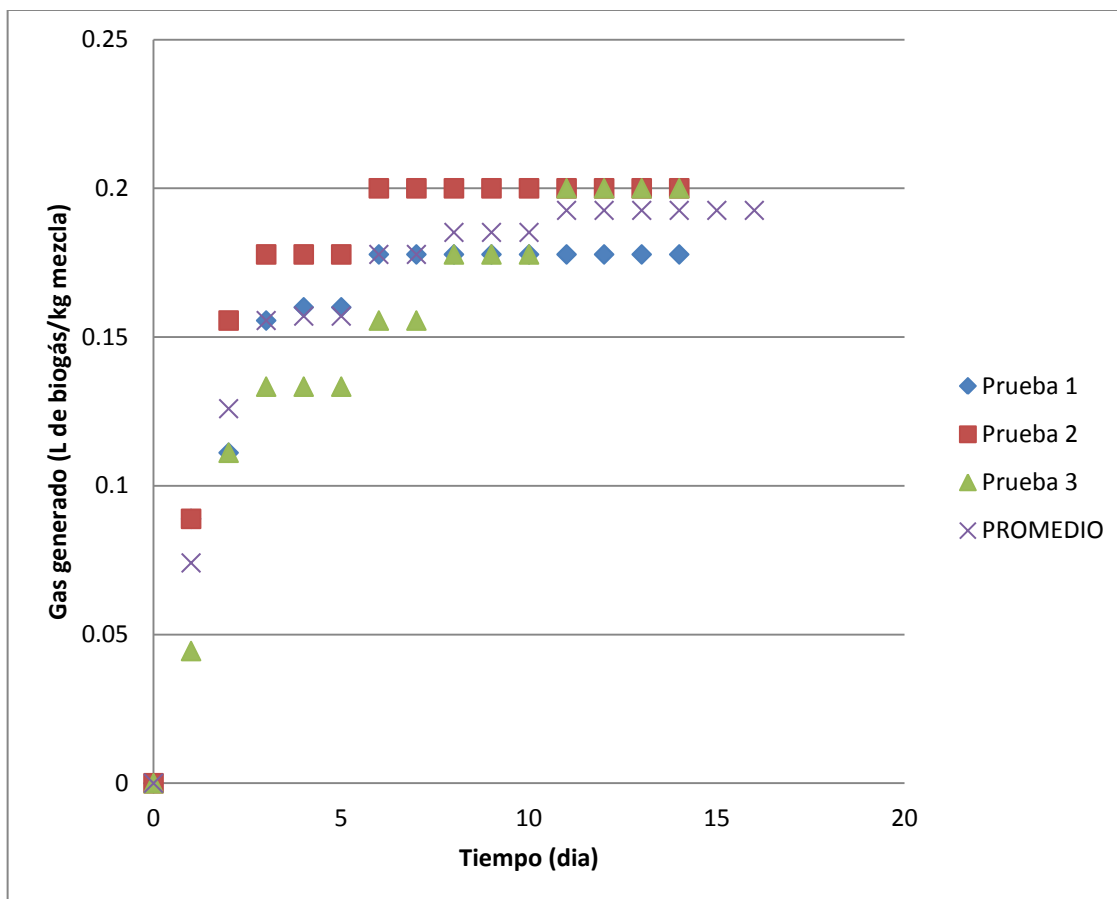


Tabla 89: Razón de biogás generado utilizando 100% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas.

Día	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	100% suero (1.36kg)	100% suero (2.5kg)	100% suero (1.36kg)
	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)	Gas generado (L/kg)
0	0	0	0
1	0	0.020±0.020	0
2	0.018±0.037	0.020±0.020	0
3	0.018±0.037	0.020±0.020	0.018±0.037
4	0.018±0.037	0.020±0.020	0.037±0.037
5	0.037±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037
6	0.037±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037
7	0.037±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037
8	0.037±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037
9	0.074±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037
10	0.074±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037
11	0.074±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037
12	0.074±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037
13	0.074±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037
14	0.074±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037
15	0.074±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037
16	0.074±0.037	0.040±0.020	0.037±0.037

Gráfica27: Crecimiento acumulado de biogás trabajando con 100% de suero láctico en el biodigestor, en las tres pruebas realizadas

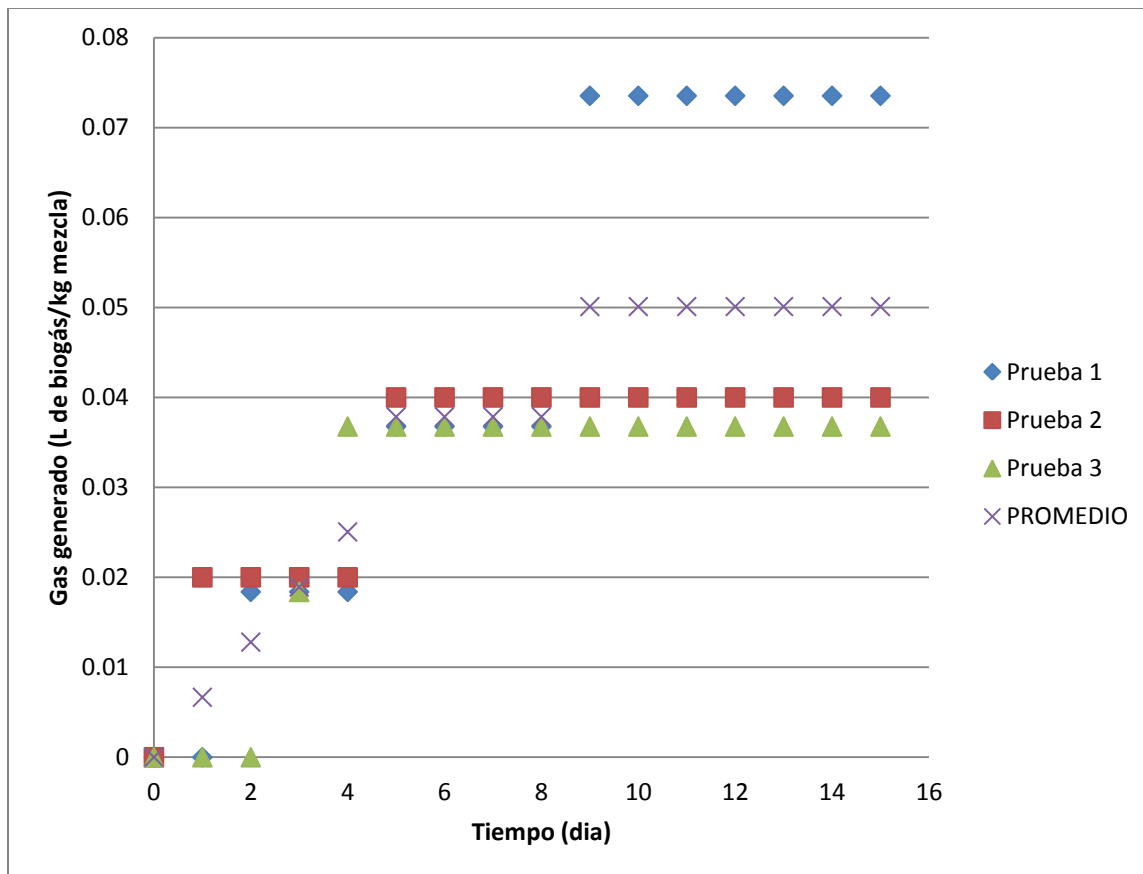


Tabla 90: Razón de biogás generado utilizando una alimentación intermitente de suero láctico, a un biodigestor con 200.00±0.01g de mezcla agua-estiércol (50% m/m)

Día	Alimentación de Suero láctico (±0.01g)	Masa total (kg)	Porcentaje de suero en el biodigestor (m/m)	Volumen de biogás generado diariamente (mL)	Volumen total de biogás generado (L)	Razón de biogás (L/kg)
0	10.00	0.21±1.73x10 ⁻⁵	4.76±4.78x10 ⁻⁵	0	0	0
3	10.00	0.22±2.00x10 ⁻⁵	9.09±6.48x10 ⁻⁵	70.00±0.50	0.070±0.500	0.318±0.002
4	-	0.22±2.00x10 ⁻⁵	9.09±6.48x10 ⁻⁵	123.00±0.50	0.193±0.707	0.877±0.003
5	10.00	0.23±2.24x10 ⁻⁵	13.04±7.64x10 ⁻⁵	9.00±0.50	0.202±0.866	0.878±0.003
6	-	0.23±2.24x10 ⁻⁵	13.04±7.64x10 ⁻⁵	130.00±0.50	0.332±1.000	1.443±0.004
7	10.00	0.24±2.45x10 ⁻⁵	16.67±8.51x10 ⁻⁵	70.00±0.50	0.402±1.118	1.675±0.005
10	10.00	0.25±2.65x10 ⁻⁵	20.00±9.19x10 ⁻⁵	137.00±0.50	0.539±1.225	2.156±0.005
11	-	0.25±2.65x10 ⁻⁵	20.00±9.19x10 ⁻⁵	0	0.539±1.225	2.156±0.005
12	10.00	0.26±2.83x10 ⁻⁵	23.08±9.75x10 ⁻⁵	130.00±0.50	0.669±1.323	2.573±0.005
13	-	0.26±2.83x10 ⁻⁵	23.08±9.75x10 ⁻⁵	130.00±0.50	0.799±1.414	3.073±0.005
14	10.00	0.27±3.00x10 ⁻⁵	25.93±1.02x10 ⁻⁴	101.00±0.50	0.900±1.500	3.333±0.006
17	10.00	0.28±3.16x10 ⁻⁵	28.57±1.06x10 ⁻⁴	140.00±0.50	1.040±0.002	3.714±0.006
18	-	0.28±3.16x10 ⁻⁵	28.57±1.06x10 ⁻⁴	73.00±0.50	1.113±0.002	3.975±0.006

Ilustración 28 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con una proporción de 66% (m/m) de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 34% (m/m) de suero láctico, en un biodigestor batch.

Data File C:\HPCHEM\1\DATA\BIOGAS\13092402.D

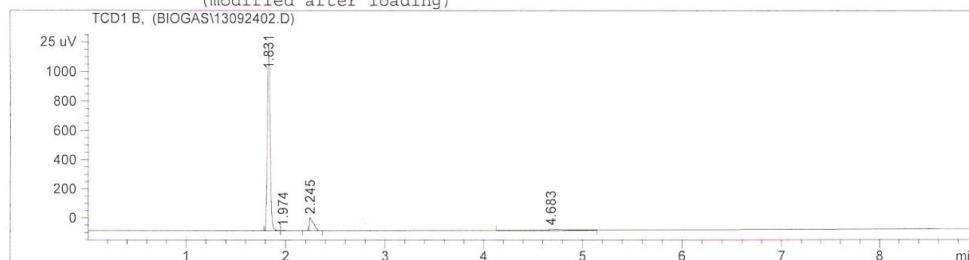
Sample Name: Mu 66-33-2

Megaproyecto Biogas

```

=====
Injection Date : 9/25/2013 10:35:53 AM
Sample Name    : Mu 66-33-2                Location   : -
Acq. Operator  : AdeM                      Inj        : 1
Acq. Instrument : Instrument 1              Inj Volume : Manually
Acq. Method    : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 9/25/2013 10:03:12 AM by AdeM
                  (modified after loading)
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 9/25/2013 11:00:32 AM by AdeM
                  (modified after loading)
=====

```



=====
Area Percent Report
=====

```

Sorted By      : Signal
Multiplier     : 1.0000
Dilution       : 1.0000
Sample Amount  : 250.00000 [ng/ul] (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

```

Signal 1: TCD1 B,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [25 uV*s]	Height [25 uV]	Area %
1	1.831	PV	0.0307	2488.23462	1280.66870	83.16618
2	1.974	VB	0.0422	9.72336	3.22085	0.32499
3	2.245	PV	0.0494	255.65303	86.80867	8.54489
4	4.683	VV	0.2778	238.27184	10.30427	7.96394

Totals : 2991.88285 1381.00249

Results obtained with enhanced integrator!

=====
*** End of Report ***

Ilustración 29 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con una proporción de 50% (m/m) de mezcla de agua y estiércol (50% m/m) y 50% (m/m) de suero láctico, en un biodigestor batch.

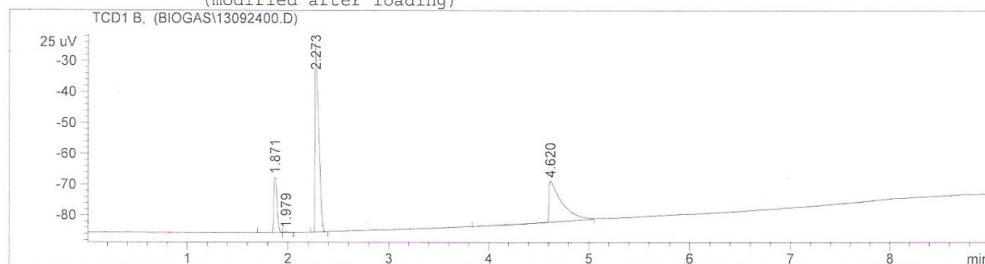
Data File C:\HPCHEM\1\DATA\BIOGAS\13092400.D

Sample Name: Mu 50-50

Megaproyecto Biogas

```

=====
Injection Date : 9/25/2013 10:09:12 AM
Sample Name : Mu 50-50
Acq. Operator : AdeM
Acq. Instrument : Instrument 1
Acq. Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed : 9/25/2013 10:03:12 AM by AdeM
                (modified after loading)
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed : 9/25/2013 11:01:41 AM by AdeM
                (modified after loading)
Location : -
Inj : 1
Inj Volume : Manually
  
```



Area Percent Report

```

=====
Sorted By : Signal
Multiplier : 1.0000
Dilution : 1.0000
Sample Amount : 500.00000 [ng/ul] (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
  
```

Signal 1: TCD1 B,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [25 uV*s]	Height [25 uV]	Area %
1	1.871	PV	0.0377	40.53329	17.73171	12.88289
2	1.979	VP	0.0377	5.77998e-1	2.43879e-1	0.18371
3	2.273	VV	0.0450	159.71750	60.18483	50.76378
4	4.620	VV	0.1121	113.80008	13.12914	36.16962

Totals : 314.62887 91.28956

Results obtained with enhanced integrator!

*** End of Report ***

Ilustración 30 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con $9.09 \pm 6.47 \times 10^{-5}$ % de suero en un biodigestor alimentado de forma intermitente

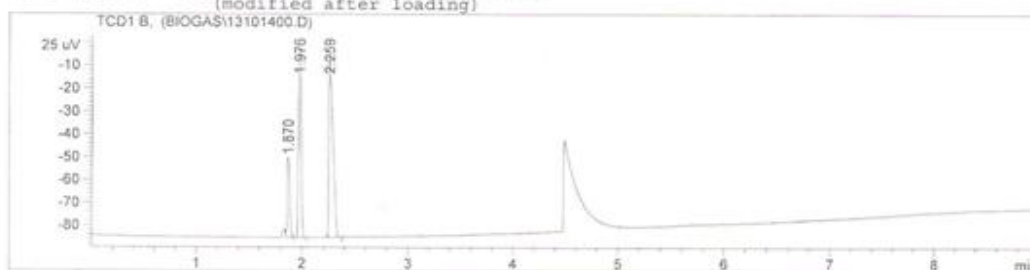
Data File C:\HPCHEM\1\DATA\BIOGAS\13101400.D

Sample Name: Mu 1

```

=====
Injection Date : 10/14/2013 10:44:10 AM
Sample Name    : Mu 1
Acq. Operator  : AdeM
Acq. Instrument : Instrument 1
Acq. Method    : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 10/14/2013 9:51:25 AM by AdeM
                (modified after loading)
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 10/14/2013 10:56:55 AM by AdeM
                (modified after loading)
Location       : -
Inj            : 1
Inj Volume     : Manually
=====

```



Area Percent Report

```

=====
Sorted By      :      Signal
Multiplier     :      1.0000
Dilution       :      1.0000
Sample Amount  :      1.00000 [ng/ul] (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
=====

```

Signal 1: TCD1 B,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [25 uV*s]	Height [25 uV]	Area %
1	1.870	VP	0.0284	60.72007	34.70300	14.43897
2	1.976	VB	0.0298	148.34061	83.18478	35.27475
3	2.259	PB	0.0463	211.46843	78.80829	50.28628

Totals : 420.52911 196.69608

Results obtained with enhanced integrator!

*** End of Report ***

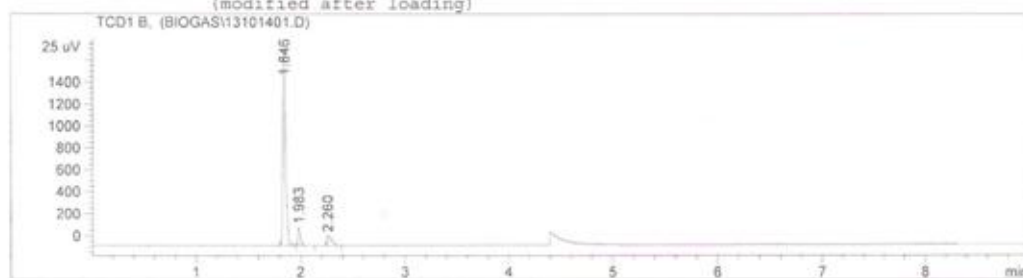
Ilustración 31 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con $13.04 \pm 7.61 \times 10^{-5}\%$ de suero en un biodigestor alimentado de forma intermitente

Data File C:\HPCHEM\1\DATA\BIOGAS\13101401.D

Sample Name: Mu 2

```

=====
Injection Date : 10/14/2013 10:58:50 AM
Sample Name    : Mu 2                      Location   : -
Acq. Operator  : Adem                      Inj        : 1
Acq. Instrument : Instrument 1              Inj Volume : Manually
Acq. Method    : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 10/14/2013 9:51:25 AM by Adem
                (modified after loading)
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 10/14/2013 10:56:55 AM by Adem
                (modified after loading)
  
```



Area Percent Report

```

=====
Sorted By      : Signal
Multiplier     : 1.0000
Dilution       : 1.0000
Sample Amount  : 1.00000 [ng/ul] (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
  
```

Signal 1: TCD1 B.

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [25 uV*s]	Height [25 uV]	Area %
1	1.846	BV	0.0273	3277.64844	1793.22607	86.83161
2	1.983	VB	0.0206	226.87759	158.97919	6.01045
3	2.260	PB	0.0427	270.19208	85.84671	7.15794

Totals : 3774.71811 2038.05197

Results obtained with enhanced integrator:

*** End of Report ***

Ilustración 32 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con $20.00 \pm 9.16 \times 10^{-5}\%$ de suero en un biodigestor alimentado de forma intermitente

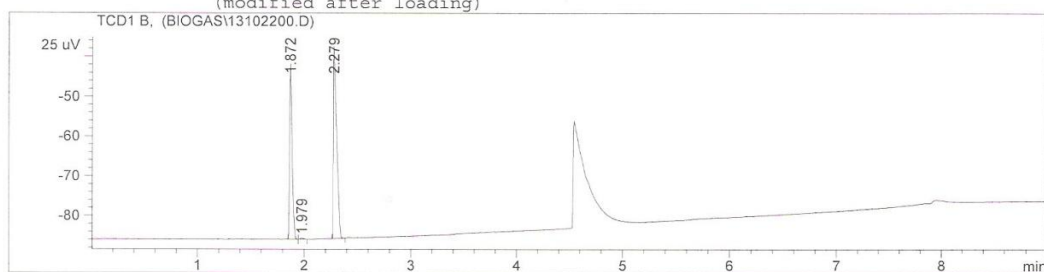
Data File C:\HPCHEM\1\DATA\BIOGAS\13102200.D

Sample Name: Mu 1

```

=====
Injection Date : 10/22/2013 11:05:24 AM
Sample Name    : Mu 1                      Location   : -
Acq. Operator  : AdeM                      Inj        : 1
Acq. Instrument : Instrument 1              Inj Volume : Manually
Acq. Method    : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 10/22/2013 11:04:42 AM by AdeM
                (modified after loading)
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 10/22/2013 11:17:46 AM by AdeM
                (modified after loading)
=====

```



Area Percent Report

```

=====
Sorted By      :      Signal
Multiplier     :      1.0000
Dilution       :      1.0000
Sample Amount  :      500.00000 [ng/ul] (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
=====

```

Signal 1: TCD1 B,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [25 uV*s]	Height [25 uV]	Area %
1	1.872	BP	0.0237	70.39188	43.99279	40.17133
2	1.979	BB	0.0274	5.18912e-1	2.96751e-1	0.29613
3	2.279	PB	0.0322	104.31834	48.36129	59.53253

Totals : 175.22914 92.65084

Results obtained with enhanced integrator!

