

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Potencial metanogénico de residuos lignocelulósicos específicos disponibles en las
fincas agrícolas costarricenses para cogeneración”**

Diana Elena Flores Hidalgo

CARTAGO, Agosto, 2014

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental

“Potencial metanogénico de residuos lignocelulósicos específicos disponibles en las fincas agrícolas costarricenses para cogeneración”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero ambiental con el grado de Licenciatura

Miembros del Tribunal

MSc. Alma Deloya Martínez
Director

MSc. Teresa Salazar Rojas
Lector 1

Ing. Liliana Gaviria Montoya
Lector 2

Dr. Luis G. Romero Esquivel
Director COTRAFIG

Dra. Floria Roa Gutiérrez
Directora Escuela de Química

M.Sc. Ana Lorena Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

A la memoria de mi abuelo Jorge y para Tita.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios, por permitirme concluir mis estudios universitarios, por cada uno de los retos que puso en mi camino y la armadura de hierro con la que vistió para superarlos.

A mi mamá por su confianza en mi esfuerzo y apoyo, espero enorgullecerla; a mi abuela, Tita, por su paciencia, por estar a mi lado siempre y vivir la carrera conmigo, ahora cruzamos la meta juntas.

A la profesora Alma Deloya, por ayudarme a forjar mi paciencia y prepararme para la vida real; la profesora Teresa Salazar Rojas, por su valiosísimo ejemplo como persona y académico; los profesores Cristián Paéz y Liliana Gaviria quienes me extendieron tan generosamente su tiempo y conocimiento.

A mis amigos, familiares y a Jesús por sus palabras de aliento incondicionales, especialmente los asistentes de laboratorio Freddy y Marco quienes presenciaron muy de cerca los altos y bajos del proyecto y no dudaron en brindarme su ayuda.

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	12
Abstract	13
1 Introducción	14
1.1 <i>OBJETIVOS</i>	15
1.1.1 Objetivo general	15
1.1.2 Objetivos específicos	15
2 Revisión de literatura	16
2.1 <i>BIOMASA</i>	16
2.1.1 Lignocelulosa	16
2.1.2 Naturaleza recalcitrante y degradación enzimática de la biomasa	17
2.1.3 Composición lignocelulósica de la biomasa seleccionada	18
2.2 <i>BIOGÁS</i>	19
2.2.1 Cogeneración	20
2.3 <i>CONVERSIÓN DE BIOMASA A BIOGÁS</i>	22
2.3.1 Digestión anaerobia	22
2.3.2. Parámetros operacionales de digestores anaerobios	24
2.4 <i>OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS</i>	27
2.4.1. Tratamiento a la lignocelulosa.....	27
2.5 <i>ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE METANO DE UN SUSTRATO</i>	31
2.5.1. Actividad Metanogénica Específica (AME).....	31
2.5.2. Potencial Bioquímico de Metano (PBM)	32
3 Materiales y métodos.....	35
3.1 <i>DISEÑOS DE EXPERIMENTOS</i>	35
3.1.1 Especificaciones para las series experimentales.....	39
3.2 <i>MEDICIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES</i>	40
3.3 <i>MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO</i>	40
3.4 <i>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</i>	41
4 Resultados y discusión.....	42
4.1 <i>ANÁLISIS DE ALCALINIDAD Y PH</i>	42

