

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y
Biotechnológicas
Escuela Profesional de Ingeniería Biotechnológica



**POTENCIAL ENERGÉTICO DEL SUSTRATO HIDROLIZADO DE BROZA
DE PÁPRIKA (*Capsicum annuum*) Y ESTIÉRCOL BOVINO MEDIANTE
DIGESTIÓN ANAEROBIA METANOGÉNICA EN UN SISTEMA HPTC-RM**

Tesis Presentada por los Bachilleres en
Ingeniería Biotechnológica:
Medina Carpio, Oscar Christian
Postigo Collado, Jaffeth Abel

Para optar el título profesional de:
Ingeniero Biotecnólogo

Asesor:
Dr. Dávila Del Carpio, Gonzalo

AREQUIPA - PERÚ

2018

UNIVERSIDAD CATOLICA SANTA MARIA
Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquím
y Biotecnológicas
Programa Profesional de Ingeniería Biotecnológica

diente N°. 13015197

N° Trámite en Fac. 186-2013
Fecha Recep. Fac. 27-03-2013

FORMATO UNICO PARA TRAMITACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

DE: **MEDINA CARPIO, Oscar Christian**
POSTIGO COLLADO, Jaffeth Abel

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO BIOTECNOLOGO

"POTENCIAL BIOENERGETICO DE LA METANOGENESIS DEL DESBROCE DE PAPIKA HIDROLIZADO Y CALIDAD BIOFERTILIZANTE DEL SUBPRODUCTO OBTENIDO EN UN DIGESTOR DE DOS ETAPAS DE ALTA PERFORMANCE A TEMPERATURA CONTROLADA DE MODELO ROTTALER (RM) HPTC"

DICTAMINADORES: 1) *Mgter. Francisco Roque Rodríguez* 2) *Blgo. Carlos Eitel Iván Paz Aliaga*

DICTAMEN DE PLAN: Señor Decano de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, en atención a su designación, el Jurado Dictaminador del Plan de Tesis presentado por la recurrente, cumplimos con informar que se ha revisado, formulado las observaciones y corregido, sugiriendo cambiar el título a: **"POTENCIAL BIOENERGETICO DE LA METANOGENESIS DEL DESBROCE DE PAPIKA HIDROLIZADO Y CALIDAD BIOFERTILIZANTE DEL LIQUIDO OBTENIDO EN UN DIGESTOR DE DOS ETAPAS DE ALTA PERFORMANCE A TEMPERATURA CONTROLADA DE MODELO ROTTALER (RM) HPTC"** luego de lo cual consideramos que se encuentra APTO para continuar con el trámite de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad.

Atentamente


FIRMAS: 

FECHA 15-03-2013

ASESOR: *Dr. Gonzalo Dávila del Carpio*

DICTAMEN ASESORÍA: Señor Decano de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, en atención a su designación como asesor del trabajo de investigación presentado por la recurrente, tengo a bien informar que luego de verificado el cumplimiento de los objetivos y la redacción del informe con los resultados, discusión y conclusiones correspondientes y debiendo cambiar el título a., considero que el presente trabajo está APTO para continuar con el trámite, en conformidad al Reglamento de Grados y Títulos de nuestra Facultad

Atentamente

FIRMA 

FECHA 06-06-2018

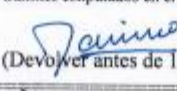
DICTAMINADORES BORRADOR DE TESIS:

- 1) *Blgo. Carlos Eitel Iván Paz Aliaga* 3) *Mgter. Jaime Barreda del Carpio*
2) *Dr. Francisco Roque Rodríguez*

DICTAMEN FINAL: Señor Decano de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, atendiendo a su designación como Dictaminadores del presente Borrador de Tesis sugiriendo se cambie el título a: **"POTENCIAL ENERGETICO DEL SUSTRATO HIDROLIZADO DE BROZA DE PAPIKA (*Capsicum annum*) Y ESTIERCOL BOVINO MEDIANTE DIGESTION ANAEROBIA METANOGENICA EN UN SISTEMA HPTC-RM"**, y luego de hechas las observaciones y correcciones pertinentes, cumpliendo con las exigencias mínimas establecidas para un trabajo de investigación de Tesis profesional, por lo que consideramos APTO para continuar con los trámites estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad.

Atentamente

FIRMA 

(Devo)  ver antes de 15 días hábiles) FECHA 30.10.2018

JURADOS: PRESIDENTE
VOCAL
SECRETARIO

Blgo. Carlos Eitel Iván Paz Aliaga
Dr. Francisco Roque Rodríguez
Mgter. Jaime Barreda del Carpio

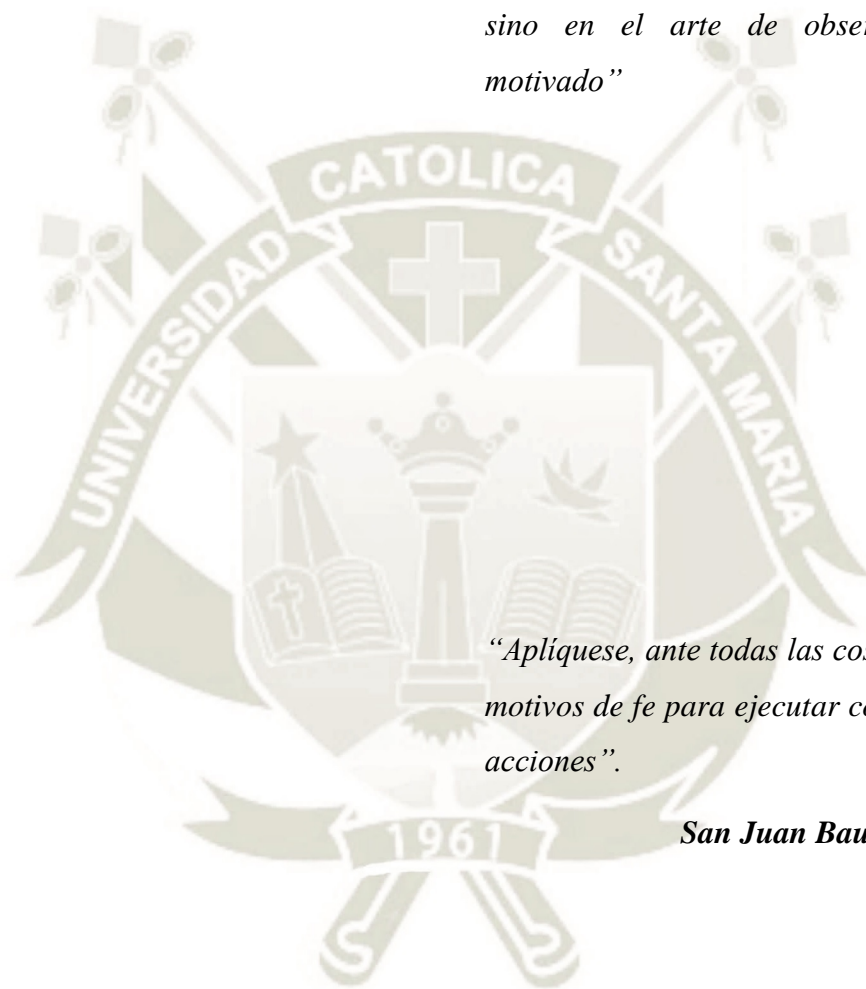
FECHA 12/11/18 HORA 19:00 hs LOCAL SOM Facultad

FIRMA DEL DECANO 

FECHA 05/11/18

*“La destreza no se encuentra en la motivación
sino en el arte de observar y ejecutar
motivado”*

Carimbell

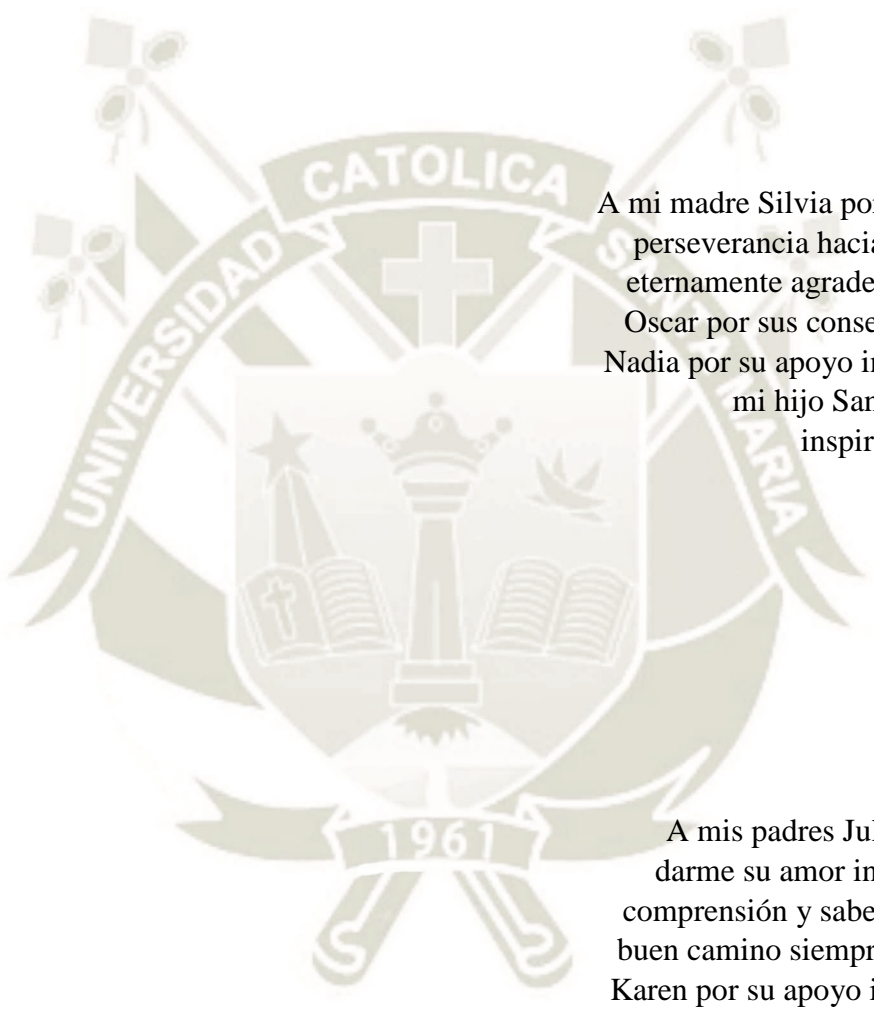


*“Aplíquese, ante todas las cosas, a regirse por
motivos de fe para ejecutar con perfección sus
acciones”.*

San Juan Bautista De La Salle

DEDICATORIA

A Dios sobre todas las cosas



A mi madre Silvia por su gran amor y perseverancia hacia mi persona a ti eternamente agradecido, a mi padre Oscar por sus consejos, a mi esposa Nadia por su apoyo incondicional y a mi hijo Santiago por ser mi inspiración y mi todo.

Oscar Medina

A mis padres Julio y Karelia por darme su amor infinito, consejos, comprensión y saberme guiar por el buen camino siempre; a mi hermana Karen por su apoyo incondicional en todo momento.

Jaffeth Postigo

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica de Santa María y a FINCYT por el financiamiento del proyecto de investigación.

A nuestros padres, por ser los principales promotores de nuestros sueños, a ellos eternamente agradecidos.

A nuestros hermanos, por su cariño y apoyo incondicional.

A nuestro asesor, el Dr. Gonzalo Dávila Del Carpio, por todos los conocimientos impartidos para lograr la ejecución exitosa de nuestro trabajo.

A los miembros del jurado: al Dr. Javier Roque, al Blgo. Iván Paz, y al Mgter. Jaime Barreda, por sus aportes en la mejora del desempeño de nuestro trabajo de investigación y clarificar en nuestro esquema nuestra metodología utilizada.

A Ing. Walter Danner de Snowleopard y al PhD. Norbert Nägele de Kepler por el aporte tecnológico, También a Godofredo Peña y a Irina Salazar por hacernos parte de proyecto Fdel cual se obtuvo financiamiento para la ejecución de nuestro trabajo de investigación, del mismo modo a la empresa Agrícola Pampa Baja por apoyarnos con los recursos para el desarrollo del proyecto.

A la Ing. Pamela Manrique por su apoyo desinteresado en el diseño experimental y procesamiento de información sin su aporte nuestro trabajo no tendría la calidad buscada.

A las personas de nuestro equipo de investigación *INGbioproductores* que nos apoyaron en momentos complicados durante la ejecución del proyecto de investigación.

A mis amigos y familiares por estar con nosotros y que nos apoyaron desinteresadamente a lo largo de este proyecto.

RESUMEN

En la etapa de cosecha, la actividad de desbroce en cultivos de ají páprika (*Capsicum annuum L. var longum*) deja broza que es quemada provocando contaminación ambiental, el presente trabajo de investigación demuestra que es posible utilizar la broza de páprika (BP) y estiércol bovino (EB) para la elaboración de un sustrato hidrolizado (SH) como insumo para la generación de biogás mediada por digestión anaerobia (DA) en un sistema Rottaler Modell (RM) de alta eficiencia y temperatura controlada (HPTC) (High Performance and Temperature Controlled), para ello se caracterizó el material biológico con el objetivo de elaborar un sustrato (S) pretratado mediante digestión hidrolítica (DH) utilizando un diseño central compuesto, el S elaborado con agregados en estado de materia fresca (MF) a partir de los insumos caracterizados presentó una relación sustrato/inóculo (S) menor a 0.5 valor sugerido para evitar errores en los ensayos acorde a la norma alemana Verein Deutscher Ingenieure (VDI 4630).

En los ensayos de metanización se utilizó lodos de siembra (LS) y efluente recirculante (ER) de la planta HPTC-RM del fundo de la Universidad Católica de Santa María (UCSM) ubicado en Majes, los ensayos se realizaron en reactores Batch Lab en un volumen de 500cm³ a una carga del 20% con un contenido de sólidos totales (ST) del 10%, el volumen de biogás se midió en un sistema MEDPOST 2015 y el metano (CH₄) se cuantificó con un equipo Multitec 540 de Sewerin, a partir de los

resultados optimizados se obtuvieron los parámetros reales de 5.60 para el %BP(ST) y 85.40 para el %ER generando 116.89 Ncm³ de biogás con una calidad del 75.60 % Vol de (CH₄) en un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 17.38 días, el resultado estadístico fue un R-cuadrado ajustado igual a 72.12% (P<0.05) para la optimización de CH₄ utilizando Statgraphics Centurión, la validación se realizó en un volumen de 5L generando 1232.37 Ncm³ de biogás con una calidad de 75.78% Vol de CH₄ en un TRH de 17 días, en conclusión se obtuvo un potencial energético (PE) de 9603.69 Kj/h con un rendimiento en relación a la metanización de los sólidos volátiles (SV) del SH de 10.0280 Ncm³ de CH₄/g*SV_{SH} utilizando como modelo de estudio el escalamiento para la instalación de una planta HPTC-RM de 30m³ en el Fundo Pampa Baja pudiendo generar ingresos por la venta del fertilizante líquido y aprovechamiento del biogás, el análisis con indicadores económicos mostraron un Valor Actual Neto (VAN) de S/.8,437.55, una tasa interna de retorno (TIR) del 10% y un periodo de recuperación de la inversión (PRI) de 5 meses y 13 días a partir de una tasa del 0.08% con un flujo de caja proyectado a 6 meses.

PALABRAS CLAVE:

Broza de páprika, digestión anaerobia, HPTC-RM, sustrato hidrolizado, efluente recirculante, lodo de siembra, optimización, metanización y biogás.

ABSTRACT

In the harvesting stage, the clearing activity in pepper crops (*Capsicum annum* L. var longum) is no longer burned causing environmental contamination, the present research shows that it is possible to use paprika (BP) and bovine manure (EB) for the elaboration of a hydrolyzed substrate (SH) as an input for the generation of biogas mediated by anaerobic digestion (DA) in a Rottaler Modell System (RM) with High Efficiency and Temperature Controlled Temperature (HPTC), for this the biological material was characterized to elaborate a pretreated substrate (S) by hydrolytic digestion (DH) using a central composite design, the S elaborated with aggregates of fresh matter state (MF), based on the characterized inputs, have a substrate/inoculum ratio (S) less than 0.5 suggested value to avoid errors in the tests according to the German Standard Verein Deutscher Ingenieure (VDI 4630).

Seeding sludge (LS) and recirculating effluent (ER) were used in methanization tests, from HPTC-RM plant of the Universidad Católica de Santa María (UCSM) farm, located in Majes. The assays were carried out in Batch Lab reactors, in a volume of 500cm³ at a load of 20%, with a 10% content of total solids (ST). The biogas volume was measured in MEDPOST 2015 system and the methane (CH₄) was quantified in a Sewerin Multitec 540 equipment. From optimized results we obtained real parameters: 5.6 from BP% (ST) and 85.4 from ER%, generating 116.89 Ncm³ of biogas with 75.6 Vol% (CH₄) in 17.38 days of hydraulic retention time (TRH). The adjusted R-squared for the CH₄ optimization was 72.12 (p<0.05), using Statgraphics

Centurion. The validation was performed in a volume of 5L generating 1232.37 Ncm³ of biogas with a quality of 75.78% Vol of CH₄ in a 17 day of TRH. In conclusion, we obtained the energy potential (PE): 9603.69 Kj/h with a relation to the methanization of the volatile solids (SV) of the SH of 10.0280 Ncm³ of CH₄/g*SV_{SH}, using as study model the scaling for the installation of a 30m³ HPTC-RM plant in the Fundo Pampa Baja, being able to generate income from the sale of the liquid fertilizer and the use of the biogas. The economic indicator analysis showed a Net Present Value (VAN) of S/ 8,437.55, an internal rate of return (TIR) of 10% and a period of recovery of investment (PRI) of 5 months and 13 days from a rate of 0.08% with a cash flow projected at 6 months.

KEYWORDS: Paprika broza, anaerobic digestion, HPTC-RM, hydrolyzed substrate, recirculating effluent, seeding sludge, optimization, methanization, and biogas.

INTRODUCCIÓN

Por años, ha sido de vital importancia evitar el agotamiento de los suelos aprovechando los residuos orgánicos provenientes de la actividad agropecuaria y su transformación como recurso de retorno de biomasa y nutrientes, sin embargo las malas prácticas como la quema de broza son utilizadas a falta de opciones rentables más amigables con el medio ambiente, algunos agricultores que cuentan con estiércol de vaca, de cerdo, cuy, entre otros, optan por la digestión anaerobia (DA) para aprovechar el digestato como fertilizante, sin embargo las tecnologías de bajo costo utilizadas son muy ineficientes y requieren de altos esfuerzos en mantenimiento, del mismo modo la digestión no es total generando malos olores y digeridos de baja biodisponibilidad para las plantas.

El sistema de alta eficiencia y de temperatura controlada (HPTC)-RM con pretratamiento hidrolítico ofrece a los agricultores una digestión anaeróbica (DA) completa del sustrato (S) mediada por los consorcios de microorganismo acidogénicos e hidrolíticos, luego el sustrato hidrolizado (SH) es metanizado por los consorcios acetogénicos y metanogénicos obteniendo efluentes digeridos completamente degradados sin malos olores y biodisponibles para las plantas, del mismo modo el sistema está diseñado para la producción de biogás a partir de biomasa de digestión compleja, este biogás es utilizado para satisfacer las necesidades energéticas de la planta ya que esta requiere de temperaturas de 50°C para la etapa de hidrolización y 37°C para la etapa de metanización, por otro lado el sistema Rotaller Modell (RM) permite que el digerido líquido no utilizado en fertilización sea recirculado ahorrando agua.

La evolución de los ensayos para determinar las proporciones en relación con la elaboración de SH permite mejorar el desempeño de la planta debido a que con bajos costos es posible determinar el potencial energético (PE) de la biomasa disponible para la generación de biogás y metano (CH₄), la norma VDI 4630 sugiere ensayos para el escalamiento y su respectiva validación, del mismo modo la relación que debe tener el S entre el lodo de siembra (LS) para evitar errores en la fermentación, también sugiere un formato para la recolección de datos y fórmulas para su interpretación en

estado seco y normalizado, la presente investigación desarrolló un reactor Batch Lab y un sistema de medición de biogás para la cuantificación de CH_4 denominado gasómetro MEDPOST 2015.

La optimización de los resultados utilizando un diseño central compuesto aporta en la mejora del desempeño de la biodigestión, ya que a diferencia de la identificación de parámetros el diseño para la optimización relaciona las variables y analiza su interacción entre las mismas, permite hacer un barrido completo entre los valores mínimos y máximos designados de las variables independientes. Investigaciones previas han demostrado que la optimización de parámetros reduce tiempo y dinero debido a que se utilizan menos ensayos en un solo lote de evaluación.

Los resultados obtenidos acorde a la norma VDI 4630 fueron utilizados en la presente investigación para determinar el PE de una planta HPTC-RM, el PE se obtiene al determinar los potenciales de sustrato disponible (PSD), de Combustible Generado (PCG), producción factible (PPF), técnico energético (PTE) y económico implementable (PEI), en resumen, el PE se refiere a la producción neta de biogás acorde a la viabilidad económica del proyecto evaluado mediante indicadores económicos.

El presente trabajo de investigación se utilizó las variables independientes de concentración de sustrato (S) y efluente recirculante (ER) para identificar las variables dependientes óptimas de generación de biogás y CH_4 en un tiempo de retención hidráulico (TRH) con el objetivo de determinar el PE de un SH elaborado a partir de broza de paprika (BP) y estiercol bovino (EB) para el escalamiento de un sistema HPTC-RM, se utilizó como modelo al fundo Pampa Baja para la proyeccion de la investigacion mediante su evaluacion con indicadores economicos de valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y periodo de recuperacion de la inversion (PRI).

INDICE

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
INTRODUCCIÓN	VII
INDICE	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
INDICE DE FIGURAS	XVIII
LISTA DE ECUACIONES	XXI
LISTA DE ABREVIATURAS BÁSICAS	XXII
CAPITULO I	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. JUSTIFICACIÓN	1
1.2. HIPÓTESIS.....	2
1.3. OBJETIVOS	2
1.3.1. Objetivos General.....	2
1.3.2. Objetivos específicos	2

1.4. VARIABLES E INDICADORES.....	3
CAPÍTULO II	5
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. El Biogás	5
2.1.1. La bioquímica en la obtención del biogás.....	6
2.1.2. Tecnologías para la producción de biogás	9
2.1.3. Lodos de siembra	14
2.1.4. Métodos de Cuantificación	17
2.1.5. La Trayectoria Tecnológica del biogás	27
2.2. Pretratamientos.....	30
2.2.1. Clasificación previa al tratamiento.....	30
2.2.2. Pretratamientos Físicos	31
2.2.3. Pretratamientos Digestivos	32
2.3. Sistema HPTC-RM	32
2.3.1. Rottaler Model	32
2.3.2. Sistema HPTC.....	34
2.4. Biomasa.....	38
2.4.1. Potencial energético de la biomasa	38
2.4.2. Disponibilidad de biomasa para metanización.....	40
2.5. La broza de páprika.....	44
2.5.1. Broza de páprika	44

2.6.	El estiércol bobino como biomasa	49
2.6.1.	El estiércol bovino.....	49
2.6.2.	Producción de leche y el estiércol bovino.....	50
2.7.	Indicadores económicos de implementación	51
2.7.1.	Retorno de la inversión (PRI)	51
2.7.2.	Valor actual neto (VAN).....	51
2.7.3.	Tasa interna de retorno (TIR).....	52
CAPÍTULO III.....		53
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....		53
3.1.	CAMPO DE VERIFICACIÓN	53
3.1.1.	Lugar de ejecución	53
3.1.2.	Ubicación espacial	53
3.2.	MATERIALES	53
3.2.1.	Material biológico	53
3.2.2.	Materiales de laboratorio.....	54
3.3.	MÉTODOS	54
3.3.1.	Recolección y tratamiento de la materia prima.....	54
3.3.2.	Pretratamiento de la materia prima.	55
3.3.3.	Caracterización fisicoquímica de la materia prima.....	56
3.3.4.	Elaboración de sustrato hidrolizado (SH)	57
3.3.5.	Metanización de sustrato hidrolizado.....	64

3.3.6. Optimización de parámetros para la obtención de biogás y metano	66
3.3.7. Determinación de Potencial Energético	67
CAPÍTULO IV	71
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
4.1. Materia prima	71
4.2. Materia prima caracterizada	71
4.3. Sustrato hidrolizado	75
4.3.1. Parámetros para la formulación de sustrato hidrolizado	75
4.3.2. Hidrolización del sustrato	78
4.4. Biogás y CH ₄ generado mediante optimización	79
4.4.1. Optimización de biogás	80
4.4.2. Optimización del Tiempo de retención hidráulico del S hidrolizado	86
4.4.3. Optimización de la generación de CH ₄	90
4.4.4. Optimización múltiples respuestas	95
4.5. Potencial energético	96
4.5.1. Potencial de Sustrato Disponible (PSD)	96
4.5.2. Potencial del Combustible Generado (PCG)	97
4.5.3. Potencial de Producción Factible (PPF)	101
4.5.4. Potencial Técnico Energético (PTE)	102
4.5.5. Potencial Económico Implementable (PEI)	104

CONCLUSIONES.....	106
RECOMENDACIONES.....	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
ANEXOS	115
Ensayos de caracterización.....	116
Tablas de proporciones.....	121
Ensayos de combustión.....	123
Tests de ensayos.....	124
Tablas de estadísticas.....	146
Tablas de potenciales	147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables definidas a nivel operacional y conceptual.....	3
Tabla 2. Métodos de cuantificación volumétrico de biogás y metano CH ₄	24
Tabla 3. Métodos de cuantificación manométrico y cromatográfico de biogás y metano CH ₄	25
Tabla 4. Proceso biológico en múltiples estadios.	36
Tabla 5. Comparación de los diferentes requisitos de las bacterias de hidrólisis y las bacterias productoras de metano.	37
Tabla 6. Factores climáticos para el cultivo de páprika	47
Tabla 7. Designación de proporciones porcentuales en los ensayos de Hidrolización y Metanización.....	57
Tabla 8. Niveles de variables de BP y ER para el diseño factorial correspondiente a la optimización de la producción de biogás y metano (CH ₄).....	58
Tabla 9. Característica de lodos de digeridos y sustratos representativos.	73
Tabla 10. Caracterización fisicoquímica del material orgánico y biológico.....	74
Tabla 11. Diseño central compuesto correspondiente a la optimización en la producción de biogás y metano (CH ₄).	75
Tabla 12. Variables porcentuales para la determinación de las proporciones del CS y CL en el Hidro Lab.	76
Tabla 13. Proporciones de materia fresca (MF) agregadas de contenido sólido y contenido líquido en los ensayos Hidrolítico.....	77
Tabla 14. Resultados de volumen de biogás y concentración de CH ₄ en dos etapas. 80	
Tabla 15. Análisis de varianza para el modelo completo de volumen de biogás correspondiente a la optimización de producción en dos etapas.....	81

Tabla 16. Valores de Broza de Páprika (BP) y Efluente Recirculante (ER) para la optimización de volumen de biogás correspondiente a la producción en dos etapas.	86
Tabla 17. Análisis de varianza para el modelo completo de TRH en un sistema HPTC-RM.	87
Tabla 18. Optimización de los valores de TRH óptimos a temperatura mesófila (37°C)	90
Tabla 19. Análisis de varianza para el modelo completo de volumen de biogás correspondiente a la optimización de producción en dos etapas.	93
Tabla 20. Valores de Broza de Páprika y Temperatura para la optimización de tiempo correspondiente a la producción en dos etapas.	95
Tabla 21. Optimización múltiple para % de metano, volumen de biogás y tiempo correspondiente a la producción en dos etapas.	96
Tabla 22. Potencial de Biomasa Disponible (PBD) de Broza de Páprika (BP) y Estiércol Bovino (EB) en estado fresco.	97
Tabla 23. Recolección de información de los sistemas Batch Piloto 5L.	98
Tabla 24. Rendimiento de producción de biogás en base a g de SV.	98
Tabla 25. Producción de Biogás en base a ST y SV.	100
Tabla 26. Resultados del potencial de producción factible (PPF).	102
Tabla 27. Poder calorífico del sustrato hidrolizado en base a SV.	102
Tabla 28. Referencias de escalamiento.	103
Tabla 29. Potencial Técnico Energético (PTE) y Potencial Energético (PE) de la planta HPTC-RM Fundo Pampa Baja.	104
Tabla 30. Proporciones de contenido de sólidos CS y contenido líquido CL en los reactores Hidro Lab.	121

Tabla 31. Evaluación de viabilidad metanogénica mediante la relación inóculo – sustrato (I/S).....	122
Tabla 32. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M1.....	124
Tabla 33. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M2.....	125
Tabla 34. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M3.....	126
Tabla 35. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M4.....	127
Tabla 36. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M5.....	128
Tabla 37. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M6.....	129
Tabla 38. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M7.....	130
Tabla 39. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M8.....	131
Tabla 40. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M9.....	132
Tabla 41. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M10.....	133
Tabla 42. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M11.....	134
Tabla 43. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH ₄ M1.....	135
Tabla 44. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH ₄ M2.....	136
Tabla 45. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH ₄ M3.....	137
Tabla 46. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH ₄ M4.....	138
Tabla 47. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH ₄ M5.....	139
Tabla 48. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH ₄ M6.....	140
Tabla 49. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH ₄ M7.....	141
Tabla 50. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH ₄ M8.....	142

Tabla 51. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH ₄ M9.....	143
Tabla 52. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH ₄ M10.....	144
Tabla 53. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH ₄ M11.....	145
Tabla 54. Análisis de varianza para el modelo completo de volumen de biogás correspondiente a la optimización de producción en dos etapas.....	146
Tabla 55. Diagnóstico de disponibilidad de Broza de Páprika (BP).....	146
Tabla 56. Diagnóstico promedio de disponibilidad de Broza de Páprika	147
Tabla 57. Diagnóstico de disponibilidad de Estiércol Bovino (Estado húmedo)	147
Tabla 58. Diagnóstico de lodo de siembra seleccionado.	148
Tabla 59. Diagnóstico de la Calidad de biogás generado por el BDG en estado seco y normalizado.....	148
Tabla 60. Rendimiento del sustrato en los ensayos a escala laboratorio	149
Tabla 61. Resultados de caracterización de biogás escalado a 5 litros.....	150
Tabla 62. Parámetros de Normalización	150
Tabla 63. Presión atmosférica durante mediciones.....	151
Tabla 64. Cuadro diferencias entre el gas natural y el GLP.....	152
Tabla 65. Costeo Construcción de planta de Biodigestión de alta eficiencia.	153
Tabla 66. Flujo de Caja Instalación Planta HPTC-RM.....	154

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de barriles de petróleo por año.	5
Figura 2. Un diagrama esquemático que muestra los procesos integrales de producción de biogás a partir de procesos anaeróbicos. (Chen, y otros, 2016)	8
Figura 3. Etapas de los sistemas de producción de biogás. (Poeschl, Ward, & Owende, 2010).	10
Figura 4. Esquema de un sistema de digestión anaerobia en dos etapas. (10).....	11
Figura 5. Biodigestores de Domésticos: A) De domo fijo de ladrillo y mortero. B) De tambor flotante. C) De hormigón moldeado in situ (puxin). (Shenzhen Puxin Science and Technology Company Limited)	12
Figura 6. Biodigestor biobag.....	13
Figura 7. Biodigestor tipo laguna instalado en Trujillo con capacidad de 4500 m ³ . (CIDELSA)	14
Figura 8. Medición de volumen de gas usando una bolsa de plástico. (Verein Deutscher Ingenieure, 2006)	18
Figura 9. Representación gráfica de la configuración experimental. (Ware & Power, 2016)	19
Figura 10. Gasómetro MEDPOST 2015, Medición volumétrica de biogás y cuantificación de % de CH ₄	20
Figura 11. Publicaciones académicas sobre la producción de biogás clasificadas por país de procedencia del autor principal durante el período 1990-2015. (26).....	28
Figura 12. Distribución de las solicitudes de patente prioritarias en Europa desde 2000 hasta 2015. (26).....	28
Figura 13. Clasificación para el pretratamiento de sustrato para la digestión anaeróbica y producción de biogás. (30).....	31

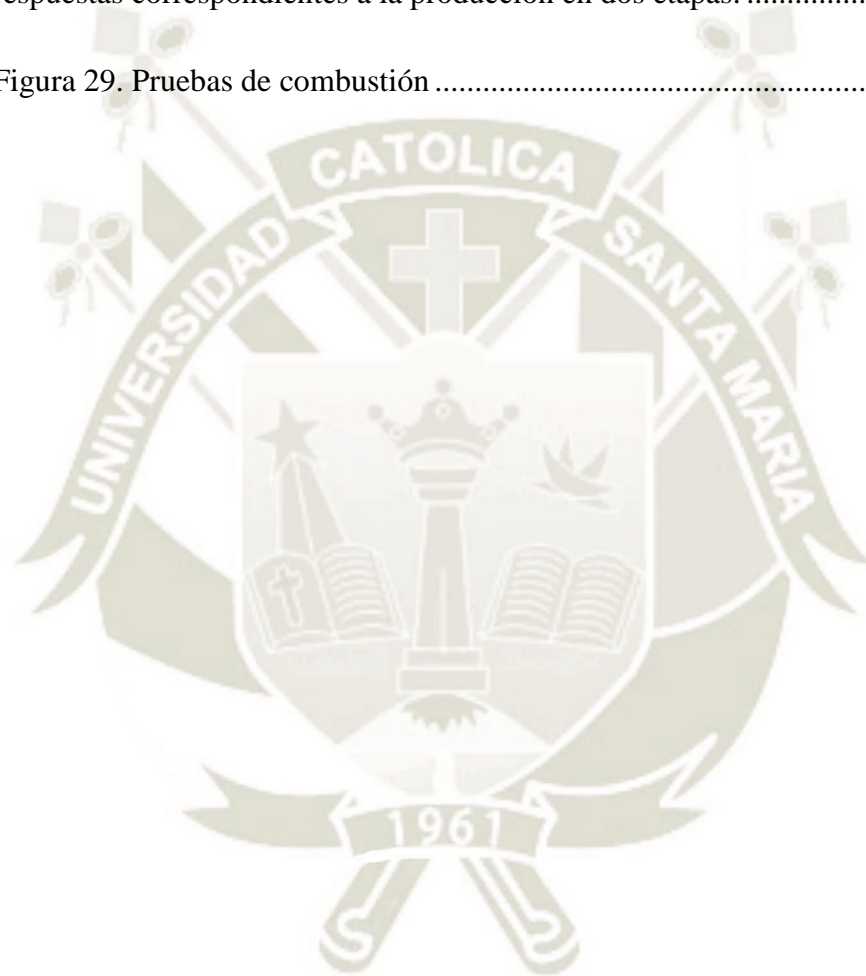
Figura 14. Sistema Modelo Rottaler. (Centro Regional de Servicios de Información para Asia Sudoriental sobre Tecnología Apropriada, 1998)	33
Figura 15. Planta de Alto Rendimiento de Temperatura y Biogas Controlada. (Snowleopard Poster)	35
Figura 16. Planta experimental HPTC-RM instalada en el fundo de Majes de la UCSM.	38
Figura 17. Clasificación de los distintos tipos de biomasa disponible indicándose si se encuentra dispersa (D), agrupada (A), o concentrada (C). (41)	41
Figura 18. Ensayos de hidrólisis de los sustratos de carga metanogénica.	78
Figura 19. Diagrama de Pareto para el volumen de biogás en un sistema HPTC-RM.	81
Figura 20. Gráfica de efectos para volumen de biogás correspondiente a la optimización de producción en un sistema HPTC-RM de dos etapas. En A) Efectos principales, B) y C) Interacciones.	83
Figura 21. a) Superficie de respuesta para volumen de biogás correspondiente a la optimización en un sistema HPTC-RM, b) Gráfica de contornos para volumen de biogás correspondiente a la optimización de producción en dos etapas.	85
Figura 22. Diagrama de Pareto para tiempo de retención hidráulico (TRH).	86
Figura 23. Gráfica de efectos para TRH correspondiente a la optimización de producción en un sistema HPTC-RM de dos etapas.	88
Figura 24. Superficie de respuesta y Gráfica de contornos para TRH correspondiente a la optimización de la obtención de biogás y generación de CH ₄ en un sistema HPTC-RM de dos etapas.	89
Figura 25. Diagrama de Pareto para la optimización de CH ₄ en un sistema HPTC-RM de dos etapas.	90

Figura 26. Gráfica de efectos principales para % de CH₄ de biogás correspondiente a la optimización de la producción en un sistema HPTC-RM..... 92

Figura 27. Superficie de respuesta y gráfica de contornos para tiempo correspondiente a la optimización de producción en dos etapas. 94

Figura 28. Gráfica de contornos sobrepuestos para la optimización de múltiples respuestas correspondientes a la producción en dos etapas. 95

Figura 29. Pruebas de combustión 123



LISTA DE ECUACIONES

Ecuación (1)	21
Ecuación (2)	21
Ecuación (3)	22
Ecuación (4)	51
Ecuación (5)	51
Ecuación (6)	52
Ecuación (7)	59
Ecuación (8)	59
Ecuación (9)	60
Ecuación (10)	60
Ecuación (11)	60
Ecuación (12)	61
Ecuación (13)	61
Ecuación (14)	62
Ecuación (15)	62
Ecuación (16)	63
Ecuación (17)	63
Ecuación (18)	65
Ecuación (19)	67
Ecuación (20)	84
Ecuación (21)	89
Ecuación (22)	93

LISTA DE ABREVIATURAS BÁSICAS

(PTE)	89, 90, 91, 92, 98, 103, 104, 106, 154
Potencial Técnico Energético, XI, 3, 68, 102, 104	Alta Eficiencia y Temperatura Controlada, VI, X, XI
BP	LS
Broza de Páprika, VI, VII, XI, I, II, 3, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 62, 67, 71, 72, 73, 74, 75, 78, 80, 81, 82, 84, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 100, 101, 102, 104, 106, 146	Lodos de Siembra, VI, X, I, 10, 17, 55, 56, 57, 64, 73, 74, 98, 101, 119
CH ₄	MF
Metano, VI, VII, X, XI, I, II, 3, 7, 9, 17, 19, 20, 22, 25, 26, 30, 31, 34, 39, 43, 53, 54, 57, 58, 64, 66, 67, 68, 75, 77, 79, 80, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 105, 106, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 148, 150, 152	Materia Fresca, VI
DA	PCG
Digestión Anaerobia, VI, X, I, 6, 7, 8, 11, 14, 15, 16, 27, 28, 29, 30, 35, 37, 57, 72, 91, 93, 96	Potencial de Combustible Generado, XI, I, 3, 68, 69, 97, 98, 101
DH	PE
Digestión Hidrolítica, VI, 10	Potencial Energético, VII, X, XI, I, II, 3, 42, 69, 104
EB	PEI
Estiércol Bovino, VI, XI, I, II, 53, 54, 55, 56, 57, 62, 67, 74, 75, 78, 86, 95, 96, 97, 98, 100, 101, 102, 106, 118	Potencial Económico Implementable, XI, I, 3, 104
ER	PPF
Efluente Recirculante, VI, VII, XI, I, II, 3, 10, 55, 56, 57, 58, 59, 63, 73, 74, 77, 78, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 98, 100, 101, 106, 120, 146	Potencial de Producción Factible, XI
HPTC	Producción Factible, I, 3, 101, 102
Alta Calidad y Temperatura Controlada, I, VI, VII, XI, I, II, 3, 14, 32, 34, 37, 38, 53, 54, 55, 56, 68, 73, 75, 77, 81, 83, 85, 87, 88,	PRI
	Periodo de Recuperación de la Inversión, VII, XI, 68, 105, 106, 155
	PSD
	Potencial de Sustrato Disponible, XI
	RM
	Rottaler Modell, I, VI, VII, X, XI, I, II, 3, 14, 32, 37, 38, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 68, 73, 75, 77, 81, 83, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 98, 103, 104, 106, 154
	S
	Sustrato, VI, VII, X, XI, I, II, 3, 13, 14, 17, 37, 38, 53, 57, 58, 65, 68, 73, 79, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91,

96, 103, 104, 105, 106, 122, 148,
154, 155

SH

Sustrato Hidrolizado, VI, VII, X,
XI, I, II, 65, 98, 100, 101, 102,
106

ST

Sólidos Totales, VI, VII, 56, 57, 58,
60, 62, 64, 71, 72, 73, 74, 81, 86,
87, 90, 94, 95, 96, 97, 99, 100,
101, 102, 106, 122, 146

TIR

Tasa Interna de Retorno, VII, 68,
105, 106, 155
taza interna de retorno, XI

TRH

Tiempo de Retención Hidráulico,
VII, XI, I, 3, 10, 57, 66, 79, 80,
86, 87, 88, 89, 90, 95, 97, 98,
102, 106, 107

UCSM

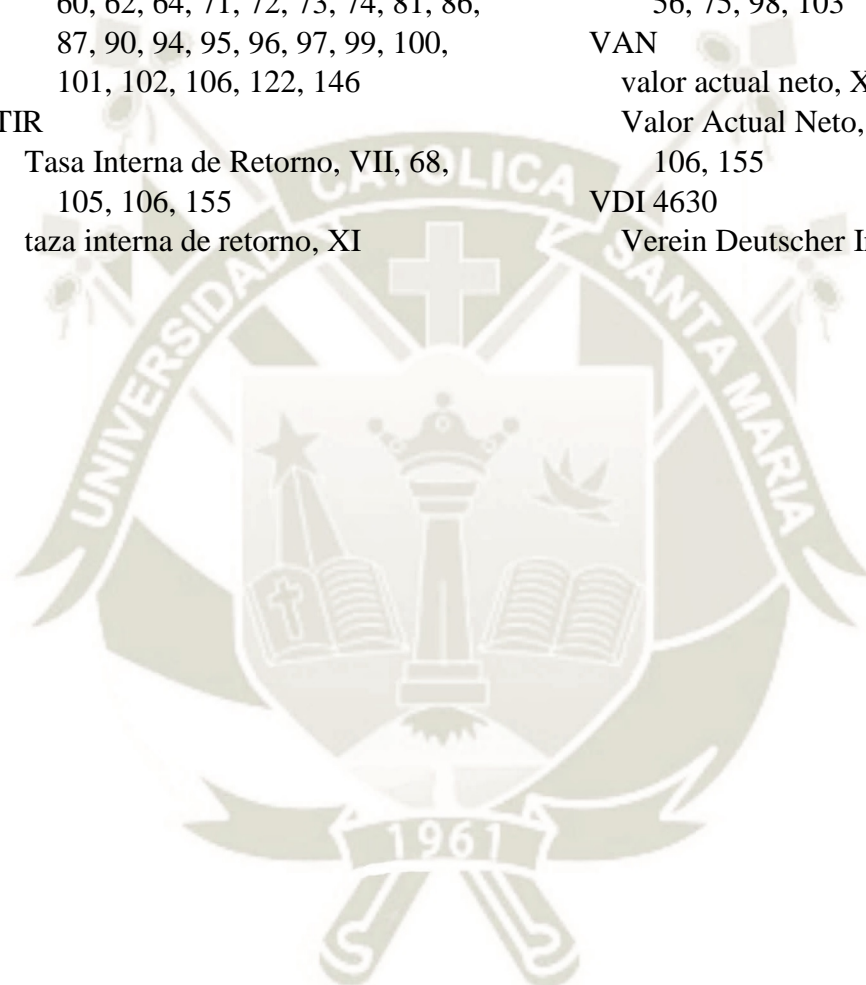
Universidad Católica de Santa
María, VI, 3, 37, 38, 53, 54, 55,
56, 75, 98, 103

VAN

valor actual neto, XI
Valor Actual Neto, VII, 68, 104,
106, 155

VDI 4630

Verein Deutscher Ingenieure, VI



CAPITULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación se enfocó en determinar el potencial energético (PE) de un sustrato (S) elaborado a partir de broza de páprika (BP), estiércol bovino (EB) y efluente recirculante (ER) aplicando digestión anaeróbica (DA) y utilizando lodos de siembra (LS) metanogénico en un sistema HPTC-RM, en mejora del desempeño de las actividades agrícolas relacionadas al tratamiento de residuos orgánicos y su reinserción al suelo agrícola, mitigando así la contaminación generada por la quema de la broza.