*** End of Report ***

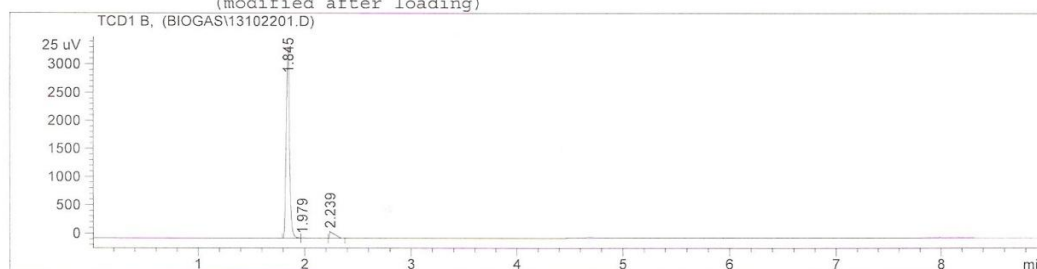
Ilustración 33 Cromatograma del biogás obtenido al trabajar con $25.93 \pm 9.42 \times 10^{-5}\%$ de suero en un biodigestor alimentado de forma intermitente

Data File C:\HPCHEM\1\DATA\BIOGAS\13102201.D

Sample Name: Mu 2

```

=====
Injection Date : 10/22/2013 11:18:54 AM
Sample Name    : Mu 2
Acq. Operator  : AdeM
Acq. Instrument : Instrument 1
Acq. Method    : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 10/22/2013 11:04:42 AM by AdeM
                (modified after loading)
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed   : 10/22/2013 11:17:46 AM by AdeM
                (modified after loading)
=====
  
```



Area Percent Report

```

=====
Sorted By      : Signal
Multiplier     : 1.0000
Dilution       : 1.0000
Sample Amount  : 500.00000 [ng/ul] (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
=====
  
```

Signal 1: TCD1 B,

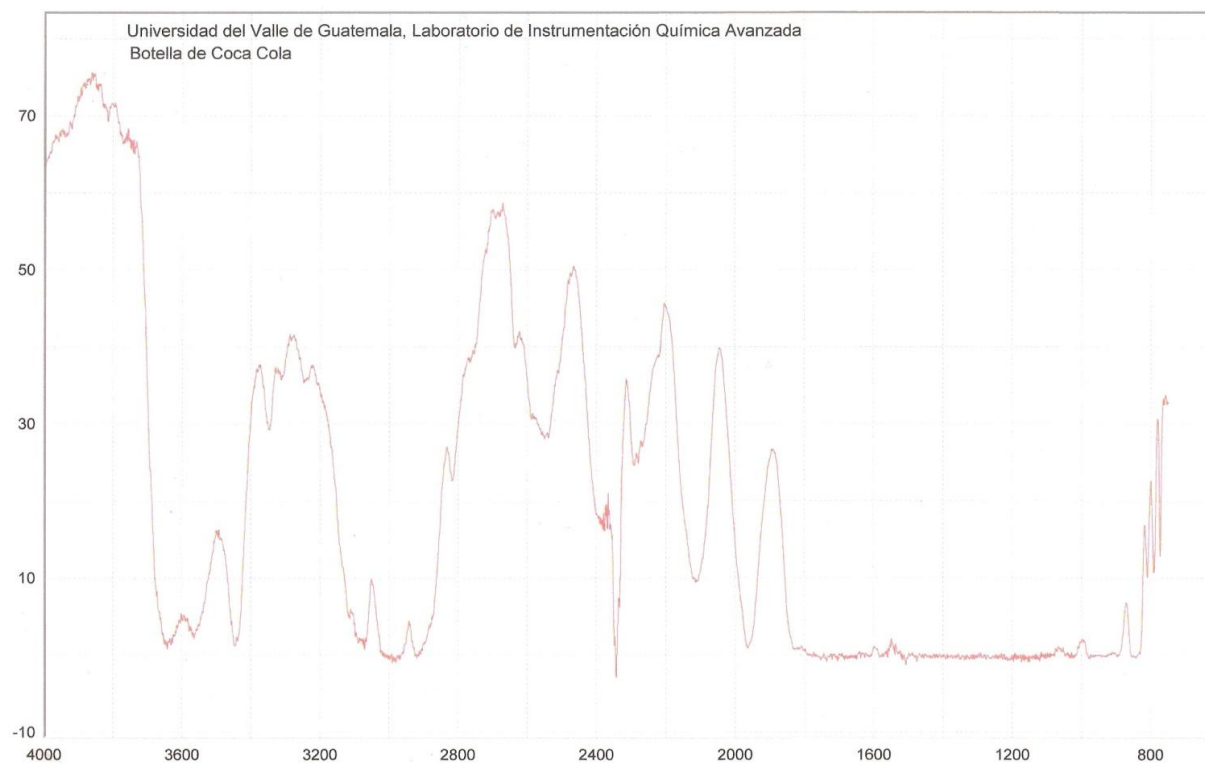
Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [25 uV*s]	Height [25 uV]	Area %
1	1.845	BV	0.0331	7291.22705	3391.01050	94.37610
2	1.979	VV	0.0521	29.34869	7.59681	0.37988
3	2.239	VV	0.0494	405.13766	108.91834	5.24402

Totals : 7725.71340 3507.52565

Results obtained with enhanced integrator!

*** End of Report ***

Ilustración 34 Espectro IR de las botellas de Coca Cola utilizadas para captación del biogás.



Transmission / Wavenumber (cm-1)

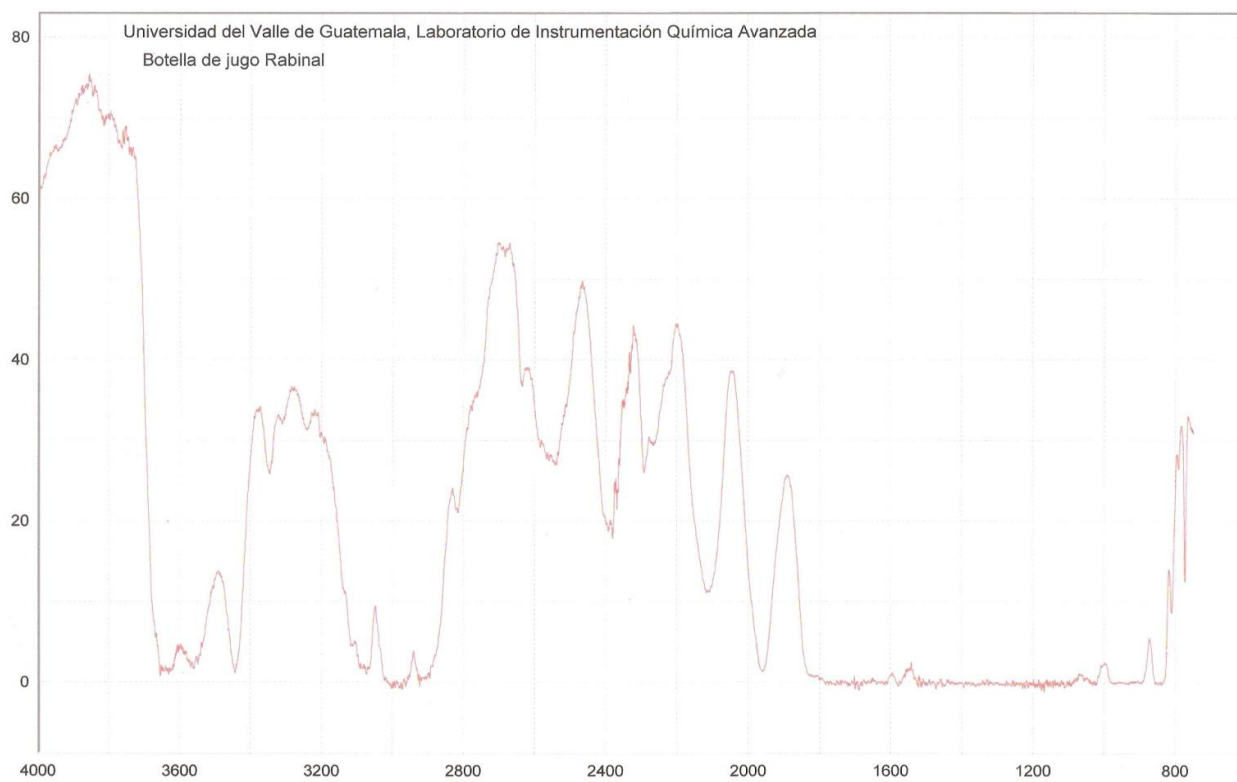
Paged X-Zoom CURSOR

File # 2 = ESPECTRO BOTELLA DE COCA COLA

26/09/2013 12:26 Res=None

botella de coca cola

Ilustración 35 Espectro IR de las botellas de jugo Rabinal utilizadas para captación del biogás.



Transmission / Wavenumber (cm-1)

File # 1 = ESPECTRO BOTELLA DE JUGO RABINAL

botella de jugo Rabinal

Paged X-Zoom CURSOR

26/09/2013 12:31 Res=None

2. Cálculos de muestra:

- a. Cálculo de la razón de biogás producido por kilogramo de biomasa alimentada: En base al biogás total acumulado cada día y la masa total alimentada al biodigestor del laboratorio se determinó la razón de biogás generado por unidad de masa.

$$\text{Razón de biogás generado} \left(\frac{L}{kg} \right) = \frac{\text{Volumen}(L)}{\text{Masa}(kg)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Ejemplo del cálculo: Se ejemplifica el cálculo de la razón de biogás generado por unidad de masa utilizando los datos obtenidos en el día 20 la primera prueba realizada al trabajar con 34% de suero láctico y 66% de mezcla de agua y estiércol al 50% (m/m)

$$\text{Razón de biogás generado} = \frac{1.950 \pm 0.05L}{2.04 \pm 0.02kg} = 0.956 \pm 0.026L/kg$$

- b. Cálculo de la masa total contenida en el biodigestor alimentado de forma intermitente: En base a la cantidad total de estiércol, agua y suero láctico agregado en la alimentación al biodigestor se determinó la masa total contenida.

$$\text{Masa Total} = \text{masa estiércol} + \text{masa agua} + \text{masa suero láctico} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Ejemplo del cálculo: Se ejemplifica el cálculo de la masa total utilizando los datos obtenidos al día cinco de operación del biodigestor.

$$\begin{aligned} \text{Masa Total} &= 100.00 \pm 0.01g \text{ estiércol} + 100.00 \pm 0.01g \text{ agua} + 30.00 \pm 0.017g \text{ suero} \\ \text{Masa Total} &= 230.00 \pm 0.02g \\ \text{Masa Total} &= 0.230 \pm 2.24 \times 10^{-5}kg \end{aligned}$$

- c. Cálculo del volumen total de biogás generado a la fecha: Dicho valor se calculó sumando el volumen de biogás generado en el día con el total de biogás acumulado hasta el día anterior.

$$\text{Volumen total de biogás} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (\text{Ecuación 3})$$

Ejemplo del cálculo: Se ejemplifica el cálculo del volumen total de biogás generado al quinto día de operación del biodigestor.

$$\text{Volumen total de biogás} = 70.0 \pm 0.5mL + 123.0 \pm 0.5mL + 9.0 \pm 0.5mL = 202.00 \pm 0.87mL$$

$$\text{Volumen total de biogás} = 0.202 \pm 0.001L$$

- d. Cálculo de la razón de biogás generado por unidad de masa, para el biodigestor alimentado de forma intermitente: Éste valor se calculó dividiendo el volumen total de biogás generado a la fecha entre la cantidad total de biomasa contenida dentro del biodigestor. Se trabaja con la misma ecuación utilizada para determinar la razón de producción de biogás en la operación batch.

$$\text{Razón de biogás generado} \left(\frac{L}{kg} \right) = \frac{\text{Volumen}(L)}{\text{Masa}(kg)} \text{ (Ecuación 1)}$$

Ejemplo del cálculo: Se ejemplifica el cálculo de la razón de biogás generado por unidad de masa utilizando los datos obtenidos el quinto día de operación del biodigestor.

$$\text{Razón de biogás generado} = \frac{0.202 \pm 0.001L}{0.230 \pm 2.24 \times 10^{-5}kg} = 0.878 \pm 0.004L/kg$$

- e. Cálculo del porcentaje de suero láctico en el biodigestor: a medida que aumentó el número de días de operación en el biodigestor intermitente, aumentó también la cantidad de suero láctico en él, por lo que el porcentaje cambió cada día que se realizó una alimentación.

$$\% \text{ Suerolácteo} = \frac{\text{Masadesueroenelbiodigestor}}{\text{Masatotalenelbiodigestor}} * 100\% \text{ (Ecuación 4)}$$

Ejemplo del cálculo: Se ejemplifica el cálculo del porcentaje de suero láctico en el biodigestor utilizando los datos obtenidos en el quinto día de operación del biodigestor.

$$\% \text{ Suerolácteo} = \frac{30.00 \pm 0.02g}{230.00 \pm 0.02g} = 13.04 \pm 7.64 \times 10^{-5}\%$$

3. Análisis de error

- a. Propagación de error en sumas y restas:

$$S_y = \sqrt{(S_A)^2 + (S_B)^2 + (S_C)^2} \text{ (Ecuación 5) (Skoog, 2001)}$$

Ejemplo del cálculo de la incertidumbre para el cálculo de la masa total contenida en el biodigestor alimentado de forma intermitente utilizando los datos obtenidos el quinto día de operación.

$$S_y = \sqrt{(0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2} = 0.02g$$

$$\text{Masa Total} = 230.00 \pm 0.02g$$

b. Propagación de error en multiplicaciones y divisiones:

$$S_y = y \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{S_c}{c}\right)^2} \text{ (Ecuación 6)(Skoog, 2001)}$$

Ejemplo del cálculo de la incertidumbre para la razón de biogás generado por unidad de masa, para el biodigestor alimentado de forma intermitente, utilizando los datos obtenidos en el quinto día de operación.

$$S_y = 0.878 \sqrt{\left(\frac{0.001}{0.202}\right)^2 + \left(\frac{2.24 \times 10^{-5}}{0.230}\right)^2} = \pm 0.004 L/kg$$

$$\text{Razón de biogás generado} = 0.878 \pm 0.004 L/kg$$

c. Media Aritmética: Este valor se determinó para reportar el valor promedio de los valores calculados para cada prueba individual.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \text{ (Ecuación 7)(Skoog, 2001)}$$

Ejemplo del cálculo de la media aritmética de la razón de biogás generado por unidad de masa utilizando los datos obtenidos en el quinto día de operación, trabajando con la proporción de 34% de suero láctico y 66% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m). Como incertidumbre se utiliza el valor de la desviación estándar.

$$\bar{x} = \frac{(0.588 \pm 0.025)L/kg + (0.746 \pm 0.023)L/kg + (0.877 \pm 0.023)L/kg}{3} = 0.737 \pm 0.145 L/kg$$

d. Desviación Estándar: Éste valor se determinó para reportarlo como incertidumbre de los promedios calculados, ya que indica qué tan dispersos se encuentran los valores utilizados para calcular dicho promedio.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \text{ (Ecuación 8)(Skoog, 2001)}$$

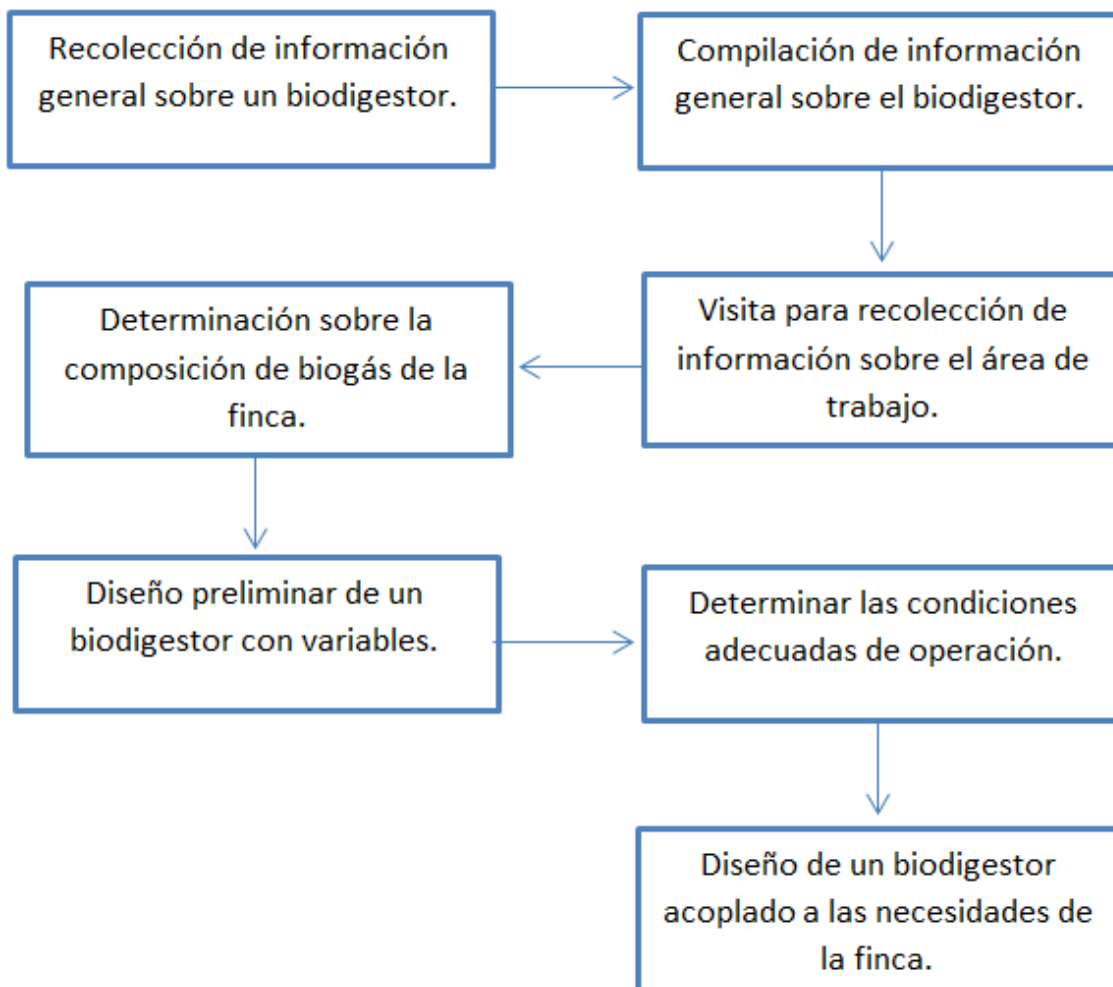
Ejemplo del cálculo de la desviación estándar de la razón de biogás generado por unidad de masa utilizando los datos obtenidos en el quinto día de operación, trabajando con la proporción de 34% de suero láctico y 66% de mezcla de agua y estiércol (50% m/m)

$$S = \sqrt{\frac{(0.588 - 0.737)^2 + (0.746 - 0.737)^2 + (0.877 - 0.737)^2}{2}} = 0.145 L/kg$$

$$\text{Razón de biogás generado} = 0.737 \pm 0.145 L/kg$$

C. Módulo de condiciones de operación

1. Diagrama de bloques utilizado para realización del estudio:



2. Datos originales:

Tabla 91: Datos obtenidos para las relaciones 1:1; 2:1 y 4:1 a 35.00±0.001°C.

Días	Volumen de biogás producido (±10.00mL) a 35.00°C		
	Relación 1:1	Relación 2:1	Relación 4:1
1	0.00	0.00	0.00
2	50.00	0.00	0.00
3	75.00	0.00	0.00
4	100.00	0.00	50.00
5	150.00	0.00	50.00
7	1500.00	50.00	100.00
8	1550.00	100.00	100.00
9	1550.00	100.00	150.00
10	1575.00	150.00	150.00
11	1575.00	250.00	200.00
14	1600.00	250.00	200.00
15	1800.00	250.00	250.00
16	2000.00	250.00	250.00
17	2100.00	250.00	250.00
18	2150.00	250.00	250.00
20	2200.00	270.00	275.00
22	2500.00	300.00	275.00
23	2700.00	350.00	300.00
24	3000.00	700.00	300.00
25	3000.00	1100.00	350.00
26	3700.00	1200.00	350.00
28	3800.00	1250.00	350.00
29	3900.00	1300.00	400.00
30	4000.00	1700.00	400.00
32	4000.00	2400.00	400.00
33	4000.00	2500.00	400.00
34	4000.00	3300.00	400.00

Tabla 92: Datos obtenidos a $35.00 \pm 0.01^\circ\text{C}$ y temperatura ambiente con relación 1:1.

Días	Volumen de biogás producido ($\pm 10.00\text{mL}$) $35.00 \pm 0.01^\circ\text{C}$	Volumen de biogás producido ($\pm 10.00\text{mL}$) Temperatura ambiente
1	0.00	0.00
2	50.00	0.00
3	50.00	0.00
4	100.00	0.00
5	150.00	0.00
8	250.00	50.00
9	250.00	50.00
10	250.00	50.00
11	300.00	50.00
12	350.00	75.00
15	400.00	100.00
16	450.00	175.00
17	450.00	250.00
18	1500.00	270.00
19	1550.00	300.00
22	1550.00	450.00
23	2000.00	500.00
24	2300.00	500.00
25	2500.00	500.00
30	3000.00	500.00
31	3000.00	500.00
32	3300.00	500.00
34	3500.00	500.00

Tabla 93: Datos obtenidos de una relación 4:1 a distintas temperaturas.

Días	Volumen de biogás producido (± 10.00 mL) 35.00 \pm 0.01°C	Volumen de biogás producido (± 10.00 mL) Temperatura ambiente
1	0.00	0.00
2	0.00	0.00
3	0.00	50.00
4	0.00	50.00
5	50.00	100.00
8	100.00	100.00
9	100.00	100.00
10	175.00	150.00
11	200.00	200.00
12	200.00	200.00
15	225.00	225.00
16	250.00	250.00
17	250.00	250.00
18	250.00	300.00
19	275.00	325.00
22	275.00	350.00
23	300.00	350.00
24	300.00	350.00
25	300.00	400.00
26	300.00	400.00
28	350.00	450.00
29	350.00	500.00
30	400.00	500.00

3. Cálculos de muestra:

- a. Balance de masa: Balance de masa realizado en una corrida del biodigestor, utilizando una relación 1:1 en masa de excremento agua.

$$F_{Excremento} + F_{Agua} = Total\ de\ masa\ entrante$$

$$1.10 \pm 0.02\text{kg Excremento} + 1.10 \pm 0.02\text{kg Agua} = 2.20 \pm 0.03\text{kg de mezcla en la entrada}$$

Se utilizó como ejemplo una corrida 1:1 para calcular la masa de biogás obtenida. Debido a una falta de caracterización de biogás se utilizará una densidad teórica de biogás, obtenida de "Riesgos y seguridad en el manejo del biogás en una planta de tratamiento de aguas servidas" por Jean-FrancoisBradfer 2002.

$$\rho_{relativa} = 0.8 - 1.2$$

Se obtuvo una producción de biogás de 3300±10mL. Se utilizó la densidad de agua de 997.13kg/m³a 25°C.

$$997.13\text{ kg/m}^3 * \left(\frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}}\right) * \left(\frac{1\text{L}}{1000\text{mL}}\right) = 0.00099713\text{ kg/mL}$$

$$999.13 * 10^{-6}\text{ kg/mL} * (0.8 - 1.2) = (7.977 * 10^{-4} - 1.19656 * 10^{-3})\text{ kg/mL}$$

$$7.977 * 10^{-4}\text{ kg/mL} * (40000 \pm 10\text{mL}) = 3.19 \pm 0.01\text{kg}$$

$$1.196 * 10^{-3}\text{ kg/mL} * (40000 \pm 10\text{mL}) = 4.78 \pm 0.15\text{kg}$$

Se tiene una salida promedio de 3.98± 1.1kg de masa de biogás.