4.1.1	Serie experimental 1	42
4.1.2	Serie experimental 2 y Serie experimental 3	45
4.1.3	Serie experimental 4	50
4.2	<i>ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE METANO POR VOLUMEN</i>	
	<i>ACUMULADO</i>	52
4.2.1	Residuos lignocelulósicos individuales	52
4.2.2	Co-digestión de sustratos lignocelulósicos	54
4.2.3	Efecto del tratamiento biológico	57
4.3	<i>ANÁLISIS DE AME Y PBM</i>	61
4.3.1	Remoción de sólidos volátiles	61
4.3.2	Actividad Metanogénica Específica	62
4.3.3	Potencial Bioquímico de Metano	65
4.4	<i>SUSTRATOS PARA COGENERACIÓN ELÉCTRICA</i>	74
5	Conclusiones y recomendaciones	80
5.1	<i>CONCLUSIONES</i>	80
5.2	<i>RECOMENDACIONES</i>	82
6	Referencias	83
	Apéndices	91
	Apéndice 1: Cuadros de pH, alcalinidad y composición de la alcalinidad de las series experimentales	92
	Apéndice 2: Cuadros de desplazamiento de naoh para determinar la producción de metano	94
	Apéndice 3: Resultados de ANOVA de un factor y prueba de Tukey para la media de producción diaria de metano de los sustratos	113
	Anexos	129
	Anexo 1: Tecnologías de limpieza y mejoramiento de biogás	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Influencia de la temperatura en la tasa de crecimiento de los microorganismos metanogénicos	25
Figura 2.2. a) Rastrojo de maiz sin tratamiento alcalino. b) Rastrojo de maiz con tratamiento alcalino de 4% NaOH y 2% Ca(OH) ₂ en base seca. Tamaño de partícula de 0,25-10 mm. Fuente: Xiao et al., 2013	29
Figura 3.1. Sustratos lignocelulósicos de estudio a) Pasto elefante b) Hojas de piña c) Vástago de banano d) Hojas de malanga.....	35
Figura 3.2. Montaje de reactores anaerobios de la Serie 1	37
Figura 3.3. Digestor y trampa de NaOH para medición de metano por desplazamiento volumétrico.....	38
Figura 3.4. Reactores anaerobios de la Serie 2 y Serie 3.....	39
Figura 4.1. pH de reactores anaerobios según sustrato para un TRH de 25 días	42
Figura 4.2. Color de las muestras de los reactores anaerobios para el día 25 de la Serie 1 y Serie 2	43
Figura 4.3. Alcalinidad según sustrato en un TRH de 25 días	44
Figura 4.4. Composición de la alcalinidad de los sustratos al finalizar el TRH.....	46
Figura 4.5. Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L) según sustrato y día de muestreo de la Serie 4.....	51
Figura 4.6. Volumen acumulado de metano según sustrato individual al 8% de contenido de sólidos.....	52
Figura 4.7. Volumen acumulado de metano según sustrato individual al 6% de contenido de sólidos.....	53
Figura 4.8. Volumen acumulado de metano según combinación de sustratos al 8% de contenido de sólidos	55
Figura 4.9. Volumen acumulado de metano según combinación de sustratos al 6% de contenido de sólidos	55
Figura 4.10. Efecto del acelerador y contenido de sólido en la producción acumulada de metano para Pe.....	58
Figura 4.11. Efecto del acelerador en la producción acumulada de metano de Hm-Hp-Vb	58

Figura 4.12. Co-digestión de sustratos con acelerador y sin acelerador a diferentes razones de sólido.....	59
Figura 4.13. Producción de metano de la co-digestión de las mezclas A, B, C y D	60
Figura 4.14. Actividad metanogénica (gDQO/gSV.d) de sustrato según contenido de sólidos.....	64
Figura 4.15. Producción diaria de metano (mL) de sustratos seleccionados según AME ...	64
Figura 4.16. Potencial Bioquímico de Metano de sustratos determinados.....	72
Figura 4.17. Producción diaria de metano de Hp 6% y Pe-Vb 6%.	73
Figura 4.18. Curvas de producción de metano para mejor (Hp 6%) y peor (Pe-Vb 6%) resultado de PBM	74
Figura 4.19. Producción diaria de metano (mL) de sustratos seleccionados según volumen acumulado.....	75
Figura 4.20. Generación diaria de metano (mL) de sustratos seleccionados según PBM....	75