Anterior a la presente investigación, no se encontraron estudios de digestión anaeróbica (DA) utilizando como materia prima la broza páprika (BP) para la generación de biogás con alto contenido de CH₄, del mismo modo no se realizaron estudios en un sistema HPTC-RM, la aplicación de la investigación permite a los tomadores de decisiones discernir entre implementar una planta HPTC-RM para el tratamiento de sus residuos orgánicos agrícolas y aprovechamiento energético-fertilizante de sus efluentes o la quema de la broza para su reinserción al suelo en forma de ceniza basándose en los resultados de los ensayos de optimización y evaluación con indicadores económicos.

La estrategia de la investigación fue determinar el potencial energético utilizando indicadores de potencial sustrato disponible (PSD), potencial combustible generado (PCG), potencial producción factible (PPF), potencial técnico energético (PTE) y potencial económico implementable (PEI). La investigación buscó obtener un SH formulado a partir de los resultados de optimización para el escalamiento de una planta HPTC-RM en el fundo Pampa Baja, del mismo modo obtener parámetros para la alimentación del digestor, manejo del efluente recirculante (ER) y la determinación de tiempo residencia hidráulica (TRH).

1.2. HIPÓTESIS

Debido a que la broza de páprika (BP) y el estiércol bovino (EB) son biomasas residuales obtenidas de actividades de mayor demanda e importancia económica que pueden ser digeridas anaerobiamente, es posible determinar el potencial energético (PE) de un SH de BP y EB en un sistema HPTC-RM de digestión hidrolítica y metanogénica en el Distrito de Majes Pedregal.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos General

Determinar el Potencial Energético (PE) de un Sustrato Hidrolizado (SH) de Broza de Páprika (BP) y Estiércol Bovino (EB) mediante digestión anaeróbica metanogénica en un sistema de alta eficiencia y de temperatura controlada con un modelo “Rotaller Modell” (HPTC-RM) en el Distrito de Majes Pedregal.

1.3.2. Objetivos específicos

- Elaborar sustratos a partir de Broza de páprika (BP), estiércol bovino (EB) y efluente recirculante (ER) mediante un diseño central compuesto basado en la relación entre el sustrato y el inóculo (S/I) propuesto por la norma alemana VDI 4630 para su hidrolización.
- Optimizar el proceso de generación de biogás y metano (CH₄) mediante metanización utilizando como sustrato (S) el hidrolizado de broza de páprika (BP), estiércol bovino (EB) y efluente recirculante (ER) en un sistema HPTC-RM a escala laboratorio.
- Determinar el potencial energético (PE) del sustrato hidrolizado (SH) obtenido a partir de proporciones óptimas validadas de broza de páprika (BP), estiércol bovino (EB) y efluente recirculante (ER) escalado para una planta de biogás basada en un sistema de alta eficiencia y de temperatura controlada con un modelo “Rotaller Model” (HPTC-RM) y su respectiva evaluación económica.

1.4. VARIABLES E INDICADORES

A continuación, la *Tabla 1* muestra las variables dependientes e independientes aplicadas en el presente trabajo de investigación.

Tabla 1. Variables definidas a nivel operacional y conceptual.

	Variable	Indicador	Unidad	Tipo de variable
Independiente	Concentración de Broza de Párika, [BP].	Broza de párika (BP) en estado seco.	%ST _{BP}	Cuantitativa
	Concentración de Efluente Recirculante, [ER].	Peso del efluente recirculante (ER) de la planta HPTC-RM UCSM-Majes.	%ER	Cuantitativa
	Potencial de Sustrato Disponible (PSD)	Peso del sustrato disponible (SD)	Ton	Cuantitativa
	Potencial del Combustible Generado (PCG)	Volumen de Combustible total generado (CG).	Ncm ³ de CH ₄ /Kg*SV _{SH}	Cuantitativa
	Potencial de Producción Factible (PPF)	Volumen de Combustible total generado menos el utilizado para el sistema.	Nm ³	Cuantitativa
	Potencial Técnico Energético (PTE)	Volumen de Combustible generado menos el utilizado para el sistema por día.	m ³ /día	Cuantitativa
		Valor actual neto (VAN)	S/.	Cuantitativa
	Potencial Económico Implementable (PEI)	Tasa interna de retorno TIR	%	Cuantitativa
		Periodo de retorno de la inversión PRI	Meses	Cuantitativa
Dependiente	Volumen de biogás, Vol. de Biogás.	Volumen de biogás generado por la metanización del S.	Ncm ³	Cuantitativa
	Concentración de metano, [CH ₄].	Contenido de CH ₄ en el Biogás generado.	%Vol	Cuantitativa
	Tiempo de retención hidráulico (TRH).	Tiempo en el que se completa la digestión metanogénica del S.	Días	Cuantitativa
	Potencial Energético (PE)	Potencial de generación de biogás considerando el PSD, PCG, PPF, PTE y PEI.	Kj / h	Cuantitativa



CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. El Biogás

El suministro de energía global actual es altamente dependiente de las fuentes fósiles (petróleo crudo, lignito, hulla, gas natural). Estos son los restos fosilizados de plantas y animales muertos, que han estado expuestas al calor y a presión en la corteza de la tierra durante cientos de millones de años. Por esta razón, los combustibles fósiles son recursos no renovables que se están agotando mucho más rápido de lo que se van formando otros nuevos tal como se puede apreciar en la curva de Hubbert la cuales son una aproximación teórica del comportamiento futuro de la producción de petróleo. Esta se basa en el análisis de la curva de exploración, que tiene la misma forma que la de producción, pero el pico de la curva de exploración llega antes. (*Figura 1*). Las economías del mundo dependen hoy del petróleo crudo. Hay un cierto desacuerdo entre los científicos de cuánto tiempo este recurso fósil va a durar, pero según los investigadores, la "producción pico del petróleo" ya se ha producido o se espera que se produzca en el próximo período de tiempo (1).

Aceite regular y Gas natural Líquido
2003 Escenario de caso base

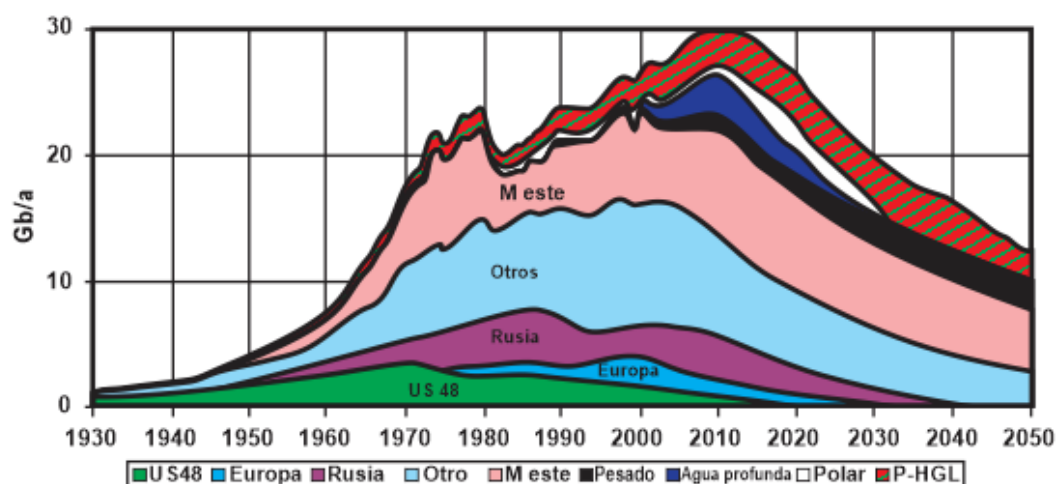


Figura 1. Consumo de barriles de petróleo por año.

Una de las principales ventajas de la producción de biogás es la capacidad de transformar los residuos en un recurso valioso, utilizado como sustrato para la DA.

Muchos países europeos se enfrentan a enormes problemas asociados con el exceso de producción de residuos orgánicos de la industria, la agricultura y los hogares. La producción de biogás es una excelente manera de cumplir con las regulaciones nacionales y europeas cada vez más restrictivas en esta materia. Utilizar los desechos orgánicos para la producción de energía, seguidos por el reciclaje del sustrato digerido como fertilizante puede contribuir a reducir el volumen de los residuos y de los costes de eliminación de estos (2).

La Unión Europea (UE) es el líder mundial con el 60% de la producción total de biogás. En el 2012, el porcentaje de energía eléctrica producida por el biogás era del 6% de la electricidad de la UE generada a través de fuentes renovables, mientras que, en 2013, las casi 830 unidades de biogás produjeron 7448 GWh, lo que corresponde al 14% de la producción bruta de electricidad de la UE. En el 2013 Alemania, el Reino Unido e Italia fueron los principales productores de biogás de la UE con más del 78% de la producción primaria de energía. La producción de electricidad mediada por biogás es la principal recuperación de energía, porque el agua de enfriamiento del motor se utiliza para mantener la temperatura requerida del digester, mientras que los cultivos energéticos y el estiércol son los sustratos orgánicos más utilizados, finalmente, los motores de encendido por chispa con una potencia nominal de 1MWel en los que se filtra el biogás quemado para producir trabajo, es la tecnología ampliamente adoptada (3).

En América Latina, las principales aplicaciones de biogas son en biorreactores de membrana anaeróbica (AnMBR), estas están surgiendo debido a que la producción de biogás ha mejorado por los biorecursos renovables BioRR disponibles, obteniendo energía similar a la derivada de las fuentes de energía fósiles naturales que se agotan a nivel mundial, al tiempo que se minimiza el gas de efecto invernadero (GEI). Durante la última década, se han desarrollado y aplicado muchos tipos de AnMBR para hacer que la tecnología del biogás sea práctica y económicamente viable (4).

2.1.1. La bioquímica en la obtención del biogás

Los desafíos potenciales de las AnMBR son las sustancias inhibitoras y dilemas operacionales, para su optimización se debe de mejorar el desempeño técnico enfocado a las principales exigencias del mercado a la par de las tendencias del avance

tecnológico, a nivel de biodigestión, el biogás se puede producir de forma anaerobia utilizando la Biomasa Residual (BR) local disponible de diversas fuentes (animal residuos, aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales, residuos agrícolas, etc.). La DA de la materia orgánica al biogás (principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2)) implica cuatro pasos clave, estos siendo la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (*Figura 2*). Un proceso equilibrado de fermentación de metano requiere fases individuales de degradación que deben llevarse a cabo con consorcios distintos de bacterias, como las bacterias fermentativas, acetógenos sintróficos, homoacetógenos, metanógenos hidrogenotróficos y metanógenos acetilásticos. La relación simbiótica entre estos microorganismos contribuye a la DA eficiente y a la producción de biogás. La fase final, que es conducida por bacterias formadoras de CH_4 , es la etapa más crucial en la producción de biogás donde los microorganismos metanogénicos convierten sus sustratos principales incluyendo acetato, hidrógeno (H) y CO_2 en CH_4 . Hay dos vías para la formación de CH_4 , en el que aproximadamente el 75% de la producción de CH_4 se deriva de la descarboxilación de acetato y el 25% restante proviene de CO_2 y H_2 (*Figura 2*) (4).

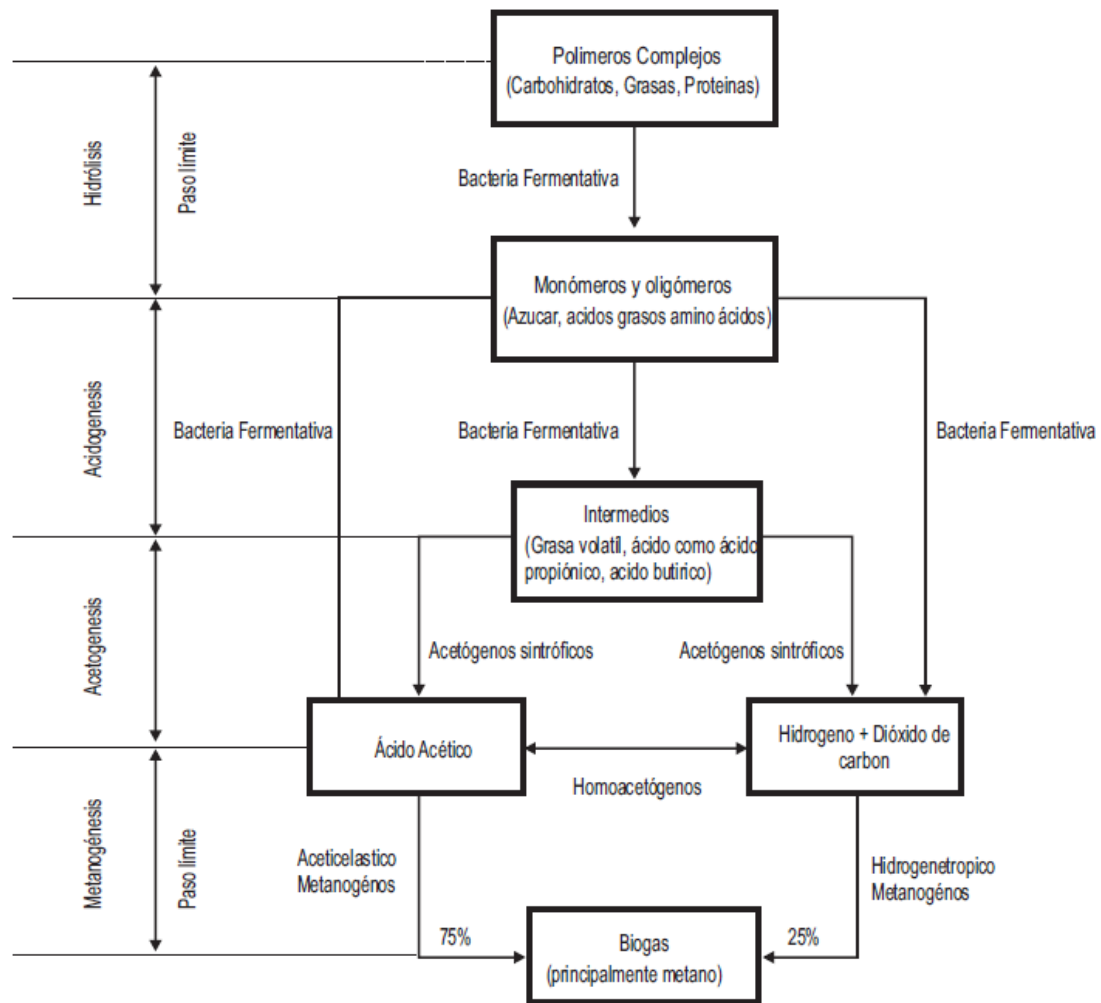


Figura 2. Un diagrama esquemático que muestra los procesos integrales de producción de biogás a partir de procesos anaeróbicos. (Chen, y otros, 2016)

Como se dijo anteriormente, la DA es un proceso microbiológico de descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Los principales productos de este proceso no es sólo el biogás, sino también el digerido que es el sustrato descompuesto debido al resultado de la producción de biogás (5).

Una planta de biogás no es sólo un proveedor de energía. El sustrato digerido, generalmente llamado digestato, es un valioso fertilizante del suelo, rico en nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes, que se puede aplicar en suelos con el equipo habitual para la aplicación de estiércol líquido. En comparación con el estiércol crudo, El digestato ha mejorado la eficiencia de fertilizantes debido a una mayor homogeneidad y la disponibilidad de nutrientes, una mejor relación C/N y olores significativamente reducidos (6).

El biogás de la digestión anaerobia ofrece un ciclo de nutrientes y carbono cerrado. El CH_4 se utiliza para la producción de energía y el CO_2 se libera a la atmósfera y es captado por la vegetación durante la fotosíntesis. Algunos compuestos de carbono permanecen en la digestión, mejorando el contenido de carbono de los suelos, cuando se aplica digestato como fertilizante. La producción de biogás puede ser perfectamente integrado en la agricultura convencional y orgánica, donde digestato reemplaza fertilizantes químicos, producidos con el consumo de grandes cantidades de energía fósil (6).

2.1.2. Tecnologías para la producción de biogás

La *Figura 3* muestra la secuencia para implementar plantas de biogás, hasta la producción y su utilización. La secuencia se estructuró con revisiones realizadas por investigadores en base la ley de Energías Renovables (EEG) y los desgravámenes fiscales sobre la energía, el objetivo fue respaldar su amplia utilización. Encontraron que lo más prometedor es en el sector del transporte, es posiblemente la tecnología que podría soportar una expansión de utilización rápida. El Despliegue sostenible de sistemas de biogás en luz varía acorde a la inestabilidad de los precios de las materias primas y la disponibilidad, la necesidad de una operación sin subvenciones a largo plazo es otro factor importante para la mejora de la flexibilidad de obtención de materia prima y características de calidad para maximizar el rendimiento del gas, del mismo modo la optimización de la gestión del proceso de digestión anaeróbica. La evaluación del balance energético y los posibles impactos ambientales de la cadena de procesos integrados proporcionan una evaluación holística de sostenibilidad, es por ello que compiten favorablemente con los combustibles fósiles, indudablemente es un aspecto muy importante para mejorar las perspectivas de una mayor utilización del recurso (7).

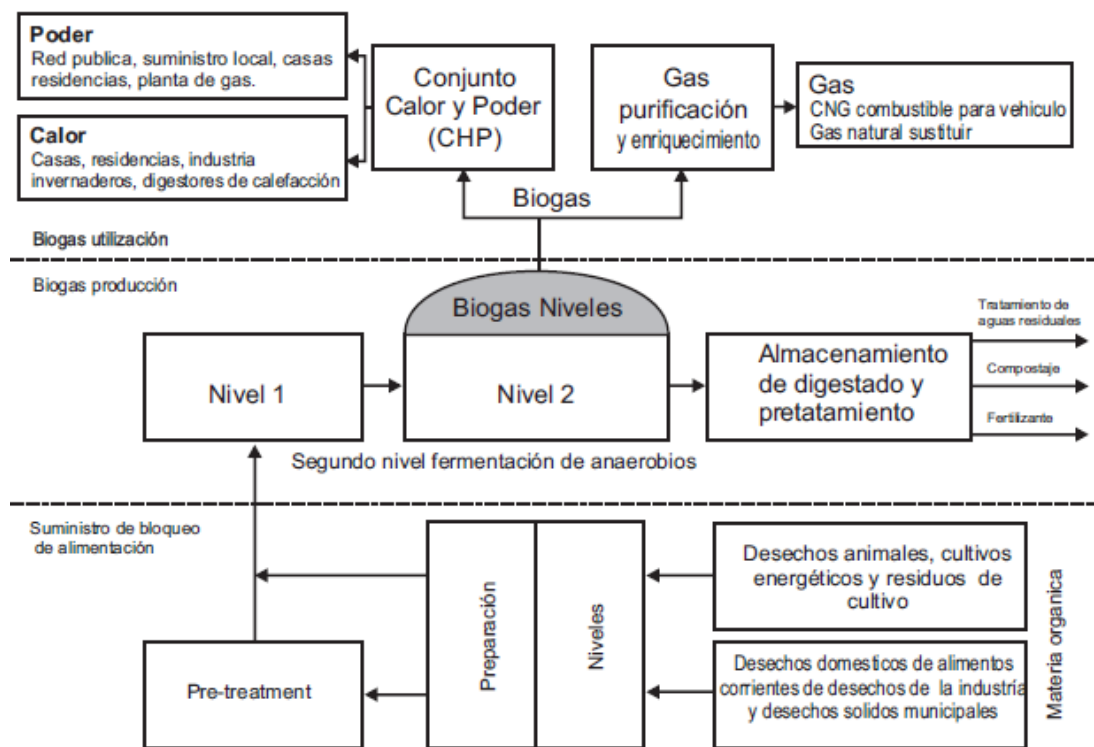


Figura 3. Etapas de los sistemas de producción de biogás. (Poeschl, Ward, & Owende, 2010).

Ya en el 2008, aproximadamente el 70% de las plantas de biogás en Alemania, se basan en procesos de digestión húmeda (DH) (8), el sistema Alemán mantiene parámetros acorde al desarrollo y evolución del sistema, por ejemplo mantener un sistema a prueba de gases, los lodos de siembra (LS) y fertilizantes líquidos (FL) deben mantenerse como efluente recirculante (ER) en tiempo de residencia hidráulico (TRH) bajo consideración de la EEG 2012, del mismo modo se debe considerar una cantidad mínima del 80% de estiércol y consideraciones de otros sustratos (9).

En Alemania los sistemas que utilizan la materia prima se pre-tratada para acelerar el proceso de digestión (Figura 4), y donde las regulaciones exigen, estén esterilizadas o que los sedimentos nocivos sean descargados de los digestores sin perjudicar el proceso de digestión. Las tecnologías para el pretratamiento de la materia prima antes de la digestión se han adaptado de la industria de procesamiento de residuos. Los mecanismos para transportar la materia prima incluyen transportadores de tornillo automatizados que aportan un mejor control de velocidad de alimentación, mientras que la materia prima líquida se bombea a los digestores (Figura 4). Los digestores más comunes están hechos de hormigón, el diseño básico es derivado de los

tanques de almacenamiento de estiércol líquido utilizados en la agricultura y plantas de tratamiento de agua. Sistemas DA de dos etapas son predominantes, es decir, separan la hidrólisis de las otras etapas procesos de generación de metano (*Figura 3* y *Figura 4*), lo que permite que el proceso de digestión sea más eficiente y seguro (10).

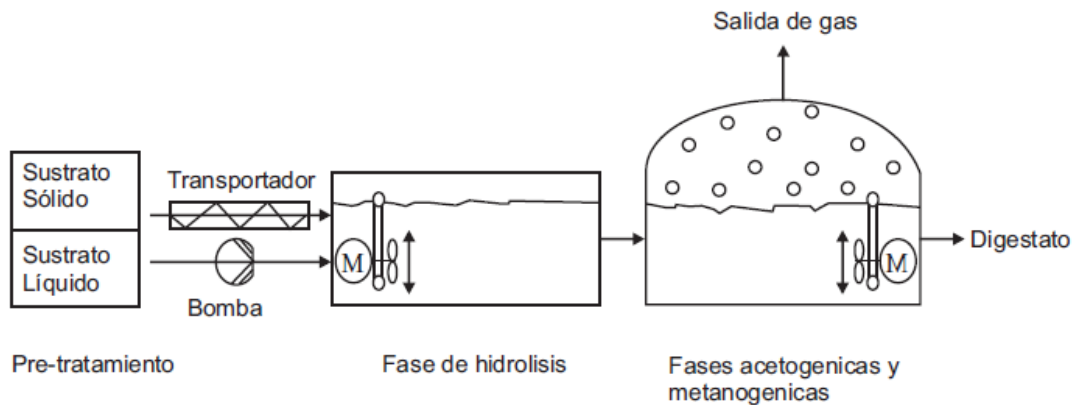


Figura 4. Esquema de un sistema de digestión anaerobia en dos etapas. (10)

En Sudáfrica se realizaron revisiones bibliográficas con el objetivo de identificar el tipo de digester apropiado, adecuado a sus condiciones ambientales y al vacío de conocimiento existente de la tecnología de biogás, por lo tanto, es más fácil el mapeo de digestores anaeróbios. En la revisión, el digester de hormigón moldeado in situ se ha analizado para el diseño más adecuado en relación a la instalación y en el contexto sudafricano, aunque los interesados todavía pueden hacer su propia selección en función del análisis de los otros diseños (11).

El digester de hormigón in situ (Puxin) encuentra su aplicación en una escala doméstica para tratar las aguas residuales y los residuos de alimentos. Es un digester de biogás hidráulico que está diseñado para resolver los problemas técnicos y las mejoras de los diseños tradicionales de digestores de tipo domo fijo y flotante (*Figura 5*). Está construido en forma de un iglú alrededor del cual se proyecta el hormigón para formar el digester. Una vez más, el concreto ha sido liberado. El digester consiste básicamente en un soporte para gas de fibra de plástico, un pozo de entrada y un pozo de salida. El digester funciona básicamente como un sistema hidráulico donde todo el digester se inunda con agua al mismo nivel en la entrada, tanto el cuello del digester como la salida (12). Dado que la descomposición del material tiene lugar bajo el agua,

son las condiciones anaeróbicas las que son cruciales para la producción de metano. El agua crea así una presión constante bajo la cual fluirá el biogás formado (11).

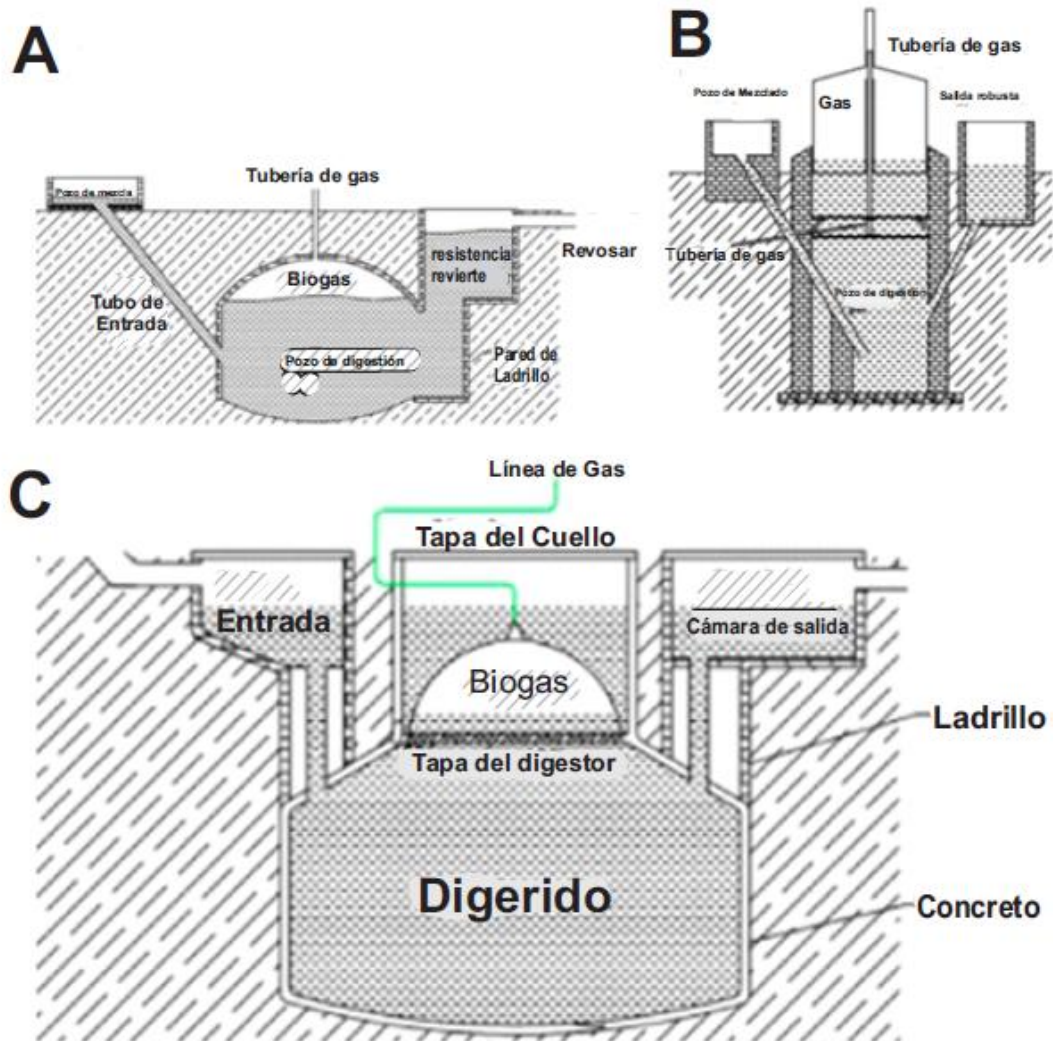


Figura 5. Biodigestores de Domésticos: A) De domo fijo de ladrillo y mortero. B) De tambor flotante. C) De hormigón moldeado in situ (puxin). (Shenzhen Puxin Science and Technology Company Limited)

A continuación, se muestran otros biodigestores comúnmente utilizados en Latinoamérica como los digestores Biobag (*Figura 6*) y los modelos de laguna abierta (*Figura 7*).

Los biodigestores Biobag (*Figura 6*) fueron desarrollados para resolver problemas experimentales a base de ladrillo y metal (13). El Biobag está hecho de PVC reforzado y resistente a bacterias, es flexible y hecho de material extremadamente resistente que proporcionará operaciones a largo plazo sin mantenimiento para hasta 15 años (14). El digestor Biobag es simple de instalar y requiere de capacitación y

habilidades limitadas, lo que es ideal en las comunidades rurales. Este digester tiene dos sistemas a prueba de agua (entrada y salida) que están a diferentes profundidades para garantizar el flujo de sustrato bajo un sistema gravitativo. El Biobag tiene forma de cilindro y la parte inferior de la excavación se deja redondeada para que la biobanda mantenga su forma que también ayuda al flujo de los contenidos desde la entrada hasta la salida. El nivel de lodo dentro del Biobag es mantenido a dos tercios del diámetro de la Biobag este nivel es controlado por la altura de la tubería de salida, el espacio restante en el Biobag es para el almacenamiento de biogás. Por ejemplo, en 15 m³ el digester puede digerir típicamente 200 kg de purín de estiércol por día y produce 5 m³ de biogás por día. Un digester Biobag es operado dentro del rango de temperatura mesófila y se puede aislar cubriendo el Biobag usando paja u otro material aislante como poliestireno. La forma más fácil de elevar la temperatura sería calentar Sustrato (S) en la boca de entrada, una vez que el S ha sido alimentado en la entrada del digester, es importante rellenar con agua para asegurar que el nivel del S en la boca de entrada esté por encima del tubo de entrada, para evitar que entre oxígeno ya que inhibe la reacción anaeróbica (14).

Para suministrar el gas a la presión deseada se debe de proporcionar suficiente presión utilizando una bomba o pesos colocados en la parte superior de la Biobag, el gas del Biobag se usa para diferentes aparatos. También se incorpora un mecanismo de alivio de presión hacia afuera de la atmosfera. En casos donde hay una necesidad de desulfurización se agrega una pequeña unidad de desulfuración y una trampa de humedad punto para eliminar el vapor condensado del gas (*Figura 6*) (11).

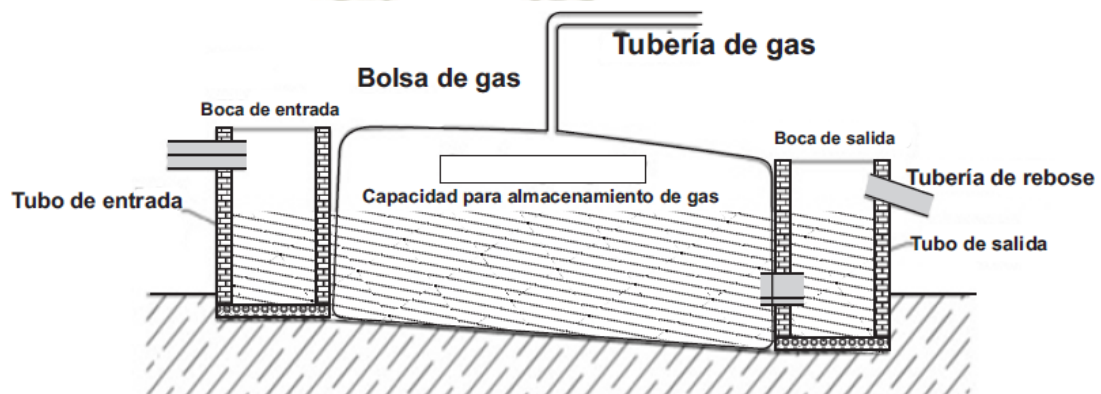


Figura 6. Biodigestor biobag.

Para zonas tropicales los biodigestores más utilizados son los de modelo laguna abierta, en el Perú se pueden encontrar este tipo de instalaciones en Trujillo (*Figura 7*) y Loreto, son biodigestores de gran volumen, donde se realiza la DA de todos los residuos orgánicos de una granja o establo y de sus purines, convirtiéndolos en energía renovable y en abono orgánico, son utilizados en medianas y grandes instalaciones pecuarias. Su instalación permite tratar aguas residuales agropecuarias. El biogás que produce diariamente es un combustible que reemplaza al Diesel, gasolina y al GLP.



Figura 7. Biodigestor tipo laguna instalado en Trujillo con capacidad de 4500 m³. (CIDELSA)

La Universidad Católica de Santa María ha instalado un biodigestor de Dos etapas con un sistema de alimentación similar al biobag, basado en la tecnología HPTC-RM de Walter Danner, el sistema fue utilizado como modelo para este estudio y es descrito más adelante.

2.1.3. Lodos de siembra

Los lodos de siembra son utilizados como inóculos para iniciar el proceso de DA, son considerados como la fuente más importante para la puesta en marcha y la operación de los procesos de Biogás, estudios realizados utilizaron tres inóculos con estructura de consorcios diferentes para iniciar seis procesos en un reactor continuo de tanque agitado (CSTR) a escala laboratorio con un contenido de estiércol mezclado con pasto como S.

Durante el primer tiempo de retención hidráulica, los resultados mostraron una gran diferencia en la estructura de la comunidad de los inóculos y en el rendimiento del proceso. Sin embargo, el rendimiento y la estructura general de la comunidad microbiana se volvieron similar en los reactores a lo largo del tiempo. Un inóculo de un proceso con alto contenido de amoníaco, caracterizado por baja diversidad y baja eficiencia en degradación, tomó el tiempo más largo para alcanzar la estabilidad y el rendimiento final de metano, el consorcio se formó por las condiciones de operación, pero, curiosamente, el potencial de las bacterias que degradan la celulosa parece originarse del sustrato (15).

Si bien, quedó claro que un inóculo adaptado a un sustrato es beneficioso para una digestión rápida, también es importante diferenciar el uso de inóculos con las características de degradación de cargar con contenido celulósico, para ello investigadores evaluaron el impacto del origen del inóculo sobre el rendimiento de metano en las pruebas del Potencial Bioquímico de Metano (PBM), para ello se eligieron los tres inóculos más comúnmente aplicados, provenientes de (i) un digestor de una planta de tratamiento de aguas residuales, (ii) una planta agrícola de biogás que trata abono y cultivos energéticos, y (iii) una planta de tratamiento de residuos biológicos. El rendimiento de cada inóculo se probó con cuatro sustratos diferentes, es decir, lodo de aguas residuales, maíz secado de cosechas enteras, desechos de alimentos y celulosa microcristalina como material de referencia típico. Los resultados revelaron que la elección del inóculo no tuvo un impacto significativo en el rendimiento de metano específico de los sustratos probados, excepto en el caso de la celulosa. Aun así, la tasa específica de producción de metano es significativamente influenciada por la elección del inóculo especialmente para el lodo cloacal, pero también por el desperdicio de alimentos y celulosa, mientras que se hizo evidente que un inóculo adaptado a un sustrato es beneficioso para una digestión rápida (16).

Otro estudio identificó las comunidades que forman parte del consorcio microbiano (CM) propio de los lodos de siembra, para ello caracterizaron y compararon las comunidades microbianas de un lodo de (DA) utilizando tres métodos diferentes: (1) biblioteca de clonación; (2) pirosecuenciación; y (3) fragmento de restricción terminal polimorfismo de longitud (T-RFLP). El estudio se basó en analizar las técnicas de secuenciación de alto rendimiento que se están volviendo cada vez más

populares y asequibles, del mismo modo la dependencia de tales técnicas para el monitoreo frecuente de consorcios microbianos, debido a que estas pueden convertirse en cargas financieras innecesarias para algunos. Además, la profundidad del análisis microbiano reveló mediante la secuenciación de alto rendimiento que puede no ser necesaria para propósitos de monitoreo. Es por ello que los investigadores desarrollaron un enfoque rápido, confiable y económico para el monitoreo de comunidades microbianas en el lodo de DA. Un enfoque combinado donde la información genética de las secuencias de la biblioteca de clonación se utilizó para asignar la filogenia a T-RF, es así como determinaron experimentalmente las comunidades. Los resultados mostraron que tanto los métodos pirosecuenciación como la biblioteca de clonación, encontraron que las bacterias dominantes phyla son Proteobacteria, Firmicutes, Bacteroidetes, y Thermotogae. En ambos métodos también encontraron que los lodos A y B estaban predominantemente dominados por metanógenos acetogénicos seguidos de metanógenos hidrogenotróficos.

En el estudio, los análisis de T-RFLP identificaron que la mayoría de las especies dominantes de los consorcios archaeas. Sin embargo, se perdieron diversos consorcios de bacterias, Los resultados mostraron que el enfoque combinado de la biblioteca de clones y el T-RFLP predijeron con precisión los grupos microbianos dominantes y, por lo tanto, es un instrumento confiable y forma más económica de controlar la evolución de los sistemas microbianos (17).

El digestato (D) es el subproducto de la DA, este puede ser dividido como digerido sólido y líquido, ambos en el Perú son conocidos comúnmente como Biosol y Biol respectivamente, estos términos fueron acuñados por los agricultores en las últimas décadas, el efluente líquido puede ser recirculado si la demanda del mismo es satisfecha reemplazando al agua (18), se realizaron estudios utilizando diferentes fuentes de efluentes líquidos como inóculo (I) en la biodigestión anaerobia de la paja de arroz, los efectos se evaluaron en reactores discontinuos. Los resultados indicaron que los abonos digeridos fueron más adecuados que los lodos de reactores inoculados con estiércol digerido logrando una mayor producción de biogás y degradación de lignocelulosa. La investigación demuestra que la mejor adaptabilidad de los abonos digeridos está relacionada con su mayor contenido de celulasa, actividad xilanasas y suficiente contenido de nutrientes. En la investigación obtuvieron como resultado que

el Digerido de estiércol (DE) tuvo el mejor efecto entre los tres abonos digeridos, los reactores inoculados con DE alcanzaron la mayor producción de biogás (325.3 mL / g VS) y actividad enzimática. La sinergia entre las actividades de celulasa y xilanas desempeñó un papel importante en la degradación de lignocelulosa (19).

2.1.4. Métodos de Cuantificación

El biogás se cuantifica realizando la medición del volumen (ml) y de la concentración de CH_4 y CO_2 (% Vol), para ello se utiliza diferentes métodos acordes a la norma alemana VDI 4630 (2006) o métodos fisicoquímicos a partir del teorema de desplazamiento de Arquímedes y captura de CO_2 por burbujeo con NaOH, en el presente trabajo se desarrolló un método para la cuantificación de biogás (ml) y metano CH_4 (% Vol) denominado Gasómetro MEDPOST 2015 (Medina y Postigo, 2015), el sistema utiliza el medidor de volumen de gas usando una bolsa plástica descrito por la norma VDI 4630 (2006) y el sistema de desplazamiento de Arquimides, a continuación se muestran diferentes sistemas de cuantificación que inspiraron al diseño utilizado en la presente investigación.