No se puede establecer la salida de excremento o agua por separado, por lo que la salida de mezcla es de 2.00 ± 0.03kg este dato fue obtenido por peso.

$$Entradas + Producción = Salidas + Acumulación$$

$$2.20 \pm 0.03\text{kg} + 3.98 \pm 0.93\text{kg} = (2.00 \pm 0.03\text{ kg} + 3.98 \pm 0.93\text{kg})$$

$$6.18 \pm 0.39\text{ kg} \approx 5.98 \pm 0.39\text{ kg}$$

Se realizó el mismo balance para todas las corridas, relaciones y temperaturas.

- b. Se calculó la producción de biogás por masa de excremento utilizado, esto para tener un factor de producción. Es te factor no representa la velocidad de la reacción, es un indicador de lo que se puede llegar a obtener en 30 días a una temperatura de 35°C.

Producción de biogás en 30 días a 35°C = 4000 ± 10mL de biogás

$$4000 \pm 10mL * \frac{1L}{1000mL}$$

$$= 4.00 \pm 0.01 L \text{ de biogás producido}$$

Se utilizó 1.10 ± 0.02 Kg de excremento en esta relación de 1:1

$$\frac{4.00 \pm 0.01 L}{1.10 \pm 0.02 kg} = 3.63 \pm 0.11 L/kg \text{ de excremento}$$

Se realizó el mismo cálculo para todas las corridas y se encontró este indicador para comparar los resultados obtenidos.

4. Datos calculados

Tabla 94: Datos calculados para la relación (1:1) excremento/agua

kg Estiércol entrada		
1.1	±	0.02 kg
kg de agua entrada		
1.1	±	0.02 kg
Total de materia en reactor		
2.2	±	0.03 kg
Temperatura del agua para calentar los reactores		
40	±	0.01 °C
Relación biogás/excremento		
3636.36	±	403.76 mL/kg
3.64	±	0.11 L/kg

Tabla 95: Datos calculados para una relación 1:1 excremento/agua a 20°C.

kg Estiércol entrada		
1.1	±	0.02 kg
kg de agua entrada		
1.1	±	0.02 kg
Total de materia en reactor		
2.2	±	0.03 kg
Temperatura		
20	±	0.01 °C
Relación biogás/excremento		
454.55	±	55.00 mL/kg
0.45	±	0.12 L/kg

Tabla 96: Datos calculados para una relación (1:1) excremento/agua a 35°C.

kg Estiércol entrada		
1.1	±	0.02 kg
kg de agua entrada		
1.1	±	0.02 kg
Total de materia en reactor		
2.2	±	0.03 kg
Temperatura		
35	±	0.01 °C
Relación biogás/excremento		
3181.82	±	55.00 mL/kg
3.18	±	0.02 L/kg

Tabla 97: Datos calculados para una relación (2:1) excremento/agua, para una producción de 16 días.

kg Estiércol		
0.7	±	0.02 Kg
kg de agua		
1.5	±	0.02 Kg
Total de materia		
2.2	±	0.03 Kg
Temperatura		
35	±	0.01 °C
Relación Biogás / Excremento		
357.14	±	35.00 mL/kg
0.36	±	0.10 L/kg

Tabla 98: Datos calculados para una relación (2:1) excremento/agua para una producción de 30 días.

kg Estiércol entrada		
0.7	±	0.02 kg
kg de agua entrada		
1.5	±	0.02 kg
Total de materia en reactor		
2.2	±	0.03 kg
Temperatura		
35	±	0.01 °C
Relación Biogás / Excremento		
4714.29	±	252.44 mL/kg
4.71	±	0.25 L/kg

Tabla 99: Datos calculados para una relación (4:1) excremento/agua para una producción de 30 días.

kg Estiércol entrada	
0.5 ±	0.02 kg
kg de agua entrada	
2.2 ±	0.02 kg
Total de materia en reactor	
2.7 ±	0.03 kg
Temperatura	
20 ±	0.01 °C
Relación de biogás / excremento	
800 ±	37.7 mL/kg
0.8 ±	0.05 L/kg

Tabla 100: Datos calculados para una relación (4:1) excremento/agua en una producción de 30 días.

kg Estiércol	
0.5 ±	0.02 kg
kg de agua	
2.2 ±	0.02 kg
Total de materia	
2.7 ±	0.02 kg
Temperatura	
35 ±	0.01 °C
Relación de biogás / excremento	
800 ±	37.7 mL/kg
0.8 ±	0.05 L/kg

Tabla 101: Datos calculados para una relación de (4:1) excremento/agua en una producción de 30 días.

kg Estiércol entrada	
0.5 ±	0.02 kg
Kg de agua entrada	
2.2 ±	0.02 kg
Total de materia en reactor	
2.7 ±	0.03 kg
Temperatura	
35 ±	0.01 °C
Relación de biogás / excremento	
1000 ±	44.72 mL/kg
1 ±	0.04 L/kg

5. Análisis de error:

- a. Cálculo de incertidumbre para las diferencias de masa en los balances de masa para un reactor.

$$s_y = \sqrt{s_a^2 + s_b^2 + \dots + s_n^2} \quad (\text{Ecuación No.1})$$

$$\sqrt{(0.02)^2 + (0.02)^2} = 2.20 \pm 0.03\text{kg}$$

Se realizaron los mismos cálculos para todas las restas y cálculos en el balance de masa. Ejemplo utilizando una relación de 1:1 a temperaturas de $35.00 \pm 0.01^\circ\text{C}$.

- b. Se calculó el análisis de error para el cálculo de un índice de crecimiento para 30 días a $35.00 \pm 0.01^\circ\text{C}$.

$$\text{resultado} + \sqrt{\left(\frac{Sa}{a}\right)^2 + \left(\frac{Sb}{b}\right)^2} + \dots \quad (\text{Ecuación No.2})$$

Se utilizó la ecuación de incertidumbre de la multiplicación de la base y altura para el área de salida en la parrilla:

$$\sqrt{\left(\frac{10}{4000}\right)^2 + \left(\frac{0.02}{1.10}\right)^2} = 3636.36 \pm 403.76 \text{ mL/kg}$$

Se realizó el mismo cálculo de incertidumbre para los cálculos de muestra que corresponden a división y multiplicación que sirvió para encontrar el indicador de producción de 30 días a $35.00 \pm 0.01^\circ\text{C}$

- c. Valores promedio, para los indicadores de producción encontrados, ya que se realizó un triplicado en la corrida.

$$\text{Promedio} = \frac{x_i + x_{i+1} + \dots + x_{n-2} + x_{n-1} + x_n}{n} \quad (\text{Ecuación No.3})$$

Ejemplo: Aplicación de promedio para las velocidades del aire, se realizó el mismo procedimiento para todas las corridas.

$$\frac{\left(0.8 \pm 0.05 \frac{L}{kg}\right) + \left(0.8 \pm 0.05 \frac{L}{kg}\right) + \left(1.0 \pm 0.04 \frac{L}{kg}\right)}{10} = 0.87 \pm 0.12L/kg$$

- d. Cálculo de la incertidumbre mediante el uso de una desviación estándar utilizando Excel, se utilizó la desviación estándar debido a la variación en los datos obtenidos de la corrida de relación 4:1 en la producción de biogás.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

La desviación obtenida fue ejemplo de ± 0.12 L /kg de análisis de error. Se utilizó la desviación estándar para todos los promedios calculados

6. Esquemas:

Planos de biodigestor piloto diseñado para hacer todas las corridas:

Ilustración 36: Vista planta de biodigestor.

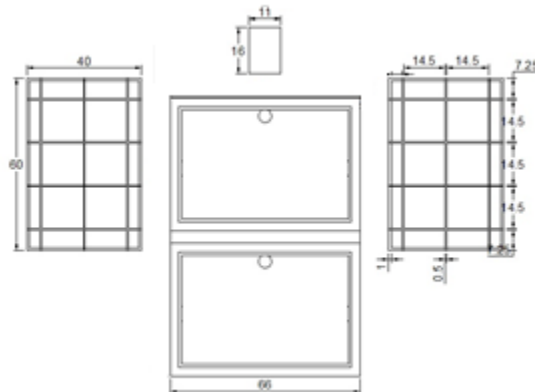


Ilustración 37: Vista de elevación de biodigestor



Ilustración 38: Vista de perfil de biodigestor.

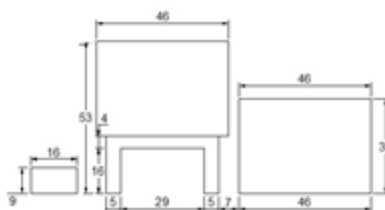
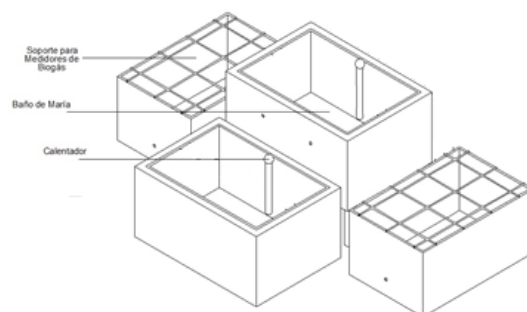


Ilustración 39: Vista Isométrica de biodigestor.



D. Módulo del diseño del biodigestor

1. Cálculos de muestra

- a. Cálculo de la fuerza boyante ejercida por el gas en el contenedor de gas del reactor piloto.

$$F_b = W_f = \text{Peso del fluido desplazado (Ecuación No.12)}$$

Ejemplo: Cálculo de la fuerza boyante en la producción de 50mL para la mezcla 1-1 excremento-agua.

$$F_b = 50\text{mL} * \frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} * \frac{1\text{kg}}{1\text{L}} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.49\text{N}$$

- b. Cálculo de la presión ejercida por el gas dentro del contenedor de gas del reactor piloto.

$$P = \frac{F_b}{A} \text{ (Ecuación No. 13)}$$

Ejemplo: Cálculo de la presión para la producción de 50mL para la mezcla 1-1 excremento-agua en el contenedor de gas de 0.115 m de diámetro.

$$P = \frac{0.49\text{N}}{\frac{1}{4} * \pi * (0.115\text{m})^2} = 47.17\text{Pa} * \frac{1\text{ atm}}{101325\text{ Pa}} = 4.66 * 10^{-4}\text{ atm}$$

- c. Cálculo de la concentración de biogás.

$$C = \frac{n}{V} = \frac{P}{RT} \text{ (Ecuación No. 14)}$$

Ejemplo: Cálculo de la concentración de biogás con volumen de 50 mL en el contenedor de gas del reactor piloto para la mezcla 1-1 excremento-agua.

$$C = \frac{5.66 * 10^{-4}\text{ atm}}{0.0821 \frac{\text{L*atm}}{\text{mol*K}} * (35 + 273)\text{K}} = 4.94 * 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

- d. Cálculo de la velocidad de reacción.

$$r_A = \frac{\Delta C_A}{\Delta t} \text{ (Ecuación No. 15)}$$

Ejemplo: Cálculo de la velocidad de reacción entre los días 1 y 2 para la producción de biogás.

$$r_A = \frac{4.94 * 10^{-4} \text{ mol/L}}{(1 - 0) \text{ días}} = 4.94 * 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{L} * \text{ día}}$$

e. Cálculo del potencial de producción de metano de la materia prima.

Ejemplo: Cálculo del potencial de generación de metano para la muestra con DBO de 1,992g/L y una conversión del 80%.

$$\frac{1,992 \text{ gO}_2}{L_{\text{estiercol}}} * \frac{1 \text{ kgO}_2}{1,000 \text{ gO}_2} * \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kgO}_2} * \frac{\frac{1}{2} \text{ kmol CH}_4}{1 \text{ kmol O}_2} * \frac{16 \text{ kg CH}_4}{1 \text{ kmol CH}_4} * 0.8 = 0.398 \frac{\text{kg CH}_4}{L_{\text{estiercol}}}$$

f. Cálculo de la fracción masa del biogás a partir de su composición volumétrica.

$$X_a = \frac{Y_a * M_a}{Y_a * M_a + Y_b * M_b + Y_c * M_c} \text{ (Ecuación No. 16)}$$

Ejemplo: Cálculo de la fracción masa para el metano de acuerdo a la composición volumétrica de 70% CH₄, 28% CO₂ y 2% H₂S.

$$X_{\text{CH}_4} = \frac{0.70 * 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.70 * 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 0.28 * 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 0.02 * 34 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0.46$$

g. Cálculo de las propiedades del biogás a producir con una composición de 0.46 m/m de metano, 0.51 m/m dióxido de carbono y 0.03 m/m ácido sulfhídrico.

$$P_{\text{biogás}} = 0.46 * P_{\text{CH}_4} + 0.51 * P_{\text{CO}_2} + 0.03 * P_{\text{H}_2\text{S}} \text{ (Ecuación No. 17)}$$

Ejemplo: Cálculo de la densidad del biogás.

$$\rho_{\text{biogás}} = 0.46 * 0.66 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0.51 * 1.83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0.03 * 1.36 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.28 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

h. Cálculo de la corrección por temperatura de las propiedades de biogás.

$$P_{\text{biogás corregida}} = P_{\text{biogás}} * \frac{T_{\text{Referencia}}}{T_{\text{Operación}}} \text{ (Ecuación No.)}$$

Ejemplo: Cálculo de la corrección por temperatura de la densidad del biogás.

$$\rho = 1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{25 + 273.15 \text{ K}}{30 + 273.15 \text{ K}} = 1.26 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

i. Cálculo de las propiedades de la mezcla de alimentación con composición de 50% estiércol y 50% agua.

$$M_{\text{Mezcla}} = 0.5 * M_{\text{Estiercol}} + 0.5 * M_{\text{Agua}} \text{ (Ecuación No. 18)}$$

Ejemplo: Cálculo de la densidad de la mezcla.

$$\rho_{\text{Mezcla}} = 0.5 * 992.67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0.50 * 1,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 996.33 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (Ecuación No.19)}$$

j. Cálculo de biogás generado.

$$\frac{\text{Potencial de generación de } CH_4 * \text{Volumen}_{\text{Estiercol}}}{\text{Fracción peso de metano en el biogás}} * \rho_{\text{biogás}}$$

Ejemplo: Cálculo del biogás generado para un volumen de estiércol de $1.03m^3$ utilizado para la generación de acuerdo al uso.

$$\frac{0.398 \frac{kg \text{ } CH_4}{L_{\text{estiercol}}} * \frac{1000L_{\text{estiercol}}}{1m^3 \text{ Estiercol}} * 1.03m^3 \text{ Estiercol}}{0.46 \frac{kgCH_4}{kgBiogás}} = 595.95kg_{\text{Biogás}}$$

k. Cálculo del tanque de mezclado para la alimentación del biodigestor.

$$V_{\text{Tanque}} = \frac{\text{MasaMezcla alimentada}}{\rho_{\text{Mezcla alimentada}}} \text{ (Ecuación No. 20)}$$

Ejemplo: Cálculo del volumen de tanque de mezclado para alimentar el biodigestor para generar biogás de acuerdo al uso.

$$V_{\text{Tanque mezclador}} = \frac{1,596kg_{\text{Mezcla}}}{992.67 \frac{kg_{\text{Mezcla}}}{m^3 \text{ Mezcla}}} = 1.60m^3$$

l. Cálculo del volumen del biodigestor

$$V_{\text{Biodigestor}} = \frac{\text{SRT} * \text{Alimentación} * \rho_{\text{Mezcla alimentada}}}{0.8} \text{ (Ecuación No. 21)}$$

Ejemplo: Cálculo del volumen del biodigestor para la generación de metano de acuerdo a su uso.

$$V_{\text{Biodigestor}} = \frac{30 \text{ días} * 2,050.874 \frac{kg}{\text{día}} * 996.33 \frac{m^3}{kg}}{0.8} = 60.07m^3$$

m. Cálculo del volumen para el tanque de almacenamiento de biogás.

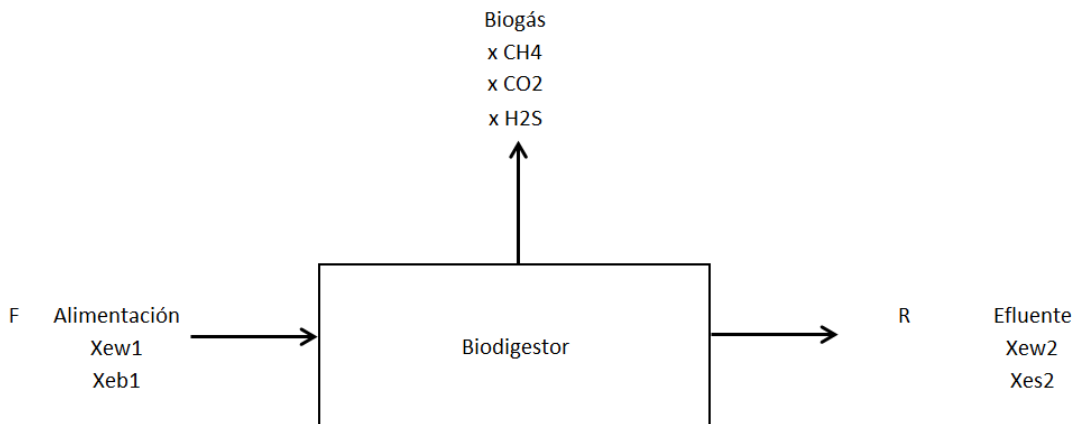
$$V = \text{Días} * \frac{RnT}{P} \text{ (Ecuación No.)}$$

Ejemplo: Cálculo del volumen para almacenar el biogás generado en dos días de acuerdo

$$V_{\text{Tanque}} = 1\text{Día} \frac{0.0821 \frac{L*atm}{mol*K} * 510.41m^3}{400kPa}$$

n. Balance de masa del biodigestor.

Ilustración 40 Diagrama de entradas y salidas del biodigestor



F: Flujo de alimentación.

x_{ew1} : Fracción masa de agua usada en la mezcla.

x_{eb1} : Fracción masa de estiércol usada en la mezcla.

R: Flujo de salida del biodigestor.

x_{ew2} : Fracción masa del agua en el flujo de salida.

x_{es2} : Fracción masa de lodos en el flujo de salida.

Biogás: Flujo de generación de biogás.

x_{CH4} : Fracción masa de metano en el biogás.

x_{CO2} : Fracción masa de dióxido de carbono en el biogás.

x_{H2S} : Fracción masa de ácido sulfhídrico en el biogás.

Ejemplo: Balance de masa para los flujos utilizados según el criterio de de acuerdo al uso.

$$F = 2,050.87 \text{ kg/día}$$

$$x_{ew1} = 0.50$$

$$x_{eb1} = 0.50$$

$$\text{Biogás} = 646.72 \text{ kg/día}$$

$$x_{CH4} = 0.46$$

$$x_{CO2} = 0.51$$

$$x_{H2S} = 0.03$$

$$R = F - \text{Biogás} \text{ (Ecuación No. 22)}$$

$$R = 2,050.87 \text{ kg/día} - 646.72 \text{ kg/día} = 1,404.15 \text{ kg/día}$$

$$x_{ew2} = \frac{x_{ew1} * F}{R} \text{ (Ecuación No. 23)}$$

$$X_{ew2} = \frac{0.5 * 2,050.87 \text{ kg/día}}{1,404.15 \text{ kg/día}} = 0.73$$

$$X_{es2} = 1 - X_{ew2} \text{ (Ecuación No.24)}$$

$$X_{es2} = 1 - 0.73 = 0.27$$

o. Cálculo del volumen efectivo y real del biodigestor.

Para este cálculo se utilizaron fórmulas de figuras geométricas básicas, cubos, polígonos rectos y pirámides, luego se sumaron los volúmenes.

$$V_{\text{Cubo o polígono}} = b * a * h \text{ (Ecuación No.25)}$$

$$V_{\text{pirámide}} = \frac{1}{3} * \frac{l_1 * l_2 * \sin \theta_{entre l_1 y l_2} * h}{2} \text{ (Ecuación No.)26}$$

Ejemplo: Cálculo del volumen de una de las inclinaciones de las esquinas del biodigestor.

$$V = \frac{1}{3} * \frac{0.45m * 0.45m * \sin(90) * 0.45m}{2} = 0.02m^3$$

p. Cálculo del costo del biodigestor.

$$VF = VA * (1 + i)^t \text{ (Ecuación No.)}$$

Ejemplo: Cálculo del costo de uno de los biodigestores diseñados.

$$Q. 32,922.05 * (1 + 4.5\%)^{2013-2004} = Q. 65844.09$$

2. Datos calculados

Tabla 102: Concentración de metano y velocidad de reacción para la producción de cada día.