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1. Características fundamentales de la celulosa, hemicelulosa y lignina.....	16
Cuadro 2.2. Efectos de la composición química y estructura física de la biomasa en su degradación enzimática	17
Cuadro 2.3. Composición lignocelulósica de biomasa variada	18
Cuadro 2.4. Composición promedio del biogás	19
Cuadro 2.5. Máxima generación de metano según sustrato biomásico.....	20
Cuadro 2.6. Degradación de ácidos grasos volátiles	23
Cuadro 2.7. Reacciones de la metanogénesis	23
Cuadro 2.8. Límites de concentración de los principales nutrientes para microorganismos de digestión anaerobia	24
Cuadro 2.9. Concentraciones de AGV inhibitoras del 50% de la actividad metanogénica..	26
Cuadro 2.10. Metodología del tratamiento alcalino para sustratos lignocelulósicos	30
Cuadro 3.1. Composición del sustrato para cada serie de experimentos.....	36
Cuadro 3.2. Condiciones operacionales de las series de experimentos.....	37
Cuadro 3.3. Especificaciones para la digestión anaerobia.....	39
Cuadro 3.4. Composición microbiológica del tratamiento BioAguas.....	40

Cuadro 4.1. Producción de metano de la Serie experimental 1	44
Cuadro 4.2. pH según sustrato al fin del TRH	47
Cuadro 4.3. Índice Ai/Ap según sustrato y contenido de sólidos para las Series 2 y 3.....	49
Cuadro 4.4. Índice Ai/Ap con HCO ₃ ⁻ y CO ₃ ²⁻ como Ap según sustrato y contenido de sólidos para las Series 2 y 3.....	50
Cuadro 4.5. pH según sustrato y día de muestreo de la Serie 4.....	51
Cuadro 4.6. Índice Ai/Ap con HCO ₃ ⁻ y CO ₃ ²⁻ como Ap según sustrato y día de muestreo para la Serie 4	51
Cuadro 4.7. Relación de celulosa:hemicelulosa: lignina según sustrato	53
Cuadro 4.8. Relación de celulosa:hemicelulosa: lignina según co-digestión de sustrato.....	56
Cuadro 4.9. Promedio del contenido de sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV) en los sustratos lignocelulósicos en estudio	61
Cuadro 4.10. Promedio del contenido de sólidos totales (ST) y sólidos totales volátiles (SV) en los sustratos lignocelulósicos digeridos de la Serie 4	62
Cuadro 4.11. Remoción de sólidos volátiles totales para la Serie 4.....	62
Cuadro 4.12. AME según sustrato lignocelulósico a CNPT	63
Cuadro 4.13. Comparación de los resultados de AME según sustrato con y sin adición de acelerador a CNPT.....	63
Cuadro 4.14. Máxima producción de metano (Bo) y coeficiente cinético (k) modelados para los sustratos al 8% y su suma de residuos (Sr) con una tolerancia de convergencia de 0,005 y un máximo de 100 iteraciones	65
Cuadro 4.15. Máxima producción de metano (Bo) y coeficiente cinético (k) modelados para los sustratos al 6% y su suma de residuos (Sr) con una tolerancia de convergencia de 0,005 y un máximo de 100 iteraciones	66
Cuadro 4.16. Máxima producción de metano (Bo) y coeficiente cinético (k) modelados para los sustratos de la Serie 4 y su suma de residuos con una tolerancia de convergencia de 0,005 y un máximo de 100 iteraciones	67
Cuadro 4.17. Sustratos cuyos datos experimentales convergieron con el modelo teórico de la ecuación exponencial.....	69
Cuadro 4.18. Mejores sustratos de acuerdo a resultados de producción de metano promedio, PBM y AME.....	76

Cuadro 4.19. Generación eléctrica y térmica por tonelada de materia fresca (mf) según producción de metano promedio y según modelación PBM.....	76
Cuadro 4.20. Generación eléctrica y térmica diaria promedio y optimizada para un digestor de 30 m3 con 6% y 8% de sólidos.....	78
Cuadro 4.21. Número de residencias del sector socioeconómico medio que pueden abastecerse con electricidad producida por biometano	79