La *Figura 8* muestra una plataforma de fermentación para volúmenes altos en experimentación, por ejemplo, en el caso de un biodigestor de 10L y contenido completamente mezclado con un agitador, el biogás es colectado periódicamente en una bolsa de plástico e inyectado a un gasómetro tipo tambor (20). Algunos investigadores optan por sumergir la bolsa con biogás en un recipiente con agua para cuantificar el contenido de biogás por diferencia de volumen.

Un sistema a escala laboratorio puede presentar una mecánica de agitación magnética (Magnet guide), un contenido con mezcla de S y lodo de siembra (LS) (Substrate + Seeding sludge) y una cámara climática (Climatic Chamber), el gas es almacenado en una bolsa de plástico (Gas bag), para ello se recomienda utilizar una bolsa Tedlar, tiene dos llaves de control entre el biodigestor y la bolsa de plástico para poder desconectarla sin generar desequilibrio en el sistema tal como se muestra en la *Figura 8*.

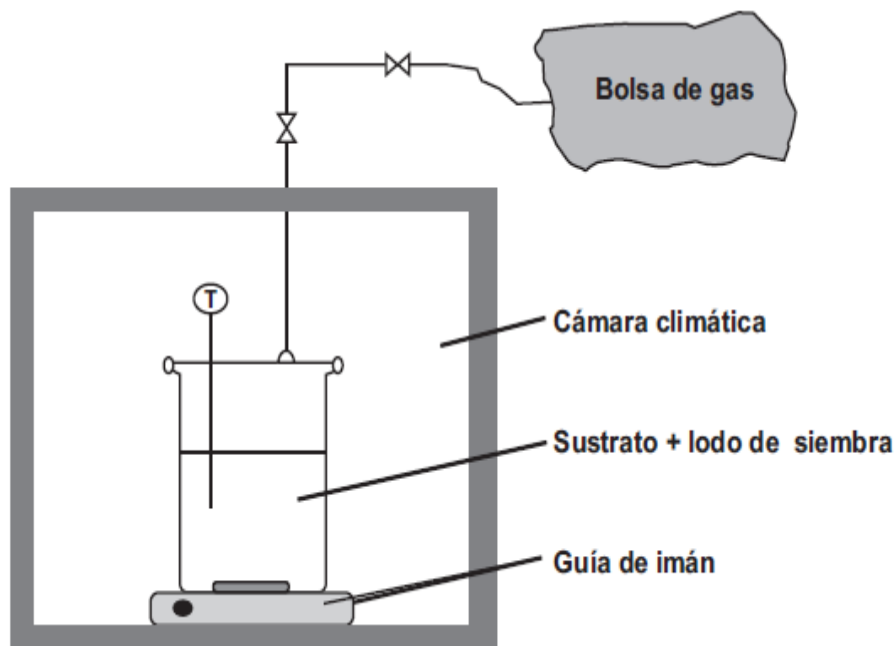


Figura 8. Medición de volumen de gas usando una bolsa de plástico. (Verein Deutscher Ingenieure, 2006)

En un estudio se utilizó el procedimiento de medida de biogás empleando los principios descritos por DIN 38 414 (S8) (1985) (21) y VDI 4630 (2006) con alteraciones en el sistema de medición de gas, la *Figura 9* muestra una configuración de la medición directa de la fracción de metano del biogás producido. Los ensayos de medición fueron utilizados para botellas Duran de 1000ml sumergidos en baño maría entre 36-39°C con un volumen funcional de 900ml de cantidades conocidas de sustrato e inóculo, en la investigación utilizaron una relación de inóculo a sustrato de 2 basado en el contenido de sólidos volátiles (SV), dentro del agua, las pruebas se realizaron hasta el agotamiento del sustrato (22).

En la *Figura 9* se puede observar la configuración utilizada en la investigación de Ware & Power, en el sistema se observa cuatro botellas Duran GL45 de 1L, las tapas (GL45 Two Port Caps) modificaron las tapas para contar con una entrada y salida del biogás, la primer botella es el reactor utilizado para la fermentación, la entrada se encuentra cerrada por una abrazadera, la salida es utilizada para la expulsión del biogás, la segunda botella utiliza NaOH para capturar el CO₂, la tercera botella es utilizada para la recolección del gas (Gas Collection Bottle) y por el teorema de desplazamiento de Arquimides, el gas que ocupa la bottella desplaza el líquido a la cuarta botella que es utilizada para la recolección del líquido, el liquido desplazado es

utilizado para la medición del biogás, el sistema esta conectado por tuberías de silicona de 8mm de diámetro (Silicone Tubing) (22).

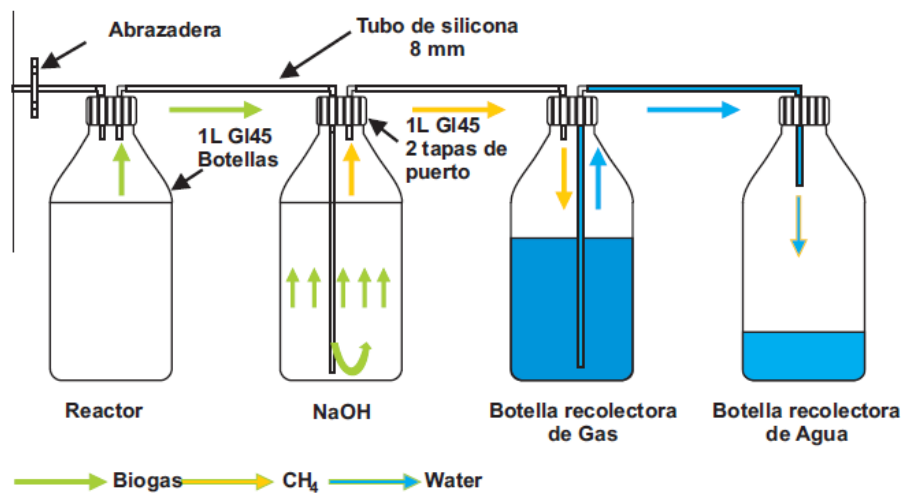


Figura 9. Representación gráfica de la configuración experimental. (Ware & Power, 2016)

El sistema utilizado en la presente investigación fue diseñado para la medición del volumen de biogás por desplazamiento de líquido, la medición de CH₄% se realiza con un sensor de gases. El diseño se apoya en la teoría del desplazamiento de Arquímedes y la técnica propuesta en el manual VDI-4630 (2006) (adaptada para la cuantificación de CH₄, CO₂, O₂ y H₂S), los gases se colectan en una bolsa Tedlar artesanal, el llenado de la bolsa genera una presión en el envase la cual desplaza el líquido a una probeta para su cuantificación en ml y determinación de la presión en hectopascales (hPa), el biogás de la bolsa es succionado por la bomba del multiparámetro permitiendo cuantificar las cantidades porcentuales de los gases que componen el biogás.

Al sistema se le denominó gasómetro MEDPOST 2015 para la evaluación de ensayos de fermentación en laboratorio, a continuación, se muestra su funcionamiento en la *Figura 10*.

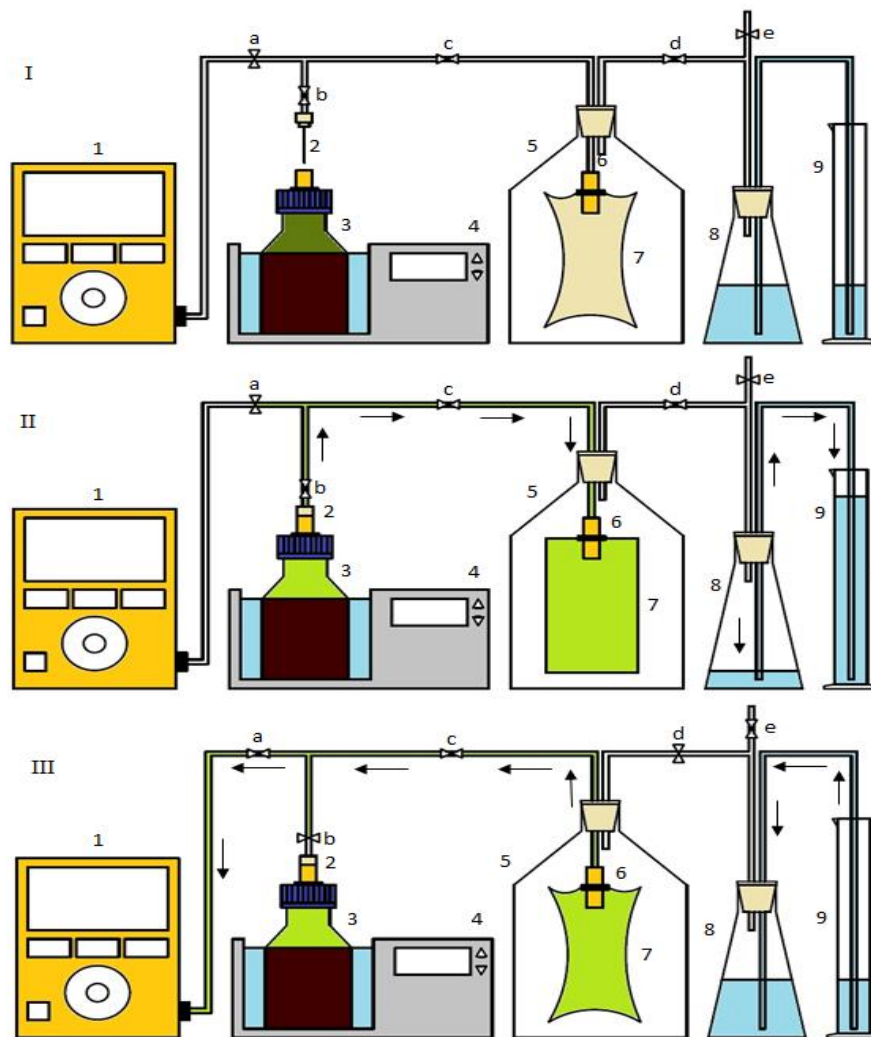


Figura 10. Gasómetro MEDPOST 2015, Medición volumétrica de biogás y cuantificación de % de CH₄.

El sistema cuenta con tres etapas principales. I) armado del sistema para la medición volumétrica de biogás y cuantificación de metano. II) Puesta en marcha y cuantificación del volumen de biogás, introducción de la aguja para la descompresión del gas. III) Cuantificación de Metano, se apertura las llaves a y e, la primera llave permite la medición de metano y la segunda llave nivela el sistema, para ello se cierran las llaves b y d con el fin de evitar la presión negativa del líquido.

Lista de componentes:

- (1). Multiparámetro de CH₄, CO₂, O₂ y H₂S.
- (2). Conector (aguja hipodérmica)
- (3). Batch Lab.

- (4). Baño María.
- (5). Cámara para el desplazamiento de aire.
- (6). Conectores de niples.
- (7). Bolsa Tetlar.
- (8). Matraz con contenido de líquido
- (9). Probeta para la medición de líquido desplazado.

El volumen obtenido es cuantificado en mlN, se considera en la formula la presión atmosférica y el aumento de la presión generada por el líquido desplazado en hPas (mbar) acorde a la *Ecuación (1)*, los elementos del biogás son cuantificados con un sensor multiparámetro expresados en %Vol y en estado seco acorde a las recomendaciones de la norma VDI 4630 (2006) *Ecuación (2)* (20).

$$V_0^{tr} = V * \frac{(P - P_w) * T_0}{P_0 * T} \quad (1)$$

Donde:

- V_0^{tr} Volumen de gas seco en estado normalizado, en ml_N .
- V Volumen del gas leído, en ml .
- P Lectura de la presión de la fase gaseosa, hPa .
- P_w Presión de vapor de agua en función a la temperatura, en hPa .
- T_0 Temperatura normal; $T_0 = 273K$.
- P_0 Presión normal; $P_0 = 1013hPa$.
- T Temperatura de fermentación, en K .

$$C_{CH_4}^{tr} = C_{CH_4}^f \frac{P}{P - P_w} \quad (2)$$

Donde:

- $C_{CH_4}^{tr}$ Concentración del gas seco, en % por volumen.
- $C_{CH_4}^f$ Concentración de metano en estado húmedo, en % por volumen.

P Lectura de la presión de la fase gaseosa, hPa .

P_w Presión de vapor de agua en función a la temperatura, en hPa .

En una investigación realizada en laboratorio se mantuvo el lodo de siembra a una temperatura de $+ 3 ^\circ C$ antes de la alimentación en el digerido. La cantidad de sustrato y lodo de siembra pesado para las botellas de fermentación se formularon de acuerdo con el procedimiento estándar alemán VDI 4630 acorde a la *Ecuación (3)* para la prevención de la inhibición en la fermentación, la producción de biogás y la calidad del gas a partir de tallos de maíz (MS) y lechada de ganado (GS) se analizaron en prueba de digestión anaeróbica por lotes a $37^\circ C$ según el procedimiento estándar alemán VDI 4630 (2004). Los experimentos por lote se llevaron a cabo en recipientes a escala de laboratorio con dos réplicas a una temperatura constante de $37^\circ C$ a través de un calentador de gabinete termostático. Los recipientes (capacidad de 0.9 litros) se llenaron con 800 g del I estabilizado. Se usaron dos botellas para cada una de las combinaciones y rendimientos promedio encontrados, al final del estudio demostraron que la co-digestión de la pulpa de ganado con tallos de maíz en diferentes proporciones resulta en un aumento tanto en el rendimiento de biogás como de metano. (23).

$$\frac{oTS_{substrate}}{oTS_{seedng sludge}} \leq 0,5 \quad (3)$$

Dónde:

$oST_{Sustrato\ hidrolizado}$ = Sólidos orgánicos totales del sustrato hidrolizado

$oST_{Lodos\ de\ Siembra}$ = Sólidos orgánicos totales de los lodos de siembra (El inoculo)

Los métodos volumétricos y manométricos son los más empleados en los ensayos de PBM (24); dependiendo de la configuración, éstos miden el biogás generado en la Digestión anaerobia, por lo que se requiere de la cromatografía de gases para determinar el CH_4 , mientras que en otros casos es posible medir el CH_4 directamente con el método volumétrico empleando una solución alcalina y en el

manométrico capturando el CO₂ antes de la lectura de la presión (25). En la *Tabla 2* y *Tabla 3* se muestra una recopilación de las configuraciones que se emplean generalmente en cada método y de las ventajas y limitaciones que presentan.



Tabla 2. Métodos de cuantificación volumétrico de biogás y metano CH₄.

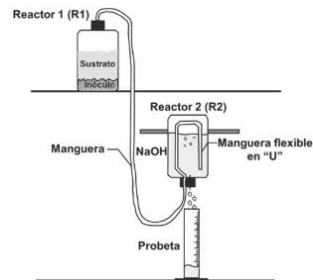
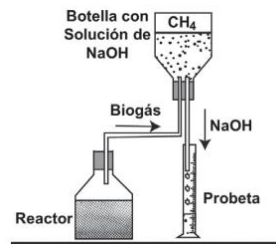
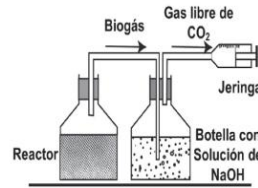
MÉTODO

CONFIGURACIÓN BÁSICA

VENTAJAS

LIMITACIONES

Volumétrico



- ✓ Simplicidad y bajos costos.
- ✓ Medición directa del contenido de CH₄ en el biogás empleando una solución alcalina que captura el CO₂.

- ✓ Configuraciones experimentales de bajo costo que pueden ser implementadas en cualquier laboratorio.
- ✓ Capacidad de trabajar por largos periodos sin necesidad de mantenimiento.

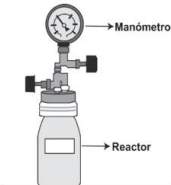
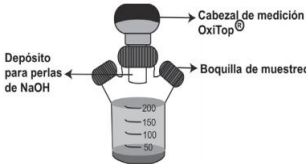
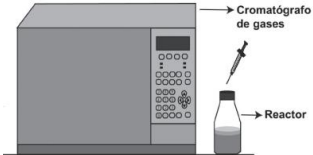
- ✓ La configuración C. evita que R1 se vea afectado en el caso que ocurra succión del NaOH por presiones negativas; adicionalmente, la manguera en forma de "U" ubicada en R2 fue ideada para actuar como un sifón, evitando el paso del NaOH hacia R1.

- Microfugas en los equipos pueden incrementar la producción real de CH₄.

- Requiere medición constante del volumen desplazado (al menos 3 veces al día) y agitar los reactores para mejorar el contacto entre el sustrato e inóculo y favorecer evacuación del biogás.

- Verificación continua de la cantidad y el pH de la solución alcalina desplazante.

Tabla 3. Métodos de cuantificación manométrico y cromatográfico de biogás y metano CH₄

MÉTODO	CONFIGURACIÓN BÁSICA	VENTAJAS	LIMITACIONES
Manométrico	 <p>Manómetro Reactor</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reducción de errores debido a interferencias humanas. ✓ Registros continuos y automáticos de la presión, por lo cual no se requiere de un control estricto. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Medida indirecta del CH₄, por lo que se requiere realizar cálculos para obtener el volumen.
	 <p>Cabezal de medición OxiTop® Boquilla de muestreo Depósito para perlas de NaOH</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Automatización para la recolección de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pueden presentarse inconvenientes en algunos equipos de acuerdo con la presión límite de funcionamiento. ➤ Mayores costos de adquisición y mantenimiento.
Cromatográfica	 <p>Cromatógrafo de gases Reactor</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Permite conocer la composición del biogás. ✓ Proporciona información cualitativa (identificación de componentes desconocidos en la muestra de biogás) y cuantitativa (cantidad de cada componente). ✓ Permite realizar mediciones en tiempos cortos. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Altos costos de adquisición, mantenimiento y operación. ➤ Requerimientos de personal calificado para el manejo del cromatógrafo.

2.1.5. La Trayectoria Tecnológica del biogás

Importantes esfuerzos en investigación combinados con la experiencia a gran escala se llevan a cabo en todo el mundo, con el objetivo de mejorar las tecnologías de conversión, la estabilidad, el rendimiento operativo y los procesos. Nuevos digestores, nuevas combinaciones de sustratos para la DA, sistemas de alimentación, instalaciones de almacenamiento y otros equipos son desarrollados y probados continuamente.

La tecnología de DA se utiliza comercialmente en todo el mundo, especialmente en Europa, donde se han establecido algunos objetivos desafiantes para diversificar su combinación energética con más energía renovable. Para ello se realizaron estudios de prospectiva tecnológica con la intención de demostrar, la relación entre la investigación académica (artículos publicados) (*Figura 11*) el desarrollo tecnológico (solicitudes de patente) (*Figura 12*) que evolucionó de 1990 a 2015.

Los investigadores clasificaron los artículos publicados con temas relacionados a desechos, los que incluyen al estiércol, residuos agrícolas y alimenticios, aguas residuales, lodos residuales y la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, el último de estos, a menudo están asociados con procesos de codigestión. Mientras tanto, las patentes en el área son principalmente para equipos del proceso DA y nuevos métodos o medios de purificación del biogás obtenido. Se encontró que las patentes archivadas en Europa tienden a proteger sus innovaciones solo ocasionalmente en países fuera de la UE. Alemania es el líder en todas las áreas de investigación y las aplicaciones comerciales de las tecnologías, seguidas por Italia, España y Suecia. Los estudios también demostraron el inmenso potencial del biogás en toda Europa, no solo para la generación de energía, sino también como combustible y subproducto del tratamiento de diferentes tipos de desechos (26).

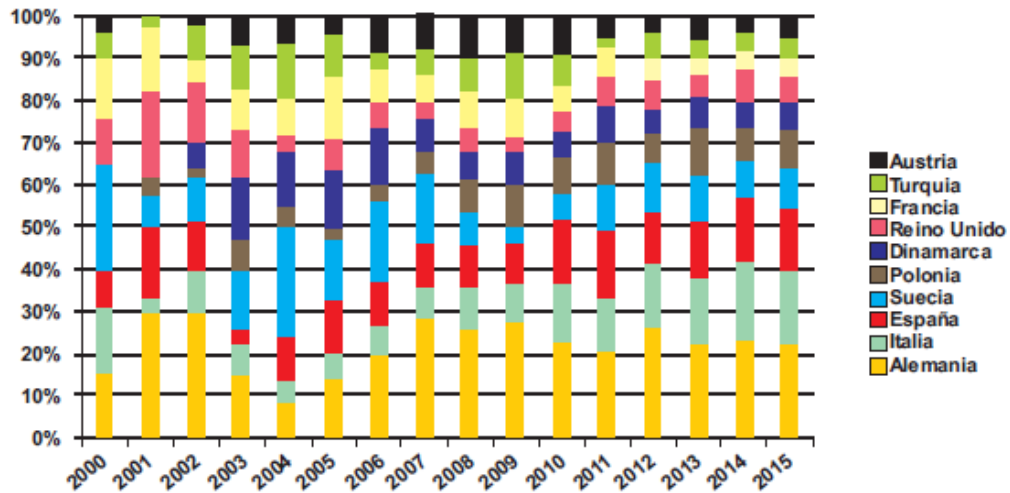


Figura 11. Publicaciones académicas sobre la producción de biogás clasificadas por país de procedencia del autor principal durante el período 1990-2015. (26)

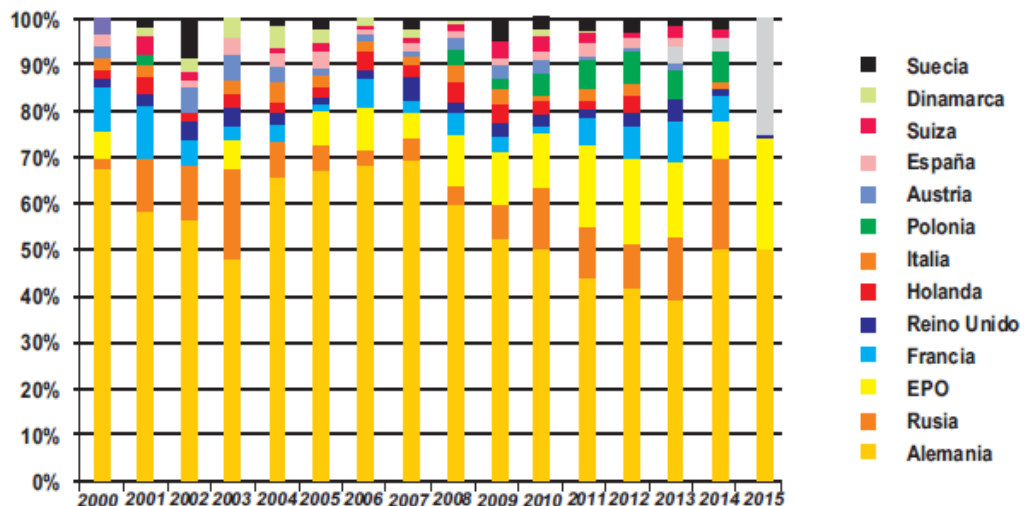


Figura 12. Distribución de las solicitudes de patente prioritarias en Europa desde 2000 hasta 2015. (26)

Ya se ha demostrado que la DA de desechos orgánicos para la obtención de biogás es una actividad valiosa a nivel mundial, tanto como una fuente de energía alternativa neutral y sostenible. Se espera que la tecnología del biogás gane aún más importancia, para que evolucione direccionada a la obtención de biometano y su valorización en relación con su limpieza, su posterior inyección a la red de gas natural o para ser utilizado como combustible de un vehículo local.

Se vienen realizando esfuerzos considerables en la investigación contemporánea para optimizar la eficiencia y la flexibilidad del desempeño técnico del biogás, para mejorar la viabilidad económica de las plantas de biogás en tiempos de

caducidad y tarifas de alimentación de electricidad verde, costos crecientes o fuertemente fluctuantes para los sustratos y actual precio bajo de la energía global.

Se identificaron tecnologías innovadoras y altamente efectivas a lo largo de toda la cadena de biometano, principalmente en los últimos años, las técnicas para separar altas y fluctuantes cantidades de sulfuro de hidrógeno (H_2S) mediante lavado químico-oxidativo con una eficiencia del 92%, del mismo modo se identificaron plantas de tres etapas con una eficiencia de separación del $> 99\%$. Además, la premiación de gases basada en membranas se presenta como un método económico de eliminación de CO_2 y secado de biogás crudo, lo que se trata es de que la demanda específica de potencia para la mejora de $0,26 \text{ kWh} / \text{m}^3$ de biogás y costos específicos de modernización logren menos de $0,15 \text{ €} / \text{m}^3$ de biometano (27).

La exploración en América Latina en 1993 sobre la tecnología del biogás se vio en los países en desarrollo donde se ha aplicado más ampliamente. Cuatro sectores están utilizando con éxito el biogás. En el sector agrícola, se han identificado 9440 digestores. En el sector industrial, 25 tipos de desechos han sido investigados para la producción de biogás o ya están en aplicación a gran escala. América Latina es ahora el principal usuario mundial de tecnología de biogás en el tratamiento municipal de aguas residuales sin procesar. Treinta y tres proyectos de I + D han sido reportados.

Desde 1977, se han implementado cinco proyectos de explotación de biogás a partir de rellenos sanitarios, esto convierte a América Latina en el principal usuario de la tecnología de los gases de vertedero en los países en desarrollo, para ello se están desarrollando y utilizando cada vez más procesos de fermentación de biogás de alta velocidad, se han aplicado varias técnicas de tratamiento de biogás. El biogás es utilizado principalmente para cocinar, alumbrar, como combustible municipal o como combustible para vehículos. La cantidad de biogás producido en América Latina se estima en 217 millones de m^3 por año. La futura I + D en la tecnología del biogás requiere no solo esfuerzos tecnológicos, sino también incitaciones de gobiernos nacionales y organizaciones no gubernamentales (ONG) con el objetivo de promover condiciones favorables para la explotación de esta energía renovable (28).

Los esfuerzos en I+D para mejorar el desempeño del biogás se están enfocando en la optimización, por ejemplo, un proyecto tuvo como objetivo optimizar la DA de cultivos energéticos. Los siguientes aspectos fueron investigados: idoneidad de

diferentes especies y variedades de cultivos, tiempo óptimo de cosecha, rendimiento específico de metano y rendimiento de metano por hectárea. Los experimentos abarcaron 7 variedades de maíz, 2 de trigo de invierno, 2 de triticale, 1 de centeno de invierno y 2 de girasol y 6 variantes con pastizales permanentes. En el transcurso del período de vegetación, se midieron el rendimiento de biomasa y su composición. La DA se llevó a cabo en digestores discontinuos eudiométricos. Los rendimientos más altos de metano de 7500-10200 m³ N por hectárea (ha) se lograron a partir de variedades de maíz con números de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (valor para la madurez del maíz) de 300 a 600. El rendimiento de metano de los cereales varió de 3200 a 4500 m³N por ha. Con girasoles, lograron encontrar rendimientos de metano entre 2600 y 4550 m³N por ha. Hubo diferencias claras entre las variedades de girasol investigado. Los pastizales alpinos pueden producir 2700-3500 m³ N CH₄ por ha. Desarrollaron un modelo de valor de energía de metano (MEVM) fue desarrollado para los diferentes cultivos energéticos. Calcularon el rendimiento de metano específico de la composición de nutrientes de los cultivos energéticos. Los cultivos energéticos para la producción de biogás deben cultivarse en rotaciones sostenibles. La investigación describe las posibilidades para optimizar rendimiento de metano de rotaciones de cultivos versátiles que integran la producción de alimentos, piensos, materias primas y energía (29).

2.2. Pretratamientos

2.2.1. Clasificación previa al tratamiento

La *Figura 13* muestra diferentes tecnologías de pretratamiento para la digestión anaeróbica de sustratos. Los pretratamientos buscan romper la pared celular, reducir el tamaño de la celda de partículas de biomasa y aumentar el área superficial específica, reducir la cristalinidad de algunos materiales fibrosos, solubilizar materiales recalcitrantes y difíciles de biodegradar, hidrolizar parcialmente polímeros celulares o desactivar materiales tóxicos. Algunas de las estrategias de pretratamiento aplicados se basan en una experiencia desde las plantas de tratamiento, ya que tienen la posibilidad de encontrar una gran cantidad de celulosa proveniente de las paredes celulares de los organismos fotosintéticos. Es importante considerar que los

pretratamientos deberían: i) preservar el contenido de materiales orgánicos de biomasa; y ii) evitar la formación de posibles sustancias o materiales inhibidores y / o tóxicos que puedan afectar la digestión anaeróbica.

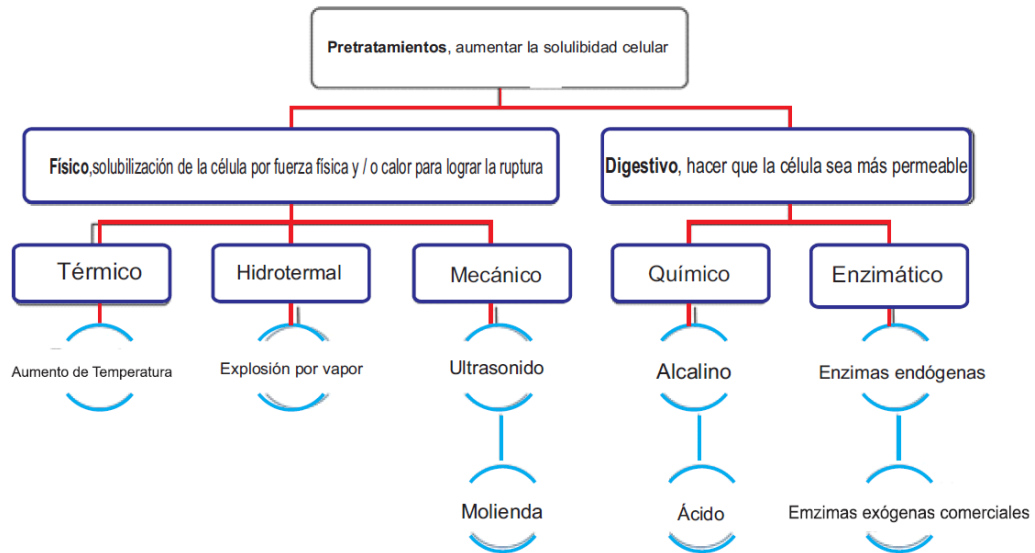


Figura 13. Clasificación para el pretratamiento de sustrato para la digestión anaeróbica y producción de biogás. (30)

2.2.2. Pretratamientos Físicos

Se evalúan por su capacidad de aumentar la producción de biogás en función de pretratamiento térmico e hidrotérmico por medio de aumento de temperatura y presión, respectivamente. En el caso de pretratamientos mecánicos, tales como ultrasonido, microondas y homogeneizadores, la idea es solubilizar material orgánico por medio de la fuerza física, para romper las células, se realizó un análisis comparativo entre diferentes pretratamientos físicos como térmico, hidrotérmico, microondas, y ultrasonido con el fin de evaluar su eficacia en el aumento solubilidad de las células de microalgas y la respectiva biometanización potenciales de cada uno Encontraron una correlación positiva entre solubilidad y biometanización, así como también entre el aumento de carbohidratos solubilidad y producción de biogás Los mejores aumentos fueron con pretratamiento térmico a 95 ° C durante 10 h, que proporcionó el mayor aumentos en la producción de metano (181.3 mL CH₄ / gVS), mientras que el ultrasonido solo alcanzó una producción de 113.7 mL de CH₄ / gVS (30).

2.2.3. Pretratamientos Digestivos

Los pretratamientos químicos son ácidos, alcalinos y oxidativos. A pesar de las mejoras en las tasas de hidrólisis, estos pretratamientos son asociados con una serie de desventajas, como aumentos en la incidencia de procesos inhibidores debido a la producción de sustancias tóxicas y la posible liberación de compuestos tóxicos o contaminantes el medio ambiente, como furfural, hidroximetilfurfural o sodio, entre otros. La pérdida de material biodegradable de la fuente orgánica, cuando se combina con la adición de estos compuestos contaminantes que puede afectar negativamente la digestión anaeróbica debido al proceso inhibitorio, sugiere que esta es una opción bastante insostenible (31). Además, esta alternativa de pretratamiento aumenta los costos asociados con producción de biogás (32).

Evaluaron pretratamientos enzimáticos, hidrotermales y de ultrasonido para comparar sus aumentos en biogás producción y el balance energético del proceso. El autor concluyó que el pretratamiento hidrotermal y ultrasonido lograron los aumentos más pequeños de la producción de biogás con energía neutral y negativa, respectivamente. Distinto es el caso de los pretratamientos enzimáticos, allí los mayores incrementos en la producción de biogás con resultados positivos. La poca energía gastada en este proceso es relacionada con el aumento de la temperatura para activar las enzimas. De esta manera, los pretratamientos digestivos por la utilización de enzimas se presentan como una alternativa muy prometedora. Los pretratamientos enzimáticos se basan en la utilización de la enzima de extractos de diferentes orígenes con el objetivo de atravesar las células de tal manera que la liberación de compuestos al medio sea más específica (33).

2.3. Sistema HPTC-RM

2.3.1. Rottaler Model

Este es un diseño de bajo costo fabricado por Equipo de Agricultura y Energía en Baviera, Alemania para procesos de pequeña escala. De cuatro plantas en una combinación de residuos sólidos urbanos (RSU) y estiércol de animales (EA). La basura clasificada se pica y se mezcla con agua reciclada hasta 10% antes de introducir el primer reactor. La fermentación ocurre en dos fases; comienza con el proceso de estabilización que opera a 37 ° C, con un tiempo de retención de 7 días. En la segunda

etapa, el D se calienta a 55°C y mantenido por 2-15 días. La parte sólida digerida requiere estar en un área de recolección rotando en la parte inferior de cada tanque y bombeada por una bomba sumergible. El lodo seco puede usarse como acondicionador de suelos, La porción de líquido en la parte superior se elimina y es posible utilizar como un fertilizante líquido. Parte del líquido se recircula al primer reactor para mezclarlo con la materia prima de entrada. El biometano se obtiene de ambos reactores y alimentados a un generador diésel después de la purificación. Los reactores se calientan con el calor generado por el motor diésel (18) (Figura 14).

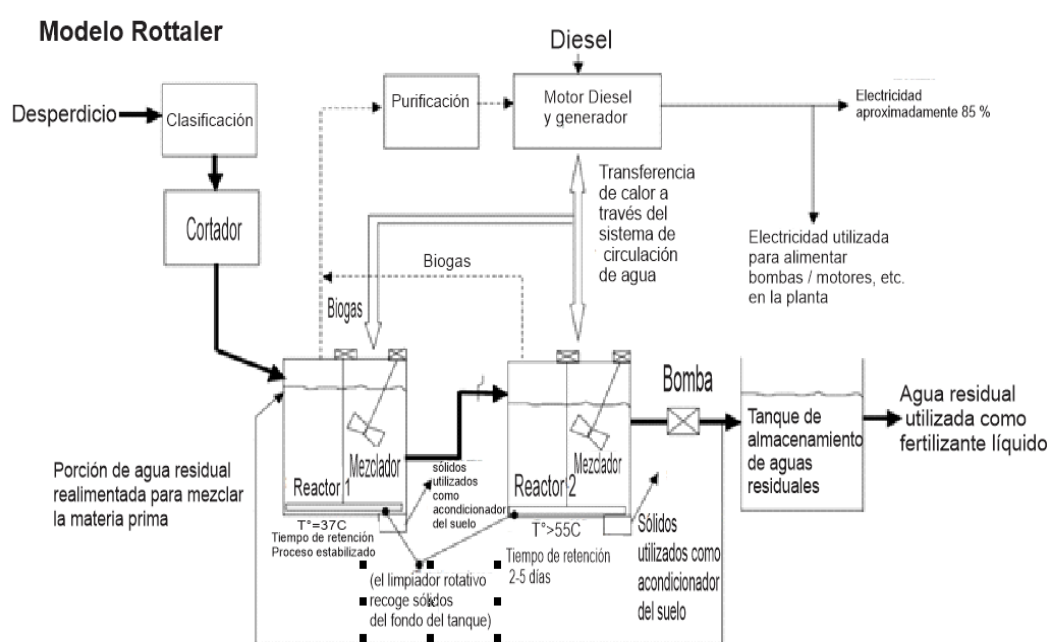


Figura 14. Sistema Modelo Rottaler. (Centro Regional de Servicios de Información para Asia Sudoriental sobre Tecnología Apropiaada, 1998)

En el modelo Rottaler consiste en introducir una hidrólisis previa al proceso de digestión de la materia, aumentando el rendimiento de las plantas de Biogás hasta un 30%. Mediante este sistema, con la misma cantidad de biomasa, se obtiene un 30% más de energía. La disponibilidad de energía es fundamental para el desarrollo económico y técnico. En los países en desarrollo, la mayoría de las personas no tienen acceso a la energía, por tanto, ninguna oportunidad para desarrollar y mejorar sus vidas (34).

2.3.2. Sistema HPTC

High Performance Biogas Plant (HPTC) o planta de alta eficiencia y temperatura controlada, esta tecnología es apropiada para producir biogás, calor y electricidad a partir de biomasa y desechos, la alimentación del sistema es por lotes en tanques hidrolizados, la ingesta es de hasta 80 kg oDM / m³ en la hidrólisis (El biogás en plantas de una etapa la ingesta es alrededor de 4 kg), los parámetros de control son: acidificación dirigida en la hidrólisis - pH 6.5 - 4.5; la celulosa y la hemicelulosa se rompen a través de ácidos biológicos; el proceso termófilo de biología en la hidrólisis es de ($> 55^{\circ} \text{C}$), la hidrólisis y la acidificación resultante es de un 25-35% más de producción de metano en comparación con KTBL2004 - monitoreo BGA desde 2006.

La materia prima y su usabilidad en plantas de biogás de una y dos etapas involucra a hierba de trébol, hierba de alfalfa, etc. Es importante para mantener la fertilidad del suelo la materia prima de cultivos intercalados también utiliza residuos de biomasa, estiércol de caballo, biomasa del paisaje, humedales, entre otros, generalmente todos los materiales de desecho agrícola (35).

La *Figura 15* muestra una planta HPTC utilizada para internados, cocinas de colegios, restaurantes y mercados de mataderos, principalmente el gas producido es utilizado en cocinas, el biogás producido puede reemplazar el 80% del petróleo utilizado para generar electricidad, el subproducto valorizado es un biofertilizante de alta calidad, cuenta con el sistema de dos etapas (Hidrolisis y metanogénesis), el volumen del digester es de 25m³, su capacidad de producción es de 60 m³ por día (un digester de 20m³ produce un equivale a 3m³ de biogás por m³ de digerido) con un contenido de 50 al 60% de CH₄, 60m³ de biogás con un 60% de calidad de CH₄ equivale a 36m³ de CH₄ equivalente a 26Kg de GLP, 90Kg de madera o 36L de petróleo (36).

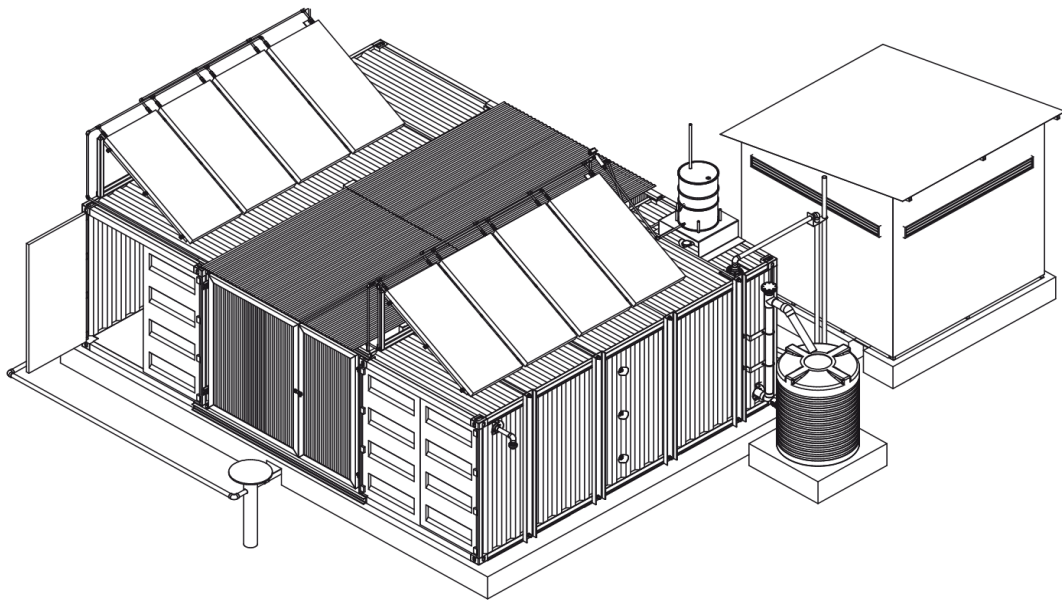


Figura 15. Planta de Alto Rendimiento de Temperatura y Biogás Controlada.
(Snowleopard Poster)

Para optimizar el biogás extraído, los procesos biológicos en una planta de biogás de varias etapas se separan deliberadamente en una planta de múltiples estadios (*Tabla 4*), (a excepción de una planta típica de 1 etapa donde todos los procesos deben realizarse en un solo tanque y no son tan eficientes).