Días	Producción de biogás(mL)	Volumen de biogás (L)	Fuerza boyante (N)	Presión del biogás (atm)	Concentración de biogás (mol/L)	Cinética de reacción ra (mol/L·día)
1	0	0.00	0.000	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00
2	50	0.05	0.490	4.66E-04	1.84E-05	1.84E-05
3	75	0.08	0.735	6.98E-04	2.76E-05	9.21E-06
4	100	0.10	0.980	9.31E-04	3.68E-05	9.21E-06
5	150	0.15	1.470	1.40E-03	5.52E-05	1.84E-05
6	1450	1.45	14.210	1.35E-02	5.34E-04	4.79E-04
7	1500	1.50	14.700	1.40E-02	5.52E-04	1.84E-05
8	1550	1.55	15.190	1.44E-02	5.71E-04	1.84E-05
9	1550	1.55	15.190	1.44E-02	5.71E-04	0.00E+00
10	1575	1.58	15.435	1.47E-02	5.80E-04	9.21E-06
11	1575	1.58	15.435	1.47E-02	5.80E-04	0.00E+00
12	1592	1.59	15.598	1.48E-02	5.86E-04	6.14E-06
13	1596	1.60	15.639	1.49E-02	5.88E-04	1.53E-06
14	1600	1.60	15.680	1.49E-02	5.89E-04	1.53E-06
15	1800	1.80	17.640	1.68E-02	6.63E-04	7.36E-05
16	2000	2.00	19.600	1.86E-02	7.36E-04	7.36E-05
17	2100	2.10	20.580	1.96E-02	7.73E-04	3.68E-05
18	2150	2.15	21.070	2.00E-02	7.92E-04	1.84E-05
19	2200	2.20	21.560	2.05E-02	8.10E-04	1.84E-05
20	2250	2.25	22.050	2.10E-02	8.29E-04	1.84E-05
21	2300	2.30	22.540	2.14E-02	8.47E-04	1.84E-05
22	2500	2.50	24.500	2.33E-02	9.21E-04	7.36E-05
23	2700	2.70	26.460	2.51E-02	9.94E-04	7.36E-05
24	3000	3.00	29.400	2.79E-02	1.10E-03	1.10E-04
25	3000	3.00	29.400	2.79E-02	1.10E-03	0.00E+00
26	3700	3.70	36.260	3.45E-02	1.36E-03	2.58E-04
27	3750	3.75	36.750	3.49E-02	1.38E-03	1.84E-05
28	3800	3.80	37.240	3.54E-02	1.40E-03	1.84E-05
29	3900	3.90	38.220	3.63E-02	1.44E-03	3.68E-05
30	4000	4.00	39.200	3.72E-02	1.47E-03	3.68E-05

Datos interpolados

Tabla 103: Porcentaje peso para cada uno de los componentes del biogás.

%m CH ₄ en Biogás	0.46
%m CO ₂ en Biogás	0.51
%m H ₂ S en Biogás	0.03

Tabla 104: Propiedades del biogás a 35°C.

ρ Biogás	1.26	kg/m ³
PM Biogás	30.76	kg/kmol

Tabla 105: Densidad promedio del estiércol y de la mezcla 1-1 agua estiércol.

ρ Estiércol	992.67	kg/m ³
ρ Mezcla	996.33	kg/m ³

Tabla 106: Producción de metano diaria de acuerdo a cada criterio.

Criterio	Producción (kg CH ₄ /día)
Espacio	6,152.76
Compost	582.17
MP	1,412.73
Uso	299.31

Tabla 107: Volúmenes efectivos de las partes del biodigestor.

Parte del biodigestor	Altura (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Cantidad	Volumen Total (m ³)
Volumen de Carga	1.80	1.09	1.09	2.14	1	2.14
Volumen de Salida	1.80	1.09	0.9	2.14	1	1.59
Volumen de cada cámara	1.50	2.40	2.40	8.64	4	34.56
Volumen de cada paso	1.50	0.15	0.80	0.18	3	0.54
Volumen de cada venta	0.50	0.15	0.55	0.04	3	0.12
Volumen entrada	0.40	0.15	0.60	0.04	1	0.04
Volumen salida	0.40	0.15	0.85	0.05	1	0.05
Volumen esquinas	0.45		0.45	0.02	8	0.12
Total						38.85

Tabla 108: Volumen que ocupa el biodigestor.

Volumen Real	65.81 m ³
--------------	----------------------

3. Reglamentos

El reglamento se adjunta a continuación.

E. Módulo sistema de extracción y purificación de biogás

1. Datos originales

Tabla 109: Masa y densidad de los principales componentes del biogás.

Propiedades físicas	
Masa Ácido Sulfhídrico (kg/kmol)	34.08
Masa Óxido de Hierro (kg/kmol)	159.69
Masa Sulfuro de Hierro (kg/kmol)	207.89
Masa Agua (kg/kmol)	18
Densidad del H ₂ S (kg/m ³)	1.3600
Densidad de Metano (kg/m ³)	0.66
Densidad de Dioxido de Carbono (kg/m ³)	1.87

Tabla 110: Composición teórica del biogás

Composición (%Volumen)	
Metano (CH ₄)	70%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	28%
Ácido Sulfhídrico (H ₂ S)	2%

Tabla 111: Concentración inicial de H₂S en ppmV⁵ y ppm del biogás generado

Concentración Inicial H ₂ S (ppmv) ml/m ³	20,000.00
Concentración Inicial H ₂ S (ppm) mg/L	27.2

Tabla 112: Caudal necesario para la producción de productos lácteos

Flujo volumétrico Necesario (m ³ /mes)	290
Flujo Volumétrico Necesario (m ³ /h)	2.42
Flujo Volumétrico Necesario para turbina (m ³ /h)	21

⁵ Partes por millón volumétricas

Tabla 113: Longitud y accesorios del sistema de tuberías para la estufa⁶

Longitud de Tubería (m)	60
Altura de la esfera (m)	7
Altura de entrada de gas a la estufa (m)	0.2
Codos necesarios	9
Reductor de 1" a 1/2"	1

Tabla 114: Longitud del sistema de tuberías para la microturbina Capstone® CR-331033D

Longitud de Tubería (m)	18.7
Altura Inicial (m)	7
Altura Final (m)	0.34036

Tabla 115: Tabla de accesorios para sistema de tuberías de la Estufa

Accesorios	Kf	Cantidad	Kf Total
Códo Estándar 90°	0.75	9	6.75
T Separando el Flujo	1.3	1	1.3

Tabla 116: Tabla de accesorios para sistema de tuberías de la turbina

Accesorios	Kf	Cantidad	Kf Total
Códo Estándar 90°	0.75	2	1.5
T Separando el Flujo	1.3	1	1.3
Válvula de bola Abierta	6	2	12

Tabla 117: Costos unitario de los accesorios a utilizar en el sistema de purificación y extracción de biogás.

	Precio Unitario
Tubería 25 mm (1") PVC 160 Cat.40 (Q/m)	Q9.30
Válvula de Bola 25mm (1") PVC 160 Cat. 40	Q20.00
Reductor de 25mm a 13mm (1" a 1/2")	Q2.85
Tubería 13mm (1/2") PVC 315 Cat. 40 (Q/m)	Q5.50
Codo Estándar 90° de 25mm (1") PVC 160 Cat. 40	Q6.50
T de 25 mm (1") PVC 160 Cat.40	Q5.50
Uniones Universales 25 mm (1") PVC 160 Cat. 40	Q3.00
Compresor Kaeser® SX5	Q64,000.00
Desulfurizador PX-25L Puxin®	Q4,200.00

⁶ Datos proporcionados por el personal de la finca

2. Cálculos de muestra

a. Determinación de flujo volumétrico.

$$Q_x = Q_{biogás} * (\% vol x) \text{ (Ecuación No. 3)}$$

Donde:

- Q_x = Flujo volumétrico del compuesto (m^3/h)
- $Q_{biogás}$ = Caudal del biogás (m^3/h)
- % = Porcentaje correspondiente en la composición del biogás (%vol)

Suponiendo un caudal de $24m^3/h$ de biogás y un porcentaje de 70% de metano (CH_4) se determinó el caudal del metano. (Este cálculo se realizó tanto para el dióxido de carbono, como para el ácido sulfhídrico)

$$Q_{CH_4} = (24)(70\%) = 16.8 \frac{m^3}{h}$$

b. Determinación del flujo másico para cada componente.

$$\dot{m}_x = \dot{Q}_x * \rho_x \text{ (Ecuación No. 4)}$$

Donde:

- M_x = flujo másico del componente (kg/h)
- Q_x = Flujo volumétrico del componente (m^3/h)
- P = densidad del componente (kg/m^3)

Tomando el flujo volumétrico del metano del cálculo anterior, $16.8 m^3/h$ y la densidad del metano, $1.30 kg/m^3$, se determinó el flujo másico. (Este cálculo se realizó tanto para el dióxido de carbono, como para el ácido sulfhídrico)

$$\dot{m}_x = (16.8)(1.30) = 21.84 \text{ kg/h}$$

c. Determinación de la composición másica del biogás.

$$\% \frac{\text{peso}}{\text{peso}} = \frac{(\% \text{volumen}) * M_x}{(\% \text{vol}) * (M1) * + (\% \text{vol}) * (M2) + (\% \text{vol}) * (M3)}$$

(Ecuación No. 5)

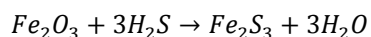
Donde:

- % (peso/peso) = Porcentaje correspondiente al componente en el biogás.
- Mx = masa molar del componente que se requiere saber la composición másica.
- M1, M2, M3 = masa molar de los componentes que conforman el gas.
- %vol = fracción volumétrica de los componentes del biogás.

$$\% \frac{\text{peso}}{\text{peso}} = \frac{(70\%) * (\frac{16.04g}{\text{mol}})}{(70\%) * (16.04) + (28\%) * (44.01) + (2\%) * (34.08)} = 46.3\% \text{ de } CH_4$$

- d. Determinación de la cantidad necesaria de óxido férrico (Fe_2O_3) para la purificación del biogás, eliminando ácido sulfhídrico.

Ecuación No. 1



A través del flujo másico del ácido sulfhídrico, 0.65kg/h, y una base de 1 hora, se determinó la cantidad necesaria teórica de óxido férrico, por medio de un cálculo estequiométrico, asumiendo una eficiencia del 100%.

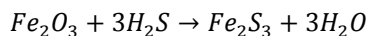
$$\frac{0.65kg H_2S}{1} * \frac{1 kmol H_2S}{34.08 kg H_2S} * \frac{1 kmol Fe_2O_3}{3 kmol H_2S} * \frac{159.7 kg Fe_2O_3}{1 kmol Fe_2O_3} = 1.02 kg Fe_2O_3$$

Se llevó a cabo el mismo cálculo, pero ahora utilizando una eficiencia del 85%, como lo menciona la teoría

$$\frac{0.65kg H_2S}{1} * \frac{1 kmol H_2S}{34.08 kg H_2S} * \frac{1 kmol Fe_2O_3}{3 kmol H_2S} * \frac{159.7 kg Fe_2O_3}{1 kmol Fe_2O_3} * 85\% = 0.87 kg Fe_2O_3$$

- e. Determinación del ácido sulfhídrico que no reacciona.

Ecuación No. 1



A través de la diferencia entre lo que se produjo de óxido férrico con una reacción con eficiencia del 100% y la otra con una de 85%, se determinó el ácido sulfhídrico que no reaccionó.

$$(1.02 - 0.87)kg Fe_2O_3 = 0.15 kg Fe_2O_3 \text{ que no se produjo}$$

$$\frac{0.15 \text{ kg } Fe_2O_3}{1} * \frac{1 \text{ kmol } Fe_2O_3}{159.7 \text{ kg } Fe_2O_3} * \frac{3 \text{ kmol } H_2S}{1 \text{ kmol } Fe_2O_3} * \frac{34.08 \text{ kg } H_2S}{1 \text{ kmol } H_2S} = 0.075 \text{ kg } H_2S$$

- f. Determinación de la cantidad de ácido sulfhídrico inicial en el biogás, en ppm (mg/L)

Este cálculo se realizó a partir del caudal de biogás de 24,000 L/h, teniendo como base 1 hora y la cantidad de H₂S de 0.65 kg.

$$\frac{0.65 \text{ kg } H_2S}{1} * \frac{1000 \text{ g } H_2S}{1 \text{ kg } H_2S} * \frac{1000 \text{ mg } H_2S}{1 \text{ g } H_2S} * \frac{1}{24,000 \text{ L de biogás}} = 27.20 \text{ ppm de } H_2S$$

- g. Determinación de la cantidad de ácido sulfhídrico restante en el biogás, luego de pasar por el proceso de desulfurización en ppm (mg/L)

Este cálculo se realizó a partir del caudal de biogás, 24,000 L/h, y siempre teniendo como base 1 hora.

$$\frac{0.075 \text{ kg } H_2S}{1} * \frac{1000 \text{ g } H_2S}{1 \text{ kg } H_2S} * \frac{1000 \text{ mg } H_2S}{1 \text{ g } H_2S} * \frac{1}{24,000 \text{ L de biogás}} = 3.13 \text{ ppm de } H_2S$$

- h. Determinación de la cantidad de ácido sulfhídrico remanente en el biogás a través del uso de un filtro desulfurizador PX-25L Puxin®, sabiendo que la eficiencia de este es del 90%.

$$\text{Masa de } H_2S_{Final} = \text{Masa de } H_2S_{Inicial} * (100 - 90)\%$$

Donde:

- Masa de H₂S_{final} = Masa de ácido sulfhídrico remanente en el biogás (kg)
- Masa de H₂S_{inicial}) Masa de ácido sulfhídrico inicial en el biogás (kg)

Para el cálculo se utilizó una masa inicial de H₂S de 0.65kg, masa que se encuentra en un volumen de 24 m³ de biogás.

$$\text{Masa de } H_2S_{Final} = 0.65 \text{ kg} * (100 - 90)\% = 0.065 \text{ kg de } H_2S$$

- i. Determinación de la cantidad de ácido sulfhídrico restante en el biogás, luego de pasar por un filtro desulfurizador PX-25L Puxin®, en ppm (mg/L)

Este cálculo se realizó a partir del caudal de biogás, 24,000 L/h, y siempre teniendo como base 1 hora.

$$\frac{0.065 \text{ kg } H_2S}{1} * \frac{1000 \text{ g } H_2S}{1 \text{ kg } H_2S} * \frac{1000 \text{ mg } H_2S}{1 \text{ g } H_2S} * \frac{1}{24,000 \text{ L de biogás}} = 2.72 \text{ ppm de } H_2S$$

j. Determinación del diámetro de la tubería

$$d_i = 18.8 \left(\frac{Q}{v} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ (Ecuación No. 6)}$$

Donde:

- d_i = diámetro interior de tubería (mm)
- v = velocidad lineal del flujo (m/s)
- Q = caudal (m^3/h)

Suponiendo un caudal de salida de, $24 \text{ m}^3/\text{h}$ y la velocidad lineal del biogás de 15 m/s a una presión de 375 kPa . Se determinó que el diámetro apropiado era:

$$d_i = 18.8 \left(\frac{24}{15} \right)^{\frac{1}{2}} = 23.78 \text{ mm} \approx 1.00 \text{ in}$$

k. Determinación del número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho D V}{\mu} \text{ (Ecuación No. 7)}$$

Donde:

- Re = Número de Reynolds
- D = Diámetro interno de la tubería (m)
- V = Velocidad lineal del gas (m/s)
- ρ = Densidad del gas (kg/m^3)
- μ = Viscosidad (kg/ms)

Se determinó el número de Reynolds con el fin de determinar el régimen del flujo (Turbulento o laminar). Este número se determina a través de la densidad del biogás, $1.30 \text{ kg}/\text{m}^3$, el diámetro interno de la tubería, 1.049 in , la velocidad del gas, 15 m/s , y la viscosidad del biogás, 0.011 cp .

$$Re = \frac{\left(1.30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * \left(1 \text{ in} * 0.0254 \text{ m} \right) * \left(15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)}{\left(0.011 \text{ cp} * 0.001 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * \text{s} \right)} = 47,236.52$$

l. Determinación del coeficiente de Fanning. (ésta ecuación se aplica solo para números de Reynolds que van desde 3000 hasta 3×10^6).

$$f = 0.0014 + \frac{0.125}{Re^{0.32}} \text{ (Ecuación No. 8)}$$

Donde:

- F = Coeficiente de Fanning
- Re = Número de Reynolds

Tomando el número de Reynolds obtenido en el cálculo anterior, se obtuvo el siguiente coeficiente.

$$f = 0.0014 + \frac{0.125}{(47,236.52)^{0.32}} = 0.005392$$

m. Determinación de coeficiente de fricción debido a una contracción súbita.

$$Kc = (0.4) * \left(1 - \frac{Sb}{Sa}\right) \text{ (Ecuación No. 9)}$$

Donde:

- Kc = Coeficiente de fricción debido a contracción
- Sb = Sección transversal de la tubería con menor diámetro.
- Sa = Sección transversal de la tubería con mayor diámetro.

Se determinó el coeficiente de fricción para el sistema de tuberías de la estufa, ya que existe una contracción de un diámetro de 1" a un diámetro de 0.5". Tomando como área de sección transversal para la tubería A, 0.000557 m² y para la tubería B, 6.71*10⁻⁵ m².

$$Kc = (0.4) * \left(1 - \frac{0.0000671m^2}{0.000557m^2}\right) = 0.352$$

n. Determinación de las pérdidas de fricción a través de la ecuación de Bernoulli.

$$Hf = \left[4f \left(\frac{L}{D}\right) + Kc + Ke + Ka\right] * \left(\frac{V^2}{2}\right) \text{ (Ecuación No. 10)}$$

Donde:

- f= Coeficiente de Fanning.
- Kc = Coeficiente de fricción debido a contracción
- Ke = Coeficiente de fricción debido a expansión.
- Ka = Coeficiente de fricción debido a accesorios.
- V = Velocidad lineal del Gas. (m/s)

- H_f = Pérdidas por fricción en la tubería.
- L = Longitud de la tubería (m)
- D = Diámetro de la tubería (m)

Se determinaron las pérdidas por fricción el sistema de tuberías que va hacia la estufa, y para el sistema de tuberías que va hacia la microturbina. El coeficiente de fricción por pérdida de accesorios se puede ver en las tablas # 41 y # 42. El cálculo siguiente se realizó para el sistema de tuberías que va hacia la estufa, teniendo una longitud aproximada de tubería de 60 m, un diámetro de 0.026m, una velocidad lineal de 15 m/s y un coeficiente de fricción por contracción de 0.352.

$$H_f = \left[4(0.005392) \left(\frac{60m}{0.026m} \right) + 0.352 + 0 + 26.05 \right] * \left(\frac{\left(\frac{15m}{s} \right)^2}{2} \right)$$

$$= 8,4333.7 \frac{m^2}{s^2}$$

- o. Determinación de la caída de presión a través de la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_a - P_b}{\rho} + g(Z_a - Z_b) = H_f \text{ (Ecuación No. 11)}$$

Donde:

- $P_a - P_b$ = Caída de Presión (Pa)
- $Z_a - Z_b$ = Diferencia de alturas (m)
- g = Gravedad (9.8 m/s²)
- ρ = Densidad del biogás (kg/m³)
- H_f = Pérdidas por fricción (m²/s²)

Determinación de la caída de presión para el sistema de tuberías que va hacia la estufa (se realizó el mismo cálculo para el sistema de tuberías que se dirige a la turbina). Se despejó para ΔP en la ecuación # 10, para poder determinar la caída de presión.

$$P_a - P_b = [H_f - g(Z_a - Z_b)] * \rho$$

$$P_a - P_b = [8,433.7 - (9.8)(7 - 0.2)] * 1.30 = 10,877.81 Pa = 10.87 kPa$$

- p. Determinación de la presión al final del sistema de tuberías, la cual se realiza a partir de la caída de presión obtenida en el cálculo anterior, teniendo como presión inicial 400 kPa.

$$P_b = (400 - 10.87)kPa = 389.12 kPa$$

Este cálculo también se realizó para determinar la presión final del sistema de tuberías que va hacia la turbina.

3. Datos calculados

Tabla 118: Composición del biogás (%peso)

Composición biogás(%peso)	
Metano (CH ₄)	46.30%
Ácido Sulfhídrico (H ₂ S)	3.00%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	51.00%

Tabla 119: Datos sobre flujos del biogás en el sistema de tuberías.

Flujo Volumétrico Biogás (m ³ /h)	24.00
Flujo Volumétrico Biogás (L/h)	24,000.00
Densidad del Biogás (kg/m ³)	1.30
Flujo Másico del Biogás (kg/h)	31.20

Tabla 120: Cantidad de óxido férrico necesaria para una reacción al 100%

Base 1 hora (reacción 100%)	
Cantidad de H ₂ S (m ³)	0.48
Cantidad de H ₂ S (kg)	0.65
Cantidad de Fe ₂ O ₃ necesaria (kg)	1.02
Cantidad de Fe ₂ O ₃ producida (kg)	1.33
Cantidad de H ₂ O producida (kg)	0.34

Tabla 121: Cantidad de óxido férrico necesaria para una reacción al 85%

Base 1 hora (reacción 85 %)	
Cantidad de H ₂ S (kg)	0.65
Cantidad de Fe ₂ O ₃ necesaria (kg)	0.87
Cantidad de Fe ₂ O ₃ producida (kg)	1.13
Cantidad de H ₂ O producida (kg)	0.29

Tabla 122: Cantidad de H₂S sin reaccionar

Cantidad de H ₂ S sin reaccionar (kg)	0.075
Cantidad de H ₂ S sin reaccionar (L)	55.31

Tabla 123: Cantidad de H₂S remanente en el biogás

Concentración Inicial H ₂ S (ppm) mg/L	27.2
Concentración Final H ₂ S(ppm) mg/L	3.13

Tabla 124: Cantidad de H₂S remanente utilizando un filtro desulfurizador PX-25L Puxin®

Base 1 hora (eficiencia 90%)	
Volumen de biogás (m ³)	24.00
Cantidad de H ₂ S inicial (kg)	0.653
Cantidad de H ₂ Sfinal (kg)	0.065
Cantidad de H ₂ Sfinal (ppm)	2.72

Tabla 125: Determinación del diámetro necesario de tubería.