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
UIPAC	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
DA	Digestión anaerobia
CNPT	Condiciones normales de presión y temperatura (100 kPa y 0 °C)
Nml, NI	Mililitros y litros expresados a CNPT
TRH	Tiempo de retención hidráulico
AGV	Ácidos grasos volátiles
Ai/Ap	Relación entre alcalinidad por AGV y alcalinidad bicarbonática
ST, SV, STV	Sólidos totales, sólidos volátiles, sólidos totales volátiles
Pe	Pasto elefante
Hm	Hojas de malanga
Hp	Hojas de piña
Vb	Vástago de banano
Mezcla A	60% pasto elefante, 13% hojas de malanga, 13% hojas de piña, 13% vástago de banano
Mezcla B	60% pasto elefante, 13% hojas de malanga, 13% hojas de piña, 13% vástago de banano y acelerador
Mezcla C	50% pasto elefante, 10% hojas de malanga, 10% hojas de piña, 30% vástago de banano
Mezcla D	50% pasto elefante, 10% hojas de malanga, 10% hojas de piña, 30% vástago de banano y acelerador
Ac	Acelerador (tratamiento biológico)
AME	Actividad Metanogénica Específica
PBM	Potencial Bioquímico de Metano
i.c	Iteración de convergencia
Bo	Producción máxima de metano
k	Constante de velocidad de reacción
mf	Materia fresca

RESUMEN

En Costa Rica los residuos agrícolas no cuentan con gestión eficiente que permita aprovechar el recurso biomásico como fuente de energía, por ello se evaluó la generación de metano de la poda de pasto elefante, el vástago del banano y las hojas residuales del cultivo de piña y malanga para cogeneración. El experimento consistió en cuatro series de reactores anaerobios discontinuos con 6% y 8% de sustrato (incluida codigestión), incubados durante 60 días, 50 días, 35 días. Se aplicó tratamiento alcalino (NaOH al 6%) y microorganismos eficientes para acelerar la hidrólisis de la lignocelulosa. La estabilidad del proceso se diagnosticó con el estudio de alcalinidad; y la producción metanogénica se analizó mediante el cálculo de Actividad Metanogénica Específica (AME) y la modelación del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) con el método iterativo Gauss Newton. Los resultados de alcalinidad muestran que la capacidad buffer del sistema se presentó en la relación $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ y no solamente HCO_3^- como resultado de la concentración de NaOH; y no superaron los 500 mg CaCO_3/L para la mayoría de los reactores. Esto indica una producción de ácidos grasos volátiles importantes que corrobora la eficiencia de tratamiento alcalino y biológico. La generación de metano fue continua y sin estancamiento, esto dificultó el ajuste de los datos experimentales al modelo de PBM. El rendimiento promedio por kg de sólido volátil diario (máximo de 0,0024 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kgSV.d}$ con pasto elefante) equivale a 14 m^3 de metano por tonelada de materia fresca y es capaz de generar 36 kWh mensuales. Esto suple la demanda eléctrica diaria de cuatro residencias del sector medio costarricense. Finalmente los resultados de AME, más favorables para cogeneración (hasta 1980 kWh al mes), son fundamento para pronosticar el aumento de la producción metanogénica al implementar condiciones óptimas en los digestores.

Palabras clave: Lignocelulosa, Digestión Anaerobia, Cogeneración, Actividad Metanogénica Específica (AME), Potencial Bioquímico de Metano (BMP), Autosuficiencia energética.