La hidrólisis y la acidificación ocurren en los tanques de hidrólisis y la acetación y la metanización ocurren en el tanque del digestor. Al perfeccionar el proceso bioquímico de producción de biogás en etapas separadas, esta planta de etapas múltiples de DA planea extraer el 99.5% del potencial de biogás en una tonelada de materia prima (37).

Tabla 4. Proceso biológico en múltiples estadios.

MATERIA PRIMA	HIDROLIZACIÓN (1)	ACIDIFICACIÓN (2)	ACETIFICACIÓN (3)	METANIZACIÓN (4)
	COMPOSICIÓN	COMPOSICIÓN	COMPOSICIÓN	COMPOSICIÓN
EJEMPLOS	Ácidos Grasos, Aminoácidos, Alcoholes	Ácidos Grasos Volátiles, Alcoholes	Ácidos Acéticos, Dióxido de Carbono, Hidrógeno	Metanos (55%), Dióxido de Carbono (45%)
Gallina de pollo, Estiércol de pato, Hierba / ensilaje de maíz, Residuos de alimentos de paja, Residuos de matadero, Pomadas y EFB y mucho más ...	PROCESO termófilo 50 ° C - 55 ° C	PROCESO termófilo 50 ° C - 55 ° C	PROCESO Mesofílico 41 ° C - 44 ° C	PROCESO Mesofílico 41 ° C - 44 ° C
Lípidos, proteínas, carbohidratos	VALOR PH Ácido 4,5 - 7pH	VALOR PH Ácido 4,5 - 7pH	PH VALUE Neutral 7 - 8pH	PH VALUE Neutral 7 - 8pH

Fuente: Proyectos de Snow Leopard GmbH

La *Tabla 5* muestra que la hidrólisis y las bacterias metanogénicas se molestan entre ellas, estudios demuestran que las bacterias hidrolíticas y metanogénicas prefieren hábitats muy diferentes, cuando la planta de biogás es alimentada con baja carga volumétrica el impacto y las interferencias entre ellas es menor, las bacterias de hidrólisis son muy robustas, ellas son como los hooligans y toleran bien oscilaciones y fallos operacionales, Las bacterias de metano son como divas, muy sensibles a todas las perturbaciones. Por ello, estas dos poblaciones microbianas son separadas en el sistema Rottaler (38).

Tabla 5. Comparación de los diferentes requisitos de las bacterias de hidrólisis y las bacterias productoras de metano.

Indicadores	Bacterias de hidrólisis	Bacterias productoras de metano
Tiempo de Reproducción	De 3 Horas Hasta 3 días	De 6 a 14 días
Valor del pH	30°C hasta 65°C variable	37°C o 55°C
Vitalidad	Robusta, Aguanta perturbaciones en la temperatura y valores de pH	Muy sensibles a cualquier perturbación en el valor de pH y la temperatura
Sensibilidad aeróbica	Trabajan también ante la introducción de oxígeno, como en la carga de depósito de hidrólisis.	Mueren inmediatamente al contacto con el oxígeno
Producción de biogás	Poco contenido de metano de 0% a 30%	Alta cantidad de metano >50%

La *Figura 16* muestra un sistema experimental HPTC-RM instalado en el fundo de Majes de la UCSM basada en la tecnología de Proyectos de Snow Leopard, la planta cuenta con dos contenedores, el primero contiene dos tanques hidrolíticos (hidrólisis 1 e hidrólisis 2) de 3m³ cada uno, un sistema de control y de bombeo, el segundo contiene un biodigestor de geomembrana de 30m³, el biogás es almacenado en un reservorio de gas de 30m³, el sistema de DA es alimentado con un volumen de S de 2m³ por día, el sistema genera en promedio 7 m³ de biogás por día a partir de estiércol de cerdo, vacuno y algunos residuos agroindustriales (34).



Figura 16. Planta experimental HPTC-RM instalada en el fundo de Majes de la UCSM.

2.4. Biomasa

2.4.1. Potencial energético de la biomasa

Varios tipos de materia prima pueden ser utilizados para la producción de biogás, la biomasa es el principal componente para la generación de biogás, es con la cual se elabora el S que será alimentado a un digestor, entre los diferentes insumos utilizados para generar biogás podemos encontrar al estiércol, residuos de cultivos, residuos orgánicos procedentes de la producción de lácteos, industrias de alimentos y agroindustrias, lodos de aguas residuales, la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, desechos orgánicos de los hogares y de los negocios de catering, así como cultivos energéticos.

Una ventaja principal de la producción de biogás es la capacidad de utilizar los tipos de "biomasa húmeda" como materia prima, todos caracterizados por el contenido de humedad superior al 60-70% (por ejemplo, lodos de aguas residuales, estiércol animal, flotación lodos procedentes de la elaboración de alimentos etc.). En los últimos años, una serie de cultivos energéticos (cereales, maíz, colza), se han utilizado principalmente como materia prima para la producción de biogás en países como Austria o Alemania. Además de los cultivos energéticos, todo tipo de residuos agrícolas, cultivos dañados, no aptos para la alimentación o como resultado de las condiciones de cultivo y climáticas desfavorables, pueden ser utilizados para producir biogás y fertilizante. Una serie de subproductos animales, no aptos para el consumo humano, también puede ser procesada en las plantas de biogás (6).

En Alemania, el creciente número de plantas de biogás agrícola causa un aumento de la demanda de cultivos como materia prima en procesos de mono y codigestión, los laboratorios realizan pruebas de digestión anaeróbica por lotes en condiciones mesófilas de acuerdo con el procedimiento estándar alemán VDI 4630 (20), para ello llevan a cabo investigaciones con el fin de identificar la idoneidad de diferentes especies de plantas como cebada (*Hordeum vulgare*), centeno (*Secale cereale*), triticale (X *Triticosecale*), alfalfa (*Medicago sativa*), cáñamo (*Cannabis sativa*), alcachofa de Jerusalén (*Helianthus tuberosus*) y maíz (*Zea mays*) para la producción de biogás. Se enfocaron en la etapa de crecimiento y la madurez, respectivamente, así como en el ensilaje de cultivos enteros preparados sin aditivos como método de conservación para cultivos de biogás. Los resultados presentados indican que el rendimiento de biogás está claramente influenciado por las especies de plantas y etapas de cosecha. La materia ensilada muestra un efecto positivo en la biometanización con mayor rendimiento de biogás y contenido de CH₄ que la materia fresca (MF) investigada. Por lo tanto, consideran al ensilado como un tratamiento previo que también tiene potencial para mejorar la producción de CH₄ de materia vegetal. Los análisis de materiales digeridos revelan una reducción considerable de materia orgánica de todos los cultivos investigados. (39).

Investigaciones recientes reportaron la cosecha de biomasa marítima del Mar Báltico con el objetivo de mitigar la eutroficación y utilizar la biomasa recuperada para la producción de biogás, parte de esta biomasa está constituida por caña común (*Phragmites australis*), una de las plantas vasculares más extendidas en la Tierra, los objetivos específicos del análisis fueron: investigar el rendimiento de metano asociado con la co-digestión anaeróbica de la caña; hacer una evaluación de la energía primaria del sistema; cuantificar el ahorro de GEI cuando se reemplaza un sistema de referencia fósil; y estimar el potencial de reciclaje de nutrientes del sistema, se obtuvieron como resultados los cálculos de energía, con respecto al GEI identificaron limitaciones del sistema, diseño del sistema, métodos de asignación y selección de indicadores, utilizaron como caso de estudio un proyecto piloto que tiene lugar en el condado de Kalmar, Suecia. Para la experimentación en laboratorio utilizaron digestores continuos de tanque agitado, encontraron un aumento del rendimiento de metano de aproximadamente 220 m³ de CH₄ por cada tonelada de caña digerida, el sistema les

exigió un 40% aproximadamente de energía producida con un aporte del 50% de energía no renovable. El valor de la energía neta resultante de la investigación fue equivalente a 40 L de gasolina por tonelada de caña en estado fresco, del mismo modo evaluaron el potencial de GEI en comparación con un sistema de referencia fósil, encontraron que el margen era considerable (alrededor del 80%). Además, se estima que el 60% del nitrógeno y casi todo el fósforo en la biomasa podrían ser recirculados a la tierra cultivable como biofertilizante. Teniendo en cuenta los beneficios combinados de todos los factores investigados en este estudio, la recolección de juncos comunes en las zonas costeras tiene el potencial de ser beneficioso trabajando aspectos de sostenibilidad (40).

2.4.2. Disponibilidad de biomasa para metanización

La caracterización es un aspecto importante para seleccionar un tipo de biomasa la cual será utilizada como un componente para la elaboración de un sustrato, el Potencial de Sustrato Disponible (PSD) depende de si la biomasa se encuentra dispersa, agrupada o concentrada, a esta etapa se la conoce como caracterización de la biomasa, en la *Figura 17* se muestra las distintas biomásas indicándose si éstas están dispersas (D), agrupadas (A) o concentradas (C).

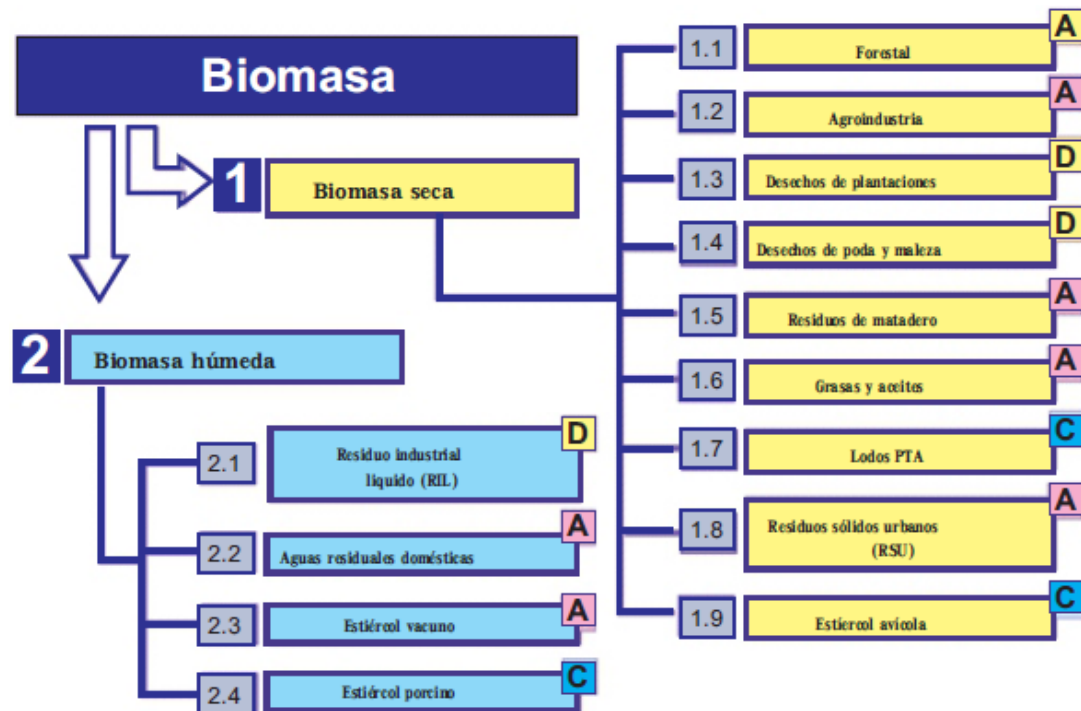


Figura 17. Clasificación de los distintos tipos de biomasa disponible indicándose si se encuentra dispersa (D), agrupada (A), o concentrada (C). (41)

Los criterios utilizados para definir las disponibilidades mínimas y máximas para las distintas biomásas son obtenidos de los procedimientos utilizados por las empresas, por ejemplo, en Chile la Industria vitivinícola tiene una categoría A debido a que en la actualidad el 81% de los residuos sólidos provenientes de la industria del vino son recolectados por Industrias Vínicas, lo que favorece su metanización. Del 19% que no son recolectadas, se asumen pérdidas del 5%, por otro lado, la industria procesadora de residuos de la industria vitivinícola tiene una categoría C que corresponde al 80% de los residuos que son retirados de las bodegas productoras de vinos. Se asume una generación del 80% de residuos luego de su procesamiento.

La Industria cervecera tiene una categoría C debido a que su biomasa se encuentra concentrada. En tres plantas se concentra más del 95% de la producción de cerveza. Se asume una pérdida del 5% y que parte del orujo puede emplearse como alimento animal, con respecto a la industria láctea se le atribuye una categoría A ya que los genera residuos sólidos en una forma más bien fugitiva y su recolección en forma separada no va más allá del 10%. La industria conservera es categoría D al ser una industria dispersa, se asume que sólo las empresas de un cierto tamaño pueden generar residuos metanizables. Además, parte de los residuos son utilizados como

alimento animal, por otro lado la Industria de bebidas infusionales con categoría C, concentrado sus residuos y se le asume pérdidas del 5%, los desechos de plantaciones son categoría D debido a que estos se encuentran muy dispersos y no se espera recuperar más del 25%, del mismo modo los residuos municipales de poda y maleza son categorizados como D ya que sólo las municipalidades grandes tendrían los recursos para su separación y posible procesamiento.

Los desechos de mataderos son categorizados como A, son los que mejor Potencial Energético (PE) pueden alcanzar, aunque, comúnmente son utilizados para la elaboración de harinas, siendo sólo entre el 10 y el 25% disponibles para metanizar, del mismo modo los residuos de la industria de grasas y aceites categorizados como A tienen en general un valor en el mercado y por tanto es bajo el porcentaje que puede metanizarse, por otro lado los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales con categoría C alcanzan el 50 % que se metaniza como valor mínimo, el resto como el 20% se descarta comúnmente es lo proveniente de plantas más chicas, los residuos sólidos urbanos categorizados como A tienen un porcentaje de rellenos para la captación de biogás, pero se recupera sólo el 30%, sin embargo existe no menos del 20% que puede metanizarse en reactores.

El Estiércol avícola de categoría C se encuentra dentro de una industria altamente concentrada y con residuos de fácil metanización. Se considera una pérdida del 3%, por otro lado, los residuos industriales líquidos de categoría D manejados con la respectiva normativa se espera que más del 60% de las plantas sean aerobias, el tratamiento anaerobio de aguas residuales categorizados como A se considera que podría tratarse una fracción del agua residual urbana en sistema anaerobio como pretratamiento al sistema aerobio. Mayores modificaciones no son posibles dadas las inversiones ya realizadas.

El estiércol vacuno de categoría A comúnmente el 50% se encuentra estabulado, lo que entrega la cota máxima. Además, se considera una fracción de las excretas en planteles no estabulados para los momentos en que los animales están en ordeña, finalmente el 50% de estiércol porcino de categoría C ya se metaniza y existe el potencial para los otros planteles, menos para el 5% más pequeño que en general no requieren sistemas de tratamiento (41).

Algunas investigaciones realizadas con residuos agroindustriales con alto contenido de lignina encontraron que la producción tradicional de biogás en estado sólido a partir de esta biomasa tiene algunos problemas, como la relativa baja del rendimiento de CH₄, inestabilidad del sistema de fermentación, entre otros, también mencionan que el problema puede ser resuelto cambiando el modo de estado sólido a modo de estado completamente líquido utilizando como sustrato el hidrolizado lignocelulósico. Sin embargo, aún no se tiene muy en claro el potencial y la posibilidad de esta nueva tecnología para aplicaciones industriales. Un estudio semipiloto para escalar la producción de biogás a largo plazo utilizando varios hidrolizados lignocelulósicos (hidrolizados ácidos de bagazo, paja de arroz y mazorca de maíz) como sustrato se llevó a cabo en un biorreactor anaeróbico de flujo ascendente de 100 L (circulación interna reactor, IC) durante 76 días, en la investigación se observó que durante la operación, el biogás se generó casi de inmediato cuando el sustrato fue bombeado al biorreactor de tal manera que la puesta en marcha puede finalizarse en un corto período de tiempo. Durante todo el proceso de fermentación, la mayoría de DQO (> 85%) de hidrolizados lignocelulósicos se utilizó para la producción de biogás.

Los resultados de la investigación mostraron un alto rendimiento de biogás (0.549 ± 0.058 m³ / kg de DQO consumido), rendimiento de metano ($0,381 \pm 0,043$ m³ / kg de DQO consumido) y contenido de CH₄ en biogás ($69.6 \pm 5.6\%$) pueden obtenerse respectivamente cuando el sistema de fermentación es estable. Variaciones del valor de pH de entrada y los tipos de hidrolizado lignocelulósico mostraron poca influencia en el rendimiento de operación de este sistema de fermentación, En general, la escala de fermentación, el período de operación, la eliminación de DQO, el rendimiento de biogás, CH₄ contenido en biogás, y rendimiento de operación con varios valores de pH de entrada y diferentes tipos de exposiciones de sustrato que esta tecnología propone muestra un gran potencial y posibilidad de industrialización (42).

También son considerados los residuos agroindustriales en estado de putrefacción, por ejemplo, se ha demostrado que las patatas pútridas pueden ser utilizadas como complemento para la aplicación como biomasa y su conversión en biogás. Los investigadores realizaron a escala laboratorio experimentos en un reactor con un volumen de 140 dm³ donde encontraron que las patatas pútridas (pútridas en 10 a 20% en volumen) pueden manejarse como una carga satisfactoria para el tanque

de fermentación. Sin embargo, su potencial para la generación de biogás es más baja que la del maíz, en la investigación menciona que el poder calorífico del biogás obtenido de la fermentación de las patatas en la comparación con el maíz es menor en aproximadamente un 35%. Aunque las patatas podridas no son tan buenas como el maíz para la generación de biogás en plantas de energía agrícola de biomasa a biogás, estas no estropean el proceso de fermentación, por lo tanto, pueden ser agregado a los tanques de fermentación sin ningún riesgo de reducir la capacidad del proceso de fermentación o matar a las bacterias metanogénicas (43)

Así como la patata podrida también se consideran otras fuentes de biomasa que acompañen al sustrato de origen agroindustrial, por ejemplo, en Alemania evaluaron el manejo de la hierba como sustrato para la biometanización debido a que los períodos de cosecha desde mediados de junio hasta febrero conducen a una muy heterogénea obtención de material con características de sustrato extremadamente variables, debido a los patrones estacionales del manejo de la hierba en relación al rendimiento de biogás y metano, los investigadores tomaron muestras cada mes desde el primer corte de un prado (Pradera de cola de zorra) durante más de tres años desde 2001 a 2004 y fue digerida anaeróbicamente en experimentos por lotes a escala de laboratorio.

Los rendimientos de biogás específicos del sustrato disminuyen linealmente a lo largo de la temporada desde 547 IN / kg VS en junio a 299 IN / kg VS en febrero. Los contenidos de metano permanecen en gran parte constante durante el año con un valor medio de 52 % Vol. El patrón estacional de los rendimientos de metano específicos del sustrato corre paralelos a los rendimientos de biogás y disminuyen desde 298 IN / kg VS en junio a 155 IN / kg VS en febrero. Los rendimientos de metano específicos del área muestran un máximo de 1604 m³ ha⁻¹ en septiembre, el rendimiento de biogás y metano del manejo de la hierba es relativamente baja en comparación con la de otros sustratos de cultivos agroindustriales (44).

2.5. La broza de paprika

2.5.1. Broza de paprika

La broza es una agrupaci3n de hojas, ramas, tallo, flores, y demas despojos de la planta de paprika despues de su cosecha del fruto. Planta: herbacea perenne, con ciclo de cultivo de porte variable entre los 0,5 metros (en determinadas variedades de

cultivo al aire libre) y más de 2 metros, en gran parte de los híbridos cultivados en invernadero. Sistema radicular: pivotante y profundo (dependiendo de la profundidad y textura del suelo), con numerosas raíces adventicias que horizontalmente pueden alcanzar una longitud comprendida entre 50 centímetros y 1 metro (45).

Tallo principal: de crecimiento limitado y erecto. A partir de cierta altura (“cruz”) emite 2 o 3 ramificaciones (dependiendo de la variedad) y continúa ramificándose de forma dicotómica hasta el final de su ciclo (los tallos secundarios se bifurcan después de brotar varias hojas, y así sucesivamente) (45). Hoja: entera, lampiña y lanceolada, con un ápice muy pronunciado (acuminado) y un pecíolo largo y poco aparente. El haz es glabro (liso y suave al tacto) y de color verde más o menos intenso (dependiendo de la variedad) y brillante. El nervio principal parte de la base de la hoja, como una prolongación del pecíolo, del mismo modo que las nerviaciones secundarias que son pronunciadas y llegan casi al borde de la hoja.

La inserción de las hojas en el tallo tiene lugar de forma alterna y su tamaño es variable en función de la variedad, existiendo cierta correlación entre el tamaño de la hoja adulta y el peso medio del fruto (45). Flor: las flores aparecen solitarias en cada nudo del tallo, con inserción en las axilas de las hojas. Son pequeñas y constan de una corola blanca.

Los residuos de cosecha de paprika y los subproductos son desechados usualmente en formas frescas o dejadas al ambiente para ser luego quemados y así poder reducirlos contaminando el medio ambiente; sin embargo, esta broza tratada es posible utilizarla como biomasa para la obtención de energía a partir del biogás generado por una biodigestión anaerobia en dos etapas.

a) **Cultivo de páprika**

El ají páprika (*Capsicum annuum L. var longum*) es un cultivo originario de América del Sur y Centro América, concretamente Perú y México. Es una planta herbácea, y tiene como importancia económica por ser uno de los colorantes naturales de mayor demanda e importancia en el mundo, se usa en la industria alimentaria, farmacéutica y de cosméticos.

La páprika se desarrolla favorablemente en clima tropical y semitropical, de alta iluminación, con suelos preferentemente sueltos con buen contenido de materia

orgánica y sobre todo con buen drenaje. En nuestro país, el cultivo de manera empresarial se inicia el año 1994, en la zona de Villacurí del departamento de Ica, actualmente es cultivado en la costa norte y sur del país en los departamentos de Arequipa, Lima, Ica, Tacna, Ancash, La Libertad, Piura y Lambayeque, para un buen rendimiento debe darse un adecuado manejo agronómico. Las variedades que actualmente se siembran en el Perú son: Paprika King, Paprika Queen, Sonora y Papribella.

Desde el año 2008, la paprika se ha exportado a países como España, EE. UU., México convirtiéndose en un importante cultivo hortofrutícola de agroexportación peruana, después del espárrago.

b) Adaptación agroecológica y factores

Al momento de elegir la zona y época de instalación del cultivo de ají paprika, se debe tener en cuenta diversos factores como el clima, suelo, agua, humedad relativa y luminosidad, estos factores hacen que sea uno de los cultivos mas importantes de la zona costera del Peru y a su vez una fuente de residuos organicos por la broza generada por la etapa de desbroce una vez cumplida su vida util.

El clima: en cultivos de paprika se desarrolla bien con una temperatura que oscila entre los 13 °C y 28°C, en general puede ubicarse a lo largo de la costa peruana y los valles interandinos de la sierra.

Las fases del desarrollo del cultivo son influenciadas por la temperatura, existiendo un rango (*Tabla 6*).

Tabla 6. Factores climáticos para el cultivo de páprika

FASE FENOLÓGICA	TEMPERATURA C		
	Optima	Mínima	Máxima
Germinación	20 a 25	13	28
Crecimiento vegetativo	20 a 25 (DIAS)	13	28
	16 a 18 (NOCHE)		
Floración y fructificación	25 a 26 (DIAS)	13	28
Cosecha y post cosecha	20 a 25	22	28

Las variaciones marcadas de temperatura, entre la máxima diurna y la mínima nocturna, puede ocasionar desequilibrios vegetativos en el cultivo.

El suelo: la planta de la paprika prefiere suelos francos a francos arenosos, sueltos y ligeros, que permiten adecuada oxigenación de las raíces, buena permeabilidad y buen drenaje. Prefiere suelos de reacción ligeramente ácida pH 6-6.5; es moderadamente tolerante a la salinidad, cultivos bajo riego por goteo pueden tolerar una salinidad hasta de 8 dS/m; mientras en riego por gravedad puede tolerar hasta 4 dS/m.

El cultivo responde muy bien a suelos ricos en materia orgánica, esta mejorar la retención de humedad y las condiciones fisicoquímicas del suelo.

El agua: además de ser de buena calidad es necesaria una dotación segura ya que el cultivo ve afectado su desarrollo normal principalmente en la fase de floración y fructificación y se torna más susceptible a plagas y enfermedades; debido al estrés, se incrementa la pungencia o el fruto se deforma acordonndose.

La humedad relativa óptima: para el cultivo oscila entre el 50% a 70%, la humedad relativa elevada favorece el desarrollo de algunas enfermedades fungosas dificultando la polinización floral; si el fruto se encuentra en crecimiento llegan a desarrollar mayor longitud, sin implicar necesariamente mejor calidad.

La luminosidad: la planta de páprika es muy exigente en luminosidad, sobre todo en los primeros estados de desarrollo y durante la floraci3n, para ello se debe determinar una densidad de siembra adecuada.

La luminosidad y temperatura, determina el buen color índice de calor, asociado directamente a los niveles altos de grados ASTA, alcanzados por los frutos, inciden en este valor la humedad relativa, genética y el manejo de la fertilizaci3n.

Cosecha y post cosecha: la cosecha se inicia aproximadamente a los 150 días pudiendo extenderse hasta los 210 días, dependiendo del tipo de siembra (directa o indirecta), es importante que se realice cuando las plantas presentan frutos maduros, de color rojo intenso, con el pedúnculo de color amarillento, además deben estar flácidos y con la punta arrugada, lo cual permite un secado uniforme.

Antes de alcanzar su completa maduraci3n los frutos de páprika se presentan tersos y rojo brillante, pero no estn totalmente maduros aptos para la cosecha. Estos pueden comprobarse abriendo los frutos y observando como las placentas estn blanquecinas en lugar de rojas. Este tipo de frutos deben ser evitados a la hora de recolecci3n pues tienen de 15% a 20% menos de colorantes naturales.

Los frutos turgentes y rojos son propensos a pudriciones y demoran en el secado. Esta labor se efectúa manualmente teniendo en cuenta de no dañar las plantas. El color de la páprika va cambiando de tonalidad de rojo intenso en el momento de la cosecha a un rojo concho de vino al momento del secado. Cuando los frutos tienen de 12% a 14% de humedad se deben seleccionar y clasificar.

Los rendimientos son de 4000 a 6000 kg/ha, en estado seco, por riego de gravedad y en riego por goteo de 5000 a 8000 kg/ha. El periodo de cosecha se extiende entre 45 y 60 días, se requieren de 60 a 70 jornales por hectárea para la cosecha.

Para el secado los frutos cosechados se deben colocar en una era de cemento limpio cubierto de lona, sin peligro de inundaciones, alejados de caminos para evitar el polvo, preferentemente cercados para evitar la entrada de animales, libre de contaminantes del producto; el secado debe hacerse e líneas de 1 m de ancho y 12 cm de altura, dejando 60 cm de camino de camino para poder realizar el volteo que va a permitir el secado uniforme que se realiza cada 3-4 días. El periodo de secado

dependerá del contenido de humedad del fruto y de las condiciones del clima, se estima no mayor de 7 a 10 días acortándose en los meses de verano (46).

Esta información es importante para determinar el potencial de biomasa disponible (PBD) debido a que permite escalar los residuos obtenidos después del desbroce por temporada y hectárea.

2.6. El estiércol bobino como biomasa

2.6.1. El estiércol bovino

Las vacas lecheras generan, según cálculos realizados a partir de datos de (47), una media de 2.120 kg de estiércol seco por animal y año. Para un contenido medio en sólidos del estiércol del 15%, la producción equivale a 14.133 kg por animal y año o 38,7 kg de estiércol por animal y día. Este valor es similar al recogido por otras fuentes, de 40 l por animal y día (48). (49) fijan en 1.200 kg la producción de estiércol seco por animal y año en el caso específico de ganado vacuno de carne.

Existe una gran variabilidad en la composición del estiércol bovino que dificulta la previsión de los efectos que pueden producir sobre el medio ambiente y sobre los procesos de tratamiento a los que pueden ser sometidas. Dicha variabilidad se debe al efecto de factores tan diversos como son la especie, raza y destino del animal, su alimentación, cría y materiales utilizados como cama y cantidades de estos, la gestión de las aguas de lavado, tratamiento posterior de la deyección, etc.

Puede generalizarse que las deyecciones ganaderas tienen altos contenidos en materia orgánica y elementos minerales, así como cantidades usualmente poco importantes de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y restos de antibióticos, presentando también una altísima actividad biológica (50). En las deyecciones frescas la mayor parte del nitrógeno se encuentra en forma orgánica, mientras que el fósforo presenta relaciones muy variables entre sus formas minerales y orgánicas (50).

La variación en la composición del estiércol depende de la especie animal, de su alimentación, contenido de materia seca (estado fresco o secado) y de cómo se le haya manejado. Para la práctica y uso en general se puede considerar que el estiércol contiene: 0,5 por ciento de nitrógeno, 0,25 por ciento de fósforo y 0,5 de potasio, es decir que una tonelada de estiércol ofrece en promedio 5 kg de nitrógeno, 2,5 kg de

fósforo y 5 kg de potasio. Al estar expuesto al sol y la intemperie, el estiércol pierde en general su valor. (51)

2.6.2. Producción de leche y el estiércol bovino

El Estiércol no es sólo materia fecal, son derivados de la producción ganadera que incluyen excremento animal, material de cama, agua de lavado, alimento salpicado, limpiadores y pelos. Su composición varía entre límites muy grandes, dependiendo de la edad, clase y características de los animales, cantidad y digestibilidad del forraje, alimentos concentrados consumidos por el ganado, cantidad y tipo de cama, duración, forma de almacenamiento y método de manejo del estiércol. En su mayor parte está compuesto por materia orgánica, cantidades importantes de minerales y micronutrientes que le confieren buenas cualidades como mejorador de las propiedades químicas y físicas de los suelos, y portador de cantidades de nutrimentos importantes para las plantas, también la bosta contiene entre 1/3 y 1/2 del nitrógeno excretado por el ganado y representa un camino eficiente para el reciclaje del nitrógeno en los pastos, la incorporación de la bosta, al igual que el uso de fertilizantes inorgánicos, aumenta el rendimiento del forraje, la producción de proteína cruda, la producción potencial de semillas y el vigor aparente de las plantas (52).

En la mayoría de las unidades pecuarias es inevitable almacenar el estiércol en un periodo de tiempo antes de darle una disposición final. En estas condiciones el estiércol acumulado se convierte en fuente de moscas y helmintos, que cumplen parte de su ciclo biológico y se multiplican en las bostas frescas y estercoleros, que afectan la salud animal. Para evitar esos inconvenientes se deben realizar los tratamientos siguientes: Físico. Calor. Con la elevación de la temperatura se eliminan muchos microorganismos. Es poco utilizado porque requiere de combustible fósil. Se emplea ante la existencia de una enfermedad altamente contagiosa. Químico. Aplicación de desinfectantes químicos, entre ellos cal viva y formaldehído. Elevan su efectividad con la homogenización, permitiendo que las partículas sólidas se disuelvan y los microorganismos se pongan en contacto con los desinfectantes, tiene el inconveniente económico de que el volumen de desinfectante a utilizar depende de la cantidad de estiércol a tratar. Biológico. Relacionado a microorganismos aerobios y anaerobios que descomponen la materia orgánica presente en el estiércol.

Hay dos métodos muy utilizados en el mundo, el silo de estiércol y el biodigestor. La biodigestión anaeróbica representa una alternativa para el tratamiento inicial del estiércol, debido a que, además de permitir reducir al mínimo el potencial de contaminación y los riesgos sanitarios de los efluentes, produce energía (biogás) y promueve el reciclaje del efluente (bioabonos) (52).

2.7. Indicadores económicos de implementación

Para implementar una planta de biogás se debe de considerar el PE y es necesario definir indicadores para la evaluación de su desempeño económico. Las técnicas de evaluación de proyectos están recomendadas en “Análisis y evaluación de proyectos de inversión” de Raúl Coss Bu (53). Los principales indicadores de proyectos son:

2.7.1. Retorno de la inversión (PRI)

Este indicador calcula el tiempo en que el periodo tarda en recuperar la inversión según la *Ecuación (4)*:

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^r F_t \quad (4)$$

Donde I_0 corresponde a la inversión inicial del proyecto, F_i al flujo de efectivo en el período i y T al periodo de retorno de la inversión, en donde la ecuación se cumple.

2.7.2. Valor actual neto (VAN)

Este indicador corresponde a la suma de los flujos de efectivo del proyecto para un tiempo cero (actual). Para un proyecto en el que se están evaluando N periodos el VAN se calcula según la *Ecuación (5)*:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=0}^N \frac{F_t}{1 + r^t} \quad (5)$$

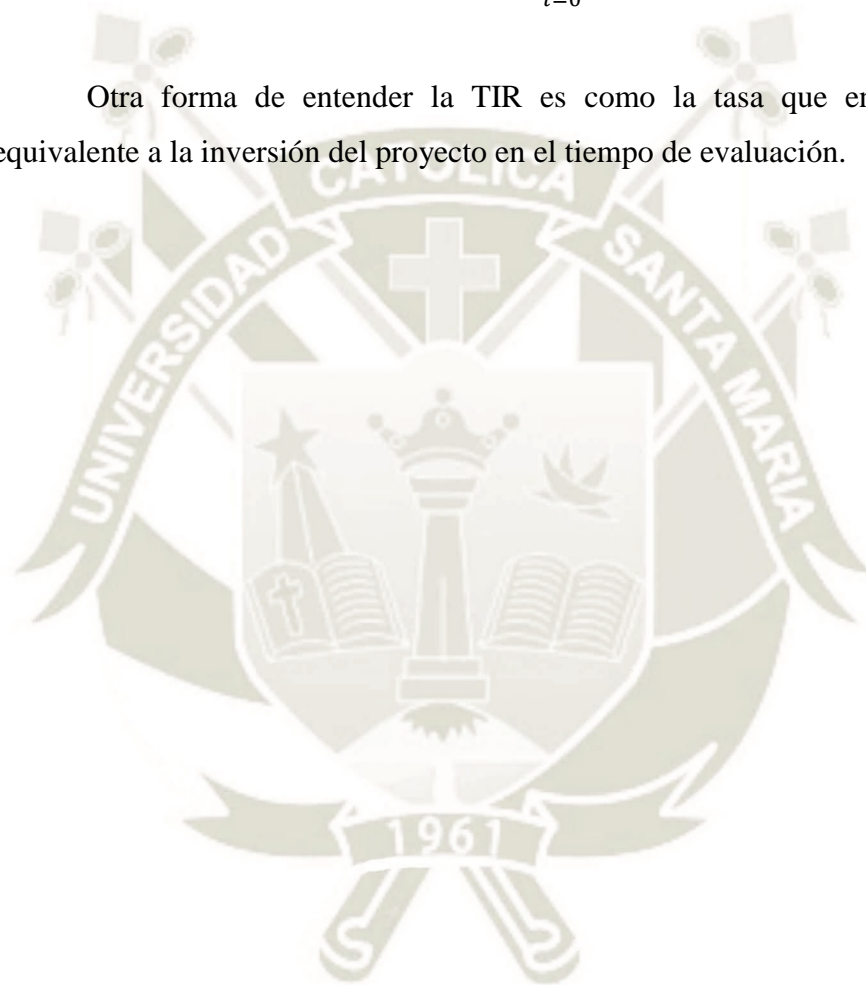
Donde r representa la tasa de descuento del proyecto que aumenta para sistemas más riesgosos y representa el valor del dinero en el tiempo. Un proyecto que retorne flujos de efectivo posee un VAN mayor a cero.

2.7.3. Tasa interna de retorno (TIR)

Este indicador se define como la tasa de descuento a la que el proyecto posee VAN igual a cero. Luego la TIR se puede calcular igualando a cero tal como se muestra en la *Ecuación (6)*:

$$VAN = -1_0 + \sum_{i=0}^N \frac{F_i}{(1 + TIR)^i} \quad (6)$$

Otra forma de entender la TIR es como la tasa que entrega un monto equivalente a la inversión del proyecto en el tiempo de evaluación.



CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CAMPO DE VERIFICACIÓN

3.1.1. Lugar de ejecución

La investigación se llevó a cabo en el laboratorio del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Católica de Santa María (UCSM) F-405 y en el laboratorio del campus universitario H-405 respectivamente.

3.1.2. Ubicación espacial

La Universidad Católica de Santa María se ubica en la Urb. San José s/n, Yanahuara, Arequipa-Perú.

3.2. MATERIALES

3.2.1. Material biológico

Materia Prima

Para evaluar la generación de biogás y CH_4 a partir de biomasa Residual (BR) en reactores Batch Lab de 0.5L y 20L se recolectó muestras de Broza de Páprika (BP) y de Estiércol Bobino (EB) provenientes de la actividad agropecuaria de la empresa “Agrícola Pampa Baja S.A.C.” ubicada en el Km 4.5 carretera vía majes (Arequipa – Perú).

Inóculo

Para determinar el potencial de producción de metano se utilizó el consorcio de microorganismos mesófilos anaerobios metanogénicos de la planta experimental de biogás RM HPTC de dos etapas, instalada en el campus de fundo “La Católica” propiedad de la UCSM ubicada en la irrigación de Majes provincia de Caylloma en el Departamento de Arequipa.

3.2.2. Materiales de laboratorio

Material de vidrio u otros

- Frascos graduados de tapa rosca (500ml)
- Accesorios de bronce
- Matraz de 500ml
- Tamiz N° 150
- Cernidor

Equipos

- Multitec 540
- Biodigestor de 20L
- Gasómetro
- pH-metro
- Sistema Medpost 2015
- Baño María
- Moulinex, 123

Software

- Excel
- Statgraphics centurión

3.3. MÉTODOS

3.3.1. Recolección y tratamiento de la materia prima

Se recolectó la BP como principal fuente de materia orgánica para ser transformada en biogás y CH₄, también se recolectó EB como fuente de consorcio de microorganismos (hidrolíticos, acidogénico, acetogénicos y metanogénicos), se obtuvo el lodo de siembra o inóculo de la planta HPTC-RM de la UCSM como fuente de consorcios de microorganismos metanogénicos y el biofertilizante líquido de la planta se utilizó como efluente recirculante.

Recolección de Broza de Páprika (BP)

Se obtuvo la BP de la actividad de desbroce, una vez cumplido el ciclo productivo de la planta de páprika y cosechado el fruto se despejó el material orgánico,

se introdujeron en bolsas de plástico de contextura gruesa y resistente para evitar la pérdida de humedad, las bolsas con el contenido de broza de páprika fue transporta a laboratorio y almacena en un lugar fresco, el material no debe de ser almacenado por más de 7 días para evitar su descomposición, enmohecimiento y perdida de humedad.

Recolección de Estiércol Bovino (EB)

El EB fue recolectado en estado húmedo con escasa presencia de purines, este se obtuvo de la estercolera y fue recolectado en bolsas de plástico gruesas y cerradas como en el procedimiento anterior, una vez transportado el material biológico se vertió en un balde, se cubrió y almacenó por no más de 15 días en un lugar fresco con el objetivo de evitar que durante el proceso de compostaje pierda micronutrientes y actividad microbiana hidrolítica y metanogénica acorde a las condiciones dadas en la presente investigación.

Obtención del lodo de siembra (LS) y efluente recirculante (ER)

Se obtuvo el LS y el ER en bidones de 8 litros, durante su recolección se evitó el contacto con el oxígeno del aire para impedir que el LS pierda actividad microbiana, , el lodo fue tomado de la parte media del biodigestor de la planta experimental de biogás HPTC-RM de la UCSM, este presentó un color verde oliva (#808000) y olor azufrado, para recolectar el ER primero se homogenizó in situ y posteriormente se vertió al bidón de 8 litros, el aspecto del biofertilizante líquido (BL) fue de color verde negruzco (#343e40) y no presentó olores significativos, no se requirió mayores cuidados para el almacenamiento de este último.

3.3.2. Pretratamiento de la materia prima.

A continuación, se describen los procedimientos de caracterización utilizados para el pretratamiento del material orgánico y biológico recomendado por la normativa alemana VDI 4630.

Pretratamiento de la Broza de Páprika.

Se fragmentó la BP en tamaños pequeños entre 1 a 3 cm, luego se puso a secar al medio ambiente, una vez seca la broza de páprika se utilizó una Picadora (Moulinex,

123) para particular sus fragmentos, se utilizó un tamiz N° 150 para obtener partículas más finas, finalmente se envió a caracterizar la materia orgánica y se almacenó a 5°C para que mantenga sus propiedades.

Pretratamiento de Efluente Recirculante (ER)

Se filtró el efluente de la planta experimental de biogás RM-HPTC en un cernidor y se obtuvo dos subproductos conocidos como biol y biosol, el biol es el contenido líquido y el biosol es la torta obtenida, el biol se caracterizó y se conservó a temperatura ambiente para ser utilizado como ER en los ensayos de optimización.

Pretratamiento de los Lodos de Siembra (LS)

Se transportó el LS obtenido de la planta RM-HPTC de la UCSM al laboratorio, posteriormente estos fueron homogenizados e inmediatamente vertidos en frascos de 500ml adaptados para la fermentación Batch (Batch Lab), se mantuvo a una temperatura de 37 °C para reactivar la actividad metanogénica en un baño María digital, cada 3 días se eliminó el biogás producido hasta expulsarlo por completo, esto nos indicó que el material orgánico aún presente fue completamente degradado, finalmente se caracterizó el LS para los ensayos de optimización.