Flujo volumétrico necesario (m ³ /mes)	290
Flujo Volumétrico necesario (m ³ /h)	2.42
Flujo Volumétrico inicial (m ³ /h)	24.00
Velocidad Lineal del biogás (m/s)	15
Diámetro interno (mm)	23.78
Diámetro interno (in)	0.94

Tabla 126: Número de Reynolds y constante de Fanning

Número de Reynolds	47,236.52
Constante de Fanning	0.005392

Tabla 127: Tubería 1" PVC 160 Cat.40

Especificaciones Tubería Cat. 40	
Diámetro exterior (in)	1.315
Diámetro interior (in)	1.049
Sección transversal (m ²)	0.00055758

Tabla 128: Tubería ½" PVC 160 Cat. 40

Especificaciones Tubería Cat. 40	
Diámetro exterior (in)	0.25
Diámetro interior (in)	0.364
Sección transversal (m ²)	6.71367E-05

Tabla 129: Coeficiente de fricción por contracción

	Tubería A	Tubería B
Diámetro interior (in)	1.049	0.364
Sección transversal (m ²)	0.00055758	6.71367E-05
Coeficiente por contracción	0.351837194	

Tabla 130: Pérdidas por fricción para sistema de tuberías de estufa

Pérdida de fricción	
Fricción por accesorios	26.05
Fricción por expansión	0
Fricción por contracción	0.352
Largo	60
Diámetro interno	0.0266
Constante de Fanning	0.00539
Pérdidas por fricción	8,433.67

Tabla 131: Pérdidas por fricción para sistema de tuberías de turbina

Pérdida de fricción	
Fricción por accesorios	14.8
Fricción por expansión	0
Fricción por contracción	0
Largo	18.7
Diámetro Interno	0.0266446
Constante de Fanning	0.00539155
Pérdidas por fricción	3,367.78

Tabla 132: Caídas de presión en ambos sistemas

Estufas	
Caída de presión (Pa)	10,877.81
Presión en B (kPa)	389.12
Turbina	
Caída de presión (Pa)	4,293.53
Presión en B (kPa)	395.71

Tabla 133: Costo para la construcción del sistema de extracción y purificación

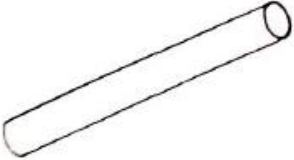
	Precio unitario	Cantidad	Costo
Tubería 25 mm (1") PVC 160 Cat.40 (Q/m)	Q9.30	72	Q669.60
Válvula de bola 25mm (1") PVC 160 Cat. 40	Q20.00	4	Q80.00
Reductor de 25mm a 13mm (1" a 1/2")	Q2.85	1	Q2.85
Tubería 13mm (1/2") PVC 315 Cat. 40 (Q/m)	Q5.50	1	Q5.50
Codo estándar 90° de 25mm (1") PVC 160 Cat. 40	Q6.50	11	Q71.50
T de 25 mm (1") PVC 160 Cat.40	Q5.50	1	Q5.50
Uniones universales 25 mm (1") PVC 160 Cat. 40	Q3.00	12	Q36.00
Compresor Kaeser® SX5	Q64,000.00	1	Q64,000.00
Desulfurizador PX-25L Puxin®	Q4,200.00	1	Q4,200.00
		Total	Q69,070.95

4. Especificaciones

Ilustración 41: Dimensiones de tuberías PVC ASTM D-1785, Catálogo 40

**SCHEDULE 40
PIPE DIMENSIONS**

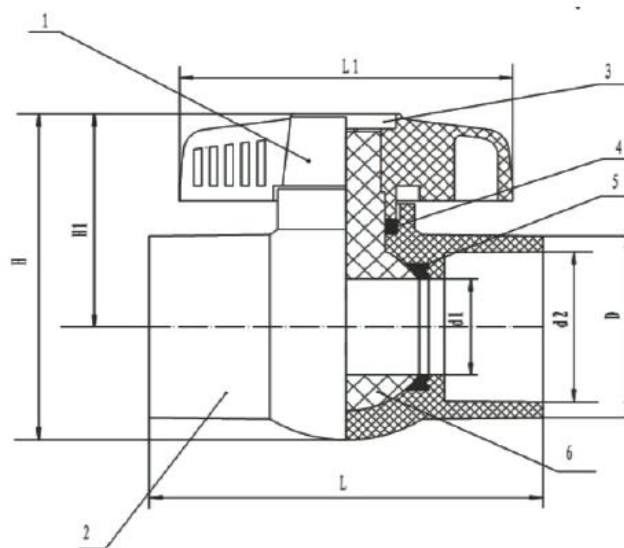
ASTM D-1785



Size	Outside diam., in.	Min. wall thickness, in.	OD tolerance, in.	Wall thickness tolerance, in.
1/2	0.840	0.109	+/-0.004	+0.020
3/4	1.050	0.113	+/-0.004	+0.020
1	1.315	0.133	+/-0.005	+0.020
1 1/4	1.660	0.140	+/-0.005	+0.020
1 1/2	1.900	0.145	+/-0.006	+0.020
2	2.375	0.154	+/-0.006	+0.020
2 1/2	2.875	0.203	+/-0.007	+0.024
3	3.500	0.216	+/-0.008	+0.026
4	4.500	0.237	+/-0.009	+0.028
5	5.563	0.258	+/-0.010	+0.031
6	6.625	0.280	+/-0.011	+0.034
8	8.625	0.322	+/-0.015	+0.039
10	10.750	0.365	+/-0.015	+0.044
12	12.750	0.406	+/-0.015	+0.049

(Sixsmith, T. & R. Hanselka, 1997)

Ilustración 42: Diagrama de válvula de bola a utilizar



(NingBo EBM Plastic Co. 2013)

Tabla 134: Medidas de válvula de bola.

	Milímetros (mm)	Pulgadas (")
Tamaño	25	1
d2	32	1.25
d1	23	0.9
D	43	1.7
L1	88	3.5
L	102	4
H1	57	2.25
H	84	3.3

(NingBo EBM Plastic Co. 2013)

Tabla 135: Partes de válvula de bola

No.	Parte	Material
1	Manija	PP ABS
2	Cuerpo	PVC
3	Tapa	PP ABS
4	Anillo-O	EPDM/NBR
5	Junta de asiento	TPE / PTFE
6	Bola	PVC

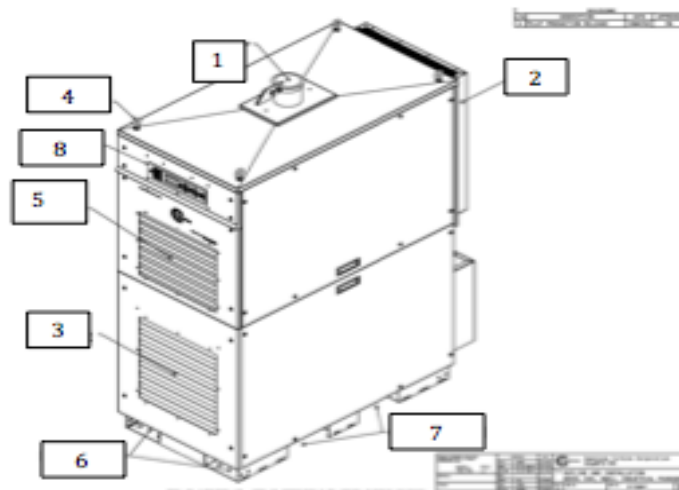
(NingBo EBM Plastic Co. 2013)

Ilustración 43: Especificaciones de la microturbina CR30 Capstone. ®



MICROTURBINA 30kWh

Isométrico de Microturbina



- Marca: Capstone Turbines
- Modelo: 30C
- Capacidad: 30kWh
- Dimensiones
 - Ancho: 30 in
 - Profundidad: 60 in
 - Altura: 70 in
- Componentes Principales
 - 1 - Escape del Motor
 - 2 - Protección Acústica
 - 3 - Ventilación de Electrónicos
 - 4 - Argolla de Suspensión
 - 5 - Entrada de Aire para el Motor
 - 6 - Aperturas para elevación traseras
 - 7 - Aperturas para elevación laterales
 - 8 - Panel de la Interface

Consumo de agua:	Consumo de Biogás:	Consumo eléctrico:	Presión de Entrada Requerida:	Poder Calorífico Requerido:
No aplica	21m ³ /h	No Aplica	60 – 70 psig	12.1 – 32.1 MJ/m ³

5. Cotizaciones

Ilustración 44: Características generales de microturbina CR30 Capstone. ®

CR30 MicroTurbine Renewable Fuels



Achieve ultra-low emissions and reliable electrical generation from waste gas.

- Years of renewable experience
- Ultra-low emissions
- Operates on landfill or digester gas
- One moving part: Minimal maintenance and downtime
- Patented air bearing: No lubricating oil or coolant
- 5 and 9 year Factory Protection Plans available
- Remote monitoring and diagnostic capabilities
- Integrated utility synchronization and protection⁽¹⁾
- Small, modular design allows for easy, low-cost installation
- Reliable: Tens of millions of run hours and counting



CR30 MicroTurbine

Electrical Performance⁽²⁾

Electrical Power Output	30kW
Voltage	400–480 VAC
Electrical Service	3-Phase, 4 wire
Frequency	50/60 Hz
Maximum Output Current	46A, grid connect operation
Electrical Efficiency LHV	26%

Fuel/Engine Characteristics⁽²⁾

Digester / Landfill Gas HHV	12.1–32.1 MJ/m ³ (325–861 BTU/scf)
H ₂ S Content	< 70,000 ppmv
Inlet Pressure – HHV dependent	414–483 kPa gauge (60–70 psig)
Fuel Flow HHV	457 MJ/hr (433,000 BTU/hr)
Net Heat Rate LHV	13.8 MJ/kWh (13,100 BTU/kWh)

Exhaust Characteristics⁽²⁾

NOx Emissions @ 15% O ₂ ⁽³⁾	< 9 ppmvd (18 mg/m ³)
NOx / Electrical Output ⁽³⁾	0.22 g/bhp-hr (0.64 lb/MWhe)
Exhaust Gas Flow	0.31 kg/s (0.69 lbm/s)
Exhaust Gas Temperature	275°C (530°F)

Ilustración 45: Precios de los diferentes desulfurizadores ofrecidos por SAIGUA S.A

Estimado Aldo, con gusto.

Es óxido férrico de cantera peletizado el ingrediente activo de nuestros filtros.

Para el flujo que menciona estaría obteniendo 624 m³/día, para ese caso le funciona muy bien nuestro PX-100L, el cual trae incorporado un deshidratador.

Desulfurizador de biogás de PX-4L	Q350.00
Desulfurizador de biogás de PX-8L	Q550.00
Desulfurizador de biogás de PX-25L	Q4,200.00
PX-100L FILTRO DESHIDRATADOR Y DESULFURIZADOR PARA 20000 M3 DE BIOGÁS	Q18,897.91

Si nos brinda su número de teléfono, con gusto le contactamos y ampliamos detalles, slds.

Participe con nosotros en el VII Congreso Iberoamericano de Control de Erosión y Sedimentos: <http://www.iscaiberoamerica.org/blog/antigua-guatemala-sede-del-proximo-congreso/>

Juan Carlos Hernández Recinos

Bioenergía & Asistencia técnica Ambiental

Tel. [+\(502\)66641796](tel:+50266641796) Fax. [+\(502\)23656913](tel:+50223656913) Cel. [+\(502\)52056214](tel:+50252056214)

skype: juanca901

enerGetic depot® Centroamérica, Km 14.5 Carr. a El Salvador,
Gran Plaza, Bodega 117, Puerta Parada, Sta. Catarina Pinula, Guatemala, C. A.

www.saigua.com

Ilustración 46: Características generales de los desulfuradores Puxin ®




FILTROS DESULFURIZADORES

www.energeticdepot.com
PRODUCTOS PARA BIOGAS

Características

En el biogás, existen trazas de ácido sulfhídrico, H₂S, también conocido como sulfuro de hidrógeno, el cual tiene potencial de toxicidad, corrosión y posee un olor peculiar (a huevo podrido), por lo que se deben instalar filtros desulfuradores previo a almacenar y utilizar biogás. El componente básico del desulfurador es el óxido férrico, Fe₂O₃.

Cuando el biogás sale de la planta (biodigestor), existe vapor de agua que puede ser separado por condensación mediante deshidratadores. Luego se procede a la desulfurización del biogás, cuyo principio es:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \cdot 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Fe}_2\text{S}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}$$

Después de utilizarlo, disminuirá su efectividad. Por lo que se debe cambiar o regenerar el material filtrante, cuyo principio de reacción es:

$$2\text{Fe}_2\text{S}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 6\text{S}$$

Modelos: existe una diversidad de diseños para cada caso, con capacidad de filtrar desde ≤ 5 m³/día hasta 600 m³/día.









Kilómetro 14.5,
Carretera a El Salvador, Gran Plaza, Bodega 217,
Puerta Parada, Santa Catarina Pinula, Guatemala, C.A.

F. Módulo de uso de biogás

1. Biodigestor instalado actualmente.

Ilustración 47: Biodigestor actual de finca Rama Blanca.



Ilustración 48: Área disponible para colocación del nuevo sistema.



Ilustración 49: Sistema de distribución actual de Biogás



Ilustración 50: Salida de biogás de bolsa contenedora.



2. Diagrama de bloques para posibles metodologías de uso

Ilustración 51: Diagrama de bloques para sistema de combustión directa.



Ilustración 52: Diagrama de bloques para sistema de cogeneración.

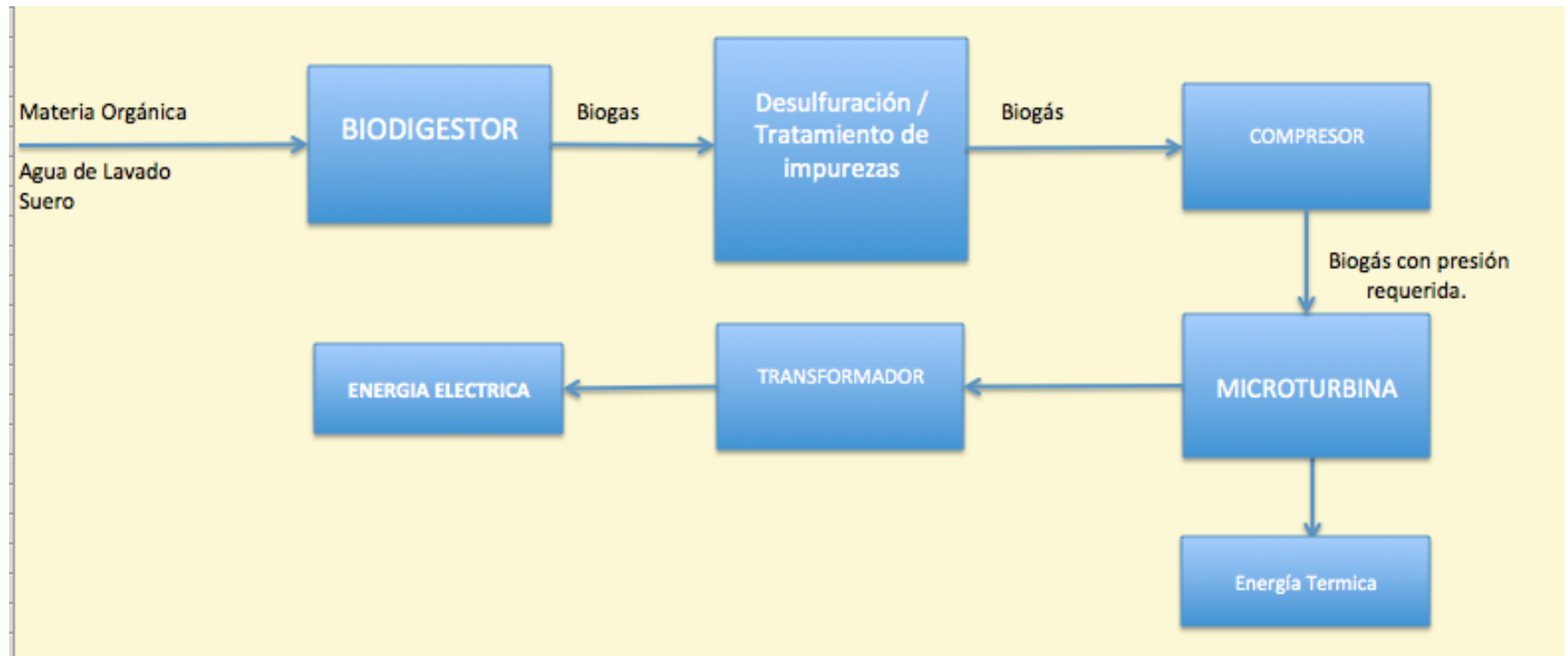
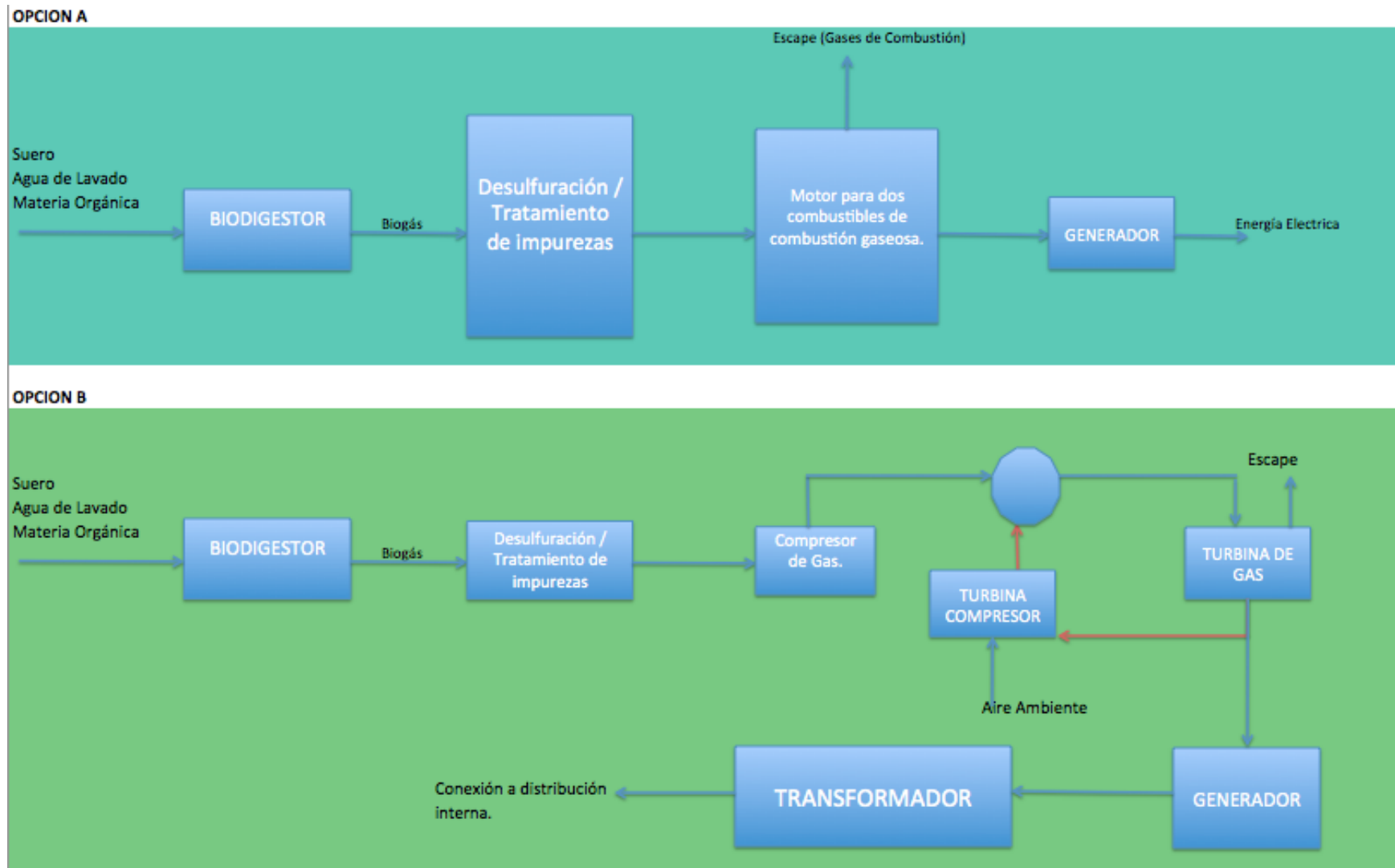


Ilustración 53: Diagrama de bloques para metodología de generación de EE.



3. Flujo de caja

Tabla 136: Flujo de caja del año 0 a 5 para la inversión evaluada.

Ingresos	0	1	2	3	4	5
Ahorro en Gas Propano		GTQ6,240.00	GTQ9,360.00	GTQ14,040.00	GTQ21,060.00	GTQ31,590.00
Ahorro en EE		GTQ501,273.36	GTQ536,362.50	GTQ573,907.87	GTQ614,081.42	GTQ657,067.12
Total de Ingresos	Q0.00	GTQ507,513.36	GTQ545,722.50	GTQ587,947.87	GTQ635,141.42	GTQ688,657.12
Egresos						
Costos Fijos		GTQ17,850.00	GTQ18,207.00	GTQ18,571.14	GTQ18,942.56	GTQ19,321.41
Costos Variables (Agua)		GTQ6.00	GTQ6.60	GTQ7.26	GTQ7.99	GTQ8.78
Venta Equipo		GTQ0.00	GTQ0.00	GTQ0.00	GTQ0.00	GTQ0.00
Depreciación Construcción		GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23
Depreciación Equipo		GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00
Total de Egresos		GTQ68,334.23	GTQ68,691.83	GTQ69,056.63	GTQ69,428.78	GTQ69,808.43
Utilidad antes Impuesto		GTQ439,179.13	GTQ477,030.66	GTQ518,891.24	GTQ565,712.64	GTQ618,848.69
Impuesto (15%)		GTQ65,876.87	GTQ71,554.60	GTQ77,833.69	GTQ84,856.90	GTQ92,827.30
Utilidad Neta		GTQ373,302.26	GTQ405,476.06	GTQ441,057.55	GTQ480,855.74	GTQ526,021.39
Depreciación Construcción		GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23
Utilidad Micro turbina y Compresor		GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00
Inversión Infraestructura	GTQ101,689.29					
Inversión Maquinaria	GTQ599,200.00					
Flujo de Caja	GTQ700,889.29	GTQ423,780.49	GTQ455,954.30	GTQ491,535.78	GTQ531,333.98	GTQ576,499.62

Tabla 137: Flujo de Caja para el año 6 al 10.