ABSTRACT

In Costa Rica agricultural residues do not have efficient management to exploit them as an energy source, therefore this study evaluates methane yield from elephant grass, banana stem and pineapple and malanga waste leaves for cogeneration. The experiment consisted of four series of batch anaerobic reactors with 6% and 8% of substrate (including co-digestion), incubated for 60 days, 50 days, 35 days. Alkaline treatment (NaOH 6%) and effective microorganisms were used to accelerate the hydrolysis of lignocellulose. The process stability was diagnosed with the study of alkalinity; and the methanogenic yield was analyzed by calculation of Specific Methanogenic Activity (SMA) and modeling Biochemical Methane Potential (BMP) with the Gauss Newton iterative method. The results show that the alkaline buffer capacity of the system is presented in relation $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ and not only as a result of HCO_3^- , this is due to the concentration of NaOH; and did not exceed 500 mg CaCO_3/L for most of the reactors. This indicates a significant production of volatile fatty acids which confirms the efficiency of alkaline and biological treatment. Methane generation was continuous and without stagnation, this made it difficult for the adjustment of the experimental data with the model of BMP. Methane yield per kg of daily volatile solids (max of 0,0024 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kgSV.d}$ with elephant grass) equals to 14 m^3 of methane per ton of fresh matter and approximately 36 kWh per month, this can meet the daily electricity demand of four middle class residences in Costa Rica. Finally AME results, more favorable for cogeneration (up to 1980 kWh), are the basis for forecasting increased methane yield by implementing optimal conditions in the digesters.

Key words: Lignocellulose Anaerobic Digestion, Cogeneration, Specific Methanogenic Activity (SMA), Biochemical Methane Potential (BMP), Electrical self-sufficiency.

1 INTRODUCCIÓN

La inestabilidad energética de los hidrocarburos y la liberación y acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera han reforzado el interés en energías sostenibles producidas a partir de biomasa. La biomasa lignocelulósica incluye madera, residuos agrícolas, residuos de silvicultura, plantas acuáticas, papel, pastos y representa la fuente orgánica más abundante en el mundo natural, por ello es la materia prima con la mayor proyección para generar energía combustible. La agencia internacional de energía (IEA) sugiere que a partir de la biomasa se puede obtener cerca de un tercio de la energía necesaria en África, Asia y Latinoamérica (Somerville, 2007; Zhao, Zhang, & Liu, 2012)

La producción de biogás, realizada a partir de cualquier tipo de biomasa, es la tecnología más eficiente en comparación con el resto de tecnologías de producción de energía a través de rutas biológicas o termo-químicas (Chandra, Takeuchi, Hasegawa, & Kumar, 2012; Khalil, Alwani, & Omar, 2006). Por ello, es ahora viable en algunos países debido a incentivos financieros y a la estabilidad de precios por la compra de la electricidad generada. El ejemplo más impresionante es la construcción y explotación de más de 5000 digestores anaeróbicos subvencionados por el gobierno alemán, durante los últimos 20 años, (De Graaf & Fendler, 2010).

De acuerdo con el Décimo Noveno Informe de la Nación (Bach, 2013), en Costa Rica la producción agrícola ocupa más de medio millón de hectáreas, aproximadamente un 10% del territorio, con predominancia de los cultivos de café, arroz, caña de azúcar, palma aceitera, piña y banano; y a pesar de los recursos millonarios invertidos para el aumento de la productividad, competitividad y sostenibilidad del sector, el avance en la implementación de prácticas y tecnologías sostenibles es lento con la remanencia de iniciativas y prácticas agrícolas sin control y sin participación del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Ministerio de Salud o entes expertos. Muy concretamente, los residuos agrícolas no cuentan con un programa de gestión que permita aprovechar la biomasa como fuente de energía viable para las fincas agrícolas y sus comunidades. Es por ello que utilizarlos en un sistema controlado de biodigestión provee una solución de seguridad ambiental y una oportunidad de lucro para dicho sector socioeconómico, donde a través de la cogeneración se supliría un porcentaje importante sino la totalidad de la demanda eléctrica.

Este trabajo busca facilitar herramientas sobre el potencial de generación de metano a través de digestión anaerobia de residuos lignocelulósicos producidos vastamente en Costa Rica (la poda de pasto elefante, vástago de banano y las hojas residuales del cultivo de piña y malanga) y su viabilidad técnica para cogeneración eléctrica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Determinar el potencial metanogénico de la poda de pasto elefante, el vástago del banano y las hojas residuales de los cultivos de piña y malanga disponibles en las fincas agrícolas costarricenses para cogeneración.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comprobar la generación de metano de la poda de pasto elefante, las hojas de los cultivos de piña, el vástago del banano y las hojas residuales del cultivo de malanga producidos en fincas agrícolas costarricenses.
- Evaluar la estabilidad de la digestión anaerobia de dichos residuos con tratamiento físico, biológico y químico a través del estudio de la alcalinidad que permita comprender los mecanismos inhibitorios en su proceso de degradación.
- Modelar el potencial bioquímico de metano de los residuos lignocelulósicos con el método Gauss Newton para predecir el comportamiento de los digestores anaerobios y optimizar su diseño.
- Determinar la composición de co-digestión de los residuos lignocelulósicos que cumpla como mejor sustrato para cogeneración.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 BIOMASA