3.3.3. Caracterización fisicoquímica de la materia prima

Se realizó una caracterización físico-química del material orgánico, se utilizó 500g de BP, 500mg de EB, 500ml de LS y 500ml de ER para determinar las proporciones del sustrato en los ensayos, se caracterizó la materia prima con un requerimiento mínimo de parámetros: Sólidos Totales (ST) en base a porcentaje de Masa Fresca (%MF), Sólidos Volátiles (SV) en base a porcentaje de Sólidos Totales (%ST), SV en base a porcentaje %MF, Humedad (H) en %MF, cenizas en base a porcentaje de Sólidos Totales (%ST), también se caracterizó los compuestos elementales tales como Nitrógeno (N) y Carbono (C) ambos en base a %ST para determinar la relación entre el C:N, finalmente se midió el pH.

Los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de control de calidad de la UCSM acorde con los métodos estándar descritos en los manuales, para la

determinación de ST, H y Materia orgánica, se utilizó el método gravimétrico, para la determinación de materia volátil, también se utilizó el método gravimétrico adaptado de COVENIN 1647-80, para la determinación de cenizas se utilizó el método gravimétrico adaptado de NTP 209.265.2001, la relación C:N se obtuvo de la norma mexicana NMX-AA-067-1985.

3.3.4. Elaboración de sustrato hidrolizado (SH)

Se identificó las proporciones optimas del S (CSBP+CSEB) en el contenido de sólidos (CS) para mejorar el desempeño en la obtención de CH₄ en el biogás generado mediante la DA de la carga del sustrato hidrolizado (CSH), también para disminuir el TRH y evaluar el efecto del ER en el contenido líquido (CL). Se optimizó el proceso utilizando la metodología de superficie de respuesta, lo cual requirió un diseño experimental previo para designar las proporciones porcentuales en los ensayos de hidrolización que fueron agregadas en los ensayos de metanización (Tabla 7), donde la temperatura (T), el contenido de sólidos totales (CST) en el sustrato, relación inóculo sustrato (I/S) y volumen de carga (VC) fueron los principales delimitantes considerados para formular las mezclas.

Tabla 7. Designación de proporciones porcentuales en los ensayos de Hidrolización y Metanización.

Ensayo Metanogénico (EM)	Contenido de Lodo de siembra (CLS) 80%	Lodo de Siembra (LS)		
	Digestor Anaerobio Metanogénico (RM) a escala Laboratodio (Batch-Lab) Contenido másico en el reactor Metanogénico (CM _{Batch-Lab}), g. 100%	Contenido de Sustrato Hidrolizado (CSH) 20%	Ensayo Hidrolítico (EH) Reactor Hidrolítico (RH) a escala laboratorio (Hidro- lab) Contenido másico en el reactor Hidrolítico. (CM _{hidro-lab}), 100%	Variables Porcentuales de BP, VP _{BP} Variables Porcentuales de EB, VP _{EB} Variables Porcentuales de ER, VP _{ER} Variables porcentuales de H ₂ O, VP _{H₂O}

Se delimitó el contenido en el sustrato al 10% de ST recomendado por el manual VDI-4630 (2006), también se fijó este valor considerando la eficiencia y mantenimiento de las bombas comúnmente utilizadas para la carga del sustrato al reactor metanogénico (RM), También se procuró que la relación I/S no sea significativamente menor a 2 con el fin de evitar la inhibición en los ensayos de acuerdo a lo consultado en el manual VDI-4630 (2006), esto ayudó a determinar el volumen máximo de carga al RM de 1/5 de Sustrato debido al potencial de recurso de material biológico que presenta el caso de estudio que cuenta con más de 3 000 cabezas de ganado y 152 has de páprika con un potencial de inversión de S/. 60 000 que implica alimentar a un RM de 30 m³.

Se elaboró un diseño factorial completo 2² con puntos centrales para determinar las VP_{BP} en el CS y las VP_{ER} en el CL a ser mezcladas en el CM Hidro Lab correspondientes a un 10% y 90% respectivamente, las variables, niveles y matriz factorial se muestran a continuación (Tabla 8).

Tabla 8. Niveles de variables de BP y ER para el diseño factorial correspondiente a la optimización de la producción de biogás y metano (CH₄).

Variables	Niveles				
	-1	0	1	-1.4142	1.4142
X ₁ [BP]	2	5	8	0.7574	9.2426
X ₂ [ER]	25	50	75	14.645	85.355

Se prepararon los ensayos para la hidrolización del sustrato a un volumen de 500 ml en frascos de 1L tapados con papel aluminio para evitar la pérdida de líquido y permitir el acceso de oxígeno, los ensayos se trataron a una temperatura de 50°C y a una concentración de ST del 10%, para ello se utilizó el baño María adaptado (BMA), se hidrolizó durante un periodo de 72 horas con agitación manual cada 24 horas durante 30 segundos acorde a los resultados de investigaciones realizadas previamente, durante la operación de agitación se realizó un seguimiento a la hidrólisis midiendo

inicialmente el pH y posteriores mediciones cada 24 horas durante un periodo de 3 días con un pH-metro HANNA HI98103 CHECKER 1 (Imagen 1).

Obtención de variables porcentuales

A continuación, se detallan los procedimientos ejecutados para obtener las VP_{BP} , VP_{EB} , VP_{ER} y VP_{H2O} .

Se procesaron las variables reales (VR) del diseño factorial para obtener las VP_{BP} en el CS y las VP_{ER} en el CL, los pasos se detallan a continuación en la *Ecuación (7)* y la *Ecuación (8)*.

$$VP_{BP} = \frac{VR_{BP}}{0.1} \tag{7}$$

Dónde:

VP_{BP} = Variables porcentuales de broza de páprika, %.

VR_{BP} = Variable real de broza de páprika, %.

0.1 = Factor decimal delimitante correspondiente al 10% de sólidos totales en la carga de sustrato hidrolizado.

$$VP_{ER} = \frac{VR_{ER}}{0.9} \tag{8}$$

Dónde:

VP_{ER} = Variables porcentuales del efluente recirculante, %.

VR_{ER} = Variable real del efluente recirculante, %.

0.9 = Factor decimal correspondiente al 90% de CL en el Hidro-Lab.

Las VP_{EB} y las VP_{H2O} se obtuvieron restando de su total proporcionado en la *Tabla 7* como se indican en la *Ecuación (9)* y la *Ecuación (10)*.

$$VP_{EB} = 100\% - VP_{BP} \quad (9)$$

Dónde:

VP_{EB} = Variables porcentuales de estiércol bovino, %.

VP_{BP} = Variables porcentuales de broza de páprika, %.

100% = Total, porcentual del contenido de sólidos.

$$VP_{H2O} = 100\% - VP_{ER} \quad (10)$$

Dónde:

VP_{H2O} = Variables porcentuales de agua, %.

VP_{ER} = Variables porcentuales de efluente recirculante, %.

100% = Total, porcentual del contenido de sólidos.

Obtención de las variables de contenido sólido y líquido

Las proporciones CS_{BP} y $CSEB$ en el CM Hidro Lab se obtuvieron en condiciones de sólidos totales (ST), se utilizaron los factores decimales de VP_{BP} (FVP_{BP}), de VP_{EB} ($FVPEB$) y el factor decimal delimitante correspondiente al 10% de sólidos totales en la carga de sustrato hidrolizado tal como se muestra en la *Ecuación (11)* y *Ecuación (12)*.

$$CS_{BP} = CM_{Hidro\ Lab} * 0.1 * FVP_{BP} \quad (11)$$

Dónde:

CS_{BP} = Contenido Sólido de broza de páprika, g.

$CM_{Hidro\ Lab}$ = Contenido Másico del reactor hidrolítico a escala laboratorio, g.

0.1 = Factor decimal delimitante correspondiente al 10% de sólidos totales en la carga de sustrato hidrolizado.

FVP_{BP} = Factores decimales de las variables porcentuales de broza de páprika.

$$CS_{EB} = CM_{Hidro-Lab} * 0.1 * FVP_{EB} \quad (12)$$

Dónde:

CS_{EB} = Contenido Sólido de estiércol bovino, g.

CM_{Hidro-Lab} = Contenido Másico del reactor hidrolítico a escala laboratorio, g.

0.1 = Factor decimal delimitante correspondiente al 10% de sólidos totales en la carga de sustrato hidrolizado.

FVP_{EB} = Factores decimales de las variables porcentuales de estiércol bovino.

El CL_{ER} y CL_{H₂O} se obtuvieron utilizando los FVP del CL acorde al CM_{Hidro-Lab} de acuerdo a lo especificado a continuación *en la Ecuación (13)* y la *Ecuación (14)*.

$$CL_{ER} = CM_{Hidro-Lab} * 0.9 * FVP_{ER} \quad (13)$$

Dónde:

CL_{ER} = Contenido líquido del efluente recirculante, g.

CM_{Hidro-Lab} = Contenido Másico del reactor hidrolítico a escala laboratorio, g.

FVP_{ER} = Factores decimales de las variables porcentuales de estiércol bovino.

0.9 = Factor decimal correspondiente al 90% de CL en el Hidro-Lab.

$$CL_{H2O} = CM_{Hidro-Lab} * 0.9 * FVP_{H2O} \quad (14)$$

Dónde:

CL_{H2O} = Contenido líquido, g.

$CM_{Hidro-Lab}$ = Contenido Másico del reactor hidrolítico a escala laboratorio, g.

FVP_{H2O} = Factores decimales de las variables porcentuales de agua.

0.9 = Factor decimal correspondiente al 90% de CL en el Hidro-Lab.

Obtención de proporciones másicas a ser agregadas a los ensayos Hidrolíticos a escala laboratorio.

Se obtuvieron las proporciones másicas (PM) a ser agregadas en el $CM_{Hidro-Lab}$ en condiciones de MF de BP (PMF_{PMBP}) y de EB (PMF_{EB}) utilizando un factor de conversión a materia fresca de Broza de Páprika el cual se consiguió mediante la caracterización del porcentaje de ST en base MF de la BP (ST_{BP}) y del EB (ST_{EB}) acorde a la *Ecuación (15)* y *Ecuación (16)*

$$PMF_{BP} = CS_{BP} * 1.0993 \quad (15)$$

Dónde:

PMF_{BP} = Proporción másica de Broza de Páprika en base a materia fresca en el ensayo hidrolítico, g.

CS_{BP} = Contenido Sólido de broza de páprika, g.

1.0993 = Factor de conversión a Materia fresca de Broza de Páprika, 100/ ST_{BP} (FM).

$$PMF_{EB} = CS_{EB} * 1.7253 \quad (16)$$

Dónde:

PMF_{EB} = Proporción másica de Estiércol Bovino en base a Materia Fresca en el ensayo hidrolítico, g.

CS_{EB} = Contenido Másico del reactor hidrolítico a escala laboratorio, g.

1.7253 = Factor de conversión a Materia fresca de Estiércol Bovino, 100/ ST_{EB} (FM).

La proporción del contenido líquido de ER a ser agregado no fue modificada más que su rútilo (CLA_{ER}), La humedad (H) acarreada de las PMF_{BP} y PMF_{EB} fueron considerados en los cálculos de contenido de líquido de agua CL_{H_2O} a ser agregados tal como se muestra en la *Ecuación (17)*.

$$CL_{H_2O} = CM_{Hidro Lab} - (PMF_{BP} + PMF_{EB} + CLA_{ER}) \quad (17)$$

Dónde:

CL_{H_2O} = Contenido de líquido de agua a ser agregados en los reactores hidrolíticos a escala de laboratorio, g.

$CM_{Hidro Lab}$ = Contenido Másico del reactor hidrolítico a escala laboratorio, g.

- PM_{FBP} = Proporción másica de Broza de Párika en base a materia fresca a ser agregado en el ensayo hidrolítico, g.
- PM_{FEB} = Proporción másica de Estiércol Bovino en base a materia fresca a ser agregado en el ensayo hidrolítico, g.
- CL_{AER} = Proporción del contenido líquido de efluente recirculante a ser agregado

Ensayos de Hidrolización

Para los ensayos de hidrolización se utilizaron frascos herméticos de 1 L resistentes a altas temperaturas debido a que la hidrolización se lleva a cabo de manera eficiente a condiciones termófilas de 55°C, a los frascos se les retiro la tapa y se cubrieron con papel aluminio para evitar la evaporación del sustrato y facilitar la mezcla y aireación.

3.3.5. Metanización de sustrato hidrolizado

Se rotularon los reactores batch metanogénicos a escala laboratorio (Batch Lab) de M1 a M11, los contenido volumétricos de los LS en Los reactores batch metanogénicos a escala laboratorio (Batch Lab) fue de 400ml a los cuales se les agregó una carga volumétrica de sustrato hidrolizado de 100ml correspondientes a sus respectivos rótulos (por ej. H1 a M1), haciendo un total de 500ml de volumen total, los ensayos metanogénicos se llevaron a cabo en un baño María digital, las mediciones de biogás se realizaron utilizando el método de desplazamiento de Arquímedes adaptado para la cuantificación de CH₄ establecido en manual VDI-4630 (2006) (20), los resultados de volumen de biogás y %CH₄ fueron interpretados en volumen de gas seco normalizado.

Los 400ml de contenido de sólidos totales en los lodos de siembra (ST_{LS}) es de 4.80%, el cual a escala y en un reactor continuo es regulado con la carga periódica de sustrato hidrolizado (CSH) la cual cuenta con un contenido de ST del 10%.

Se fijó la temperatura mesófila a la cual trabajan los microorganismos metanogénicos de los Lodos de Siembra (LS) correspondiente a 37 °C la cual

concuera con lo establecido en el manual VDI-4630 (2006) para microorganismos mesófilos. Se requirió evaluar previamente la relación S/I para evitar errores e inhibiciones en los ensayos metanogénicos para cada variable, para ello se utilizaron los valores de concentración de sólidos orgánicos del inóculo o lodos de siembra ($oST_{Inóculo}$) y del sustrato ($oST_{Sustrato}$).

Evaluación de viabilidad metanogénica mediante la relación inóculo – sustrato (I/S)

La viabilidad metanogénica se evaluó mediante la norma alemana de procedimientos VDI 4630 (2006) (3). Para determinar la viabilidad metanogénica se utilizó un valor de 4.80% de sólidos orgánicos totales del lodo de siembra (oST_{LS}) en base a MF el cual se obtuvo de la caracterización del material orgánico, para obtener los sólidos orgánicos totales de los sustratos hidrolizados (SH) se utilizaron los valores de PMF_{BP} y PMF_{EB} con sus respectivos contenidos de oST_{BP} y de oST_{EB} como se indica a continuación en la *Ecuación (18)*.

$$oST_{Sustrato\ hidrolizado} = \frac{(PMF_{BP} * oST_{BP} + PMF_{EB} * oST_{EB})}{100} \tag{18}$$

Dónde:

- $oST_{Sustrato\ hidrolizado}$ = Sólidos orgánicos totales del sustrato hidrolizado en base a (MF)
- PMF_{BP} = Proporción másica de Broza de Párika en base a materia fresca en el ensayo hidrolítico, g.
- oST_{BP} = Sólidos orgánicos totales de broza de párika.
- PMF_{EB} = Proporción másica de Estiércol Bovino en base a Materia Fresca en el ensayo hidrolítico, g.
- oST_{EB} = Sólidos orgánicos totales de estiércol bobino.

Sistema de medición del volumen de biogás y cuantificación del porcentaje de metano (%CH₄)

Las mediciones se realizaron utilizando la teoría del desplazamiento de Arquímedes y la técnica propuesta en el manual VDI-4630 (2006) adaptada para la cuantificación de CH₄, CO₂, O₂ y H₂S, los gases se almacenaron en un gasómetro implementado en el sistema, el llenado de la bolsa generó una presión en el envase la cual desplaza el líquido a una probeta para su posterior cuantificación en ml y determinación de la presión en hectopascuales (hPa), el biogás de la bolsa es absorbido por un multiparámetro permitiendo determinar las características porcentuales del gas. Se utilizó el sistema adaptado MEDPOST 2015 para la evaluación de ensayos de fermentación en laboratorio, se utilizaron las *Ecuación (1)* y *Ecuación (2)* recomendadas por el manual de la norma VDI-4630 (2006) para obtener los valores de %CH₄ en estado seco y de volumen de biogás normalizado respectivamente.

3.3.6. Optimización de parámetros para la obtención de biogás y metano

Procesamiento de información recolectada

Los datos se obtuvieron utilizando las evaluaciones cuantitativas de Biogás y CH₄ aplicadas a los datos registrados tal como se indica en los métodos de procesamiento de datos, para la evaluación estadística primero se seleccionaron los datos con el mayor porcentaje de producción de metano CH₄ en estado seco y normalizado por cada tratamiento, los datos de volumen de biogás seco normalizado y tiempo de retención hidráulica (TRH) fueron los obtenidos cuando se registró el mayor porcentaje de CH₄.

Validación de la optimización

Los resultados óptimos obtenidos fueron aplicados por triplicado en un reactor de 20 L a temperatura de 37°C, se midió el biogás con un gasómetro de pistón, los resultados fueron promediados y normalizados, de mismo modo en los cálculos se eliminó el contenido de humedad a la concentración de metano para obtener información en estado seco.

3.3.7. Determinación de Potencial Energético

La metodología utilizada para la determinación del potencial energético de biogás en el caso de estudio consta fundamentalmente de los siguientes cinco pasos (41):

Potencial de sustrato disponible (PSD)

La primera etapa consistió en determinar los tipos de biomasa y disponibilidad de un determinado sector (agroindustria e industria láctea en Pampa Baja), se diagnosticó la disponibilidad de Broza de Páprika mediante entrevistas realizadas, se identificó la mínima y máxima producción del cultivo por 1.6 ha y se escaló a 1 ha y a 152 ha, se recolectó información sobre cantidad de plantas y frutos por unidad y cosecha por kg, luego se determinó la cantidad de broza generada por planta, kg. y ton. Respectivamente, el resultado obtenido es el promedio entre la mínima y máxima producción. En relación con el estiércol se diagnosticó su disponibilidad (Ton*día-1) a partir del total de vacas y vacas en producción por unidad, del mismo modo la generación de estiércol por cabeza de vacuno y vacuno en producción (Kg*día-1).

El PSD se obtuvo relacionando la máxima disponibilidad de biomasa de BP (DBBP) y su requerimiento de EB en relación con los factores de contenido sólido de las proporciones porcentuales obtenidas del proceso de optimización para la generación de biogás y CH₄), a continuación se obtiene el potencial de sustrato disponible PSD a partir del requerimiento máximo disponible de una biomasa para la elaboración del sustrato tal como se indica en la *Ecuación (19)*, para ello se requiere de contar con cantidades mayores de la biomasa de soporte, en el caso de estudio, la biomasa de soporte es el EB.

$$PSD = BD_{BP} + \frac{BD_{BP}}{FCS_{BP} + FCS_{EB}} \quad (19)$$

Donde:

- PSD = Potencial de Biomasa Disponible, Ton.
- BD_{BP} = Biomasa disponible de Broza de Páprika, Ton
- FCS_{BP} = Factor porcentual del contenido sólido de Broza de Páprika.

FCS_{EB} = Factor porcentual del contenido sólido de Estiércol Bobino.

Potencial del Combustible Generado (PCG)

Como segundo paso se determinó el potencial de generación de biogás y metano de acuerdo con los resultados obtenidos de los experimentos anteriores, este valor corresponderá a la cantidad de biogás y metano que es posible generar a partir del sustrato elaborado.

Se utilizó el rendimiento del sustrato validado en un reactor de 5L acorde a la norma alemana VDI-4630 (2006) (20), los datos se expresaron para biogás en Nm³/h y CH₄ en % Vol.

Potencial Factible de producción de biogás (PFP)

Como tercer paso se determinó el potencial factible de biogás de acuerdo con las restricciones técnicas de disponibilidad de la biomasa, principalmente relacionadas con la factibilidad de recolección y transporte. Se clasificó la biomasa disponible indicando si se encuentra dispersa (D), agrupada (A), o concentrada (C), se utilizó PCG escalado a Nm³/h para determinar el PFP a partir del PSD en ton.

Potencial Técnico Energético (PTE)

En el cuarto paso se evaluaron los aspectos técnicos de utilización de biogás para generar energía, la cantidad de energía calorífica del biogás se estimó considerando los rendimientos eléctricos de equipos típicos de generación que utilizan biogás como combustible, así como también los rendimientos térmicos de equipos de recuperación de calor en sistemas de cogeneración. En los cálculos serán considerados como el poder calorífico del metano en 8.569 kCal/m³.

Potencial Implementable Económico (PIE)

Se identificaron materiales, equipos y servicios para la construcción de una planta HPTC-RM de dos etapas para evaluar mediante indicadores económicos la viabilidad del proyecto en un periodo de 6 meses, los indicadores utilizados fueron el VAN, el TIR y El PRI, se escaló la planta en base a un presupuesto de S/.80,000.00 a una tasa de retorno del 8%.

Potencial Energético (PE)

El PE se determinó considerando el PSD, PCG, PFP y el PIE para identificar la producción calorífica de la planta en base a su consumo expresado en Kcal/h.





CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Materia prima

La ubicación del caso de estudio se encuentra en el distrito de Majes - Pedregal Km 890 de la panamericana sur, cuenta con 1,288 hectáreas completamente sembradas entre sus principales productos tiene Uvas de Mesa (262 has), Palta (230 has) Cítricos (60 has), Granadas (87 has), Pimientos (152 has), Alcachofa (59 has), Cebollas (44 has), Forrajes (253 has), otros (7 has), su sistema de riego es por goteo y sus productos son exportados principalmente a Norteamérica, Europa, Asia, Oceanía.

Actualmente entre sus cultivos de hortalizas la páprika representa el 13% del total de sus cultivos que comprende 152 hectáreas del área agrícola.

Con respecto a la actividad ganadera el Establo Los Rosales en el distrito de majes Pedregal tiene en Arequipa 4,900 hembras, 2,200 vacas en producción 79,000 litros diarios a diciembre 2014 productividad por cabeza 13,100 kg/vaca-año (41.40 kg/vaca-día) tecnificación en genética, alimentación, ordeño, manejo del hato (54). Se seleccionó a la broza de páprika debido a la importancia económica del fruto ya que es uno de los colorantes naturales de mayor demanda e importancia en el mundo, se usa en la industria alimentaria, farmacéutica y de cosméticos (46).

4.2. Materia prima caracterizada

La caracterización del material orgánico es una actividad muy importante para determinar parámetros y proporciones de mezclas, para ello se obtuvieron los valores de sólidos volátiles del sustrato hidrolizado y lodos de siembra con el objetivo de elaborar un correcto diseño experimental y evitar errores en los ensayos (20), a continuación se muestran los resultados obtenidos que fueron utilizados para determinar parámetros y proporciones de mezclas para la elaboración del sustrato.

La BP alcanzó un peso aproximado a 2Kg por bolsa en el muestreo, se apreciaron residuos de tierra y piedras que no se consideraron en el tratamiento de las muestras, el total de muestra recolectada fue de 4Kg, posterior a su tratamiento se obtuvo 2,5Kg, presentó un contenido de ST del 26,82 %MF_{BP} el cual se encuentra

dentro de los rangos de los $ST_{Maíz}$ que oscila entre un 25.1 al 37.0 % a partir de $MF_{Maíz}$ con un 95.0 al 95.9 % de $SV_{Maíz}$ ($ST_{Maíz}$), la muestra se trató deshidratándola para su tamizaje hasta un contenido de sólidos totales (ST_{BP}) de 94.12% MF_{BPT} en conservación, inicialmente la BP recolectada presentó un contenido de ST del 26,82 % MF_{BP} el cual se encuentra dentro de los rangos de los $ST_{Maíz}$ que oscila entre un 25.1 al 37.0 % a partir de $MF_{Maíz}$ con un 95.0 al 95.9 % de $SV_{Maíz}$ ($ST_{Maíz}$) respectivamente (39), por defecto perdió un contenido de humedad del 67.30%MF el cual puede ser utilizado en la preparación del sustrato hidrolizado o en la recirculación del efluente con el objetivo de ahorrar agua (9). El contenido inicial de sólidos volátiles (SV_{BP}) fue de 25.79% de MF para su transformación en metano.

El estiércol bovino presentó un contenido de sólidos totales (ST_{EB}) de 55.6 % MF_{EB} de contenido de humedad y un alto contenido de sólidos volátiles (SV_{EB}) el cual alcanzó un 51.7% en base a su estado de materia fresca (MF_{EB}) en comparación a lo obtenido en investigaciones realizadas donde encontraron un valor de ST_{Cow} (MF_{Cow}) de 26.94 y un valor de SV_{Cow} (ST_{Cow}) de 75.81 (55), al momento de utilizar la muestra esta presentó un contenido de sólidos totales (ST_{EB}) del 57.96% lo que nos indicó una pérdida de humedad del 13.56% (MF_{EB}), esta pérdida puede ser aprovechada en la preparación del sustrato hidrolizado o en la recirculación del efluente como en el caso anterior (9).

El contenido de sólidos volátiles de los lodos de siembra (SV_{LS}) fue de 4.79% y el contenido de sólidos totales (ST_{LS}) fue de 4.8% en relación a MF_{LS} , esto nos indica que el material orgánico utilizado para la producción del lodo de siembra es digerible y transformable en metano durante el procedimiento de reactivación y agotamiento (15), en comparación con otros lodos de siembra (Tabla 9) el % de ST_{LS} (MF_{LS}) es menor, sin embargo el contenido de SV_{LS} (ST_{LS}) es alto con un valor del 99.79 % (19), se presume que es debido a la DA en dos etapas ya que en la etapa metanogénica los microorganismos solo consumen el material digerido para transformarlo en metano (4), el contenido de ST del efluente recirculante (ST_{ER}) es de 0.18% debido al proceso de separación del biosol, sus valores no son considerados significativos como actividad orgánica en la presente investigación, la Tabla 9 muestra las comparaciones realizadas entre diferentes tipos de digeridos que son utilizados como lodos de siembra tales como digeridos de estiércol bobino, porcino y de pollo, del mismo modo lodos

municipales y de una fábrica de papel, por otro lado, la *Tabla 9* también muestra una comparación entre sustratos, se comparan la broza de páprika en relación con el maíz debido a que ambos contienen una humedad cercana, por otro lado, se compara la paja de arroz debido a que contiene una humedad aproximada a la broza de páprika tratada para la formulación del sustrato derivado a la hidrolización y posterior metanización.

Tabla 9. Característica de lodos de digeridos y sustratos representativos.

Material Orgánico	Código	%ST (FM)	%SV (MF)	%SV (ST)	Referencia
Digeridos					
Lodo de siembra HPTC-RM	LS	4.80	4.79	99.79	Fuente propia
Efluente recirculante	ER	0.18	0.18	99.80	
Estiércol Bobino Digerido	DM	2.80	1.60	59.10	
Estiércol porcino Digerido	SM	6.10	3.90	62.70	(19)
Estiércol de pollo digerido	CM	22.50	8.20	36.40	
Lodo Granular anaeróbico	AGS	5.40	3.90	71.80	
Lodo Municipal	MS	19.20	9.70	50.40	
Lodo de Fábrica de papel	PS	17.30	14.00	80.50	
Sustratos					
Broza de páprika	BP	26.82	25.79	96.15	Fuente propia
Broza de páprika tratada	BPT	94.12	90.50	96.15	
Paja de Arroz	RS	97.30	84.00	86.30	(19)
Maíz (min.)	V11) D2)1 S	25.10	23.85	95.00	(39)
Maíz (máx.)	V3 D2 S	37.00	35.48	95.90	

A continuación, la *Tabla 10* muestra los resultados de la caracterización realizada.

Tabla 10. Caracterización fisicoquímica del material orgánico y biológico.

Parámetro	Unidad	Broza de Párika, BP.	Broza de Párika tratada, BPT.	Estiércol Bovino, EB.	Lodos de Siembra, LS.	Efluente Recirculante, ER.	Estiércol Bovino, EB.(2)
Sólidos Totales (ST)	%ST (MF)	26.82	94.12	44.40	4.80	0.18	57.96
Sólidos Volátiles (SV)	%SV (ST)	96.15	96.15	89.29	99.79	99.80	89.29
Sólidos Volátiles (SV)	%SV (MF)	25.79	90.50	39.64	4.79	0.18	51.75
Humedad (H)	%H (MF)	73.18	5.88	55.60	95.20	99.82	42.04
Cenizas (Ce)	%Ce (ST)	3.86	3.86	10.97	0.21	0.20	10.97
Cenizas (Ce)	%Ce (MF)	1.04	3.63	4.87	0.01	0.00	4.87
Nitrógeno (N)	%N	0.71	0.71	1.82	1.90	0.60	1.82
Carbono (C)	%C	82.00	82.00	48.36	4.80	3.00	48.36
C:N	-	66.99	66.99	15.41	1.47	2.90	15.41
pH	-	6.30	7.30	6.37	6.81	7.89	-
Referencias	-	<i>Anexo 1</i>	<i>Anexo 2</i>	<i>Anexo 3</i>	<i>Anexo 4</i>	<i>Anexo 5</i>	-

La proporción de carbono y nitrógeno (C:N) son muy importantes para la metanización del contenido orgánico, se sugiere que la relación (C:N) sea de 30:1, mayor contenido de carbono (C) provocaría que el proceso sea demasiado lento con una prolongada producción de metano por la falta de formación de colonias microbianas, si la relación es menor el proceso se complicaría por la presencia de contenido de amonio, si llega a alcanzar una relación (C:N) de 8:1 esta se inhibiría, se puede apreciar en los resultados de la *Tabla 10* que la relación C:N de BP (C:NBP) es de 67:1 la cual es alta pero que puede ser regulada con el EB que tiene una relación C:N de 26.57:1, las relaciones de C:N de los lodos de siembra y del efluente recirculante no son significativos pero si fueron considerados en la formulación de los ensayos, los pHs se orientan hacia la neutralidad lo cual no implica ningún riesgo en el proceso de fermentación (56).

4.3. Sustrato hidrolizado

Los resultados que se muestran en la *Tabla 11* corresponden a la obtención de las variables reales a partir del diseño factorial completo de la *Tabla 8*, posteriormente se obtuvieron las variables porcentuales (VP) para la mezcla de broza de paprika (VPBP) y de estiercol vacuno (VPEB) correspondiente al 10% del contenido total de solidos, tambien se obtuvieron los valores de VP para el efluente recirculante (VPER) y del agua (VPH₂O) correspondientes para el 90 % del contenido liquido total tal como se muestra en la *Tabla 12*.

4.3.1. Parámetros para la formulacion de sustrato hidrolizado

El diseño experimental muestra 11 ensayos de hidrolizacion para formular los parámetros óptimos a condiciones mesofitas (37°C) en los reactores Hidro Lab (20), el valor del 10% fue considerado debido a que la planta HPTC-RM de la UCSM puede ser alimentada hasta un máximo de 3m³ de sustrato hidrolizado para un volumen de 30m³ de lodos activos, los rangos en los que se puede alimentar la planta se encuentran entre 2m³ a 3m³ cada dos días dependiendo del rendimiento (38).

Tabla 11. Diseño central compuesto correspondiente a la optimizacion en la produccion de biogas y metano (CH₄).

Tratamientos	Variables Codificadas (VCEGM)		Variables Reales (VREGM)	
	X1	X2	VRBP-EGM	VRT-EGM
1	-1	-1	2	25
2	1	-1	8	25
3	-1	1	2	75
4	1	1	8	75
5	menos alfa	0	0.7574	50
6	más alfa	0	9.2426	50
7	0	menos alfa	5	14.645
8	0	más alfa	5	85.355
9	0	0	5	50
10	0	0	5	50
11	0	0	5	50

Tabla 12. Variables porcentuales para la determinación de las proporciones del CS y CL en el Hidro Lab.

Ensayos	Contenido de sustrato, 10%				Contenido de Líquido, 90 %			
	VPBF, %	FV PBP	VP _{EB} , %	FVP EB	VP _{ER} , %	FV P _{ER}	VP _{H2O} , %	FVP _H 20
M1	20.00	0.20	80.00	0.80	27.78	0.28	72.22	0.72
M2	80.00	0.80	20.00	0.20	27.78	0.28	72.22	0.72
M3	20.00	0.20	80.00	0.80	83.33	0.83	16.67	0.17
M4	80.00	0.80	20.00	0.20	83.33	0.83	16.67	0.17
M5	7.57	0.08	92.43	0.92	55.56	0.56	44.44	0.44
M6	92.43	0.92	7.57	0.08	55.56	0.56	44.44	0.44
M7	50.00	0.50	50.00	0.50	16.27	0.16	83.73	0.84
M8	50.00	0.50	50.00	0.50	94.84	0.95	5.16	0.05
M9	50.00	0.50	50.00	0.50	55.56	0.56	44.44	0.44
M10	50.00	0.50	50.00	0.50	55.56	0.56	44.44	0.44
M11	50.00	0.50	50.00	0.50	55.56	0.56	44.44	0.44

La *Tabla 12* muestra los resultados de las variables porcentuales (VP) procesadas para obtener las proporciones de masa fresca (PMF) que fueron agregadas a los reactores Hidro Lab para conformar los ensayos hidrolíticos (EH) con un contenido másico de 500g en estado de MF, se puede comparar los valores del *Anexo 6 (Tabla 30)* con los obtenidos de la *Tabla 13* en relación con el aumento de humedad en las variables de CS_{BP} y CS_{EB} la cual fue retirada de los valores de CL_{H_2O} debido a que en la mezcla se agregan proporciones en estado de MF.

Se utilizó el biol como efluente recirculante para evaluar sus efectos en el sistema, comúnmente no todo el biol para una planta de alta eficiencia es utilizado en el proceso de obtención de biogás y CH_4 ya que se generan grandes cantidades cuando el sistema es alimentado continuamente (9).

Tabla 13. Proporciones de materia fresca (MF) agregadas de contenido sólido y contenido líquido en los ensayos Hidrolítico.

Tratamientos	Contenido de Sólidos, 10%		Contenido Líquido, 90%		Total, g.
	CS_{BR} , g.	CS_{EB} , g.	CL_{BR} , g.	CL_{H_2O} , g.	
M1	10.62	69.01	125.00	295.36	500.00
M2	42.50	17.25	125.00	315.25	500.00
M3	10.62	69.01	375.00	45.36	500.00
M4	42.50	17.25	375.00	65.25	500.00
M5	4.02	79.73	250.00	166.24	500.00
M6	49.10	6.53	250.00	194.37	500.00
M7	26.56	43.13	73.23	357.08	500.00
M8	26.56	43.13	426.78	3.53	500.00
M9	26.56	43.13	250.00	180.30	500.00
M10	26.56	43.13	250.00	180.30	500.00
M11	26.56	43.13	250.00	180.30	500.00

El sistema HPTC-RM comprende de un sistema recirculante, esto permite reemplazar el contenido de H_2O con el EL convirtiéndose en ER, en un sistema

Rottaler Model la parte sólida digerida requiere estar en un área de recolección rotando en la parte inferior de cada tanque y bombeada por una bomba sumergible. El lodo seco puede usarse como acondicionador de suelos, La porción de líquido en la parte superior se elimina y es posible utilizar como un fertilizante líquido. Parte del líquido se recircula al primer reactor para mezclarlo con la materia prima de entrada (18).

4.3.2. Hidrolización del sustrato

En la *Figura 18* se muestran los sistemas Hidro lab para conformar los 11 ensayos hidrolíticos (EH) puestos en marcha a 50°C, estos fueron agitados diariamente durante un periodo de 3 días los recomendados para una hidrolización completa, se observaron los cambios de pH y se permitió el contacto con el oxígeno ambiental para mejorar el proceso hidrolítico (37).



Figura 18. Ensayos de hidrólisis de los sustratos de carga metanogénica.

La *Figura 18* muestra 11 EH y un frasco para el control de la T interna mediante un termostato que controla el ambiente a 50°C (± 2), cada Hidro-Lab a escala laboratorio contiene mezclas másicas de un total 500g con variaciones porcentuales de BP, EB, ER y H₂O, se observa que se utilizó un sistema BMA para mantener las condiciones de T.

4.4. Biogás y CH₄ generado mediante optimización

Se ha utilizado la *Ecuación (3)* de la relación S/I para determinar el éxito de la fermentación, los resultados son mostrados en el *Anexo 6 - Tabla 31*, el promedio obtenido es de 0.48 lo cual indicó que no existieron riesgos para que los ensayos se inhiban (20), A continuación, la *Tabla 14*. Muestra los resultados obtenido de la etapa metanogénica a la cual se agregó el 20% de sustrato como influente en relación con el contenido del reactor Bacth Lab, se dejó digerir durante un periodo de 26 días a 37°C tal como indica la metodología, los volúmenes y tiempos de retención hidráulico (TRH) son presentados como respuesta a la mayor cantidad de %CH₄, estos valores fueron utilizados para la optimización del proceso.

De los tratamientos, el que tuvo mayor rendimiento en relación con el % de CH₄ fue el tratamiento 1, en relación a la generación de biogás fue el tratamiento 6, finalmente en relación al TRH el tratamiento 1,3,5,6 y 8 fueron lo que alcanzaron valores mayores al 70% de CH₄ en estado seco y los tratamientos 1,6 y 8 obtuvieron valores mayores a 100 ml_N en relación al volumen de biogás generado en estado seco y normalizado (20).

Tabla 14. Resultados de volumen de biogás y concentración de CH₄ en dos etapas.

N° Tratamiento	Broza de Páprika, BP.	Temperatura, °T.	Metano, %CH ₄ por volumen	Volumen de Biogás, mlN.	TRH
1	2.00	25.00	78.57	119.19	13
2	8.00	25.00	73.09	95.07	26
3	2.00	75.00	78.41	87.65	13
4	8.00	75.00	72.20	98.83	26
5	0.80	50.00	74.19	93.89	13
6	9.20	50.00	68.26	152.41	13
7	5.00	14.60	71.98	81.36	26
8	5.00	85.40	75.55	138.78	13
9	5.00	50.00	66.99	88.13	17
10	5.00	50.00	67.08	90.63	17
11	5.00	50.00	69.39	84.40	17

El *Anexo 6 - Tabla 32* muestra los ensayos concluidos a los cuales se les realizaron pruebas de combustión con el objetivo de observar el color de la llama en relación con la calidad de CH₄, el biogás de alta calidad se caracteriza por tener una llama azul poco notoria a la vista por ello requiere de utilizar un fondo negro para poder observarla (57).

Los resultados de la recolección de datos de volumen de biogás se observan en el *Anexo 8 (Tabla 32 a la Tabla 42)* y del % de CH₄ del *Anexo 9 (Tabla 38 a la Tabla 53)*; realizados acorde la norma alemana VDI 4630 (20).

4.4.1. Optimización de biogás

Para evaluar las respuestas del efecto que ejercen las variables en el sistema correspondiente a la generación de biogás se procedió a estimar las respuestas en orden decreciente tanto para factores e interacciones, en la *Figura 19* se puede observar que todos los efectos estandarizados presentan significancia con un -P menor a 0.05 y un nivel de confianza del 95%, el diagrama de Pareto muestra que el efecto cuadrático

AA: Broza de páprika² ejerce el mayor efecto en el sistema, el sistema no presenta efectos negativos a considerar.

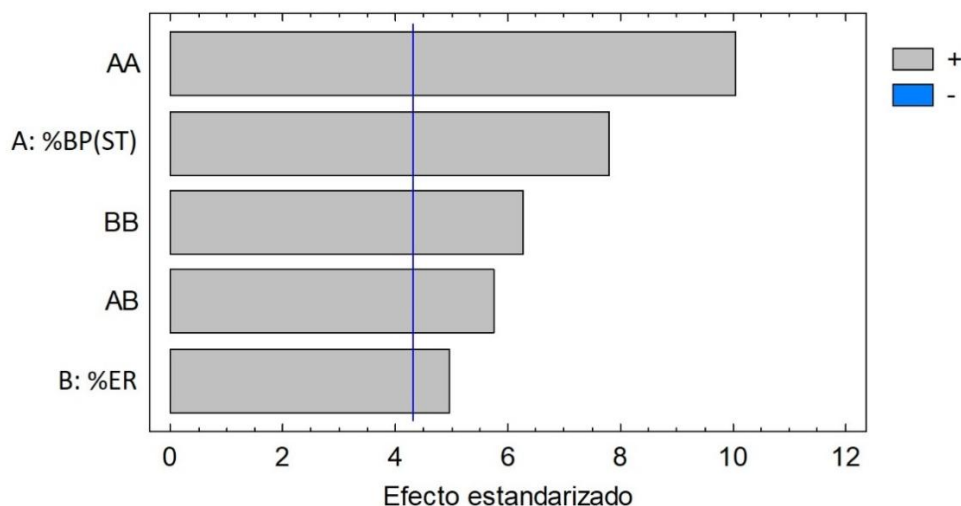


Figura 19. Diagrama de Pareto para el volumen de biogás en un sistema HPTC-RM.

Así mismo se evaluaron las significancias en el estadístico correspondientes a la Tabla 15, esta nos indica que el modelo sin ajuste explica el 42.55%, el modelo no presenta correlación entre los datos, también el error estándar del estimado mostró una desviación estándar de los residuos de 3.13517, el modelo no se fue refinado debido a que todos los efectos muestran significancia y para no bajar el R^2 .