Ingresos	0	6	7	8	9	10
Ahorro en Gas Propano		GTQ47,385.00	GTQ71,077.50	GTQ106,616.25	GTQ159,924.38	GTQ239,886.56
Ahorro en EE		GTQ703,061.82	GTQ752,276.15	GTQ804,935.48	GTQ861,280.96	GTQ921,570.63
Total de Ingresos	Q0.00	GTQ750,446.82	GTQ823,353.65	GTQ911,551.73	GTQ1,021,205.33	GTQ1,161,457.19
Egresos						
Costos Fijos		GTQ19,707.84	GTQ20,102.00	GTQ20,504.04	GTQ20,914.12	GTQ21,332.40
Costos Variables (Agua)		GTQ9.66	GTQ10.63	GTQ11.69	GTQ12.86	GTQ14.15
Venta Equipo		GTQ0.00	GTQ0.00	GTQ0.00	GTQ0.00	GTQ0.00
Depreciación Construcción		GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23
Depreciación Equipo		GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00
Total de Egresos		GTQ70,195.74	GTQ70,590.86	GTQ70,993.96	GTQ71,405.21	GTQ71,824.78
Utilidad antes Impuesto		GTQ680,251.08	GTQ752,762.79	GTQ840,557.76	GTQ949,800.12	GTQ1,089,632.41
Impuesto (15%)		GTQ102,037.66	GTQ112,914.42	GTQ126,083.66	GTQ142,470.02	GTQ163,444.86
Utilidad Neta		GTQ578,213.42	GTQ639,848.37	GTQ714,474.10	GTQ807,330.10	GTQ926,187.55
Depreciación Construcción		GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23	GTQ2,542.23
Utilidad Micro turbina y Compresor		GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00	GTQ47,936.00
Inversión Infraestructura	GTQ101,689.29					
Inversión Maquinaria	GTQ599,200.00					
Flujo de Caja	GTQ700,889.29	GTQ628,691.65	GTQ690,326.60	GTQ764,952.33	GTQ857,808.33	GTQ976,665.78

4. FICHAS TÉCNICAS DEL EQUIPO PRINCIPAL

Ilustración 54: Ficha técnica – compresor de tornilla Kaeser SX5



COMPRESOR DE TORNILLO

Vista Frontal



- Marca: Kaeser
- Modelo: SX5
- Tipo Compresor: de Tornillo
- Componentes Principales:
 - 1 – Compresor de Tornillo Rotatorio
 - 2 – Secador de Fluido Refrigerado
 - 3 – Tanque de Recepción de Fluido
- Dimensiones:
 - Altura: 61 – 3/8 in
 - Ancho: 23 – 1/4 in
 - Profundidad: 42 – 3/4 in
- Precio: Q. 64,000.00

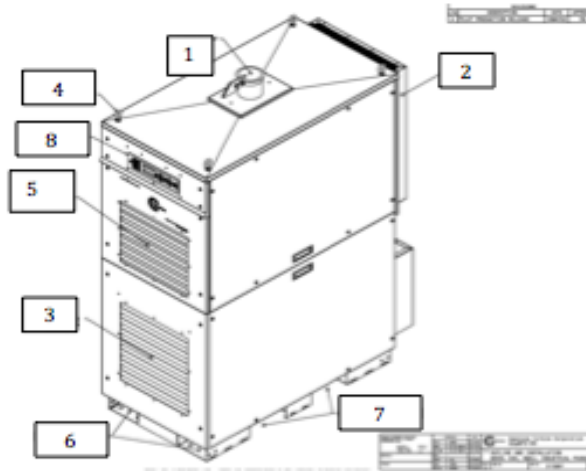
Consumo de agua: No aplica	Consumo de vapor: No aplica	Consumo eléctrico: NA	Rango de Presiones: 125 – 150 psig	Flujos de Entrada Permitidos: 17 – 21 cfm
-------------------------------	--------------------------------	--------------------------	---------------------------------------	--

Ilustración 55: Ficha técnica – microturbina Capstone C30



MICROTURBINA 30kWh


Isométrico de Microturbina



- Marca: Capstone Turbines
- Modelo: 30C
- Capacidad: 30kWh
- Dimensiones
 - Ancho: 30 in
 - Profundidad: 60 in
 - Altura: 70 in
- Componentes Principales
 - 1 - Escape del Motor
 - 2 - Protección Acústica
 - 3 - Ventilación de Electrónicos
 - 4 - Argolla de Suspensión
 - 5 - Entrada de Aire para el Motor
 - 6 - Aperturas para elevación traseras
 - 7 - Aperturas para elevación laterales
 - 8 - Panel de la Interface

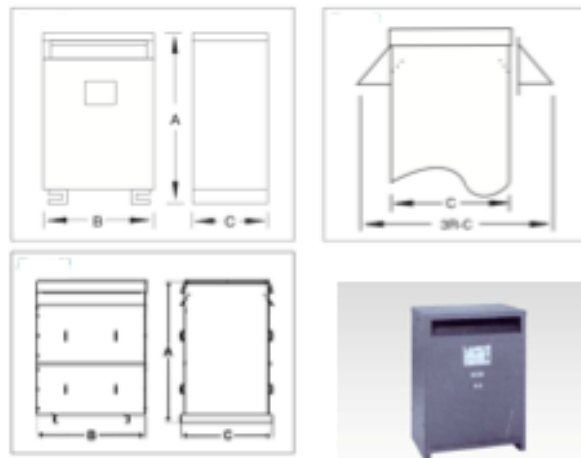
Consumo de agua:	Consumo de Biogás:	Consumo eléctrico:	Presión de Entrada Requerida:	Poder Calorífico Requerido:
No aplica	21m ³ /h	No Aplica	60 – 70 psig	12.1 – 32.1 MJ/m ³

Ilustración 56: Ficha técnica-Transformados Jefferson Electric trifásico seco 220/480 V



TRANSFORMADOR TIPO SECO 45kVa

Imagen del Equipo



- Marca: Jefferson Electric
- Capacidad: 45 kva
- Voltaje Primario: 480 V
- Voltaje Secundario: 240 V
- Dimensiones
 - A = 28 in
 - B = 25 in
 - C = 18.5 in
 - 3R-C = 25.5in

Consumo de agua:	Consumo de vapor:	Consumo eléctrico:	Consumo de aire a presión y vacío:	Eficiencia:
No aplica	No aplica	No Aplica	No aplica	90%

5. LAYOUT DEL SISTEMA

Ilustración 57: Distribución espacial en finca Rama Blanca

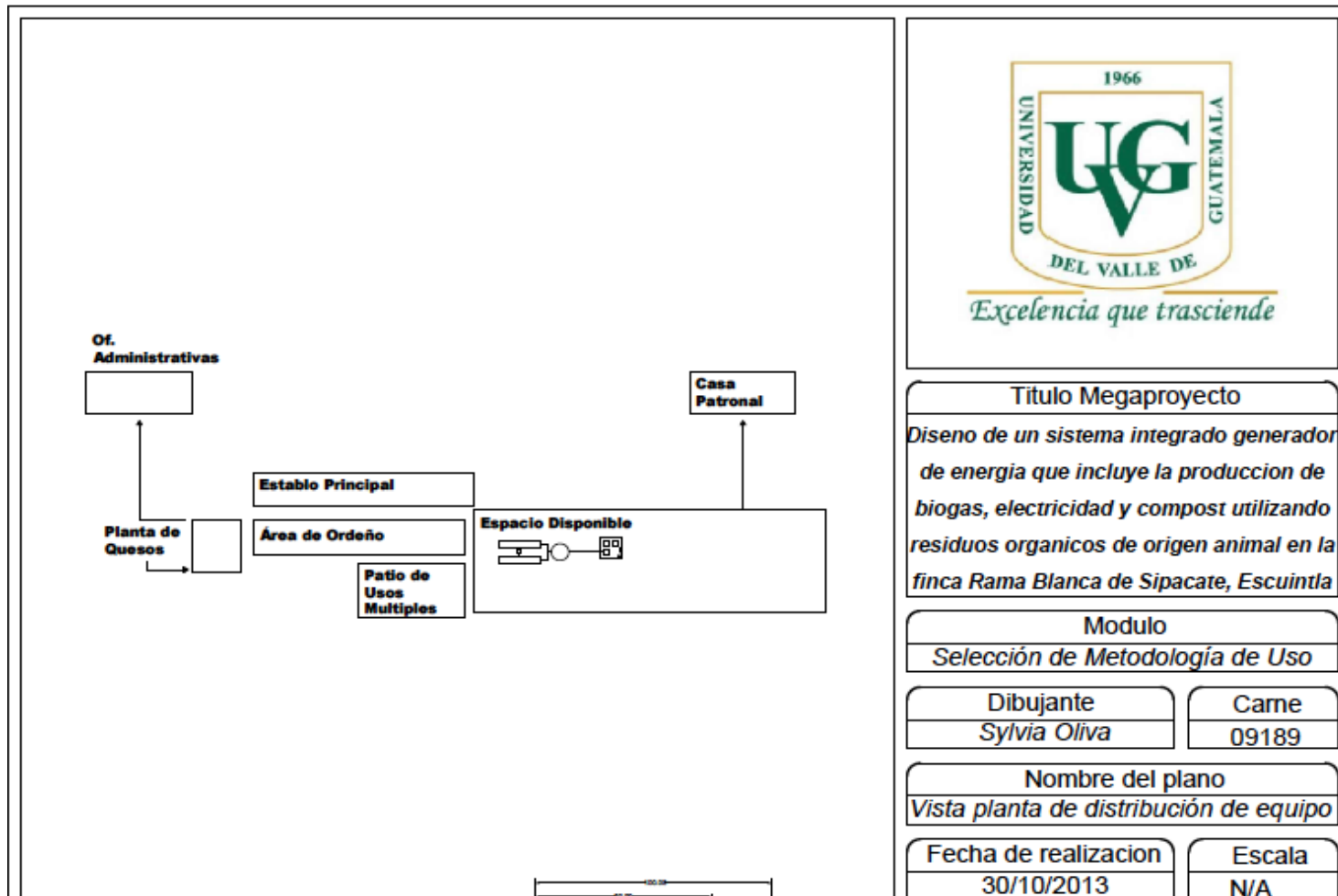
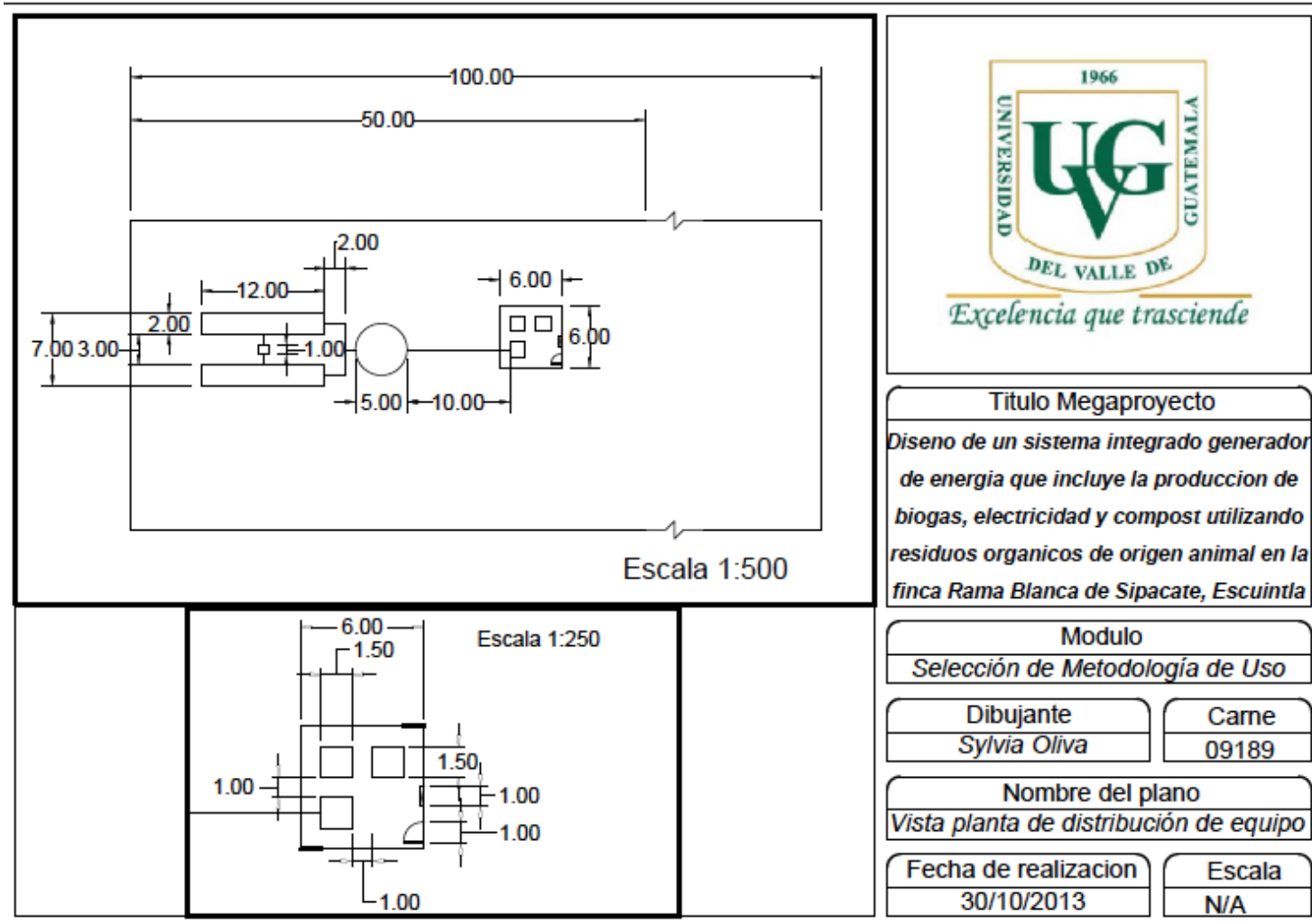


Ilustración 58: Distribución espacial equipo seleccionado para la cogeneración de energía eléctrica



6. Datos originales

- Consumo energético mensual de la Finca por tipo de combustible

Tabla 138: Consumo mensual energético de Finca Rama Blanca por tipo de combustible

Fuente	Consumo	Unidad
Gas LPG	45.36	kg
Combustible Diesel	9979.2	L
Energía Eléctrica	16254	kWh

- Factores de emisión por tipo de combustible

Tabla 139: Factores de emisión utilizados para el cálculo de Huella de CO₂

Fuente	Factor Emisión	Dimensión
Gas LPG	2.96	kg CO ₂ / kg GLP
Combustible Diesel	2.79	kg CO ₂ / L Diesel
Energía Eléctrica	0.267	kg CO ₂ / kWh

- Precio base de cada fuente de Energía

Tabla 140: Precios base utilizados para el cálculo del total de factura energética mensual.

Fuente	Precio Unitario (Q.)
Gas LPG	130 / 25 lb
Combustible Diesel	31.21/ galón
Energía Eléctrica	2.57 / kWh

- Relación de excretación del búfalo

Tabla 141: Relación peso/ excreta diaria para el cálculo de excremento disponible diario.

Peso espécimen	Excretación
100 Lb	65 Lb

- Composición volumétrica del biogás producido

Tabla 142: Composición volumétrica utilizada a lo largo del trabajo.

Compuesto	% Volumétrico
CH4	70.00%
CO2	28.00%
H2S	2.00%

- Capacidad de producción de biogás del biodigestor instalado

Tabla 143: Biogás disponible para utilización.

Unidad	Producción diaria	Producción mensual	Producción anual
kg CH4	320.28	9608.40	115300.80
kg Biogás	696.26	20887.83	250653.91
m ³ Biogás	600.22	18006.75	216080.96

7. Cálculos de muestra

- Volumen del biodigestor tipo taiwanés instalado en Finca Rama Blanca

$$V = \pi r^2 h$$

Este cálculo se realizó para obtener un volumen aproximado del biodigestor actual.

Ejemplo:

$$V = \pi * 0.9^2 * 22.6 = 57.51m^3$$

- Representación económica de gasto energético por tipo de combustible.

Para cada una de las fuentes de energía se buscó un precio de referencia para determinar el valor promedio de la factura energética mensual. Ejemplo: costo del gas propano.

$$\frac{25 \text{ lbs gas}}{1 \text{ tambo}} * \frac{4 \text{ tambos}}{1 \text{ mes}} * \frac{Q.130.00}{25 \text{ lbs}} = Q.520.00/\text{mes}$$

- Equivalente de biogás para cada tipo de combustible

Se utilizó este cálculo para determinar el equivalente volumétrico de biogás necesario para cubrir la demanda. Se usó un valor de 5300 kcal/m³ y se buscó el poder calorífico de todas las fuentes de energía. Ejemplo: Sustitución de Gas Propano por Biogás.

$$\frac{100 \text{ lbs}}{\text{mes}} * \frac{2.2 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} * \frac{0.56 \text{ m}^3}{1 \text{ kg}} * \frac{28,000 \text{ kcal}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{5300 \text{ kcal}} = 426 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

- Generación de excremento diaria en Finca Rama Blanca.

Relación de excremento establecida:

$$\frac{35 \text{ lbs excremento}}{100 \text{ lbs alimento}} = 0.65$$

Se asumió que las búfalas comen el 80% de la ingestión de un macho pues esta es la relación de peso entre el animal. Se realizó el cálculo para cada género.

$$88 \text{ búfalos macho} * \frac{100 \text{ lbs alimento}}{1 \text{ búfalo}} * 0.65 * \frac{1 \text{ kg}}{2.2 \text{ lbs}} * \frac{1 \text{ TM}}{1000 \text{ kg}} = 1.4 \text{ TM/día}$$

- Cálculos representantes para las especificaciones técnicas de Microturbina Capstone C30

Flujo volumétrico requerido:

$$\frac{457 \text{ MJ}}{1 \text{ h}} * \frac{1 * 10^6 \text{ J}}{1 \text{ MJ}} * \frac{1 \text{ kcal}}{4184 \text{ J}} * \frac{1 \text{ m}^3}{5300 \text{ kcal}} = 20.61 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

- Cálculos representantes para las especificaciones técnicas de Compresor Kaeser SX5
Conversión de flujo a cfm para cumplir con unidades manejadas en Kaeser

$$\frac{20.61 \text{ m}^3}{\text{h}} * \frac{3.28^3 \text{ ft}^3}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 12.12 \text{ cfm}$$

Determinación de caída de presión en el trayecto almacenamiento – compresor. (El detalle de este cálculo se puede observar en el trabajo de Aldo Rojas)

$$\frac{P_a - P_b}{\rho} + g(Z_a - Z_b) = H_f$$

Donde:

- $P_a - P_b$ = Caída de Presión (Pa)
- $Z_a - Z_b$ = Diferencia de alturas (m)
- g = Gravedad (9.8 m/s^2)
- ρ = Densidad del biogás (kg/m^3)
- H_f = Pérdidas por fricción (m^2/s^2)

Determinación de la caída de presión para el sistema de tuberías que va hacia la estufa (se realizó el mismo cálculo para el sistema de tuberías que se dirige a la turbina). Se despejó para ΔP en la ecuación, para poder determinar la caída de presión.

$$P_a - P_b = [H_f - g(Z_a - Z_b)] * \rho$$

$$P_a - P_b = [8,433.7 - (9.8)(7 - 0.2)] * 1.30 = 10,877.81 Pa = 10.87 kPa$$

Determinación de la presión al final del sistema de tuberías, la cual se realiza a partir de la caída de presión obtenida en el cálculo anterior, teniendo como presión inicial 400 kPa.

$$P_b = (400 - 10.87) kPa = 389.12 kPa$$

Este cálculo también se realizó para determinar la presión final del sistema de tuberías que va hacia la microturbina.

G. Módulo de compostaje

1. Cálculos de muestra

- Sumatoria de masa de materiales para mezcla inicial

Este cálculo se hizo para determinar la masa inicial de la mezcla de materiales inertes y tierra, estiércol de búfalo y residuos del biodigestor.

$$MasaTotalMezcla = MasaMaterialesInertes + MasaEstiércol + MasaResiduosBiodigestor$$

Ejemplo: Sumatoria de masa de materiales para el método de aireación:

$$7.41 \pm 0.01 kg + 1.70 \pm 0.01 kg + 1.70 \pm 0.01 kg = 10.81 \pm 0.02 kg$$

-Este cálculo se hizo también para determinar la masa inicial del método de lombricultura.

- Determinación de masa de pérdidas para el sistema de compostaje

Este cálculo se hizo para determinar la masa total perdida en cada uno de los sistemas de compostaje.

$$MasaPérdidas = MasaTotalMezcla - MasaHumus$$

Ejemplo: Determinación de masa de pérdidas para el método de aireación:

$$10.81 \pm 0.02 kg - 6.74 \pm 0.01 kg = 4.07 \pm 0.02 kg$$

-Este cálculo se hizo también para determinar la masa de pérdidas del método de lombricultura.

- Porcentaje de cambio (aumento o disminución) para el contenido de nutrientes.