La biomasa es un término que se aplica para todo el material orgánico derivado de las plantas, estas convierten la luz solar en biomasa a través de la fotosíntesis. El recurso energético es la energía solar, la cual se almacena en los enlaces químicos; y cuando los enlaces entre el carbono, hidrógeno y oxígeno se rompen (por oxidación, combustión o descomposición) las sustancias liberan la energía química almacenada (Mckendry, 2002; Laurinovica, Jasko, Skripsts, & Dubrovskis, 2013).

2.1.1 Lignocelulosa

La lignocelulosa incluye una combinación variada de polisacáridos agrupados como celulosa, hemicelulosa y lignina, presentes en la pared celular de las plantas y que constituyen alrededor del 80-90% de la biomasa. Extractivos orgánicos y minerales inorgánicos constituyen el resto. La proporción varía según la especie de planta, etapa de crecimiento y tejido específico. (Pasangulapati et al., 2012; En el Cuadro 2.1 1 se describen las características fundamentales de la lignocelulosa.

Cuadro 2.1. Características fundamentales de la celulosa, hemicelulosa y lignina

	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Referencias
Composición Química	Polímero de cientos a miles de unidades de D-glucosa unida por enlaces glucosídicos β -1,4.	Polímero complejo de pentosas (D-xilosa y L-arabinosa), hexosas (D-glucosa, D-manosa, D-galactosa) y ácidos D-glucurónicos unidos por enlaces β -1,4 y β -1,3.	Polímero aromático insoluble en agua y constituido por tres monómeros básicos: p-hidroxifenilos (H), guaicilos (G), y siringilos (S)	J. Pérez, Muñoz-Dorado, de la Rubia, & Martínez, 2002; Sánchez, Gutiérrez, Muñoz, & Rivera, 2010

	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Referencias
Forma estructural	Largas cadenas lineales, denominadas microfibrillas.	Cadenas ramificadas	Amorfo y tridimensional	Zhao et al., 2012;
Función	Dar estructura, sostén, impermeabilidad y protección a la planta			

2.1.2 Naturaleza recalcitrante y degradación enzimática de la biomasa

El término “recalcitrante” se aplica a aquellos compuestos cuya persistencia en el medio ambiente es grande debido a su difícil biodegradación. Dicha persistencia se debe a causas químicas, físicas y celulares. La pared celular de las plantas define la naturaleza recalcitrante de la biomasa; y aun cuando la celulosa está disponible, su misma estructura cristalina dificulta la penetración de microorganismos y enzimas para el consumo de la glucosa (Zhao et al., 2012; Moran-Mirabal, 2013). Los factores físicos y químicos que intervienen en la lisis de la biomasa lignocelulósica se describen en el Cuadro 2.2, donde el efecto es positivo en cuanto facilita el acceso de las enzimas a la materia biodegradable.

Cuadro 2.2. Efectos de la composición química y estructura física de la biomasa en su degradación enzimática

	Factor	Efecto	Descripción
Composición química	Lignina	-	Barrera física que restringe el acceso a la celulosa. Puede absorber irreversiblemente las enzimas hidrolíticas.
	Hemi-celulosa	-	Barrera física menos resistente que la lignina. Removerla incrementa la porosidad del sustrato.
Estructura física	Área superficial accesible	+	Es el factor más importante que limita el acceso de las enzimas a la celulosa. Se puede aumentar alterando la composición química y las estructuras físicas de la biomasa.