Tabla 15. Análisis de varianza para el modelo completo de volumen de biogás correspondiente a la optimización de producción en dos etapas.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:%BP (ST)	597.018	1	597.018	60.74	0.0161
B:ER%	242.183	1	242.183	24.64	0.0383
AA	994.213	1	994.213	101.15	0.0097
AB	324.180	1	324.180	32.98	0.0290
BB	385.863	1	385.863	39.26	0.0245
Falta de ajuste	3069.52	3	1023.17	104.09	0.0095
Error puro	19.6586	2	9.8293		
Total (corr.)	5364.49	10			

R-cuadrada = 42.4142 porciento.

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 0.0 por ciento

Error estándar del est. = 3.13517

Error absoluto medio = 13.0519

Estadístico Durbin-Watson = 1.95547 (P=0.4025)

Se puede observar que en la gráfica de efectos de la *Figura 20-(a)*, correspondiente a la generación de volumen de biogás en la sección a) de la gráfica presentan los efectos cuadráticos de AA: Broza de Párika² y de BB: Efluente Recirculante², ambos presentan una forma en u, la gráfica muestra valores volumétricos mínimos aproximados a 86ml_N de biogás tanto para BP como para ER, en el primer caso se puede observar una ligera generación de biogás aproximado a 96ml_N a menores concentraciones de BP, este presenta un aumento significativo cuando culmina la generación mínima de biogás ocasionada por un ligero aumento de BP, a partir de ese punto un aumento de BP afecta de manera positiva al sistema alcanzando valores aproximados a 110ml_N.

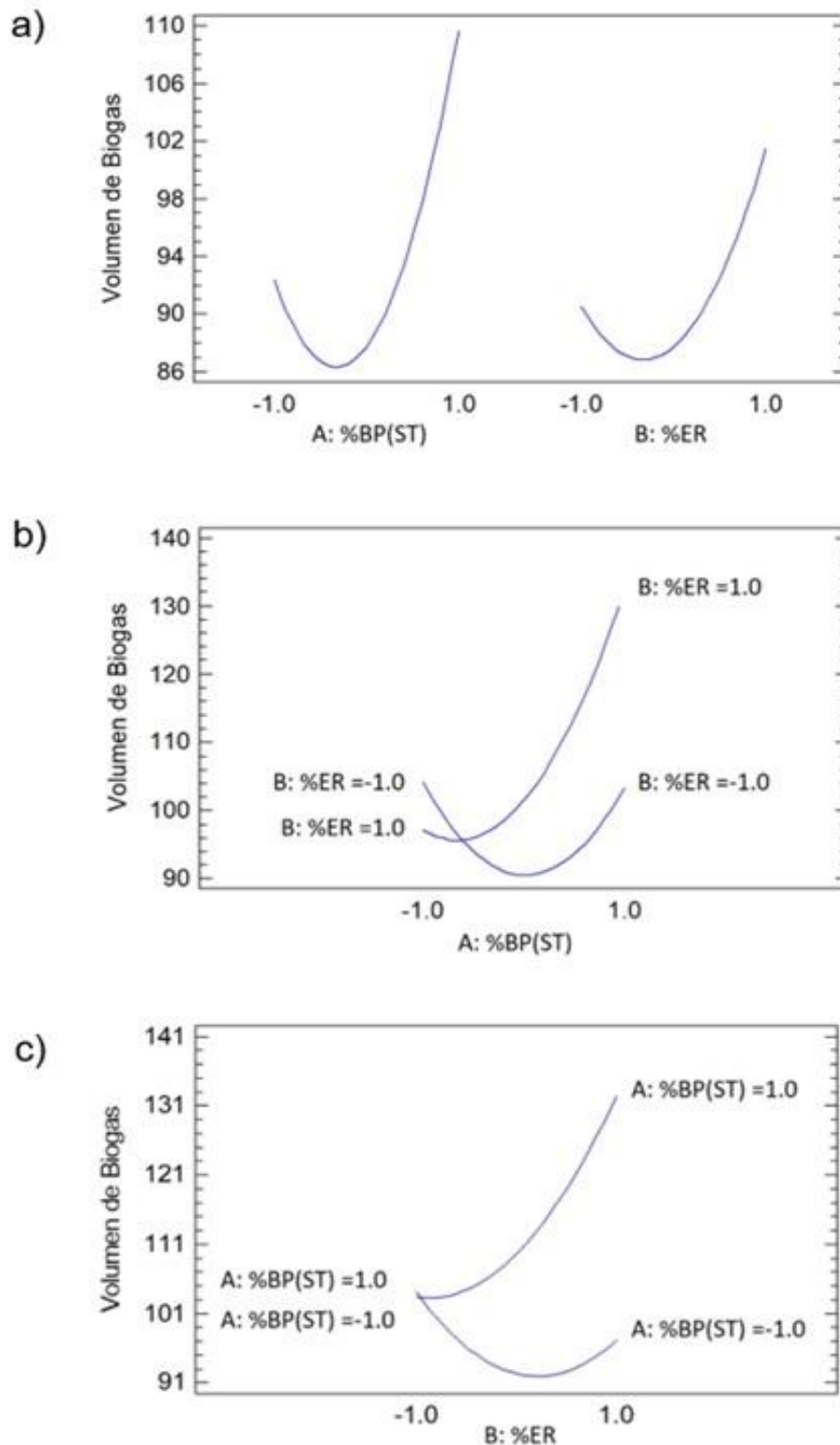


Figura 20. Gráfica de efectos para volumen de biogás correspondiente a la optimización de producción en un sistema HPTC-RM de dos etapas. En A) Efectos principales, B) y C) Interacciones.

En el segundo caso las variaciones del ER se puede apreciar el mismo fenómeno, a menores cantidades de ER el sistema se ve afectado negativamente con un leve decrecimiento inicial, cómo en el caso anterior el volumen de biogás empieza a aumentar cuando llega a su mínima generación en relación a las variables, el volumen a partir de ese punto aumenta alcanzando valores aproximados a 101ml_N.

Estos resultados muestran que el aumento de la concentración de broza de páprika en la mezcla hidrolítica afecta positivamente la generación de biogás lo que nos indica que los sólidos volátiles de la materia orgánica hidrolizada se están convirtiendo en biogás, de la misma manera el aumento de la concentración del ER estimula la generación de biogás, ambos presentan un efecto cuadrático estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95%.

En la siguiente sección de la gráfica de efectos correspondiente en la *Figura 20 (b)* y *(c)* se pudo observar una fuerte interacción entre los factores AB: Broza de páprika y en ER lo cual nos indica que ambos guardan una relación con la generación de biogás, el aumento de ambos implicaría un aumento en el volumen hasta un valor aproximado de 134ml_N, a continuación se muestra en la ecuación de segundo orden correspondiente al modelo matemático construido para la generación de biogás mediante la digestión en dos etapas para la optimización de la generación de Biogás tal como se muestra en la *Ecuación (20)*.

$$VB = 87.7201 + 8.63872*BP + 5.50208*ER + 13.2687*BP^2 + 9.0025*BP*ER + 8.26622*ER^2 \quad (20)$$

La *Figura 21 (a)* muestra la superficie de respuesta donde se puede apreciar que los valores de generación de metano pueden alcanzar hasta 140ml_N trabajando con valores codificados de 1.38 y 1.78 de y ER respectivamente tal como se muestra en la gráfica de contornos de la *Figura 21(b)* que corresponde a valores proyectados.

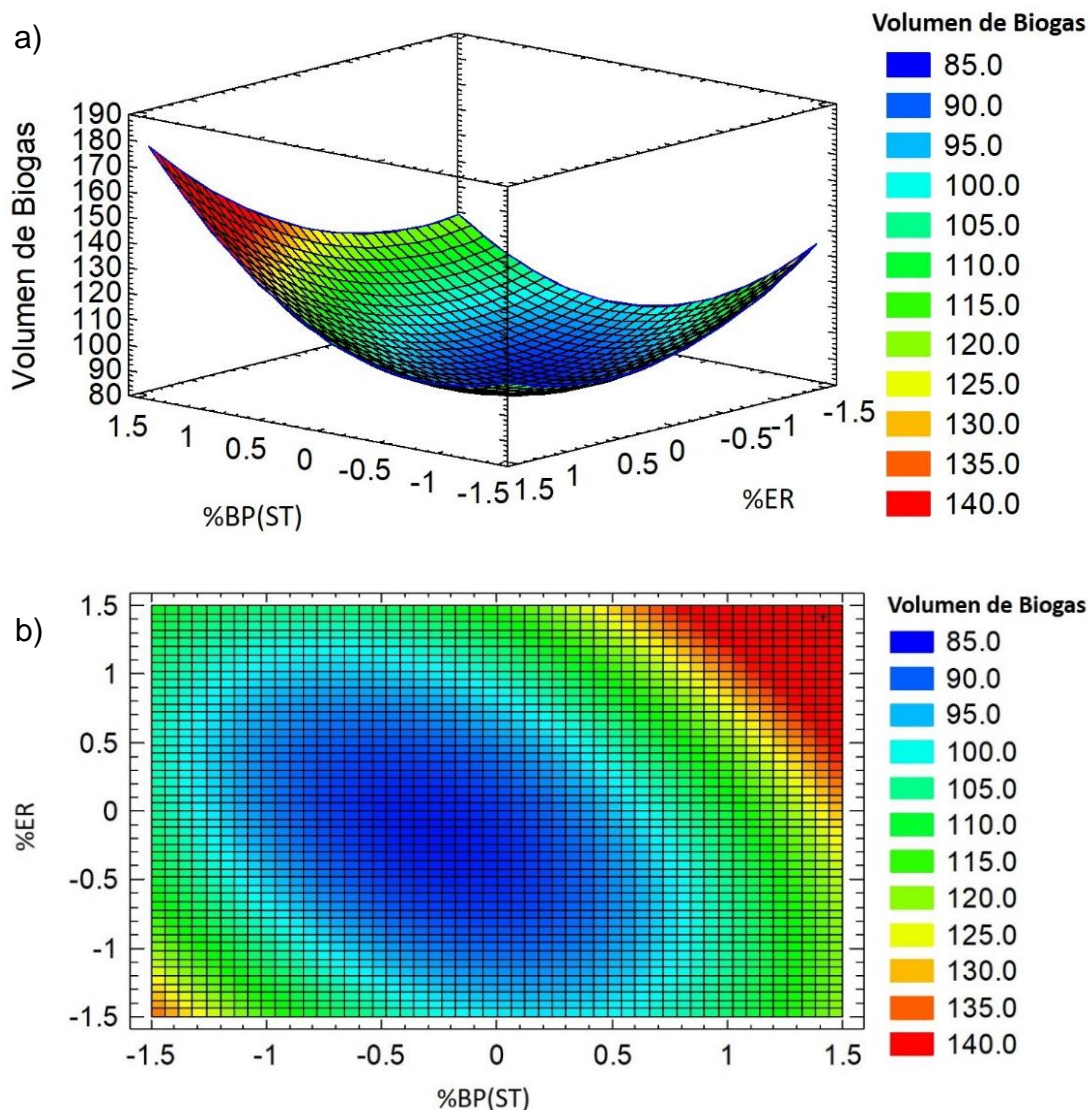


Figura 21. a) Superficie de respuesta para volumen de biogás correspondiente a la optimización en un sistema HPTC-RM, b) Gráfica de contornos para volumen de biogás correspondiente a la optimización de producción en dos etapas.

La gráfica de contornos de la *Figura 21* muestra una marca fuera de las regiones indicadas, esto predice que si se trabajan a mayores concentraciones de las fijadas el sistema seguiría siendo afectado positivamente, esto nos indica que el pretratamiento hidrolítico afecta positivamente en la biodisponibilidad de S digerido en el medio metanogénico.

A continuación, se muestran los valores óptimos para la generación de volumen de biogás en la *Tabla 16*, el óptimo trabajo se encuentra en los valores que indica las variables codificadas tanto para broza de paprika como para biol el cual es de 1.4142 correspondiente a las variables reales de 9.2% de broza de paprika y 85.4% de ER en

la mezcla del sustrato para una generación de 168.79 ml_N de biogás para una digestión en dos etapas.

Tabla 16. Valores de Broza de Páprika (BP) y Efluente Recirculante (ER) para la optimización de volumen de biogás correspondiente a la producción en dos etapas.

Factor	Óptimo codificado	Óptimo real	Valor óptimo de DBO
(ST) %BP	1.41421	9.20	168.79
ER%	1.41421	85.40	

4.4.2. Optimización del Tiempo de retención hidráulico del S hidrolizado

El diagrama de Pareto muestra en la [Figura 22](#) los efectos e interacciones de las variables de %BP y %EB, se observa que el efecto lineal correspondiente al contenido porcentual de BP es positivo, del mismo modo el efecto que ejerce el contenido porcentual de ER es negativo, el efecto cuadrático AA resultó negativo y el efecto cuadrático BB es positivo, sin embargo el nivel de confianza al 95% muestra que los resultados no son significativos ($P > a 0.05$)([Tabla 17](#)).

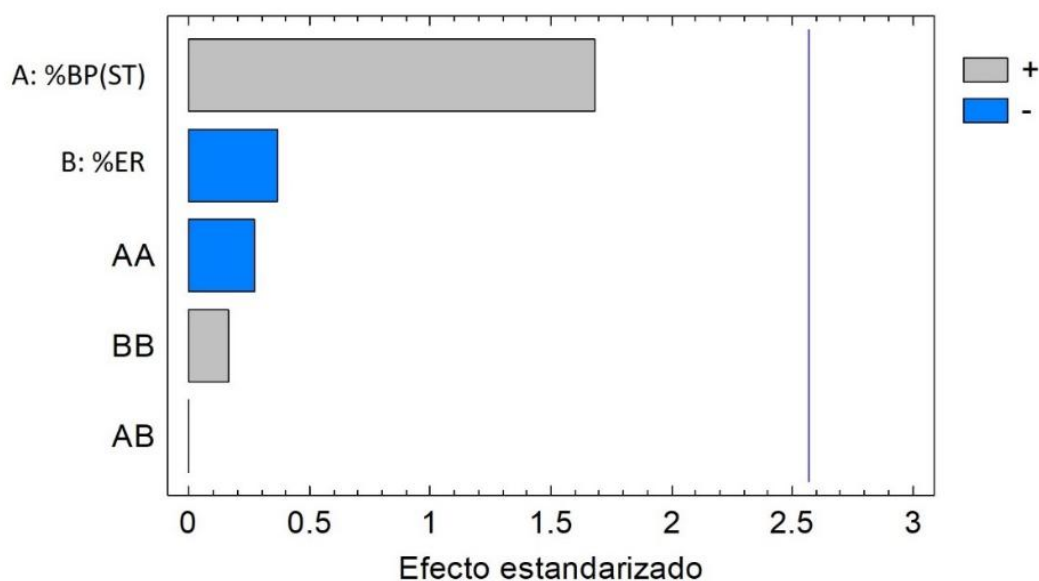


Figura 22. Diagrama de Pareto para tiempo de retención hidráulico (TRH).

La *Figura 22* también muestra el análisis de varianza para el modelo completo de TRH en un sistema HPTC-RM, se puede observar que todos los efectos resultaron no ser significativos, el R^2 no presentó ajuste.

Tabla 17. Análisis de varianza para el modelo completo de TRH en un sistema HPTC-RM.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:%BP (ST)	84.5002	1	84.5002	2.84	0.1530
B: %ER	3.99999	1	3.99999	0.13	0.7291
AA	2.2058	1	2.2058	0.07	0.7964
AB	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BB	0.794175	1	0.794175	0.03	0.8767
Error total	149.0	5	29.8		
Total (corr.)	241.636	10			
A: Broza de Páprika	84.5002	1	84.5002	2.84	0.1530

La *Figura 23* muestra las gráficas de los efectos en un sistema HPTC-RM en relación a los TRH en los ensayos metanogénicos correspondiente a las variaciones de contenido porcentual de BP y ER, en la *Figura 23-(a)* se observa que el efecto lineal de A:%BP (ST) requiere de mayor tiempo aproximado a 20 días para metanizar el S a mayores contenido de %BP, lo que indica que menor contenido de %BP puede lograr metanizar el S hasta en 13 días, también se observa que el efecto del B:%ER se encuentra entre el día 17, la *Figura 23-(b)* explica que a menor o mayor contenido de BP no se aprecia una variación mayor de dos días en el TRH, en la *Figura 23-(c)* se aprecia que a menor o mayor contenido de ER hay una diferencia de 7 días de TRH.

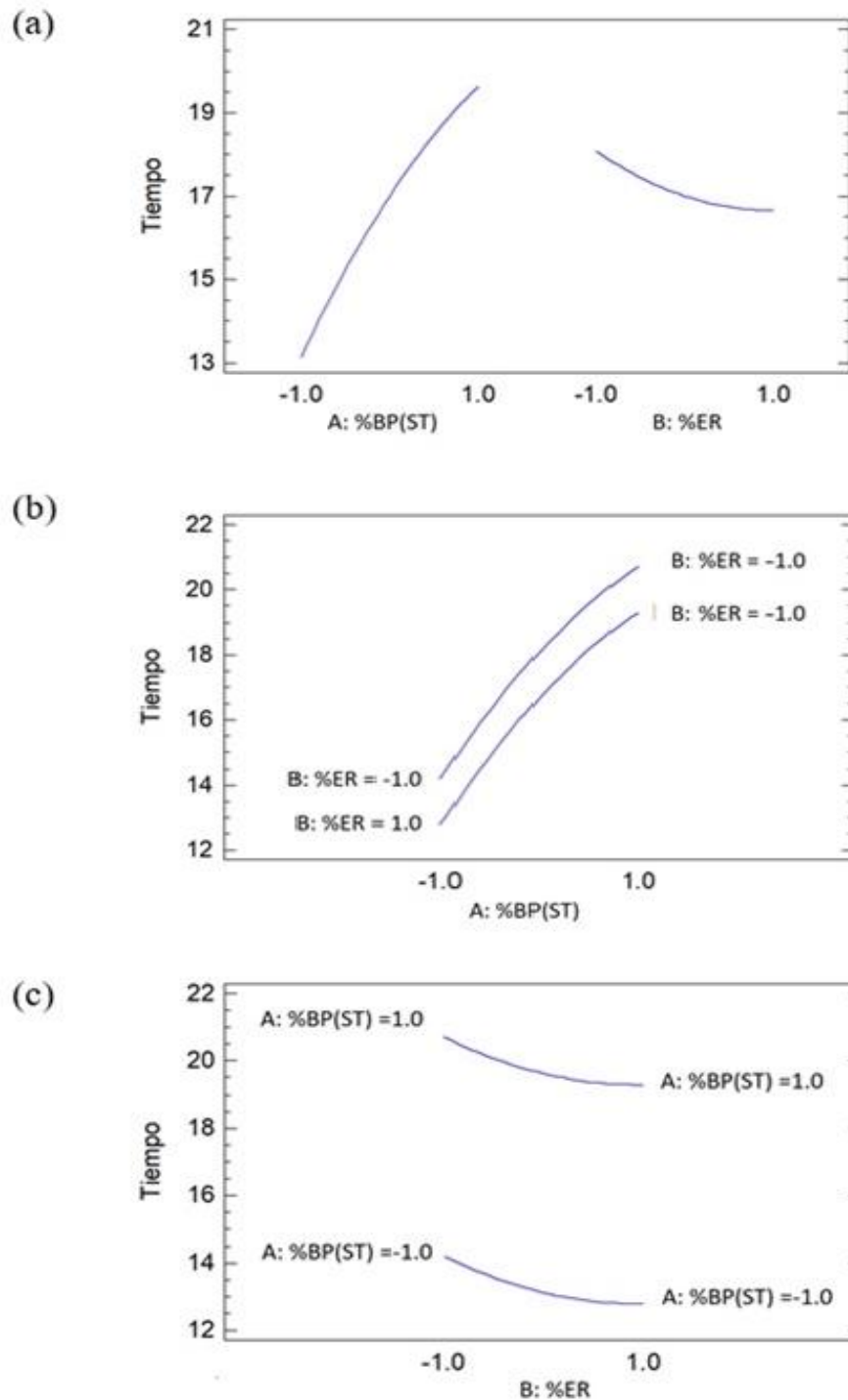


Figura 23. Gráfica de efectos para TRH correspondiente a la optimización de producción en un sistema HPTC-RM de dos etapas.

En la *Figura 24-(a)* y la *Figura 24-(b)* se observa la superficie de respuesta y el diagrama de contornos para TRH, se aprecia que a menor contenido porcentual de BP y mayor contenido porcentual de ER el S es digerido en 11 días, a continuación, se

muestra la fórmula para obtener el TRH óptimo en la metanización del S hidrolizado tal como se muestra en la (21).

$$TRH = 17.0 + 3.25001*BP - 0.707107*ER - 0.62499*BP^2 + 0.0*BP *ER + 0.375015*ER^2 \quad (21)$$

Fórmula del óptimo TRH.

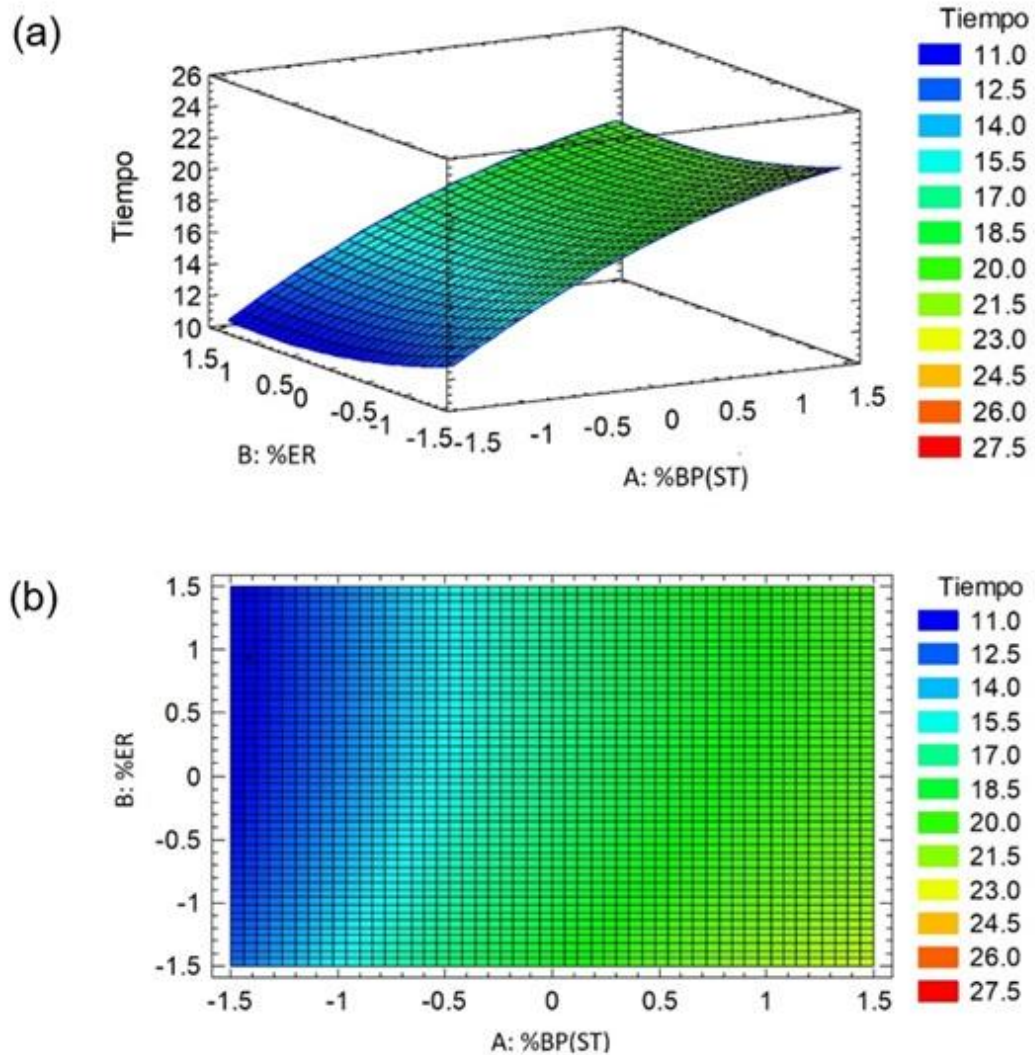


Figura 24. Superficie de respuesta y Gráfica de contornos para TRH correspondiente a la optimización de la obtención de biogás y generación de CH₄ en un sistema HPTC-RM de dos etapas.

La *Tabla 18* muestra los valores óptimos codificados de -1.41421 para %BP (ST) y 0.9428 %ER correspondientes los óptimos reales de 0.80 %BP (ST) y 70.71 %ER para digerir el S en un tiempo de 10.82 días.

Tabla 18. Optimización de los valores de TRH óptimos a temperatura mesófila (37°C)

Factor	Óptimo Codificado	Óptimo Real	Valor Óptimo de TRH
%BP (ST)	-1.41421	0.80	10.82
%ER	0.9428	70.71	

4.4.3. Optimización de la generación de CH₄

Se optimizaron de las variables correspondientes al % de CH₄ como respuestas a los periodos de generación de biogás y contenido de metano CH₄, El diagrama de Pareto de la *Figura 25* muestra los efectos e interacciones significativas ($P < 0.05$) en orden decreciente, se puede observar que el efecto cuadrático B²:%ER es positivo, el efecto lineal de A:%BP (ST) es negativo y el efecto cuadrático de A²:%BP es positivo con un R² ajustado de 83.2717 a un nivel de confianza del 95% de acuerdo con estos valores el estadístico indica que es un modelo adecuado con un error estándar de 1.3604 (*Tabla 19*).

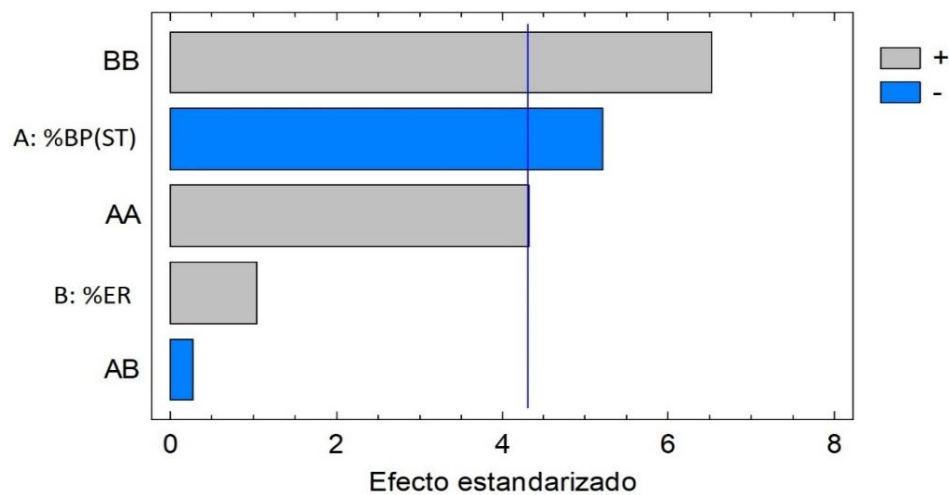


Figura 25. Diagrama de Pareto para la optimización de CH₄ en un sistema HPTC-RM de dos etapas.

En la *Figura 26* muestra la gráfica de efectos principales para el contenido porcentual de CH_4 en biogás correspondiente a la optimización de la producción en un sistema HPTC-RM, la *Figura 26-(a)* muestra que a menor contenido de BP la DA del S genera un contenido mayor al 72% de CH_4 y un contenido mayor genera entre el 67% al 68% de contenido porcentual de CH_4 en el Biogás, del mismo modo muestra que a menor contenido de ER el efecto en la generación de CH_4 se encuentra aproximadamente en el 71% y a mayor contenido de ER genera un 72% de contenido de CH_4 , valores medios generan entre 67% a 68% de CH_4 .

La *Figura 26-(b)* muestra que el efecto cuadrático del ER en la generación de CH_4 es mayor cuando hay mayor cantidad de ER y menor contenido de BP oscilando entre el 77% al 78 %, del mismo modo la *Figura 26-(c)* muestra que el efecto cuadrático de la BP en la generación de CH_4 alcanza entre el 77% al 78% cuando el contenido de ER es mayor y el contenido de BP es menor.

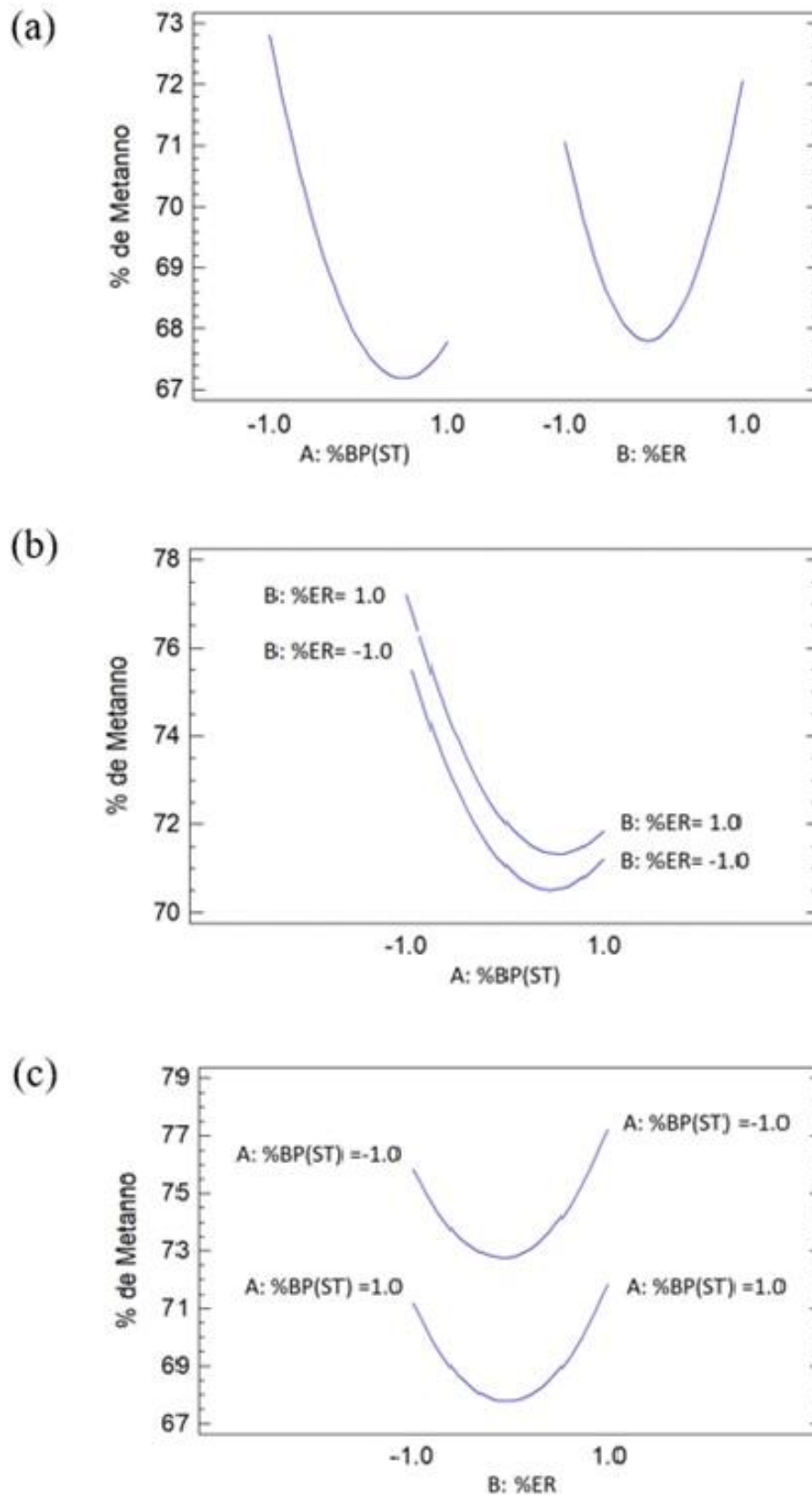


Figura 26. Gráfica de efectos principales para % de CH_4 de biogás correspondiente a la optimización de la producción en un sistema HPTC-RM.

Tabla 19. Análisis de varianza para el modelo completo de volumen de biogás correspondiente a la optimización de producción en dos etapas.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Brosas de Páprika	50.3822	1	50.3822	27.22	0.0348
B:Biol	1.99873	1	1.99873	1.08	0.4078
AA	34.4697	1	34.4697	18.63	0.0497
BB	79.0154	1	79.0154	42.69	0.0226
Falta de ajuste	25.027	4	6.25675	3.38	0.2411
Error puro	3.7014	2	1.8507		
Total (corr.)	171.735	10			

R-cuadrada = 83.2717 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 72.1195 porciento

Error estándar del est. = 1.3604

Error absoluto medio = 1.40271

Estadístico Durbin-Watson = 1.0747 (P=0.0297)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.347677

A continuación, se muestra el modelo matemático en la *Ecuación (22)* obtenido para la optimización del contenido de CH₄ en biogás como respuesta a los valores máximos obtenidos con un valor confiable de R² de 72.1195%.

$$\begin{aligned} \% \text{ CH}_4 = & 67.82 - 2.50954*BP + 0.499842*Biol + 2.47064*BP^2 \\ & + 3.74064*Biol^2 \end{aligned} \quad (22)$$

La *Figura 27* muestra la superficie de respuesta y la gráfica de contornos correspondiente para la optimización de las concentraciones porcentuales de BP y ER, también describe una tendencia ascendente en relación al CH₄ % fuera los rangos reales propuestos, la *Figura 27-(a)* se puede observar que a menor concentración con valores codificados de BP y mayores concentraciones de ER la respuesta en relación al contenido de CH₄ alcanza valores de 86% en el biogás, del mismo modo la *Figura 27-(b)* muestra una zona marcada con verde entre rangos de 72.4% al 77.2% de concentración de CH₄ en el biogás, el objetivo del proyecto implica la DA de la BP como prioridad, por tal motivo el uso de la BP como sustrato esperando respuestas con los rangos anteriormente mencionados son considerados de buena calidad para el su uso calorífico como en hornos o para los requerimientos energéticos de la planta de biogás.

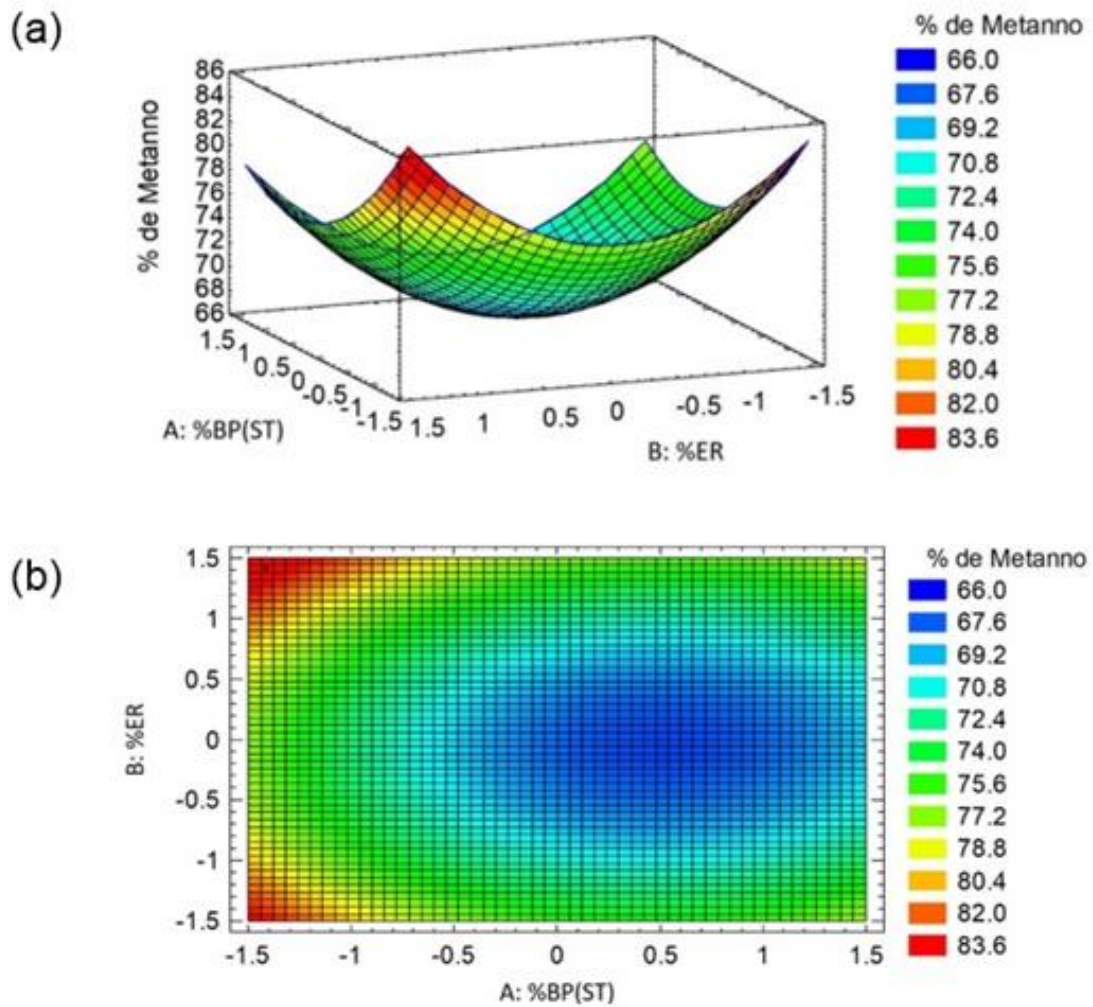


Figura 27. Superficie de respuesta y gráfica de contornos para tiempo correspondiente a la optimización de producción en dos etapas.

La *Tabla 20* muestra las variables codificadas óptimas para mejorar el proceso de obtención de CH_4 en biogás. La variable codificada óptimas para %BP (ST) es correspondiente al 0.80 como óptimo real, del mismo modo las variables codificadas óptimas para ER% es de 1.4142.

Tabla 20. Valores de Broza de Páprika y Temperatura para la optimización de tiempo correspondiente a la producción en dos etapas.

Factor	Óptimo codificado	Óptimo real	Óptimo CH ₄
%BP (ST)	-1.41421	0.80	
ER%	1.4142	85.40	84.50

4.4.4. Optimización múltiples respuestas

La *Figura 28* muestra en la gráfica de contornos sobrepuestos el punto óptimo de las respuestas múltiples obtenidas para la producción de biogás donde se prioriza la calidad de CH₄, volumen de biogás y el TRH, es importante tener en cuenta que el presente trabajo se enfoca en la generación de energía calorífica y eléctrica como respuesta a la máxima concentración del CH₄ en el Biogás, en la *Tabla 21* se observan los factores codificados y reales para obtener los valores óptimos de la concentración de CH₄ en % Vol, volumen de biogás en mlN y TRH en días, los resultados muestran que para obtener un volumen de biogás (en estado seco y normalizado) de 116.89mlN con una calidad de 75.60% CH₄ en un tiempo de retención de 17.38 se requiere de 5.6% de BP (ST), 4.4% de EB (ST), 85.4% de ER y 4.6% de H₂O en porcentaje peso a peso (%P/P).

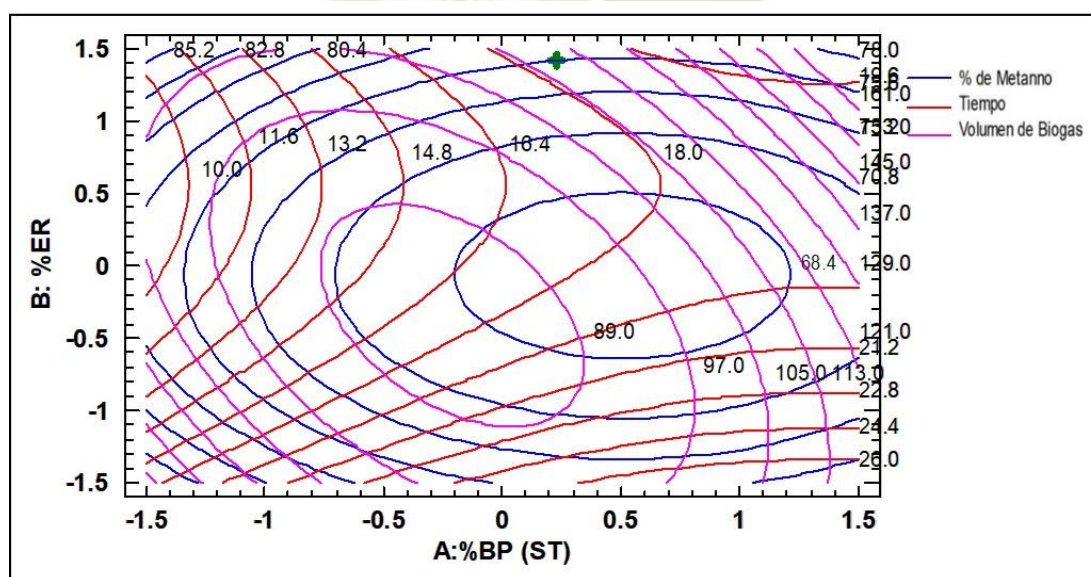


Figura 28. Gráfica de contornos sobrepuestos para la optimización de múltiples respuestas correspondientes a la producción en dos etapas.

Tabla 21. Optimización múltiple para % de metano, volumen de biogás y tiempo correspondiente a la producción en dos etapas.