Este cálculo se hizo para determinar cuál había sido el cambio en el contenido de cada uno de los nutrientes analizados en el laboratorio para compararlos entre cada uno de los métodos.

$$\text{PorcentajeDeCambio} = 1 - \frac{\text{ContenidoFinal}}{\text{ContenidoInicial}} \cdot 100$$

Ejemplo: Determinación de masa de pérdidas para el método de aireación:

$$\text{PorcentajeDeCambio} = -\left(1 - \frac{7.55}{8.96}\right) \cdot 100 = -16\%$$

-Este cálculo se hizo también para determinar el porcentaje de cambio para todos los nutrientes analizados.

- Rendimiento

Este cálculo se hizo para determinar el rendimiento para cada uno de los métodos de compostaje. .

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{MasaHumus}}{\text{MasaMezclaInicial}} \cdot 100$$

Ejemplo: Determinación de rendimiento para el método de aireación

$$\text{Rendimiento} = \frac{10.81 \pm 0.02 \text{ kg}}{6.74 \pm 0.01 \text{ kg}} \cdot 100 = 62 \pm 0.13\%$$

-Este cálculo se hizo también para determinar el rendimiento del método de lombricultura.

2. Análisis de error

- Incertidumbres para sumas y restas:

Este valor se calcula para determinar la propagación del error en valores que se suman o se restan.

$$s_y = \sqrt{s_a^2 + s_b^2 + \dots + s_n^2}$$

Los valores S dentro de la raíz cuadrada es la incertidumbre de cada medición y la Sy es la incertidumbre de la suma o resta de la operación.

Ejemplo: Incertidumbre para la suma de las masas para obtener la masa de la mezcla inicial.

$$S = \sqrt{(0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2} = 0.02 \text{ kg}$$

-Este proceso se utilizó para todas las incertidumbres generadas por sumas y restas.

- Incertidumbre para multiplicaciones y divisiones:

Este valor se calcula para determinar la propagación del error en valores que se multiplican o dividen.

$$s_y = y \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \dots + \left(\frac{s_n}{n}\right)^2}$$

Los valores S dentro de la raíz cuadrada es la incertidumbre de cada medición y está dividido entre el valor medido y la Sy es la incertidumbre de la multiplicación o división de la operación.

Ejemplo: Incertidumbre para la división de masas para obtener el rendimiento del método de aireación

$$S_F = 0.62 \sqrt{\left(\frac{0.02}{10.81}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{6.74}\right)^2} = 0.62 \pm 0.0013$$

-Este proceso se utilizó para todas las incertidumbres generadas por multiplicaciones y divisiones.

3. Ilustraciones

Ilustración 59 Montaje de pila compostera para ambos métodos



Ilustración 60 Pila de compostaje luego de 13 días de descomposición



Ilustración 61 Área de compostaje por el método de aireación dentro de la pila



Ilustración 62 Área de compostaje por el método de lombricultura dentro de la pila



Ilustración 63 Humus obtenido por el método de compostaje por aireación



Ilustración 64 Humus obtenido por el método de compostaje por lombricultura



Ilustración 65 Análisis de laboratorio hecho a la muestra obtenida de los residuos del biodigestor piloto

AGROLABORATORIO
CERES
CIENCIA Y PRACTICA

2ª. Avenida 5-54 zona 9
Guatemala
Teléfono (502) 2339 4440
E-mail: labceresguate@gmail.com

INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO DE SUELOS

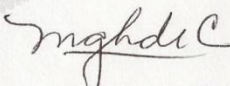
INTERESADO: ISABEL EIZAGUIRRE/ UVG	FECHA: 12-09-2013
FINCA:	CULTIVO:
MUNICIPIO:	DEPTO:

NUTRIENTES		RANGOS ADECUADOS
N-total (g/kg)	8,96 E	3.0-6.0
P Mehlich (mg/kg)	220,33 E	15-20
K (mg/kg)	626,25 E	160-230
Ca (mg/kg)	348,75 D	800-2200
Mg (mg/kg)	157,50 A	85-180
Fe (mg/kg)	25,00 D	30-50
Cu (mg/kg)	0,90 D	2 A 10
Mn (mg/kg)	4,85 D	5 A 10
Zn (mg/kg)	4,65 A	3 A 10
OTRAS CARACTERISTICAS		
pH (agua - 1:2.5)	6,42 E	5.8-6.3
C.e. (dS/m)	1,63 A	MENOR DE 2
M.O. (%)	3,19 D	4 A 10
C.I.C. Efectiva (mmolc/dm3)	47,38 D	75 A 150
Acidez (mmolc/dm3)	1,00 D	10 A 25
Al (mmolc/dm3)	0,50 D	3 A 5
RELACIONES CATIONICAS		
Ca/Mg	1,34 D	4.00-5.00/1
Ca/K	1,09 D	5.00-20.00/1
Mg/K	0,81 D	3.00-10.00/1
Ca+Mg/K	1,90 D	3.00-25.00/1
100K/Ca+Mg+K	92,84 E	4.00-25.00/1
COMPLEJO ADSORBENTE		
Ca (%)	36,73 D	65.00-80.00
Mg (%)	27,36 E	15.00-20.00
K (%)	33,80 E	3.00-7.00
Al (%)	1,06 D	5.00-10.00
H (%)	1,06 D	10.00-15.00

SIMBOLOGIA: D = Deficiente; A = Adecuado; E = Exceso

Referencia: 13-1670

NOTA: Los análisis se realizaron en la muestra tal y como se recibió.



Ing. Agr. Margarita H. de Colocho
Especialista en Análisis de Suelos
y Fisiología Vegetal

USE RACIONALMENTE EL SUELO, HÁGALE ANÁLISIS, CONSERVEMOS LA NATURALEZA

Ilustración 66 Análisis de laboratorio hecho a la muestra de humus obtenido por medio del método de compostaje por aireación

AGROLABORATORIO
CERES
CIENCIA Y PRACTICA

2ª. Avenida 5-54 zona 9
Guatemala
Teléfono (502) 2339 4440
E-mail: labceresguate@gmail.com

INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS

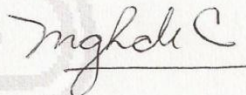
INTERESADO: ISABEL EIZAGUIRRE/ UVG FECHA: 01-10-2013

IDENTIFICACION: AEREACIÓN

NUTRIENTES	
N-total (g/kg)	2,59
P (g/kg)	1,56
K (g/kg)	2,01
Ca (g/kg)	2,37
Mg (g/kg)	0,60
S (g/kg)	1,12
Na (g/kg)	0,05
Fe (mg/kg)	2800,00
Cu (mg/kg)	13,50
Mn (mg/kg)	159,50
Zn (mg/kg)	21,00
B (mg/kg)	13,00
OTRAS CARACTERISTICAS	
pH (agua - 1:2.5)	7,20
C.e. (dS/m)	0,16
M.O. (g/kg)	21,11

Referencia 13-1779

El presente Informe representa unicamente las características analizadas en la muestra enviada al laboratorio.



Ing. Agr. Margarita H. de Cotocho
Especialista en Análisis de Suelos
y Fisiología Vegetal

USE RACIONALMENTE EL SUELO, HÁGALE ANÁLISIS, CONSERVEMOS LA NATURALEZA

Ilustración 67 Análisis de laboratorio hecho a la muestra de humus obtenido por medio del compostaje por lombricultura

AGROLABORATORIO
CERES
CIENCIA Y PRACTICA

2ª. Avenida 5-54 zona 9
Guatemala
Teléfono (502) 2339 4440
E-mail: labceresguate@gmail.com

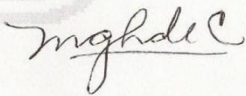
INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS

INTERESADO: ISABEL EIZAGUIRRE/ UVG	FECHA: 01-10-2013
IDENTIFICACION: LOMBRIZ	

NUTRIENTES	
N-total (g/kg)	7,55
P (g/kg)	1,80
K (g/kg)	3,09
Ca (g/kg)	6,45
Mg (g/kg)	1,08
S (g/kg)	1,53
Na (g/kg)	0,05
Fe (mg/kg)	2950,00
Cu (mg/kg)	16,50
Mn (mg/kg)	164,00
Zn (mg/kg)	55,50
B (mg/kg)	21,72
OTRAS CARACTERISTICAS	
pH (agua - 1:2.5)	8,13
C.e. (dS/m)	0,27
M.O. (g/kg)	34,68

Referencia 13-1778

El presente Informe representa unicamente las características analizadas en la muestra enviada al laboratorio.

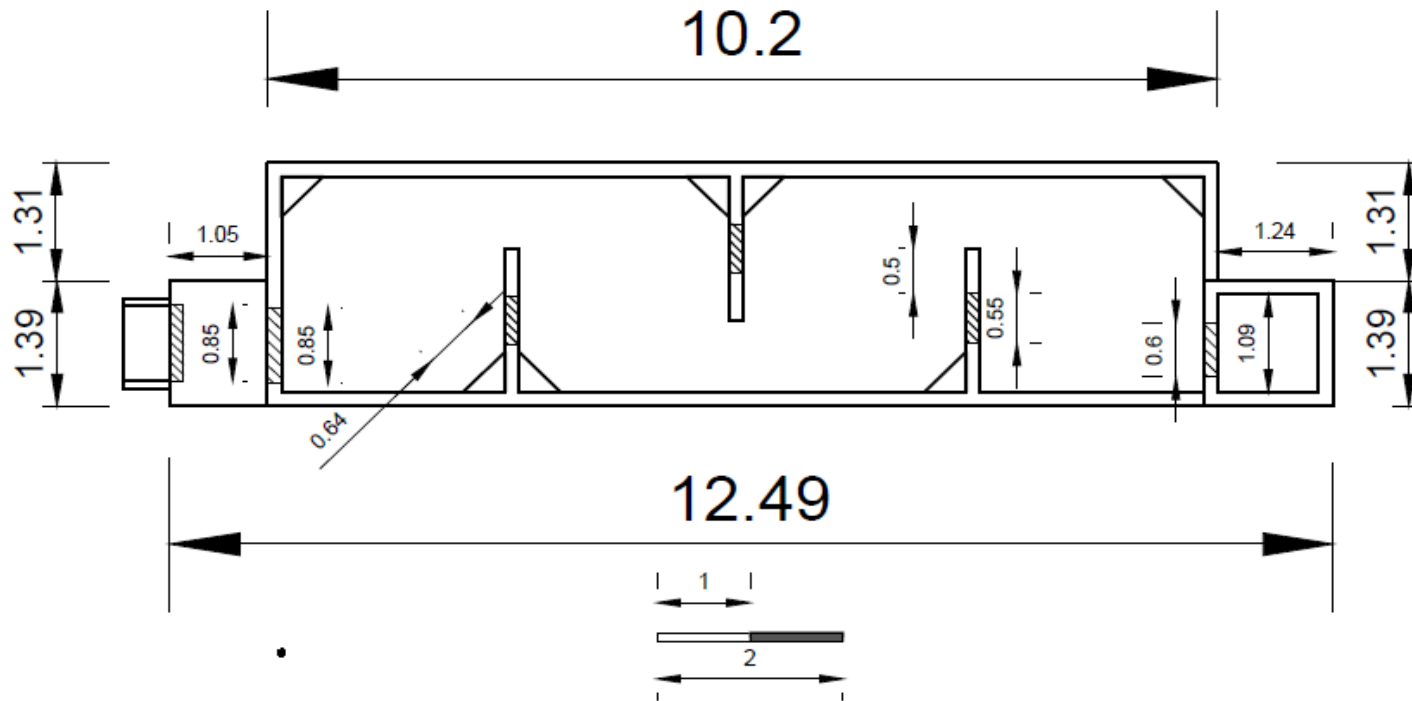


Ing. Agr. Margarita H. de Cotocho
Especialista en Análisis de Suelos
y Fisiología Vegetal

USE RACIONALMENTE EL SUELO, HÁGALE ANÁLISIS, CONSERVEMOS LA NATURALEZA

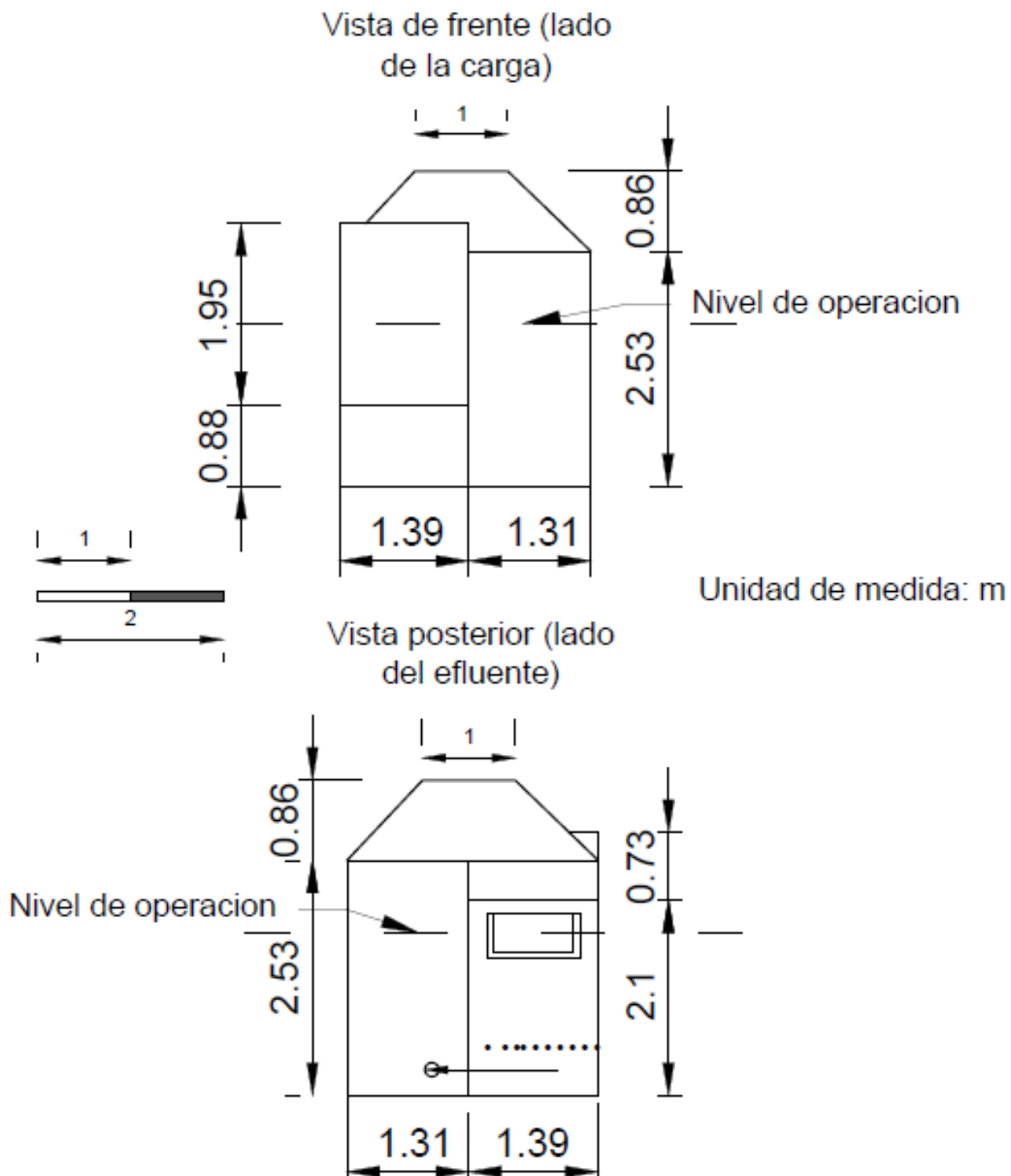
A. Diagramas

Ilustración 68: Vista planta del biodigestor

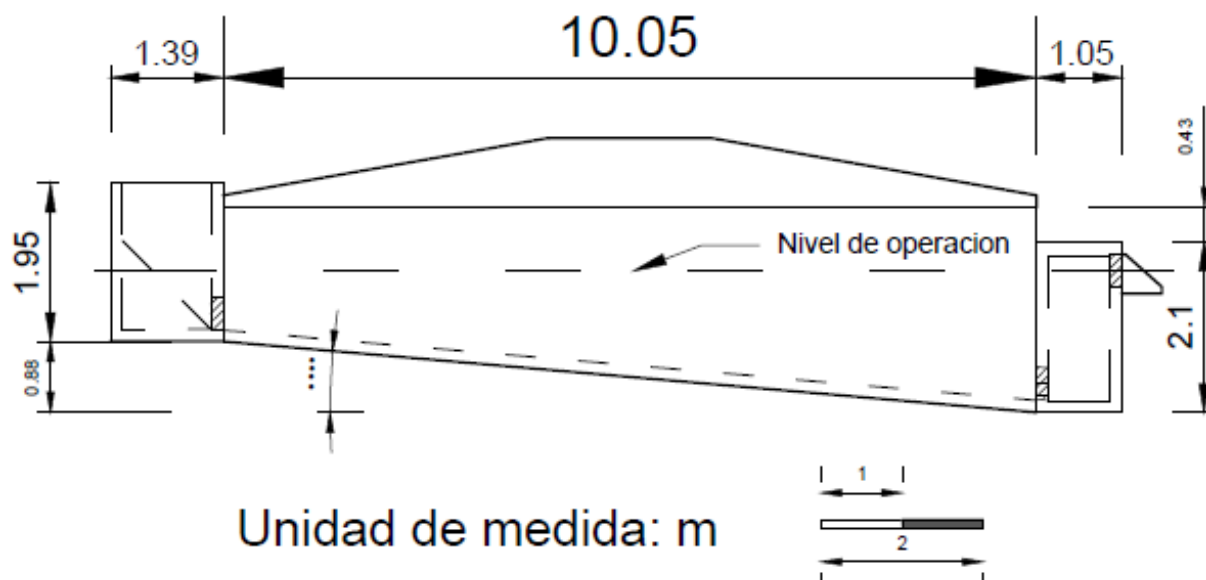


Unidad de medida: m

Ilustración 69: Vistas de elevación frontal y posterior del biodigestor



Elevacion lateral del biodigestor



Elevacion lateral del biodigestor

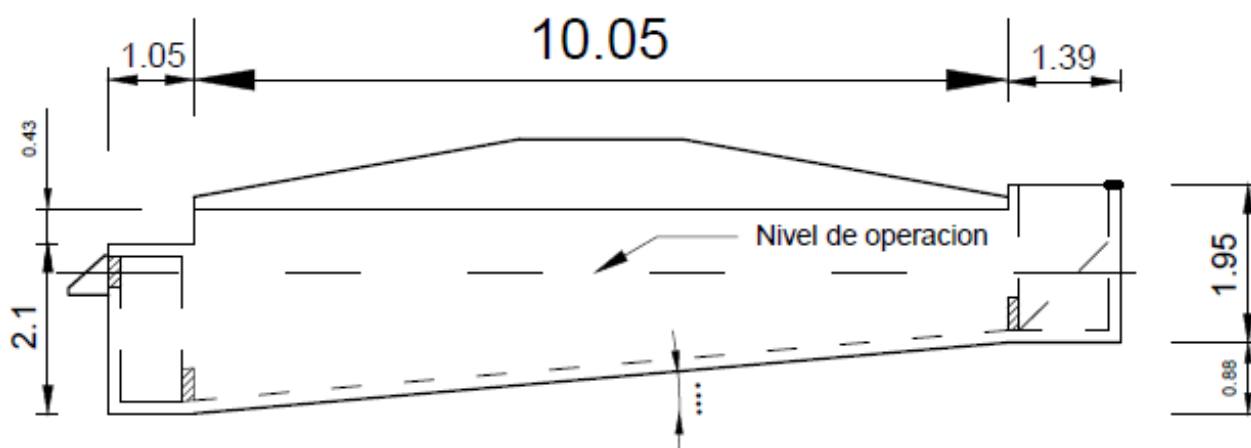


Ilustración 71: Isométrico del biodigestor

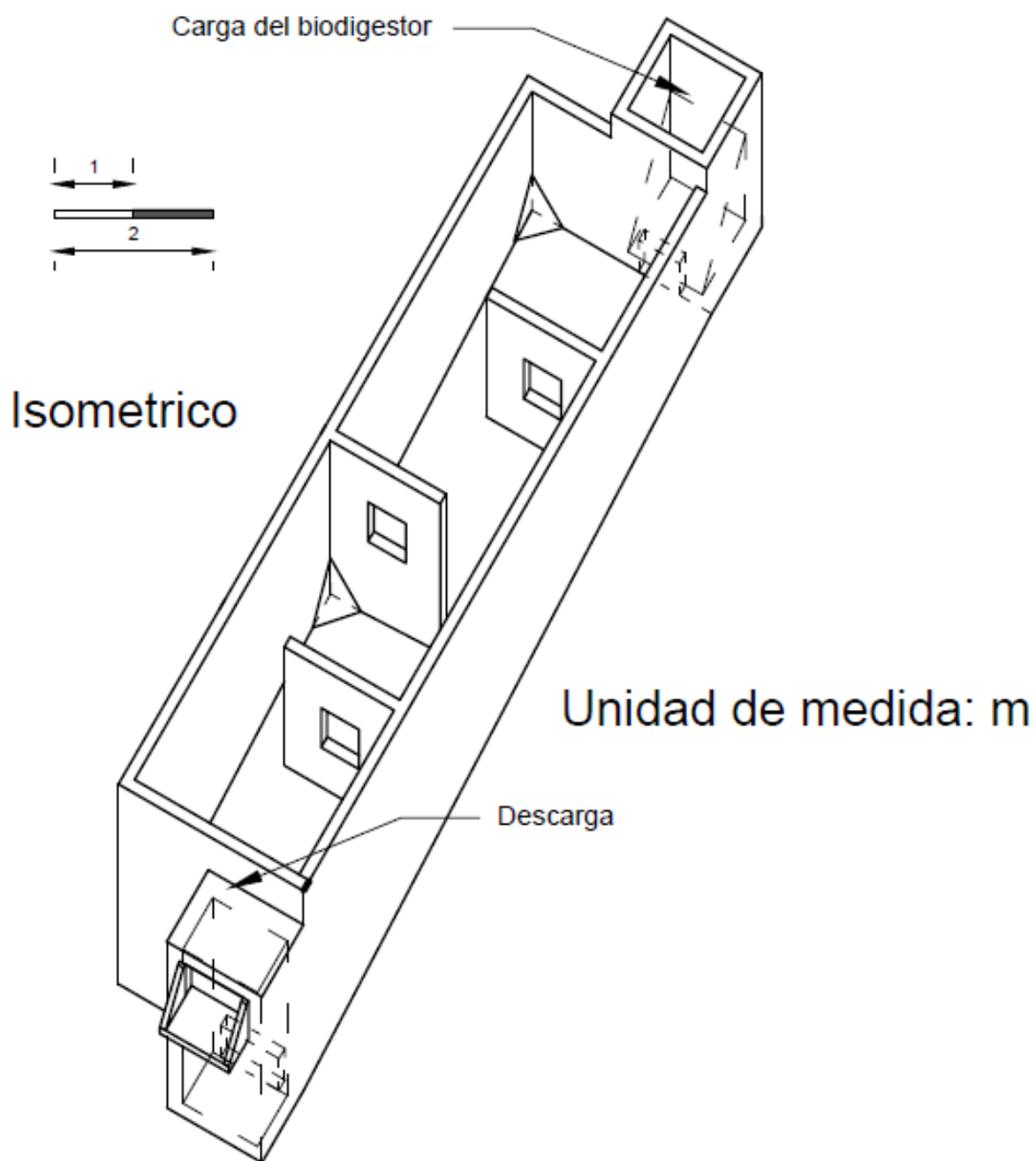


Ilustración 72: Diagrama de Flujo del sistema de purificación y extracción de biogás.