Factor	Efecto	Descripción
Estructura física	Área superficial específica +	El área de superficie específica total está ligada estrechamente con el tamaño de partícula, porosidad y volumen de poro. No es igual al área superficial accesible porque no toda superficie es accesible a la enzima.
	Poros y volumen +/-	Solo los poros de más de 5,1 nm pueden acomodar las celulasas para que se comporten como hidrolizantes.

Fuente: Adaptado de Kumar, Barrett, Delwiche, & Stroeve, 2009; Zhao et al., 2012

2.1.3 Composición lignocelulósica de la biomasa seleccionada

La facilidad de degradación de la biomasa queda sujeta a su heterogeneidad y a la proporción de los componentes principales específicos para cada especie. (Sogari, 2003) El contenido típico de las principales composiciones de algunas biomásas se resume el Cuadro 2.3. Para el estudio en cuestión, la biomasa seleccionada fue pasto elefante (*Pennisetum purpureum*), hojas de piña (*Ananas comosus*), hojas de malanga (*Colocasia esculenta*) y vástago de banano (*Musa acuminata*).

Cuadro 2.3. Composición lignocelulósica de biomasa variada

Biomasa	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Referencias
Madera dura	40-55	24-40	18-25	
Madera suave	45-50	25-35	25-35	Cuervo et al., 2009;
Plantas herbáceas	25-50	20-50	10-30	
Paja de trigo	38,2	24,7	23,4	Zhao et al., 2012
Paja de arroz	34,2	24,5	11,9	Zhao et al., 2012
Hojas	15-20	80-85	0	Ferreira, Ortiz, & Pardo, 1990; Cuervo et al., 2009

Biomasa	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Referencias
Hojas de piña	69,5	19,5	4,4	Daud et al., 2013; Banik et al., 2011; Khalil et al., 2006
Vástago de banano	63,9	1,3	18,6	K. Li, Fu, Zhan, Zhan, & A. Lucia, 2010; Khalil et al., 2006; Ho, Aziah, & Bhat, 2012
Pasto elefante	12	68,2	10,7	Daud et al., 2013; Rekha & Pandit, 2013

2.2 BIOGÁS

El biogás es un gas de digestión que surge de la actividad de las bacterias anaerobias metanogénicas que descomponen la materia orgánica. Su composición y propiedades varían en gran medida según el tipo de materia prima, el sistema de digestión y parámetros ambientales (Cuadro 2.4) (Ziemiński & Fraç, 2012).

Cuadro 2.4. Composición promedio del biogás	
Compuesto	Contenido (% vol)
Metano (CH ₄)	50-75
Dióxido de carbono (CO ₂)	25-45
Vapor de agua (H ₂ O)	2 (20°C) -7 (40°C)
Oxígeno (O ₂)	<2
Nitrógeno (N ₂)	<2
Amoníaco (NH ₃)	<1
Hidrógeno (H ₂)	<1
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	<1

Fuente: (Al Seadi et al., 2008)

El porcentaje de metano que producen los sustratos depende de su contenido de proteínas, grasas e hidratos de carbono (Walsh, Ross, Smith, Harper, & Wilkins, 1988) El Cuadro 2.5 muestra el rendimiento de generación de metano para una variedad de residuos agrícolas.

Cuadro 2.5. Máxima generación de metano según sustrato biomásico

Sustrato	Máxima generación de CH ₄ (Bo) (m ³ /kg SV)	Referencia
Residuos de piña	0,133-0,413	
Cáscara de banano	0,181 -0,231	
Cáscara de mango	0,68	Kavitha & Joseph, 2007
Residuo de papa	0,42	
Co-digestión de residuos de frutas y vegetales	0,429-0,568	
Vástago de banano	0,267-0,271	
Residuos de cítricos	0,455-0,732	Gunaseelan, 2004
Residuos de vegetales	0,19 -0,41	
Ensilo de alfalfa	0,24-0,26	
Ensilo de pasto	0,128–0,392	Frigon & Guiot, 2010
Ensilo de maíz	0,270–0,298	
Cáñamo	0,230–0,409	
Residuos de jardín	0,20-0,50	
Paja de arroz	0,241 – 0,365	Al Seadi et al., 2008
Paja de trigo	0,162- 0,249	
Pasto elefante	0,19-0,34	Chandra et al., 2012