Factor	Óptimo codificado	Óptimo real	%Metano	Volumen	Tiempo
%BP (ST)	0.2017	5.60	75.60	116.89	17.38
ER%	1.4142	85.40			

4.5. Potencial energético

4.5.1. Potencial de Sustrato Disponible (PSD)

Correspondiente al caso de estudio, se identificó la biomasa disponible del sector agropecuario de la empresa Agrícola Pampa Baja S.A.C., donde se cultiva Ají Párika en un área de 152 has correspondiente al 13% de sus cultivos, la actividad de cosecha y desbroce genera BP de categoría A (agrupada) (41). En promedio, para lotes de 1.600mts² se recolectan 135 plantas, la cantidad de frutos que genera es de 1644 alcanzando un peso promedio de 8.96 Kg (*Anexo 10; Tabla 57*), durante la recolección se reportó que por cada saco de BP se obtenía un peso aproximado de 1.5 Kg, el muestreo realizado corresponde a 5 plantas haciendo un peso promedio de 0.3Kg de BP por planta, para 1600mts² se obtuvo 135 plantas esto corresponde a 40.9Kg de BP en promedio, el tiempo que transcurre desde el momento de la siembra hasta la primera cosecha es de 5 meses y se puede disponer de 52.82 Ton de BP como máximo (*Anexo 10; Tabla 56*) y en promedio 38.86 Ton en 152has (54), la *Tabla 22* muestra los resultados obtenidos del Potencial de BP en estado fresco (BPF) como Biomasa Disponible (PBD_{BPF}) para la obtención de biogás.

El EB es un recurso de principal importancia en la DA, provee de microorganismos hidrolíticos que digiere el material orgánico en la etapa de pretratamiento hidrolítico para mejorar el desempeño de la asimilación del sustrato elaborado en la etapa metanogénica (4), en nuestro caso de estudio el Establo Los Rosales de Majes tiene 4,900 hembras, 2,200 vacas en producción de las cuales se obtiene 79,000 litros de leche diarios, la productividad por cabeza es de 13,100 kg/vaca-año (41.40 kg/vaca-día) (*Anexo 10; Tabla 57*), mantiene tecnificación en genética, alimentación, ordeño y manejo del hato (54).

La producción de EB indica que las cantidades por cabeza de vacuno produce más de 10 ton por periodo de estabulación (30Kg de excremento por día), al principio el EB no se recolectaba en estercoleras debido a que en estas condiciones el estiércol acumulado se convierte en fuente de moscas y helmintos, como parte de su ciclo biológico y se multiplican en las bostas frescas y estercoleros, que afectan la salud animal (52), sin embargo, el estiércol recolectado en pozas estercoleras es categorizando como biomasa concentrada (C) (41) generando un aumentando del contenido de nitrógeno (0,8%), El diagnóstico realizado muestra que el presente caso de estudio recolecta 66 ton/día de EB Fresco (EBF) considerando sólo a las vacas en producción (Anexo 10; Tabla 57).

La Tabla 22 muestra un PSD de 18.61 ton por temporada, a partir de los requerimientos mínimos de biomasa de BP en estado seco y su relación con las proporciones porcentuales obtenidos de los ensayos de optimización, se puede disponer de 10.42 Ton de BP y 8.19 Ton de EB por temporada para la elaboración del sustrato.

Tabla 22. Potencial de Biomasa Disponible (PBD) de Broza de Páprika (BP) y Estiércol Bovino (EB) en estado fresco.

PBD	Código	Estado	Produc., Kg.	Periodo, días.	MF, Ton.	ST, Ton.	Req*. Ton.	PSD, Ton
BP	PBD _{BPF}	Agrupada	38855	150	38.86	10.42	10.42	18.61
EB	PBD _{EBF}	Concentrada	66000	1	66.00	29.30	8.19	

*Requerimiento de biomasa

4.5.2. Potencial del Combustible Generado (PCG)

En la Tabla 23 se observan los resultados de la prueba de validación utilizando las proporciones óptimas donde el promedio del flujo de Biogás registrado en estado seco y normalizado es de 1232.37 Nm³ con una calidad de CH₄ del 75.78 del % Vol en un TRH de 17.38 días, los valores sin procesar se muestran en el Anexo 10; Tabla 61.

Tabla 23. Recolección de información de los sistemas Batch Piloto 5L.

Item	Código	R1	R2	R3	Promedio	Uni.
Volumen de Flujo registrado seco*	V_{0Tr}	1208.67	1301.10	1187.35	1232.37	Nm ³
Contenido de metano	CH ₄	75.32	75.61	76.42	75.78	%Vol.
Contenido de Dióxido de carbono	CO ₂	21.15	19.74	20.05	20.31	%Vol.
Contenido de Oxígeno	O ₂	3.53	4.65	3.54	3.90	%Vol.
Contenido de sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	0.2	0.2	0.20	0.20	%Vol.

La *Tabla 24* muestra un PCG de 10.0280 Ncm³ de CH₄/g*SV_{SH} del SH elaborado con BP y EB digerido anaerobiamente por metanogénesis durante un TRH de 17.38 días complementado con ER de la Planta HPTC-RM, La planta HPTC-RM de la UCSM con el LS seleccionado registró un flujo de 5m³*día⁻¹ en un biodigestor de 30 ton alimentado cada 2 días con 2 toneladas de purines de porcino, este genera un contenido de metano del 63.8% en estado húmedo controlado a una presión de 30mbar y a 37°C con una presión externa de 851.06 mbar (SENAMHI, 2015) (*Anexo 10;Tabla 58*). En condiciones normalizadas y en estado seco la planta HTPC-UCSM de biogás produce 3.55 Nm³*día⁻¹ con una calidad de 66.6% de metano (CH₄) (*Anexo 10; Tabla 59*).

Los resultados obtenidos se encuentran por encima de lo reportado en la planta HPTC-RM, también están por debajo de lo reportado con relación a otros recursos, considerando que la biomasa microalgal genera un amplio rango de 50 a 800 ml de CH₄/gVS, (40-72% del máximo de biogás teórico) (58) sabiendo que las microalgas tienen muchas ventajas para la producción de biogás por el proceso de digestión anaeróbica (32).

Tabla 24. Rendimiento de producción de biogás en base a g de SV.

Rendimientos de PCG	Ncm ³ de CH ₄ /g de SV
PCG (SH)	10.0280
PCG (BP)	5.7977
PCG (EB)	4.2303

En la [Tabla 25](#) se observan los resultados obtenidos para la producción de biogás a partir de ST y SV, se aprecia que el biogás producido alcanza una generación de 1232.37Ncm³ por g de ST con una calidad de 75.78 %CH₄, por otro lado en un estado ideal donde el contenido de CH₄ es del 100% el sustrato hidrolizado genera 933.93 Ncm³ de biogás por g de SV del Sustrato Hidrolizado.



Tabla 25. Producción de Biogás en base a ST y SV.

Concepto	Contenido Total	Volumen de Lodo	Volumen de Sustrato	Porcentaje de Contenido Sólido, %.		Porcentaje de contenido Líquido, %.		Volumen de Biogás Normalizado Ncm3	Porcentaje de CH ₄ en estado seco CH ₄ , % Vol
				Broza de páprika (BP)	de Estiércol Bovino (EB)	Efluente Recirculante (ER)	Agua (H ₂ O)		
				5.6	4.4	85.4	4.6		
Validación Experimental, g.	5000	4000	1000	56	44	854	46	1232.37	75.78
				Contenido de SV en SH					
				54	39	0	0	933.93	100.00

En comparación con los 325.3 mL/g VS generados por paja de arroz utilizando LS de estiércol digerido (LS_{DM}) alcanzando la mayor producción de biogás con pretratamiento enzimático (19), los resultados obtenidos se encuentran muy debajo de lo reportado, sin embargo, investigaciones previas realizadas para el presente trabajo de investigación se encontró que el efecto hidrolítico con un 50% de ST (MF) de BP en el 10% del SH genera 60.03 ± 1.30 % Vol de CH₄ en el ensayo Hidrolizado al cabo del día 17 y la máxima producción de biogás con 150 ± 5 m³N en hidrolizado en el día 13 alcanzando un rendimiento de 9.7115 Ncm³ de CH₄/g de SV_{SH}, concluyendo que el pretratamiento hidrolítico genera un efecto positivo significativo en la producción de CH₄ generado a partir de la digestión anaerobia de la biomasa de BP, se reportó en otra investigación que la generación de volumen de CH₄ sin pretratamiento hidrolítico y con parámetros escalados en un reactor piloto de 20 litros obteniendo un rendimiento de 2.09 Ncm³/g de SV_S de generación de biogás y un rendimiento de 1.33 Ncm³/g de SV_S de producción de metano (CH₄).

4.5.3. Potencial de Producción Factible (PPF)

La *Tabla 26* muestra un PPF de 173.79 Nm³ de CH a partir de un volumen de 186.09 de PSD y un PCG de 10.0280 Ncm³ de CH₄ en base a 17,33 SV_{SH}, la disponibilidad de sustrato se encuentra limitada por 10.42 Ton en estado de ST (MF) debido a la temporada de producción de páprika y el respectivo desbroce que se realiza en un promedio de 150 días (46), la disponibilidad de estiércol es diaria debido a la cantidad de producción de nuestro caso de estudio que es de 29.30 ton de EB en estado ST (MF) (54), con relación al ER este se consigue del mismo efluente producido por la planta, lo que permite ahorrar agua y vender el fertilizante líquido (biol) a demanda de los clientes, obteniendo así un compuesto de materia orgánica caracterizado por las cantidades importantes de minerales y micronutrientes que le confieren buenas cualidades como mejorador de las propiedades químicas y físicas de los suelos, este sistema permite que las condiciones del estiércol acumulado no se convierta en fuente de moscas y helmintos, del mismo modo se cumple parte de su ciclo biológico (52).

Tabla 26. Resultados del potencial de producción factible (PPF).

Recursos	Dis., Días	Ton, ST	Req. * Ton	SHD	SV _{SHD}	Nm ³ de CH ₄ /Ton de SV _{SHD}	Nm ³ de Biogás/Ton de SV _{SHD}
Broza de páprika	150	10.42	10.42				
Estiércol Bovino	1	29.30	8.19	186.09	17.33	173.79	229.33
Efluente Recirculante	1	0.00	158.92				
Agua	1	0.00	8.56				

4.5.4. Potencial Técnico Energético (PTE)

La *Tabla 27* muestra los resultados del poder calorífico generado por cada m³N producido de metano por tonelada de SV de SH de BP y EB, los resultados indican que se puede obtener un PCI de 6229765.83Kj y 1419.14KW a partir de 173.79m³N de CH₄ (PCI_{CH₄}=35846.07), del mismo modo la *Tabla 28* muestra los valores para una planta escalada a 30m³ acorde a los resultados del SH elaborado para la producción de biogás, se observa que bajo un TRH de 17.38 días se puede alimentar a la planta con 1.73 m³ * día durante un tiempo de operación de 3.59 meses a una calidad de biogás del 75.78 %CH₄.

Tabla 27. Poder calorífico del sustrato hidrolizado en base a SV.

Sustrato Hidrolizado (SH)	PPF, m3N de CH ₄ / SV _{SH}	PCI de CH ₄ , Kj/m ³	Poder Calorífico, Kj.	Poder Energético, KW.	Poder Calorífico, Kcal
SH _{BP y EB}	173.79	35846.07	6229765.83	1419.14	1487939.79

$$1\text{Kcal} = 35846.07 \text{ Kj/m}^3$$

$$1\text{kj} = 0.0002278 \text{ KWh/m}^3$$

Tabla 28. Referencias de escalamiento.

Concepto	Cantidad	Unidad
Volumen de Cámara Metanogénica	30.00	m ³
Tiempo de Retención	17.38	días
Volumen de Influyente (Sustrato)	1.73	m ³ *días-1
	3.59	meses
Tiempo operativo	107.81	días
	2587.36	horas

Se determinó el costo energético de la planta HPTC-RM del Fundo de la UCSM para analizar el requerimiento energético de una planta de 30m³, se identificó que se requiere de un balón de 10kg y otro de 50kg por semana para mantener la planta HPTC-RM del fundo de la UCSM para lo cual se determinó un gasto energético de 1310807.14 Kcal*mes⁻¹, considerando que un balón de 10 Kg contiene 4Kg de gas comprimido, se requiere de 505.07Kg para compensar el consumo, del mismo modo la producción de biogás de la planta satisface el 31.59% obteniendo 414057.29 Kcal*mes⁻¹ como PTE, el resultado obtenido fue un potencial negativo de -896749.85 Kcal*mes⁻¹ para lo cual se requerirá de 161.26 Kg de gas propano para cubrir el gasto energético total, inicialmente se gasta S/.769.29 utilizando solo propano, el gas generado cubre S/. 242.42 del gasto monetario (*Tabla 29*).

En el Perú los agrónomos prefieren aprovechar el efluente como fertilizante líquido lo cual justifica la implementación de una planta de biogás a pesar de mantener un potencial energético negativo

Tabla 29. Potencial Técnico Energético (PTE) y Potencial Energético (PE) de la planta HPTC-RM Fundo Pampa Baja.

Consumo Energético	Consumo Diario, Kg.	Consumo Mensual, Kg.	Consumo Calorífico Mensual		Costo, S/.
			Kcal*mes-1	Kj*mes-1	
Referencia de gas propano (RFP)	7.86	235.71	1310807.14	5488139.78	769.29
Requerimiento de biogás (RQB)	16.84	505.07	1310807.14	5488139.78	1012.67
Potencial Técnico Energético (PTE)	4.03	120.91	414057.29	1733591.62	242.42
Potencial Energético (PE)	-12.81	-384.17	-896749.85	-3754548.15	-770.26
Requerimiento de Gas Propano (RQP)	5.38	161.26	896749.85	3754548.15	526.28
				Consumo Económico (PTE+RGP)	768.70

4.5.5. Potencial Económico Implementable (PEI)

Se determinó un costo de S/.74,740.88 como resultado del coste para la construcción de la planta de Biodigestión de alta eficiencia HPTC-RM (*Anexo 10; Tabla 65*), para su estimación se utilizaron los costos de las cámaras, implementos, accesorios, construcción, materiales e insumos, en relación con los insumos se tomó en cuenta el costo del rastrojo y el estiércol acorde al requerimiento de la planta dependiendo de la cantidad promedio de BP disponible en un periodo de 5 meses por un valor de S/.100.00 por Tonelada.

El flujo de caja considera los ingresos operativos por venta del efluente o fertilizante líquido (Biol) a un precio de S/.1.00 el Litro y la producción de biogás a S/. 2.01 el Kilo., se identificaron los ingresos operativos por concepto de construcción de la planta HPLC-RM, lodo de siembra, mantenimiento, personal operativo, personal administrativo, terreno, gas propano, gas metano y servicios básicos como agua y luz por un total de S/. 79,411.71, como resultado se encontró que se requiere de una inversión de S/.114,400.00 a partir de una tasa de interes del 0.08 con un VAN de

S/6,086.07, un TIR del 10% y un PRI de 2.74 (*Anexo 10; Tabla 66*). Los costos se basaron en el consumo energético de la planta de biogás que utiliza un balón de 4.5 Kilo y otro de 10.0 Kilos durante 7 días generando un gasto de S/. 179.50 y manteniendo la referencia de que un balón de 10Kg de biogás contiene 4Nm³ con una calidad de 75.60 %CH₄ tiene un PCI de 108660.43KJ/balón lo que equivale 10866.04Kj/Kg.

Si bien los reactores de membrana anaeróbica hacen que la tecnología sea práctica y viable (4) teniendo en cuenta que la demanda de combustibles se basa en los precios del petróleo, la demanda del biogás se basa en el costo del gas propano o natural (1) esperar ganancias por la producción de biogás se debe de tener en cuenta que un balón de 10 kilos de biogás comprimido debe de costar menos de S/2.00 por Kilo de gas comprimido, para que los costos no sean menores el biogás debe de ser procesado a Biometano, sin embargo hay que tener en cuenta los costos de purificación y el gas debe de tener un poder calorífico aproximado a los balones comerciales.

En tal contexto, actualmente en el Perú la producción de Biogás se debe de basar en su aprovechamiento directo en secadores, calderas, calefacción y cocinas hasta que las políticas nacionales regulen el tratamiento de residuos orgánicos que son de alta importancia para la generación de biogás y su aprovechamiento (2), del mismo modo las regulaciones concernientes para su inserción a la red eléctrica fuera de las subastas energéticas como en Alemania, Reino Unido e Italia (3), para ello se debe de seguir realizando investigaciones que mejoren el desempeño técnico de la trayectoria del Biogás en el Perú acorde a la realidad y tendencia nacional.

CONCLUSIONES

- Los sustratos elaborados con broza de páprika no presentaron errores en los ensayos de metanización con proporciones msicas en estado de materia fresca (MF) del sustrato hidrolizado (SH) debido a su formulación en relación S/I promedio de 0.48 menor al indicador 0.5 de la norma VDI 4630 a partir de un diseño central compuesto.
- Los parámetros óptimos reales para la producción de biogás y metano (CH₄) en un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 17.38 días son de 5.60 para el porcentaje de broza de páprika (%BP (ST)) y 85.40 para el porcentaje de efluente recirculante %ER, para generar 116.89 cm³ de biogás con una calidad del 75.60% en ensayos de 500 ml con alimentación de SH del 20% del contenido. La generación validada de biogás en ensayos de 5L es un volumen de 1232.37 Ncm³ con una calidad de 75.78% de CH₄ equivalente a 933,93 Ncm³ en un TRH de 17 días.
- El potencial energético del biogás es de -1245,49 Kj*h⁻¹ si se alimenta con 1,7261Ton de sustrato hidrolizado elaborado a base de BP, EB y ER por día para una planta HPTC-RM de 30m³ generando ingresos por la venta del fertilizante líquido y biogás con un VAN de S/.6 086,07, un TIR del 10% y un PRI de 2,74 a partir de una tasa de interés del 0.08%. El rendimiento del metano obtenido es de 10,0280 Ncm³ de CH₄/g de SV_{SH}.

RECOMENDACIONES

- Caracterizar el sustrato incluyendo el porcentaje de contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, debido a que la función del diseño HPTC-RM de dos Etapas una hidrolítica y otra metanogénica se encuentra elaborado para sustratos de difícil descomposición, es posible que el pretratamiento del sustrato aplicado en la presente investigación requiera de un análisis inicial y final de los contenidos mencionados priorizando el contenido de lignina.
- Considerar todos los valores de producción de biogás, en la presente investigación se evaluó el potencial metanogénico de biogás cuando alcanzó los valores porcentuales superiores de producción, no fueron considerados los valores posteriores, se recomienda considerarlos para determinar el rendimiento de generación de metano a partir de los sólidos volátiles del sustrato en su totalidad durante un determinado tiempo de retención orgánico.
- No considerar al TRH como respuesta del sistema sino como un valor final, debido a que no se consideró la degradación total del sustrato hidrolizado en el seguimiento de los ensayos, es probable encontrar mejores rendimientos si la evaluación de la degradación es al finalizar la etapa de metanización con la digestión completa del sustrato hidrolizado en el sistema HPTC-RM de dos etapas.
- Los modelos matemáticos ajustados para la determinación del óptimo se ven afectados a causa del modelo experimental debido a que refleja una tendencia fuera de los valores reales propuestos en el diseño que podrían no estar sujetos a los resultados esperados, sin embargo el punto óptimo refleja valores dentro de los parámetros propuestos los cuales fueron validados por triplicado, por tal motivo se recomienda utilizar el rango completo de concentraciones del material orgánico con el objetivo de no afectar al modelo con tendencias fuera de las variables propuestas que podrían no corroborarse experimentalmente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar F, Botero R. Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo. *Tierra Tropical*. 2006; 1: p. 15-25.
2. Sreekrishnan T, Kohli S, Rana V. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. *Bioresource technology*. 2004 Oct 31; 95: p. 1-0.
3. Rodriguez C, Alaswad A, Benyounis KY, Olabi AG. Pretreatment techniques used in biogas production from grass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 68(2): p. 1193-1204.
4. Chen C, Guo W, Ngo HH, Lee DJ, Tung KL, Jin P, et al. Challenges in biogas production from anaerobic membrane bioreactors. *Renewable Energy*. 2016; 98: p. 120-134.
5. Gunaseelan VN. Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. *Biomass and bioenergy*. 1997 Dec 31; 13(1): p. 83-114.
6. McGarry M, Stainforth J. Compost, fertilizer, and biogas production from human and farm wastes in the People's Republic of China. International Development Research Centre. 1978.
7. Poeschl M, Ward S, Owende P. Prospects for expanded utilization of biogas in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010; 14(7): p. 1782-1797.
8. FNR. Biogas—basic data of Germany. Agency for Renewable Resources. 2008.
9. FNR. GÜLLE-KLEINANLAGEN. Bioenergie: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. 2015.
10. Helm M. Factors of efficiency within gas injection. Nuremberg, Germany: Cooperation of consultants for biogas, Legislation and biological process; 2018.

11. Mutungwazi A, Mukumba P, Makaka G. Biogas digester types installed in South Africa: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018; 81(1): p. 172-180.
12. Shenzhen Puxin Science and Technology Company Limited. PUXIN family size biogas system. ;: p. 1-5.
13. Cheng S, Li Z, Mang HP, Huba EM, Gao R, Wang X. Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries. *Renew Sustain Energy Rev*. 2014; 34: p. 387-400.
14. Owner's manual. Owner's manual for the Energyweb DIY Biobag digester. 2014;: p. 1-32.
15. Liu T, Sun L, Müller B, Schnürer A. Importance of inoculum source and initial community structure for biogas production from agricultural substrates. *Bioresource Technology*. 2017; 245(Part-A): p. 768-777.
16. Koch K, Lippert T, Drewes JE. The role of inoculum's origin on the methane yield of different substrates in biochemical methane potential (BMP) tests. *Bioresource Technology*. 2017; 243: p. 457-463.
17. Lim JW, Ge T, Tong YW. Monitoring of microbial communities in anaerobic digestion sludge for biogas optimisation. *Waste Management*. 2018; 71: p. 334-341.
18. Regional Information Service Center for South East Asia on Appropriate Technology. Review of Current Status of Anaerobic Digestion Technology for Treatment of Municipal Solid Waste. 1998;: p. 10-11, 15-16.
19. Gu Y, Chen X, Liu Z, Zhou X, Zhang Y. Effect of inoculum sources on the anaerobic digestion of rice straw. *Bioresource Technology*. 2014; 158: p. 149-155.
20. Verein Deutscher Ingenieure. VDI 4630 - Fermentation of organic materials. 2006..

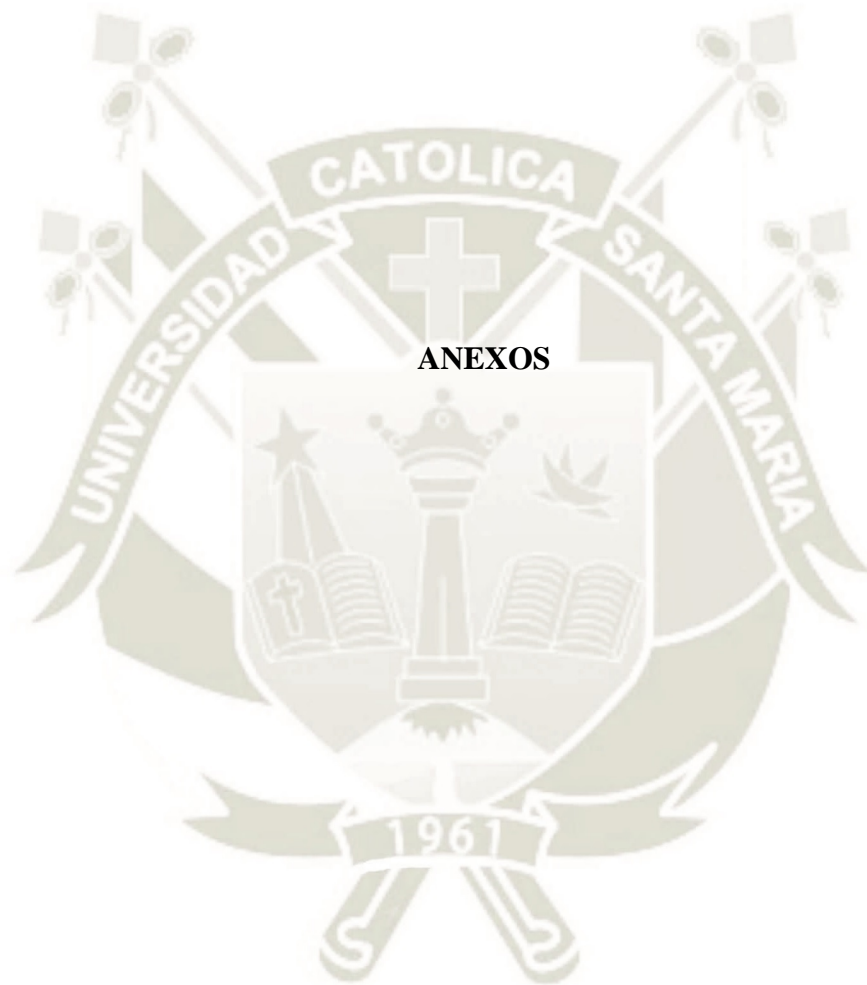
21. DIN 38414-17. German standard methods for the examination of water, waste water and sludge. 1985.
22. Ware A, Power N. What is the effect of mandatory pasteurisation on the biogas transformation of solid slaughterhouse wastes? In *Waste Management*. 2016; 48: p. 503-512.
23. Adebayo AO, Jekayinfa SO, Linke B. Anaerobic Co-Digestion of Cattle Slurry with Maize Stalk at. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 2014; 3(1): p. 80-88.
24. Esposito G, Frunzo L, Liotta F, Panico A, Pirozzi F. Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates. *The Open Environmental Engineering Journal*. 2012; 5: p. 1-8.
25. Cárdenas-Cleves LM, Parra-Orobio BA, Torres-Lozada , Vásquez-Franco CH. Perspectives of Biochemical Methane Potential - BMP test. 2016; 29(1).
26. Grandó RL, De Souza Antune AM, Da Fonseca FV, Sánchez A, Barrena R, Font X. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 80: p. 44-53.
27. Miltner M, Makaruk A, Harasek M. Review on available biogas upgrading technologies and innovations towards advanced solutions. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 161: p. 1329-1337.
28. Ni JQ, Naveau H, Nyns EJ. iogas: exploitation of a renewable energy in Latin America. *Renewable Energy*. 1993; 3(6-7): p. 763-779.
29. Thomas A, Barbara A, Kryvoruchko V, Machmu'ller A, Hopfner-Sixt K, Bodiroza V, et al. Methane production through anaerobic digestion of various. *Bioresource Technology*. 2007; 98: p. Bioresource Technology.

30. Córdova O, Santis J, Ruiz-Fillipia G, Zuñiga ME, Feroso FG, Chamy R. Microalgae digestive pretreatment for increasing biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017.
31. Passos F, Carretero J, Ferrer I. Comparing pretreatment methods for improving microalgae anaerobic digestion: Thermal, hydrothermal, microwave and ultrasound. *Chemical Engineering Journal*. 2015; 279: p. 667-672.
32. López Torres M, Espinoza Lloréns MdC. Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes. *Waste Management*. 2008; 28(11): p. 2229-2234.
33. Ometto F, Quiroga G, Pšenička P, Whitton R, Jefferson , Villa R. Impacts of microalgae pre-treatments for improved anaerobic digestion: Thermal treatment, thermal hydrolysis, ultrasound and enzymatic hydrolysis. *Water Research*. 2014; 65: p. 350-361.
34. Kepler Ingeniería y Ecogestión. Plantas de Biogas modelo ROTALLER. .
35. Herrmann GA. High Performance Biogas Plant (HPTC)..
36. Snowleopard Poster. High Performance Temperature & Controlled Biogas Plant..
37. Snow Leopard Projects GmbH. DIGESTING FIBRUOUS MATERIALS AND WASTE IN MULTI STAGE BIOGAS PLANTS..
38. KEPLER. Planta de Biogas de Alto Rendimiento RM con Hidrólisis Secuencial. 2012 Enero..
39. Heiermann M, Plöchl M, Linke B, Schelle H, Herrmann C. Biogas Crops – Part I. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript 1087. 2009 Junio; 11.

40. Risén E, Gregeby E, Tatarchenko G, Blidberg E, Malmström ME, Welande U, et al. Assessment of biomethane production from maritime common reed. *Journal of Cleaner Production*. 2013; 53: p. 186-194.
41. Chamy R, Vivanco E. Identificación de Clasificación de los Distintos Tipos de Biomasa en Chile para la Generación de Biogás. *Potencial Biogás, Proyecto Energías Renovables No convencionales en Chile (CNE/GTZ)*. 2007.
42. Chao H, Hai-Jun G, Can W, Lian X, Mu-Tan L, Xue-Fang C, et al. Efficient continuous biogas production using lignocellulosic hydrolysates as substrate: A semi-pilot scale long-term study. *Energy Conversion and Management*. 2017; 151: p. 53-62.
43. Krzywika , Stanislaw S. Putrid Potatoes as Biomass Charge to an Agricultural Biomass-to-Biogas Power Plant. *Energy Procedia*. 2017; 118.
44. Prochnow A, Heiermann , Drenckhan A, Schelle. Seasonal Pattern of Biomethanisation of Grass from Landscape Management. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal..* 2005 Diciembre; VII(Manuscript EE 05 011).
45. InfoAgro. El cultivo del pimiento. Consultado. ; 2013.
46. INIA. Cultivo de Ají Párika - Estació experimental agraria Donoso-Huaral Lima: Ministerio de Agricultura; 2010.
47. Krich K. Biometano de desechos lácteos: un libro de consulta para la producción y uso de gas natural renovable en California. ; 2005.
48. Brown BB, Yiridoe EK, Gordon R. Impacto de las opciones de políticas simples versus múltiples sobre la viabilidad económica de la producción de energía de biogás: operaciones de cerdos y lácteos en Nueva Escocia. *Política Energética*. 2007 Septiembre; 35-9: p. 4597-4610.
49. Row, J, Neabel D. Sistema integrado de utilización del estiércol valor del ciclo de vida. 2005..

50. Canet R, Ribó M, Pomares F, Albiach MR. Caracterización y potenciales impactos ambientales de las deyecciones ganaderas. Tierra de Castilla y León - Ganadería. 2006;(131).
51. SEDAPAR. Boletín Estiercoles. 2004..
52. Yen H, Brune D. Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. Bioresource Technology. 2007 Jan 31; 98(1): p. 130-4.
53. Coss Bu R. Análisis y evaluación de proyectos de inversión. 2005..
54. Agrícola Pampa Baja S.A.C. DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UNA PLANTA DE BIODIGESTIÓN DE ALTA EFICIENCIA, CON DOBLE CÁMARA HIDROLÍTICA Y METANOGÉNICA, Y TEMPERATURA CONTROLADA EN RANGO MESOFÍLICO, EN LA IRRIGACIÓN MAJES, AREQUIPA. In Taller de Difusión FINCyT; 2015; Arequipa.
55. Zhang Z, Zhang G, Li W, Li C, Xu G. Enhanced biogas production from sorghum stem by co-digestion with cow manure. International Journal of Hydrogen Energy. 2016; 41(21): p. 9153-9158.
56. MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. Manual de Biogas. 2011..
57. Ilminnafik N, Listyadi S , Sutjahjono H. Thermal Characteristic of Flame As Quality. International Journal of Applied Environmental Sciences. 2017; 12(7): p. 1379-1385.
58. Sialve B, Bernet N, Bernard O. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal. Biotechnology Advances. 2009; 27: p. 409–416.
59. García D, Doménech SG. La representación gráfica urbana en los manuscritos de Leonardo da Vinci. [Online].; 2017 [cited 2017 11 26. Available from: <https://polipapers.upv.es/index.php/ega/article/view/7345>.

60. Martínez RRC, Morantes EFF, Castro Molano LDPC, Químico I. EFECTO DE LA AGITACION SOBRE EL PROCESO DE PRODUCCION DE BIOGAS A PARTIR DEL BAGAZO DE FIQUE A DIFERENTES ESCALAS. [Online].; 2012 [cited 2017 11 26. Available from: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6727/2/139039.pdf>.
61. Arthur R, Glover K. Biomethane potential of the POME. In Bioresource Technology. 2012; 111: p. 155-160.
62. KEPLER Ingeniería y Ecogestión. KEPLER BIOGAS DEVELOPP. 2014..
63. GEF, MINENERGIA / PNUD / FAO. Manual de Biogas. 2011..
64. Medina-Carpio OC, Manrique-Pino P, Dávila Del Carpio G. EVALUACIÓN DE LA BIODIGESTIÓN ANAEROBIA DE BROZA DE PÁPRIKA (*Capsicum annum*) EN UN SISTEMA HPTC-RM DE DOS ETAPAS (HIDROLÍTICA Y METANOGENICA). 2017.
65. Medina-Carpio C, Postigo-Collado J, Peña-Davila G. Determinación de Parámetros para la Biodigestión Anaerobia de Broza de Páprika (*Capsicum annum*). Seminario Internacional de Procesamiento de Residuos Orgánicos. 2017; 1: p. 30.
66. Córdova O, Santis J, Ruiz-Fillipi G, Zuñiga ME, Feroso FG, Chamy R. Microalgae digestive pretreatment for increasing biogas production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. ; 82(3): p. 2806-2813.
67. Edmeades DC. Los efectos a largo plazo de los abonos y fertilizantes sobre la productividad y la calidad del suelo: una revisión. NUTR. CYCL. Agroecosyst. 2003;(66): p. 165-180.
68. Tufaner F, Avsar Y. Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: a review. Azad University. 2015.



Ensayos de caracterización

Anexo 1. Resultados de la caracterización de lodos de Broza de Páprika.



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD

Urb. San José SN Umacollo CAMPUS UNIVERSITARIO H-204205 T + 51 54 382038 ANEXO 1166
laboratoriodeensayo@ucsm.edu.pe http://www.ucsm.edu.pe Aptdo. 1359
AREQUIPA - PERU



INFORME DE ENSAYO
Nº DE INFORME: ANA04114.001365A

Nombre del Cliente	: UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARIA
Dirección del Cliente	: Calle Samuel Velarde 320 Umacollo
RUC	: 20141637941
Condición del Muestreado	: Por el cliente
Descripción	: Broza de Paprika BP
Tamaño de muestra	: 500 mL
Fecha de Recepción	: 04/09/2014
Fecha de Inicio del Ensayo	: 04/09/2014
Fecha de Emisión de Informe	: 10/09/2014
Página	: 1 de 1

I. ANALISIS FISICO – QUIMICO:

ANALISIS	RESULTADO
DETERMINACION DE SOLIDOS TOTALES (% ST MF) Método gravimétrico	26,82
DETERMINACION DE MATERIA VOLATILES (% SV ST) Método gravimétrico	96,15
DETERMINACION DE SOLIDOS VOLATILES (% SV MF) Método Gravimétrico	25,79
DETERMINACION DE HUMEDAD (%H MF) Método Gravimétrico	73,18
DETERMINACIÓN DE CENIZA (%Ce ST) Método gravimétrico adaptado de NTP 209.265.2001	3,86
DETERMINACIÓN DE CENIZA (%Ce MF) Método gravimétrico adaptado de NTP 209.265.2001	1,04
DETERMINACION DE NITROGENO (% N) Método Kjeldahl	0,71
DETERMINACION DE MATERIA ORGANICA (% C) Método gravimétrico	82,00
RELACION CARBONO NITROGENO Norma Mexicana NMX-AA-067-1985	66,99
DETERMINACION DE pH (unidades de pH a 20 °C) Método instrumental directo	6,30

OBSERVACIONES:

Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INDECOPI-SNA

Q.F. Ricardo A. Abril Ramirez
CQFDA/00624
JEFE DE LABORATORIO LECC



Anexo 2. Resultados de la caracterización de lodos de Broza de Páprika Tratada (BPT).



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD



Urb. San José S/N Umacollo CAMPUS UNIVERSITARIO H. 204205 SE + 51 54 382038 ANEXO 1106
E: laboratorioensayo@ucsm.edu.pe | F: http://www.ucsm.edu.pe | P: Apdo. 1320
AREQUIPA - PERU



INFORME DE ENSAYO
Nº DE INFORME: ANA04114.001365B

Nombre del Cliente	: UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARIA
Dirección del Cliente	: Calle Samuel Velarde 320 Umacollo
RUC	: 20141637941
Condición del Muestreado	: Por el cliente
Descripción	: Broza de Paprika Tratada BP
Tamaño de muestra	: 500 mL
Fecha de Recepción	: 04/09/2014
Fecha de Inicio del Ensayo	: 04/09/2014
Fecha de Emisión de Informe	: 10/09/2014
Página	: 1 de 1

I. ANALISIS FISICO – QUIMICO:

ANALISIS	RESULTADO
DETERMINACION DE SOLIDOS TOTALES (% ST MF) Método gravimétrico	94,12
DETERMINACION DE MATERIA VOLATILES (% SV ST) Método gravimétrico	96,15
DETERMINACION DE SOLIDOS VOLATILES (% SV MF) Método Gravimétrico	90,50
DETERMINACION DE HUMEDAD (%H MF) Método Gravimétrico	5,88
DETERMINACIÓN DE CENIZA (%Ce ST) Método gravimétrico adaptado de NTP 209.265.2001	3,86
DETERMINACIÓN DE CENIZA (%Ce MF) Método gravimétrico adaptado de NTP 209.265.2001	3,63
DETERMINACION DE NITROGENO (% N) Método Kjeldahl	0,71
DETERMINACION DE MATERIA ORGANICA (% C) Método gravimétrico	82,00
RELACION CARBONO NITROGENO Norma Mexicana NMX-AA-067-1985	66,99
DETERMINACION DE pH (unidades de pH a 20 °C) Método instrumental directo	7,30

OBSERVACIONES:

Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INDECOPI-SNA

Q.F. Ricardo A. Abril Ramirez
C.F.D.A. 00624
JEFE DEL LABORATORIO LECC

Anexo 3. Resultados de la caracterización de lodos de Estiércol Bobino (EB).



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD

Urb. San José SM Umacollo CAMPUS UNIVERSITARIO N° 204205 M - 51 54 302038 ANEXO 1188
E: laboratoriodeensayo@ucsm.edu.pe T: http://www.ucsm.edu.pe F: Apdo. 1300
AREQUIPA - PERU



INFORME DE ENSAYO
N° DE INFORME: ANA0414.001365C

Nombre del Cliente : UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARIA
Dirección del Cliente : Calle Samuel Velarde 320 Umacollo
RUC : 20141637941
Condición del Muestreado : Por el cliente
Descripción : ESTIERCOL BOVINO BP
Tamaño de muestra : 500 mL
Fecha de Recepción : 04/09/2014
Fecha de Inicio del Ensayo : 04/09/2014
Fecha de Emisión de Informe : 10/09/2014
Página : 1 de 1

I. ANALISIS FISICO - QUIMICO:

ANALISIS	RESULTADO
DETERMINACION DE SOLIDOS TOTALES (% ST MF) Método gravimétrico	44,40
DETERMINACION DE MATERIA VOLATILES (% SV ST) Método gravimétrico	89,29
DETERMINACION DE SOLIDOS VOLATILES (% SV MF) Método Gravimétrico	39,64
DETERMINACION DE HUMEDAD (%H MF) Método Gravimétrico	55,60
DETERMINACIÓN DE CENIZA (%Ce ST) Método gravimétrico adaptado de NTP 209.265.2001	10,97
DETERMINACIÓN DE CENIZA (%Ce MF) Método gravimétrico adaptado de NTP 209.265.2001	4,87
DETERMINACION DE NITROGENO (% N) Método Kjeldahl	1,82
DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGANICA (% C) Método gravimétrico	48,36
RELACION CARBONO NITROGENO Norma Mexicana NMX-AA-067-1985	15,41
DETERMINACION DE pH (unidades de pH a 20 °C) Método instrumental directo	6,37

OBSERVACIONES:

Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INDECOPI-SNA

Q.F. Ricardo A. Abril Ramirez
COFDA 00624
JEFE DE LABORATORIO LECC



Anexo 4. Resultados de la caracterización de lodos de siembra (LS)



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD



Urb. San José S/N Umacollo CAMPUS UNIVERSITARIO H-204/205 ☎ + 51 54 251210 ANEXO 1166
✉ laboratoriodensayo@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe 📄 Aptdo. 1350
AREQUIPA - PERU



INFORME DE ENSAYO
N° DE INFORME: ANA04114.001365

Nombre del Cliente	: UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARIA
Dirección del Cliente	: Calle Samuel Velarde 320 Umacollo
RUC	: 20141637941
Condición del Muestreado	: Por el cliente
Descripción	: LODOS DE SIEMBRA
Tamaño de muestra	: 500 mL
Fecha de Recepción	: 04/09/2014
Fecha de Inicio del Ensayo	: 04/09/2014
Fecha de Emisión de Informe	: 10/09/2014
Página	: 1 de 1

I. ANALISIS FISICO – QUIMICO:

ANALISIS	RESULTADO
DETERMINACION DE HUMEDAD (%) Método gravimétrico	95,20
DETERMINACION DE MATERIA VOLATIL (%) Método Gravimétrico	4,80
DETERMINACION DE SOLIDOS VOLATILES (%) Método Gravimétrico	99,79
DETERMINACION DE CENIZA (%) Método gravimétrico adaptado de NTP 209.265.2001	0,21
DETERMINACION DE NITROGENO (%) Método Kjeldahl	1,90
RELACION CARBONO NITROGENO Norma Mexicana NMX-AA-067-1985	1,47

OBSERVACIONES:
Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INDECOPI-SNA

Q.F. Ricardo A. Abril Ramirez
CQFDA 00624
JEFE DE LABORATORIO LECC



Anexo 5. Resultados de la caracterización del Efluente Recirculante (ER).