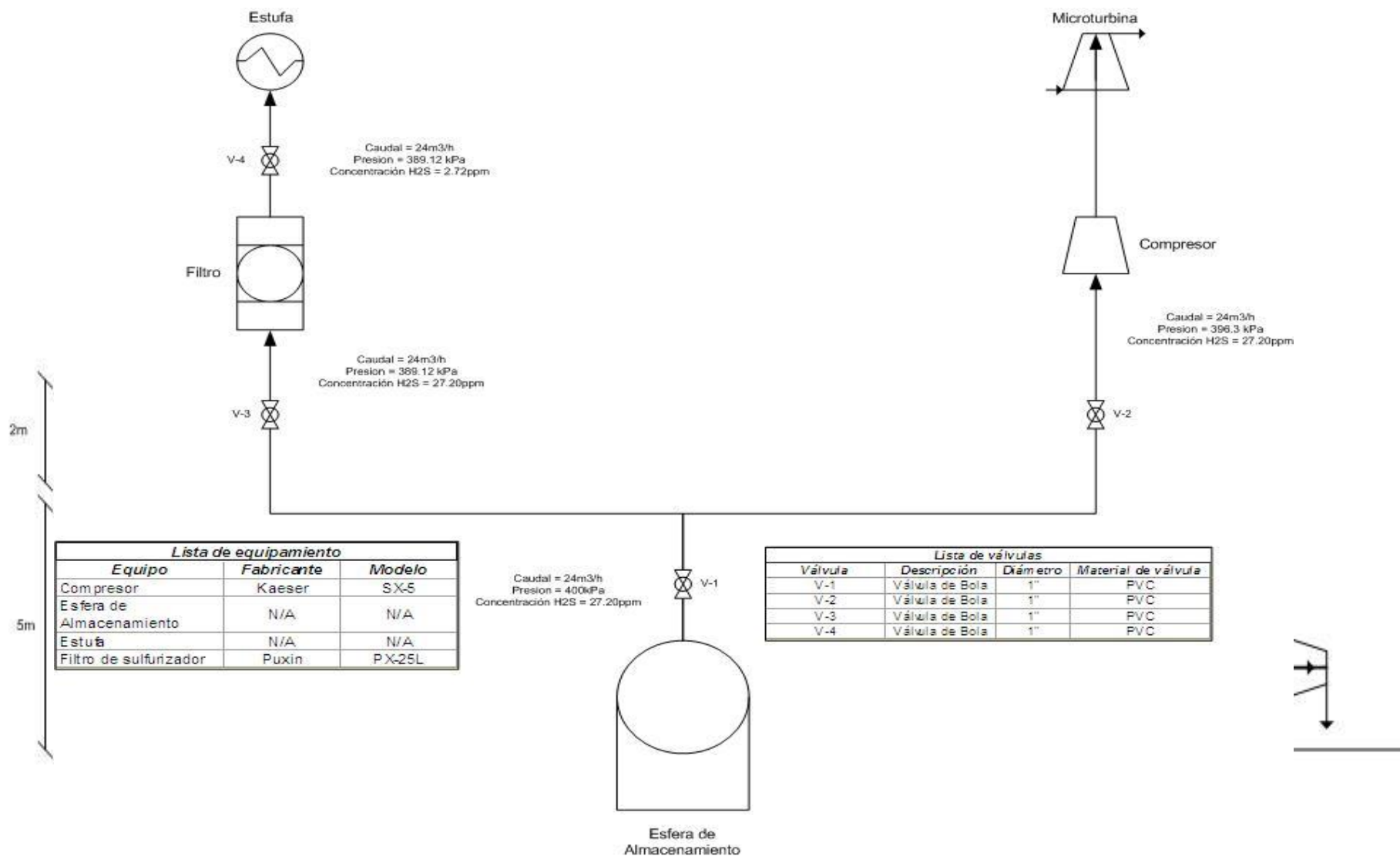


Ilustración 73: Distribución espacial del sistema de tuberías que va hacia la turbina.

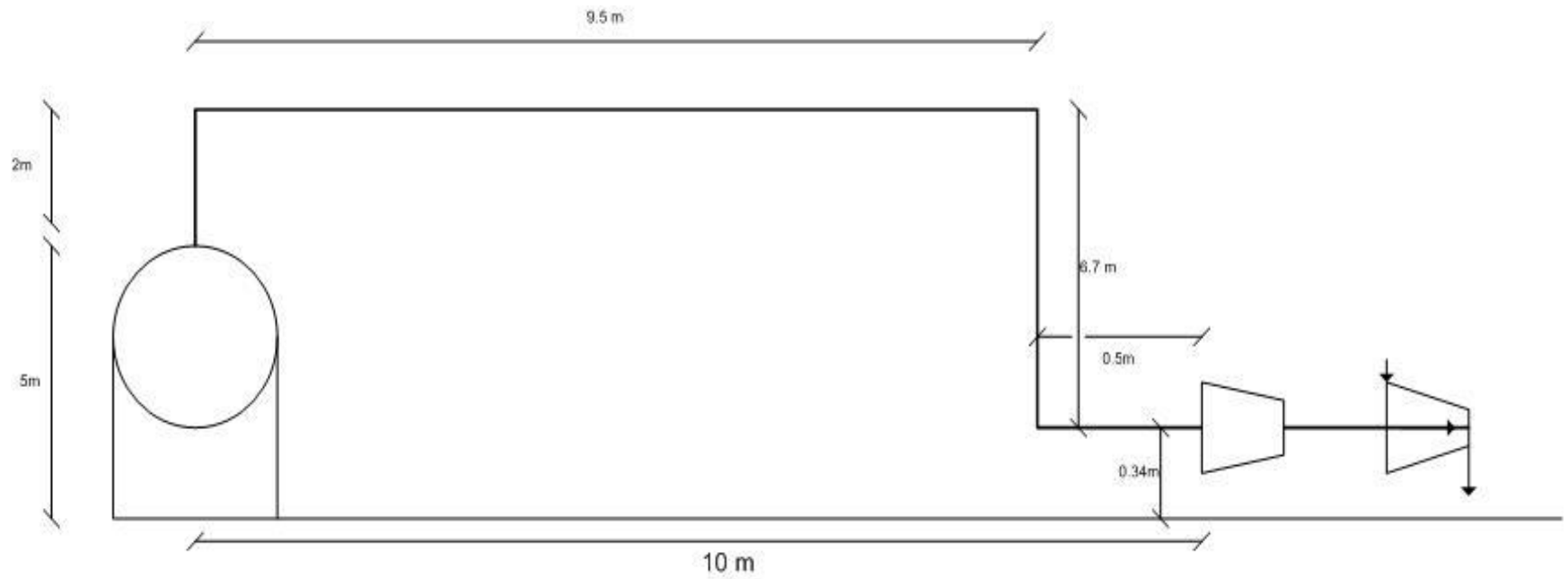


Ilustración 74: Diagrama de proceso para la generación de biogás

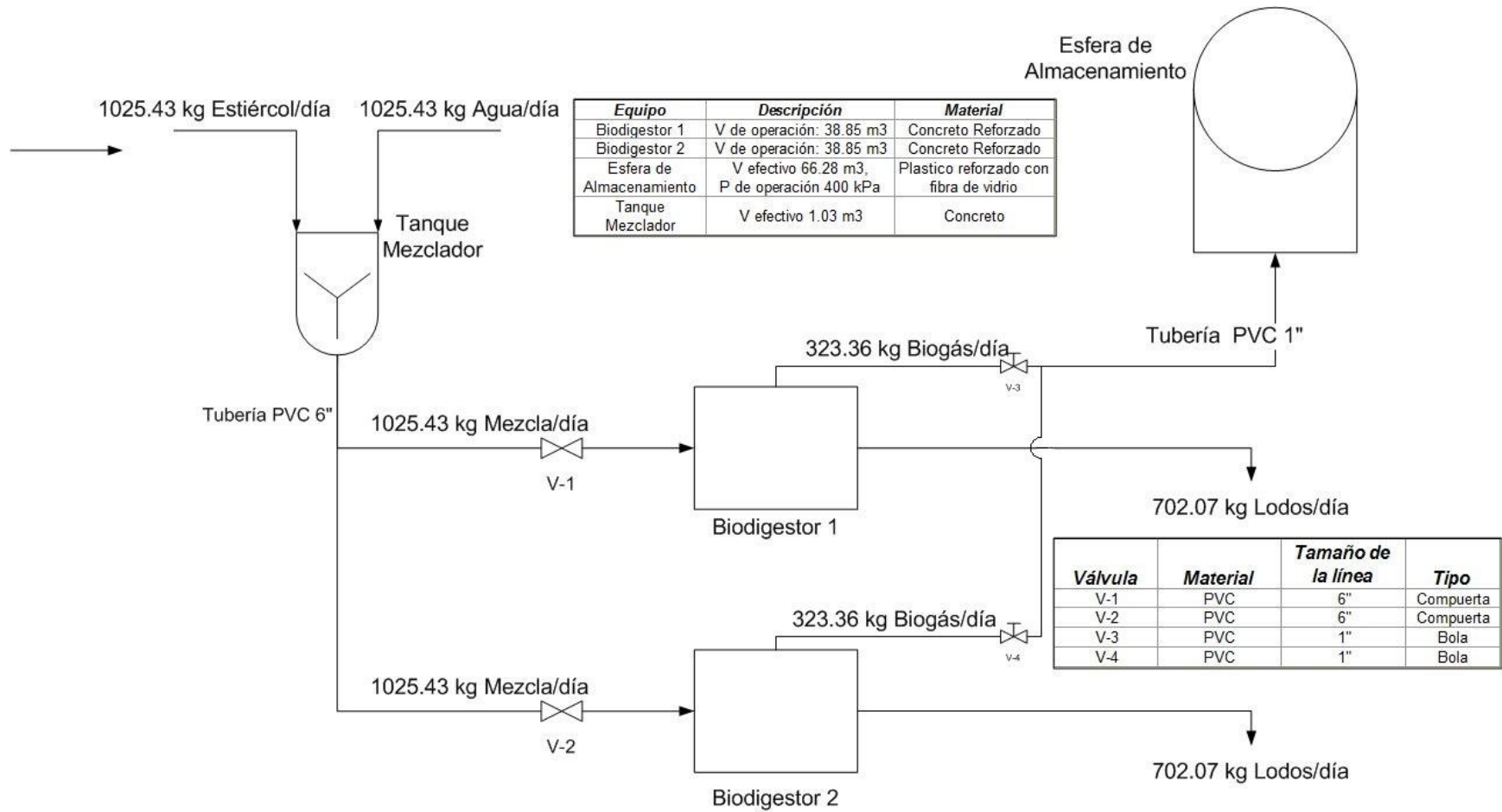


Ilustración 76: Características de compresor Kaeser® SX5.



COMPRESOR DE TORNILLO

Vista Frontal

- **Marca:** Kaeser
- **Modelo:** SX5
- **Tipo Compresor:** de Tornillo
- **Componentes Principales:**
 - 1 – Compresor de Tornillo Rotatorio
 - 2 – Secador de Fluido Refrigerado
 - 3 – Tanque de Recepción de Fluido
- **Dimensiones:**
 - Altura: 61 – 3/8 in
 - Ancho: 23 – 1/4 in
 - Profundidad: 42 – 3/4 in
- **Precio:** Q. 64,000.00

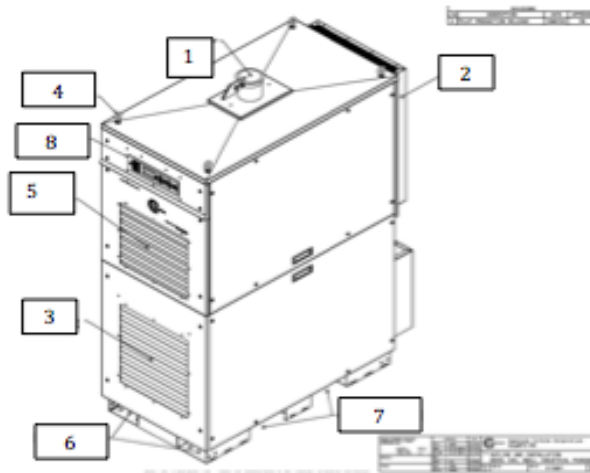
Consumo de agua:	Consumo de vapor:	Consumo eléctrico:	Rango de Presiones:	Flujos de Entrada Permitidos:
No aplica	No aplica	NA	125 – 150 psig	17 – 21 cfm

Ilustración 77: Especificaciones Microturbina Capstone C30.



MICROTURBINA 30kWh

Isométrico de Microturbina



- Marca: Capstone Turbines
- Modelo: 30C
- Capacidad: 30kWh
- Dimensiones
 - Ancho: 30 in
 - Profundidad: 60 in
 - Altura: 70 in
- Componentes Principales
 - 1 - Escape del Motor
 - 2 - Protección Acústica
 - 3 - Ventilación de Electrónicos
 - 4 - Argolla de Suspensión
 - 5 - Entrada de Aire para el Motor
 - 6 - Aperturas para elevación traseras
 - 7 - Aperturas para elevación laterales
 - 8 - Panel de la Interface

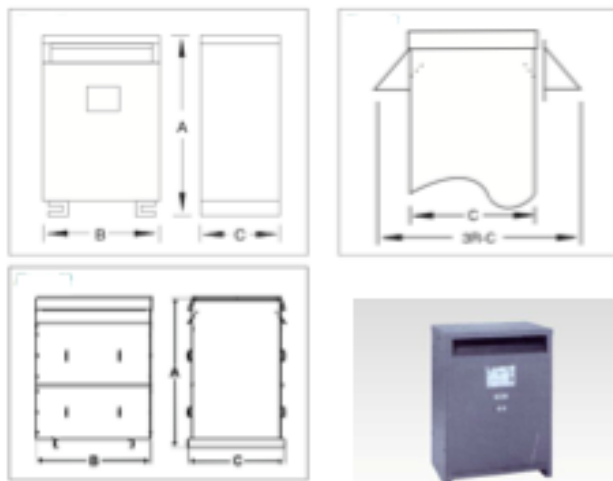
Consumo de agua: No aplica	Consumo de Biogás: 21m ³ /h	Consumo eléctrico: No Aplica	Presión de Entrada Requerida: 60 – 70 psig	Poder Calorífico Requerido: 12.1 – 32.1 MJ/m ³
-------------------------------	---	---------------------------------	--	--

Ilustración 78: Especificaciones Transformador Electric trifásico seco 220/480



TRANSFORMADOR TIPO SECO 45kVa

Imagen del Equipo



- Marca: Jefferson Electric
- Capacidad: 45 kva
- Voltaje Primario: 480 V
- Voltaje Secundario: 240 V
- Dimensiones
 - A = 28 in
 - B = 25 in
 - C = 18.5 in
 - 3R-C = 25.5in

Consumo de agua:	Consumo de vapor:	Consumo eléctrico:	Consumo de aire a presión y vacío:	Eficiencia:
No aplica	No aplica	No Aplica	No aplica	90%

XIII. GLOSARIO

1. Absorción: Operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido.
2. Acetogénesis: Transformación de los ácidos grasos volátiles de la acidogénesis en acetato. Existen dos tipos de bacterias que realizan la deshidrogenación acetogénica, las bacterias acetogénicas reductoras obligadas de protones y las bacterias fermentativas acidogénicas. Ambos tipos de bacterias producen H_2 , CO_2 y acetato.
3. Acidogénesis: Segunda etapa de la metanogénesis en la que sucede el metabolismo de los productos obtenidos de la hidrólisis, a través de diferentes rutas metabólicas. Se obtienen ácidos orgánicos (acetato, butirato, lactato, propionato, entre otros) y alcoholes, además de amoníaco, hidrógeno y dióxido de carbono.
4. Adsorción: Operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa a través de sólido que se mantiene en un lecho fijo.
5. Biodigestor: Equipo en el que se lleva a cabo el proceso de digestión de la materia orgánica. Al biodigestor se le alimenta la biomasa que se desea degradar y se recibe biogás y un efluente de materia orgánica tratada.
6. Biogás: Gas producido por digestión anaeróbica de los desechos orgánicos. Generalmente está compuesto de 40-70% en volumen de metano y el resto de dióxido de carbono, con trazas de sulfuro de hidrógeno.
7. Cogeneración (CHP): Es el procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil.
8. Corrosión: Deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico. Es una reacción química de óxido-reducción.
9. Desechos Sólidos: Residuos que genera el ser humano por sus actividades diarias y no son líquidos ni gaseosos.
10. Deshumidificación: Es una operación que consiste en reducir la cantidad de agua presente en una corriente gaseosa.
11. Desulfurización: Operación que consiste en la eliminación de compuestos de azufre contenidos en gases combustibles.
12. Digestión anaeróbica: Es una serie de procesos en los cuales microorganismos descomponen material biodegradable en la ausencia de oxígeno.
13. Efluente: Conjunto de las aguas sobrantes, residuales y superficiales evacuadas a través de la salida del biodigestor.
14. Gas licuado de petróleo: Mezcla de gases licuados presentes en el gas natural o disuelto en petróleo. Generalmente, es una mezcla de propano y butano.

15. Hato: Se refiere al conjunto de cabezas de ganado, como bueyes, vacas, etc. Puede también referirse a la hacienda de campo destinada a la cría de toda clase de dicho ganado.
16. Hidrólisis: Primera etapa de la metanogénesis. Consta de la ruptura de las macromoléculas orgánicas presentes en la biomasa del biodigestor, hasta subunidades pequeñas que pueden atravesar la pared celular. La hidrólisis se produce por la acción de exoenzimas secretadas por las bacterias acidogénicas.
17. Impacto ambiental: Cambio adverso o beneficioso en el medio ambiente, como resultado total o parcial de las actividades de un individuo u organización.
18. Mercaptano: Compuesto que contiene un grupo funcional formado por un átomo de azufre y un átomo de hidrógeno.
19. Metanogénesis: Paso final en la descomposición anaerobia de la materia orgánica. En esta etapa se convierte en metano a la mayor parte de la energía química contenida en el sustrato, mediante la acción de las Archaea metanogénicas. El sustrato utilizado para la formación de metano fundamentalmente es H₂, CO₂, acetato, metanol, monoaminas, diaminas y triaminas.
20. Microturbinas de gas: Turbinas de combustión que trabajan con potencias de hasta 1500 kW. Éstas funcionan con diversos combustibles, gas natural, propano, biogás, etc.
21. Potencial de producción de biogás: Es la relación entre el volumen total de biogás producido durante la fermentación y la masa de sólidos volátiles que produjeron esa cantidad de biogás.
22. Registro: Documento que presenta resultados obtenidos o proporciona evidencia de actividades desempeñadas. Por lo general se refiere a un formato ya utilizado en el que se han anotado valores medidos u observaciones.
23. Sólidos totales: Son todos los sólidos presentes en una sustancia. En el caso de los desechos se refiere a los sólidos volátiles y a los sólidos inorgánicos.
24. Sólidos volátiles: Son los sólidos presentes en la materia orgánica que las bacterias pueden descomponer.
25. Suero láctico: Derivado de la industria láctea, subproducto de la elaboración de quesos. Líquido remanente luego de la separación de la caseína de la leche por coagulación. El suero láctico comprende entre el 80 y el 90% del volumen total de leche procesada para la fabricación de queso, y posee cerca del 50% de los nutrientes presentes en la leche
26. Temperaturas mesofílicas: Rango medio de temperaturas de operación en biodigestores. Comprende temperaturas entre 15°C y 45°C.
27. Temperaturas Psicofílicas: Rango de temperaturas bajas de operación en biodigestores. Comprende temperaturas menores a 15°C.

28. Temperaturas Termofílicas: Rango de temperaturas altas de operación en biodigestores. Comprende temperaturas entre 50°C y 80°C.
29. Torre Empacada: Equipo utilizado para el contacto continuo de un líquido y de un gas. Pueden trabajar a flujo en contracorriente o a flujo en paralelo. Se caracterizan por ser columnas verticales que se han llenado con empaques para aumentar el área superficial de contacto.
30. Zeolita: Mineral aluminosilicato microporoso. Destacan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse. Suelen ser utilizados y comercializados como adsorbentes.