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD

Urb. San José 8th Umaccollo CAMPUS UNIVERSITARIO II-2043205 ☎ +51 54 362038 ANEXO 1166
✉ laboratorioensayo@ucsm.edu.pe | http://www.ucsm.edu.pe | Av. Aguirre 1350
AREQUIPA - PERU



INFORME DE ENSAYO
N° DE INFORME: ANA04I14.001365E

Nombre del Cliente	: UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARIA
Dirección del Cliente	: Calle Samuel Velarde 320 Umaccollo
RUC	: 20141637941
Condición del Muestreado	: Por el cliente
Descripción	: EFLUENTE RECIRCULANTE ER
Tamaño de muestra	: 500 mL
Fecha de Recepción	: 04/09/2014
Fecha de Inicio del Ensayo	: 04/09/2014
Fecha de Emisión de Informe	: 10/09/2014
Página	: 1 de 1

I. ANALISIS FISICO – QUIMICO:

ANALISIS	RESULTADO
DETERMINACION DE SOLIDOS TOTALES (% ST MF) Método gravimétrico	0,18
DETERMINACION DE MATERIA VOLATILES (% SV ST) Método gravimétrico	99,80
DETERMINACION DE SOLIDOS VOLATILES (% SV MF) Método Gravimétrico	0,18
DETERMINACION DE HUMEDAD (%H MF) Método Gravimétrico	99,82
DETERMINACIÓN DE CENIZA (%Ce ST) Método gravimétrico adaptado de NTP 209.265.2001	0,20
DETERMINACIÓN DE CENIZA (%Ce MF) Método gravimétrico adaptado de NTP 209.265.2001	0,00
DETERMINACION DE NITROGENO (% N) Método Kjeldahl	0,60
DETERMINACION DE MATERIA ORGANICA (% C) Método gravimétrico	3,00
RELACION CARBONO NITROGENO Norma Mexicana NMX-AA-067-1985	2,90
DETERMINACION DE pH (unidades de pH a 20 °C) Método instrumental directo	7,89

OBSERVACIONES:

Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INDECOPI-SNA

Q.F. Ricardo A. Abril Ramirez
CCFOA 00624
JEFE DE LABORATORIO LECC



Anexo 6

Tablas de proporciones

Tabla 30. Proporciones de contenido de sólidos CS y contenido líquido CL en los reactores Hidro Lab.

Tratamientos	Contenido de Sólidos, 10%		Contenido Líquido, 90%		Total, g.
	CS _{BR} , g.	CS _{EB} , g.	CL _{BR} , g.	CL _{H2O} , g.	
M1	10.00	40.00	125.00	325.00	500.00
M2	40.00	10.00	125.00	325.00	500.00
M3	10.00	40.00	375.00	75.00	500.00
M4	40.00	10.00	375.00	75.00	500.00
M5	3.79	46.21	250.00	200.00	500.00
M6	46.21	3.79	250.00	200.00	500.00
M7	25.00	25.00	73.23	376.78	500.00
M8	25.00	25.00	426.78	23.23	500.00
M9	25.00	25.00	250.00	200.00	500.00
M10	25.00	25.00	250.00	200.00	500.00
M11	25.00	25.00	250.00	200.00	500.00

Tabla 31. Evaluación de viabilidad metanogénica mediante la relación inóculo – sustrato (I/S).

Trat.	Sustrato, SV (ST)		Lodo de siembra, SV (ST)		S/I
	g	%	g	%	
M1	9.07	90.66	19.16	99.79	0.47
M2	9.48	94.78	19.16	99.79	0.49
M3	9.07	90.66	19.16	99.79	0.47
M4	9.48	94.78	19.16	99.79	0.49
M5	8.98	89.81	19.16	99.79	0.47
M6	9.56	95.63	19.16	99.79	0.50
M7	9.27	92.72	19.16	99.79	0.48
M8	9.27	92.72	19.16	99.79	0.48
M9	9.27	92.72	19.16	99.79	0.48
M10	9.27	92.72	19.16	99.79	0.48
M11	9.27	92.72	19.16	99.79	0.48

Anexo 7

Ensayos de combustión.

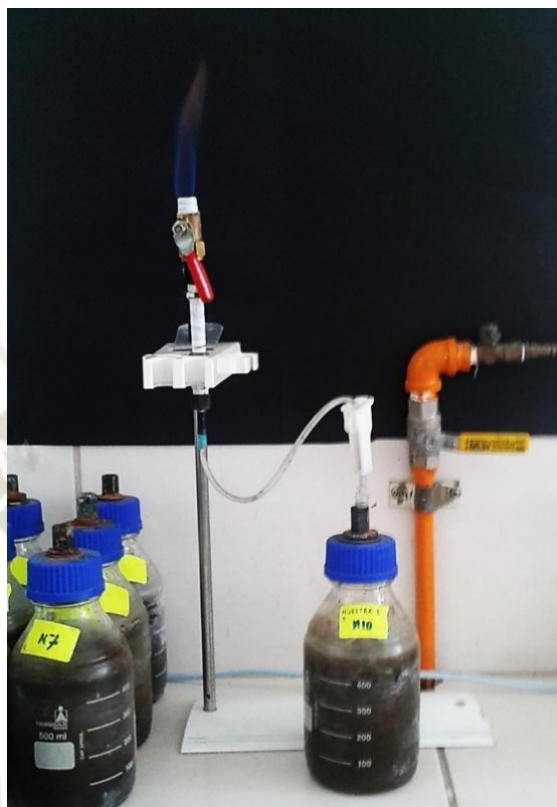


Figura 29. Pruebas de combustión

Anexo 8

Tests de ensayos

Tabla 32. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M1.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad: 100 g
		ST: 10 %MF
		SV: 90.66 %ST
	Lodos de siembra:	Origen: Planta Biogás Majes
		Cantidad: 400 g
		ST: 4.80 %MF
		SV: 99.79 %ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):	I/S: 0.47
	Evaluación del pH final:	7.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fecha	t, días	Volumen del gas producido, V en ml	Temperatura de la fase gaseosa, T en K	Presión del aire, p_a en mbar	Presión adicional, en mbar	Presión del gas, $p(=5+6)$ en mbar	Presión del vapor de agua, p_w en mbar	Volumen del gas normalizado en estado seco, V_N en ml_N	Total	Contenido de CH ₄ del gas seco, en vol. %
24 10 2014	1	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	50	310	765.70	8.71	774.41	62.82	30.93	30.93	52.61
6 11 2014	13	105	310	767.70	18.30	786.00	62.82	66.01	119.19	78.57
		85	310	767.70	14.81	782.51	62.82	53.18		
10 11 2014	17	65	310	766.60	11.33	777.93	62.82	40.41	40.41	46.09
19 11 2014	26	55	310	767.10	9.59	776.69	62.82	34.13	34.13	23.72

Tabla 33. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M2.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad:	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	94.78	%ST
	Lodos de siembra:	Origen:	Planta Biogás Majes	
		Cantidad:	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):	I/S:	0.49	
	evaluación del pH final:		7.9	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fecha	t, días	Volumen del gas producido, V en ml	Temperatura de la fase gaseosa, T en K	Presión del aire, p_a en mbar	Presión adicional, en mbar	Presión del gas, $p(=5+6)$ en mbar	Presión del vapor de agua, p_{w_m} mbar	Volumen del gas normalizado en estado seco, V_N en ml_N	Total	Contenido de CH_4 del gas seco, en vol. %
24 10 2014	1	0	0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	105	310	765.7	18.3	784.00	62.82	65.83	90.51	21.77
		40	310	765.7	7.0	772.67	62.82	24.68		
6 11 2014	13	105	310	767.7	18.3	786.00	62.82	66.01	82.05	52.85
		26	310	767.7	4.5	772.23	62.82	16.03		
10 11 2014	17	105	310	766.6	18.3	784.90	62.82	65.91	72.05	64.27
		10	310	766.6	1.7	768.34	62.82	6.13		
19 11 2014	26	105	310	767.1	18.3	785.40	62.82	65.96	95.07	73.09
		47	310	767.1	8.2	775.29	62.82	29.11		

Tabla 34. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M3.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	90.66	%ST
	Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	Relación inóculo – sustrato (I/S):		0.47	
	Evaluación del pH final:		8.1	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fecha	t, días	Volumen del gas producido, V en ml	Temperatura de la fase gaseosa, T en K	Presión del aire, p_a en mbar	Presión adicional, en mbar	Presión del gas, $p(=5+6)$ en mbar	Presión del vapor de agua, p_{w_m} en mbar	Volumen del gas normalizado en estado seco, V_N en ml_N	Total	Contenido de CH_4 del gas seco, en vol. %
24 10 2014	1	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	3	57	310	765.70	9.93	775.63	62.82	35.32	35.32	52.18
6 11 2014	13	105	310	767.70	18.30	786.00	62.82	66.01	87.65	78.41
		35	310	767.70	6.10	773.80	62.82	21.63		
10 11 2014	17	50	310	766.60	8.71	775.31	62.82	30.97	30.97	62.74
19 11 2014	26	55	310	767.10	9.59	776.69	62.82	34.13	34.13	26.15

Tabla 35. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M4.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	94.78	%ST
	Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):		0.49	
	evaluación del pH final:		7.8	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fecha	t, días	Volumen del gas producido, V en ml	Temperatura de la fase gaseosa, T en K	Presión del aire, p_a en mbar	Presión adicional, en mbar	Presión del gas, $p(=5+6)$ en mbar	Presión del vapor de agua, $p_{w_{m}}$ mbar	Volumen del gas normalizado en estado seco, V_N en ml_N	Total	Contenido de CH_4 del gas seco, en vol. %
24 10 2014	1	0	0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	105	310	765.7	18.3	784.00	62.823	65.83	86.16	29.73
		33	310	765.7	5.8	771.45	62.823	20.33		
6 11 2014	13	105	310	767.7	18.3	786.00	62.823	66.01	88.89	62.67
		37	310	767.7	6.4	774.15	62.823	22.88		
10 11 2014	17	105	310	766.6	18.3	784.90	62.823	65.91	89.38	67.10
		38	310	766.6	6.6	773.22	62.823	23.47		
19 11 2014	21	105	310	767.1	18.3	785.40	62.823	65.96	98.83	72.20
		53	310	767.1	9.2	776.34	62.823	32.88		

Tabla 36. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M5.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	0.00	%ST
	Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):		0.00	
	evaluación del pH final:		7.9	

1	2	3	4	5	6.0	7	8	9	10	11
Fecha	t, dias	Volumen del gas producido, V en ml	Temperatura de la fase gaseosa, T en K	Presión del aire, p_a en mbar	Presión adicional, en mbar	Presión del gas, $p(=5+6)$ en mbar	Presión del vapor de agua, $p_{w_{en}}$ mbar	Volumen del gas normalizado en estado seco, V_N en ml_N	Total	Contenido de CH_4 del gas seco, en vol. %
24 10 2014	1	0	0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	38	310	765.7	6.6	772.32	62.823	23.44	23.44	31.88
6 11 2014	13	105	310	767.7	18.3	786.00	62.823	66.01	93.89	74.19
		45	310	767.7	7.8	775.54	62.823	27.88		
10 11 2014	17	50	310	766.6	8.7	775.31	62.823	30.97	30.97	62.39
19 11 2014	26	53	310	767.1	9.2	776.34	62.823	32.88	32.88	21.39

Tabla 37. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M6.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	0.00	%ST
	Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):		0.00	
	evaluación del pH final:		7.7	

1	2	3	4	5	6.0	7	8	9	10	11
Fecha	t, días	Volumen del gas producido, V en ml	Temperatura de la fase gaseosa, T en K	Presión del aire, p_a en mbar	Presión adicional, en mbar	Presión del gas, $p(= 5+6)$ en mbar	Presión del vapor de agua, $p_{v, m}$ mbar	Volumen del gas normalizado en estado seco, V_N en ml_N	Total	Contenido de CH_4 del gas seco, en vol. %
24 10 2014	1	0	0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	70	310	765.7	12.2	777.90	62.823	43.52	43.52	24.73
6 11 2014	13	105	310	767.7	18.3	786.00	62.823	66.01	152.41	68.26
		105	310	767.7	18.3	786.00	62.823	66.01		
		33	310	767.7	5.8	773.45	62.823	20.39		
10 11 2014	17	105	310	766.6	18.3	784.90	62.823	65.91	75.12	61.94
		15	310	766.6	2.6	769.21	62.823	9.21		
19 11 2014	26	105	310	767.1	18.3	785.40	62.823	65.96	65.96	47.63

Tabla 38. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M7.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	92.72	%ST
Lodos de siembra:		Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
relación inóculo – sustrato (I/S):			0.48	
evaluación del pH final:			8.1	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fecha	t, días	Volumen del gas producido, V en ml	Temperatura de la fase gaseosa, T en K	Presión del aire, p_a en mbar	Presión adicional, en mbar	Presión del gas, $p(= 5+6)$ en mbar	Presión del vapor de agua, $p_{v_{H_2O}}$ en mbar	Volumen del gas normalizado en estado seco, V_N en ml_N	Total	Contenido de CH_4 del gas seco, en vol. %
24 10 2014	1	0	0	0.0	0.0	0.00	62.823	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	100	310	765.7	17.4	783.13	62.823	62.62	62.62	36.36
6 11 2014	13	105	310	767.7	18.3	786.00	62.823	66.01	106.48	43.84
		65	310	767.7	11.3	779.03	62.823	40.47		
10 11 2014	17	105	310	766.6	18.3	784.90	62.823	65.91	87.51	71.98
		35	310	766.6	6.1	772.70	62.823	21.60		
19 11 2014	26	105	310	767.1	18.3	785.40	62.823	65.96	81.36	68.57
		25	310	767.1	4.4	771.46	62.823	15.40		

Tabla 39. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M8.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	92.72	%ST
	Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):		0.48	
	evaluación del pH final:		7.9	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fecha	t, días	Volumen del gas producido, V en ml	Temperatura de la fase gaseosa, T en K	Presión del aire, p_a en mbar	Presión adicional, en mbar	Presión del gas, $p(= 5+6)$ en mbar	Presión del vapor de agua, $p_{v_{H_2O}}$ mbar	Volumen del gas normalizado en estado seco, V_N en ml_N	Total	Contenido de CH_4 del gas seco, en vol. %
24 10 2014	1	0	0	0.0	0.0	0.00	62.823	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	52	310	765.7	9.1	774.76	62.823	32.18	32.18	31.70
6 11 2014	13	105	310	767.7	18.3	786.00	62.823	66.01	138.78	75.55
		105	310	767.7	18.3	786.00	62.823	66.01		
		11	310	767.7	1.9	769.62	62.823	6.76		
10 11 2014	17	105	310	766.6	18.3	784.90	62.823	65.91	80.06	68.33
		23	310	766.6	4.0	770.61	62.823	14.15		
19 11 2014	26	100	310	767.1	17.4	784.53	62.823	62.74	62.74	43.40

Tabla 40. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M9.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad:	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	92.72	%ST
	Lodos de siembra:	Origen:	Planta Biogás Majes	
		Cantidad:	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):		0.48	
	evaluación del pH final:		8.1	

1	2	3	4	5	6.0	7	8	9	10	11
Fecha	t, días	Volumen del gas producido, V en ml	Temperatura de la fase gaseosa, T en K	Presión del aire, p , en mbar	Presión adicional, en mbar	Presión del gas, $p(= 5+6)$ en mbar	Presión del vapor de agua, p_{v} en mbar	Volumen del gas normalizado en estado seco, V_N en ml_N	Total	Contenido de CH_4 del gas seco, en vol. %
24 10 2014	1	0	0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	105	310	767.1	18.3	785.40	62.823	65.96	73.94	36.17
		13	310	767.1	2.3	769.37	62.823	7.98		
6 11 2014	13	105	310	767.7	18.3	786.00	62.823	66.01	125.59	58.76
		95	310	767.7	16.6	784.26	62.823	59.58		
10 11 2014	17	105	310	766.6	18.3	784.90	62.823	65.91	88.13	66.99
		36	310	766.6	6.3	772.87	62.823	22.22		
19 11 2014	26	105	310	767.1	18.3	785.40	62.823	65.96	86.95	58.96
		34	310	767.1	5.9	773.03	62.823	20.99		

Tabla 41. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M10.

Batch: Fermentación del sustrato	Cantidad	100	g
	ST:	10	%MF
	SV:	92.72	%ST
Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
	Cantidad	400	g
	ST:	4.80	%MF
	SV:	99.79	%ST
Relación inóculo – sustrato (I/S):		0.48	
Evaluación del pH final:		7.7	

1	2	3	4	5	6.0	7	8	9	10	11
Fecha	t, días	Volumen del gas producido, V en ml	Temperatura de la fase gaseosa, T en K	Presión del aire, p_a en mbar	Presión adicional, en mbar	Presión del gas, $p(= 5+6)$ en mbar	Presión del vapor de agua, $p_{w,m}$ mbar	Volumen del gas normalizado en estado seco, V_N en ml _N	Total	Contenido de CH ₄ del gas seco, en vol. %
24 10 2014	1	0	0	0.0	0.0	0.00	62.823	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	105	310	767.1	18.3	785.40	62.823	65.96	75.79	40.80
		16	310	767.1	2.8	769.89	62.823	9.83		
6 11 2014	13	105	310	767.7	18.3	786.00	62.823	66.01	132.02	58.99
		105	310	767.7	18.3	786.00	62.823	66.01		
10 11 2014	17	105	310	766.6	18.3	784.90	62.823	65.91	90.63	67.08
		40	310	766.6	7.0	773.57	62.823	24.72		
19 11 2014	26	105	310	767.1	18.3	785.40	62.823	65.96	88.82	56.21
		37	310	767.1	6.4	773.55	62.823	22.86		

Tabla 42. Test de fermentación Batch: Recolección de Datos M11.

Batch:	Fermentación del sustrato	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	92.72	%ST
	Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):		0.48	
	evaluación del pH final:		7.9	

1	2	3	4	5	6.0	7	8	9	10	11
Fecha	t, días	Volumen del gas producido, V en ml	Temperatura de la fase gaseosa, T en K	Presión del aire, p_a en mbar	Presión adicional, en mbar	Presión del gas, $p(=5+6)$ en mbar	Presión del vapor de agua, p_w en mbar	Volumen del gas normalizado en estado seco, V_N en ml_N	Total	Contenido de CH_4 del gas seco, en vol. %
24 10 2014	1	0	0	0.0	0.0	0.00	62.823	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	105	310	767.1	18.3	785.40	62.823	65.96	86.33	29.68
		33	310	767.1	5.8	772.85	62.823	20.37		
6 11 2014	13	105	310	767.7	18.3	786.00	62.823	66.01	100.17	58.55
		55	310	767.7	9.6	777.29	62.823	34.16		
10 11 2014	17	105	310	766.6	18.3	784.90	62.823	65.91	84.40	69.39
		30	310	766.6	5.2	771.83	62.823	18.49		
19 11 2014	26	105	310	767.1	18.3	785.40	62.823	65.96	91.94	60.96
		42	310	767.1	7.3	774.42	62.823	25.98		

Tabla 43. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH₄ M1.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad: <u>100</u> g
		ST: <u>10</u> %MF
		SV: <u>90.66</u> %ST
	Lodos de siembra:	Origen: <u>Planta Biogás Majes</u>
		Cantidad: <u>400</u> g
		ST: <u>4.80</u> %MF
		SV: <u>99.79</u> %ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):	I/S: <u>0.47</u>
	Evaluación del pH final:	<u>7.7</u>

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha	t, días	Estado Húmedo				Estado Seco		
		CH4	CO2	O2	H2S	CH4	CO2	O2
24 10 2014	1	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	23.2	12	8.9	0.2	52.61	27.21	20.18
6 11 2014	13	68.2	16	2.6	0.2	78.57	18.43	3.00
10 11 2014	17	36	33	9.1	0.2	46.09	42.25	11.65
19 11 2014	26	5.1	4	12.4	0.2	23.72	18.60	57.67

Tabla 44. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH₄M2.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad: <u>100</u> g
		ST: <u>10</u> %MF
		SV: <u>94.78</u> %ST
	Lodos de siembra:	Origen: <u>Planta Biogás Majes</u>
		Cantidad: <u>400</u> g
		ST: <u>4.80</u> %MF
		SV: <u>99.79</u> %ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):	I/S: <u>0.49</u>
	evaluación del pH final:	<u>7.9</u>

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha	t, días	Estado Húmedo				Estado Seco		
		CH4	CO2	O2	H2S	CH4	CO2	O2
24 10 2014	1	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	16.5	55	4.3	0.2	21.77	72.56	5.67
6 11 2014	13	50	41	3.6	0.2	52.85	43.34	3.81
10 11 2014	17	46.4	19	6.8	0.2	64.27	26.32	9.42
19 11 2014	26	66	20	4.3	0.2	73.09	22.15	4.76

Tabla 45. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH₄ M3.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	90.66	%ST
	Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):		0.47	
	evaluación del pH final:		8.1	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha	t, días	Estado Húmedo				Estado Seco		
		CH4	CO2	O2	H2S	CH4	CO2	O2
24 10 2014	1	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	25.1	15	8	0.2	52.18	31.19	16.63
6 11 2014	13	65	14	3.9	0.2	78.41	16.89	4.70
10 11 2014	17	32.5	8	11.3	0.2	62.74	15.44	21.81
19 11 2014	26	5.1	5	9.4	0.2	26.15	25.64	48.21

Tabla 46. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH₄ M4.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	94.78	%ST
	Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):		0.49	
	evaluación del pH final:		7.8	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha	t, días	Estado Húmedo				Estado Seco		
		CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S	CH ₄	CO ₂	O ₂
24 10 2014	1	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	20.1	43	4.5	0.2	29.73	63.61	6.66
6 11 2014	13	54.4	29	3.4	0.2	62.67	33.41	3.92
10 11 2014	17	62.2	28	2.5	0.2	67.10	30.20	2.70
19 11 2014	26	67	23	2.8	0.2	72.20	24.78	3.02

Tabla 47. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH₄M5.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad <u>100</u> g
		ST: <u>10</u> %MF
		SV: <u>89.81</u> %ST
	Lodos de siembra:	Origen <u>Planta Biogás Majes</u>
		Cantidad <u>400</u> g
		ST: <u>4.80</u> %MF
		SV: <u>99.79</u> %ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):	<u>0.47</u>
	evaluación del pH final:	<u>7.9</u>

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha	t, días	Estado Húmedo				Estado Seco		
		CH4	CO2	O2	H2S	CH4	CO2	O2
24 10 2014	1	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	11	11	12.5	0.2	31.88	31.88	36.23
6 11 2014	13	59.8	18	2.8	0.2	74.19	22.33	3.47
10 11 2014	17	34	11	9.5	0.2	62.39	20.18	17.43
19 11 2014	26	4	4	10.7	0.2	21.39	21.39	57.22

Tabla 48. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH₄M6.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	95.63	%ST
	Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):		0.50	
	evaluación del pH final:		7.7	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha	t, días	Estado Húmedo				Estado Seco		
		CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S	CH ₄	CO ₂	O ₂
24 10 2014	1	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	15.9	41	7.4	0.2	24.73	63.76	11.51
6 11 2014	13	59.8	23	4.8	0.2	68.26	26.26	5.48
10 11 2014	17	55	29	4.8	0.2	61.94	32.66	5.41
19 11 2014	26	18.1	15	4.9	0.2	47.63	39.47	12.89

Tabla 49. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH₄ M7.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	92.72	%ST
	Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):		0.48	
	evaluación del pH final:		8.1	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha	t, días	Estado Húmedo				Estado Seco		
		CH4	CO2	O2	H2S	CH4	CO2	O2
24 10 2014	1	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	17.6	21	9.8	0.2	36.36	43.39	20.25
6 11 2014	13	60.1	27	50	0.2	43.84	19.69	36.47
10 11 2014	17	65	22	3.3	0.2	71.98	24.36	3.65
19 11 2014	26	63.7	26	3.2	0.2	68.57	27.99	3.44

Tabla 50. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH₄ M8.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad <u>100</u> g
		ST: <u>10</u> %MF
		SV: <u>92.72</u> %ST
	Lodos de siembra:	Origen <u>Planta Biogás Majes</u>
		Cantidad <u>400</u> g
		ST: <u>4.80</u> %MF
		SV: <u>99.79</u> %ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):	<u>0.48</u>
	evaluación del pH final:	<u>7.9</u>

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha	t, días	Estado Húmedo				Estado Seco		
		CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S	CH ₄	CO ₂	O ₂
24 10 2014	1	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	14.2	16	14.6	0.2	31.70	35.71	32.59
6 11 2014	13	64.9	17	4	0.2	75.55	19.79	4.66
10 11 2014	17	61.5	24	4.5	0.2	68.33	26.67	5.00
19 11 2014	26	10.2	8	5.3	0.2	43.40	34.04	22.55

Tabla 51. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH₄ M9.

Batch: Fermentación del sustrato:

Cantidad 100 g
 ST: 10 %MF
 SV: 92.72 %ST

Lodos de siembra:

Origen Planta Biogás Majes
 Cantidad 400 g
 ST: 4.80 %MF
 SV: 99.79 %ST

relación inóculo – sustrato (I/S):
 evaluación del pH final:

0.48
8.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha	t, días	Estado Húmedo				Estado Seco		
		CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S	CH ₄	CO ₂	O ₂
24 10 2014	1	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	22.1	33	6	0.2	36.17	54.01	9.82
6 11 2014	13	51	32	3.8	0.2	58.76	36.87	4.38
10 11 2014	17	61.3	26	4.2	0.2	66.99	28.42	4.59
19 11 2014	26	20.4	12	2.2	0.18	58.96	34.68	6.36

Tabla 52. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH₄ M10.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad <u>100</u> g
		ST: <u>10</u> %MF
		SV: <u>92.72</u> %ST
	Lodos de siembra:	Origen <u>Planta Biogás Majes</u>
		Cantidad <u>400</u> g
		ST: <u>4.80</u> %MF
		SV: <u>99.79</u> %ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):	<u>0.48</u>
	evaluación del pH final:	<u>7.7</u>

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha	t, días	Estado Húmedo				Estado Seco		
		CH4	CO2	O2	H2S	CH4	CO2	O2
24 10 2014	1	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	25.5	32	5	0.2	40.80	51.20	8.00
6 11 2014	13	51.2	32	3.6	0.2	58.99	36.87	4.15
10 11 2014	17	60.1	26	3.5	0.2	67.08	29.02	3.91
19 11 2014	26	19.9	13	2.5	0.2	56.21	36.72	7.06

Tabla 53. Test de fermentación Batch: Recolección de datos %CH₄ M11.

Batch:	Fermentación del sustrato:	Cantidad	100	g
		ST:	10	%MF
		SV:	92.72	%ST
	Lodos de siembra:	Origen	Planta Biogás Majes	
		Cantidad	400	g
		ST:	4.80	%MF
		SV:	99.79	%ST
	relación inóculo – sustrato (I/S):		0.48	
	evaluación del pH final:		7.9	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha	t, días	Estado Húmedo				Estado Seco		
		CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S	CH ₄	CO ₂	O ₂
24 10 2014	1	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30 10 2014	6	18.4	35	8.6	0.2	29.68	56.45	13.87
6 11 2014	13	51	32	4.1	0.2	58.55	36.74	4.71
10 11 2014	17	58.7	21	4.9	0.2	69.39	24.82	5.79
19 11 2014	26	22.8	12	2.6	0.2	60.96	32.09	6.95

Anexo 9

Tablas de estadísticas

Tabla 54. Análisis de varianza para el modelo completo de volumen de biogás correspondiente a la optimización de producción en dos etapas.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:%BP (ST)	50.3822	1	50.3822	27.22	0.0348
B:%ER	1.99873	1	1.99873	1.08	0.4078
AA	34.4697	1	34.4697	18.63	0.0497
AB	0.133225	1	0.133225	0.07	0.8136
BB	79.0154	1	79.0154	42.69	0.0226
Falta de ajuste	24.8938	3	8.29792	4.48	0.1877
Error puro	3.7014	2	1.8507		
Total (corr.)	171.735	10			

R-cuadrada = 83.3493 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 66.6985 por ciento

Error estándar del est. = 1.3604

Error absoluto medio = 1.40271

Estadístico Durbin-Watson = 1.08443 (P=0.0557)

Tabla 55. Diagnóstico de disponibilidad de Broza de Páprika (BP)

Terreno, has.	0.16		1		152	
Producción	min.	max.	min.	max.	min.	máx.
Plantas, Uni.	131.00	139.00	818.75	868.75	124450.00	132050.00
Frutos, Uni.	1444.00	1843.00	9025.00	11518.75	1371800.00	1750850.00
Cosecha, Kg.	7.87	10.05	49.19	62.81	7476.50	9547.50
Broza x Planta, Kg.	0.20	0.40	1.25	2.50	190.00	380.00
Broza, Kg.	26.20	55.60	163.75	347.50	24890.00	52820.00
Broza, Ton.	0.03	0.06	0.16	0.35	24.89	52.82

Anexo 10

Tablas de potenciales

Tabla 56. Diagnóstico promedio de disponibilidad de Broza de Páprika

Terreno, has.	0.16	1.00	152
Plantas, Uni.	135.00	843.75	128250.00
Frutos, Uni.	1643.50	10271.88	1561325.00
Cosecha, kg.	8.96	56.00	8512.00
Broza x Planta, Kg.	0.30	1.88	285.00
Broza, Kg.	40.90	255.63	38855.00
Broza, Ton	0.04	0.26	38.86
Broza, Ton*día-1	38.86 días		

Tabla 57. Diagnóstico de disponibilidad de Estiércol Bovino (Estado húmedo)

Item	Cantidad
Total de Vacas, Uni.	4900
Vacas en producción, Uni.	2200
Producción leche, L.	79000
Generación de estiércol por cabeza de Vacuno, Kg*día.	30
Generación de estiércol por cabezas de vacunos en producción, Kg*día.	66000
Generación de estiércol por cabezas de vacunos en producción, Ton*día ⁻¹	66

Tabla 58. Diagnóstico de lodo de siembra seleccionado.

Item	Código	Cantidad	Uni.
Biodigestor	BDG	30	m ³
Volumen de Flujo registrado	V	5	m ³ *día-1
Sustrato	S	2	ton
Periodo de alimentación	t	2	días
Contenido de metano	CH ₄	63.8	% Vol.
Contenido de Dióxido de carbono	CO ₂	32	% Vol.
Contenido de Oxígeno	O ₂	0	% Vol.
Contenido de Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0.2	% Vol.
Presión Interna	P	30	hPas
Presión Externa	P _{atm}	851.06	hPas
Presión de Vapor de agua	P _w	62.823	hPas
Temperatura Interna Centígrados	T	37	°C
Temperatura Interna Kelvin	T	310.15	K

Tabla 59. Diagnóstico de la Calidad de biogás generado por el BDG en estado seco y normalizado.

Item	Código	Cantidad	Uni.
Volumen de Flujo registrado seco*	V ₀ ^{Tr}	3.55	Nm ³
Contenido de metano	CH ₄	66.60	% Vol.
Contenido de Dióxido de carbono	CO ₂	33.40	% Vol.
Contenido de Oxígeno	O ₂	0.00	% Vol.
Contenido de sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	0.20	% Vol.
*Presión Normal	P ₀	1013	hPas
*Temperatura Normal	T ₀	273	K

Tabla 60. Rendimiento del sustrato en los ensayos a escala laboratorio

Concepto	Contenido Total	Volumen de Lodo	Volumen de Sustrato	Porcentaje de Contenido Sólido, %.		Porcentaje de contenido Líquido, %.		Volumen de Biogás Normalizado		Porcentaje de metano en estado seco
				Broza de paprika (BP)	Estiercol Bovino (EB)	Efluente Recirculante (ER)	Agua (H2O)	Ncm3/día	Ncm3/h	CH4, %Vol
Resultados de optimizacion, g.	500	400	100	5.6	4.4	85.4	4.6	116.8900	4.8704	75.60
Rendimiento, g.	5	4	1	0.056	0.044	0.854	0.046	1.1689	0.0487	75.60
Referencia cuantitativa, g.	5000	4000	1000	56	44	854	46	1168.9000	48.7042	75.60

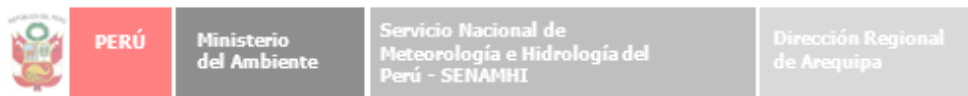
Tabla 61. Resultados de caracterización de biogás escalado a 5 litros.

Item	Código	R1	R2	R3	Promedio	Uni.
Volumen de flujo registrado	Vol.	1700	1830	1670.00	1733.33	cm ³
Contenido de metano	CH ₄	64.1	65.1	64.80	64.67	% Vol.
Contenido de Dióxido de carbono	CO ₂	18	17	17.00	17.33	% Vol.
Contenido de Oxígeno	O ₂	3	4	3.00	3.33	% Vol.
Contenido de Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0.2	0.2	0.20	0.20	% Vol.

Tabla 62. Parámetros de Normalización

*Presión Normal	P ₀	1013 hPas
*Temperatura Normal	T ₀	273 K
Preción Interna	P	30 hPas
Presión Externa	P _{atm}	851.06 hPas
Presión de Vapor de agua	P _w	62.82 hPas
Temperatura Interna Centígrados	T	37 °C
Temperatura Interna Kelvin	T	310.15 K

Tabla 63. Presión atmosférica durante mediciones.



2007-2016 "Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú"
"Año de la Diversificación Productiva y del Fortalecimiento de la Educación"

INFORMACION PREPARADA PARA:

OSCAR MEDINA CARPIO

(Referencia: Carta oficio|N° 001-2015-CICA)

ESTACION: MAP LA PAMPILLA

LAT: 16°24'18.22" LONG: 71°31'24" ALT: 2385 ~~msnm~~

FECHA	P. ATMOSFERICA	TEMP MEDIA	FECHA	P. ATMOSFERICA	TEMP MEDIA	FECHA	P. ATMOSFERICA	TEMP MEDIA
01/07/2014	766.9	15.3	25/07/2014	766.2	15.0	19/11/2014	767.1	17.5
04/07/2014	769.3	14.5	31/07/2014	768.5	15.9	05/01/2015	765.9	17.7
07/07/2014	768.2	15.1	24/10/2014	S/D	19.1	08/01/2015	764.7	17.3
11/07/2014	766.8	15.7	30/10/2014	765.7	18.3	12/01/2015	766.5	18.1
16/07/2014	768.9	14.4	06/11/2014	767.7	15.5	16/01/2015	768.4	18.7
19/07/2014	767.4	14.9	10/11/2014	766.6	18.6	19/01/2015	767.7	14.7

Arequipa, 09 de marzo del 2015

.....
Msc. Blgo. Guillermo Gutierrez Paco
Director Regional
SENAMHI- Arequipa



Calle Federico Torneo C-26 Urb. Atlas Urbanizado -
Arequipa (054) 238118
Email: dr05-arequipa@senamhi.gob.pe

Tabla 64. Cuadro diferencias entre el gas natural y el GLP.

Propiedad	Gas Natural	GLP	Unidades		
Composición	90% Metano	60% propano, 40% Butano	-		
Formula Química	CH ₄	C ₄ H ₁₀ , C ₃ H ₈	-		
Gravedad específica	0.60	2.05, 1.56	-		
Poder Calorífico	9200.00	22244.00	Kcal/m ³		
		6595.00	Kcal/lt		
		11739.00	Kcal/Kilo		
		38518928.00	93132068.96	KJ/m ³	
Presión de suministro	21.00	50.00	mbar		
Estado Físico	Gaseoso sin límite de compresión líquido a -160°C y a presión atmosférica	Líquido a 20°C con presión manométrica de 2.5 bar	-		
Color/olor	Incoloro/inodoro	Incoloro/inodoro	-		
			Kcal*m ³ =	4186.84	J/m ³
			Kcal*m ³ =	4.19	KJ/m ³

Tabla 65. Costeo Construcción de planta de Biodigestión de alta eficiencia.

Item	Concepto	Unidades	Cantidad	Precios	Importe	Parcial
	Construcción cámara hidrolítica 3m3	Servicio	1.00	3,100.00	3,100.00	
	Cámara de almacenaje 100L	Unidad	3.00	400.00	1,200.00	
	Construcción cámara metalogénica	Servicio	1.00	6,000.00	6,000.00	22,800.00
	Construcción sistema de recirculación	Servicio	1.00	2,500.00	2,500.00	
	Construcción sistema de control y seguridad	Servicio	1.00	10,000.00	10,000.00	
Implementos	Agitador de influente para cámara de almacenaje	Unidad	1.00	220.00	220.00	
	Filtro biogás	Unidad	2.00	1,500.00	3,000.00	6,720.00
	Quemador biogás	Unidad	1.00	2,000.00	2,000.00	
	Flujómetro	Unidad	3.00	500.00	1,500.00	
Accesorios	Válvulas PVC	Válvula	10.00	50.00	500.00	
	Tubería de 1/2"	m	30.00	180.00	5,400.00	6,760.00
	Tuberías PVC	m	80.00	10.00	800.00	
	Tuberías de conexión	m	12.00	5.00	60.00	
Construcción	Construcción y operación de prototipo de planta	Servicio	1.00	10,000.00	10,000.00	
	Supervisión de construcción de plantas agroindustriales	Consultoría	1.00	3,000.00	3,000.00	23,000.00
	Diseño, construcción planta	Incentivo	1.00	10,000.00	10,000.00	
Materiales	Agregados	m3	20.00	60.00	1,200.00	
	Cemento	Bolsa	90.00	25.00	2,250.00	
	Madera	pie2	100.00	5.00	500.00	13,600.00
	Plancha Tecnolblock	plancha	10.00	65.00	650.00	
	Fierro de construcción	kg	1800.00	5.00	9,000.00	
Insumos	Rastrojo	TM	10.42	100.00	1,042.09	1,860.88
	Estiércol	TM	8.19	100.00	818.79	
Total:						74,740.88

Tabla 66. Flujo de Caja Instalación Planta HPTC-RM

Flujo de Capital / Mes	0	1	2	3	4	5
Inversión	S/. 114,500.00	S/. 114,500.00	S/. 35,088.29	S/. 36,126.76	S/. 36,962.14	S/. 37,797.52
Ingresos Operativos						
Efluente liquido	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 3,819.40	S/. 3,819.40	S/. 3,819.40	S/. 3,819.40
Producción Biogás	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 242.42	S/. 242.42	S/. 242.42	S/. 242.42
Total:	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 4,061.81	S/. 4,061.81	S/. 4,061.81	S/. 4,061.81
Egresos Operativos						
Construcción de planta de Biodigestión de alta eficiencia	S/. 0.00	S/. 74,740.88	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 0.00
Lodo de siembra	S/. 0.00	S/. 2,000.00	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 0.00
Mantenimiento	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 150.00	S/. 150.00	S/. 150.00	S/. 150.00
Personal operativo	S/. 0.00	S/. 1,500.00	S/. 1,500.00	S/. 1,500.00	S/. 1,500.00	S/. 1,500.00
Personal Administrativo	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 203.09	S/. 406.18	S/. 406.18	S/. 406.18
Terreno	S/. 0.00	S/. 163.60	S/. 163.60	S/. 163.60	S/. 163.60	S/. 163.60
Gas Propano	S/. 0.00	S/. 769.29	S/. 526.28	S/. 526.28	S/. 526.28	S/. 526.28
Gas metano	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 242.42	S/. 242.42	S/. 242.42	S/. 242.42
Agua	S/. 0.00	11.69	11.69	11.69	11.69	11.69
Luz	S/. 0.00	226.26	226.26	226.26	226.26	226.26
Total:	S/. 0.00	S/. 79,411.71	S/. 3,023.34	S/. 3,226.43	S/. 3,226.43	S/. 3,226.43

Flujo de caja económico	114,500.00	35,088.29	36,126.76	36,962.14	37,797.52	38,632.90
--------------------------------	------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Flujo de caja proyectado	Inversión	1	2	3	4	5
---------------------------------	------------------	----------	----------	----------	----------	----------

Saldo inicial	S/. 114,500.00	S/. 114,500.00	S/. 35,088.29	S/. 36,126.76	S/. 36,962.14	S/. 37,797.52
---------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Ingresos a caja	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 4,061.81	S/. 4,061.81	S/. 4,061.81	S/. 4,061.81
-----------------	----------	----------	--------------	--------------	--------------	--------------

Egresos de caja	S/. 0.00	-S/. 79,411.71	-S/. 3,023.34	-S/. 3,226.43	-S/. 3,226.43	-S/. 3,226.43
-----------------	----------	----------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Saldo final	-S/. 114,500.00	S/. 35,088.29	S/. 36,126.76	S/. 36,962.14	S/. 37,797.52	S/. 38,632.90
-------------	-----------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Descuento	-S/. 114,500.00	37895.34913	42138.24997	46561.64905	51423.10717	56764.40404
-----------	-----------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Acumulado	-S/. 114,500.00	-76,604.65	-34,466.40	12,095.25	63,518.36	120,282.76
-----------	-----------------	------------	------------	-----------	-----------	------------

Indicadores Económicos

Tasa de interés	0.08
-----------------	------

VAN	S/. 6,086.07
-----	--------------

TIR	10%
-----	-----

PRI	2.74
-----	------