2.2.1 Cogeneración

La cogeneración o sistema calor-electricidad (CHP) es un procedimiento en el cual se genera electricidad con liberación simultánea de energía térmica que puede ser aprovechada (Baena & Pueyo, 2006). El biogás genera tanto calor (mediante combustión directa) como electricidad (mediante pilas de combustible o microturbinas); sin embargo, la

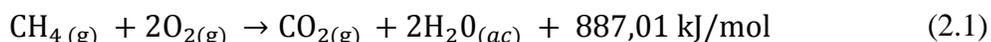
cogeneración con el uso de motores de combustión ofrece la mayor rentabilidad energética y financiera debido a la necesidad propia de calentar los digestores (Al Seadi et al., 2008).

Para máxima eficiencia de la cogeneración y evitar la contaminación por emisiones tóxicas así como daños a tanques de almacenamiento, compresores y motores, el biogás debe ser depurado de agua, polvo, H₂S, CO₂, NH₃ y demás impurezas referidas en el Cuadro 2.4 para obtener biometano. (Galante, Pezzola, Priano, Scaramellini, & Sottocornola, 2012; Strauch, Krassowski, & Singhal, 2013). Las tecnologías utilizadas para refinar el biogás son variadas y específicas para cada contaminante, como se observa en el Anexo 1; y se diferencian entre sí según las características del tratamiento, eficiencia de remoción, energía demandada, costo de implementación y subproductos generados. (Morero, Gropelli, & Campanella, 2009)

2.2.1.1 Conversión energética

El metano puro a condiciones de temperatura y presión estándar tiene un valor calorífico de 39,7 MJ/ Nm³ o 9500 kcal/Nm³. (Jutglar, Miranda, & Villarubia, 2011) El biogás con un contenido de 65% de metano tiene aproximadamente 20 MJ/Nm³ dado que solo la fracción del metano es combustible. (Walsh et al., 1988).

La combustión del metano sucede según la Ecuación 2.1:



Se observa que 1 mol de metano requiere de 2 moles de O₂, para su oxidación completa en dióxido de carbono y agua con un valor de energía liberada de 887,01 kJ/mol (Chernicharo, 2007). Tomando que el volumen molar de metano es 0,0227 m³ a condiciones normales de presión y temperatura (CNPT) de acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (UIPAC), 0 °C y 100 kPa, la energía liberada por mol de metano es de 39074, 38 kJ. Con su equivalencia de kWh, se tiene que 1 m³ de metano equivale a 10,86 kWh.

Un motor de combustión para cogeneración posee una eficiencia de un 90% y su producción eléctrica y térmica depende de la potencia de la unidad, siendo ésta en promedio 35%-40% de generación de electricidad y 50%-65% generación de calor,

considerando que las unidades más pequeñas generalmente producen menos electricidad por m³ de biogás que las unidades más grandes (Al Seadi et al., 2008; Strauch et al., 2013; Gerlach, Grieb, y Zerger, 2013).

2.3 CONVERSIÓN DE BIOMASA A BIOGÁS

2.3.1 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia consiste de un conjunto de complejas conversiones bioquímicas de la materia orgánica biodegradable a biogás, realizada por una población mixta de bacterias en un medio estrictamente anaerobio. (Soto, Méndez & Lema, 1993) Se distinguen cuatro etapas en la digestión anaerobia de acuerdo a los productos generados y sus poblaciones bacterianas características. La velocidad de cada una de las etapas es diferente, por lo tanto la velocidad global de la digestión anaerobia está controlada por la etapa más lenta. (Monge, Certucha, & Almendariz, 2013)

2.3.1.1 Hidrólisis

La hidrólisis se realiza extracelularmente, por medio de exoenzimas hidrolíticas excretados por las bacterias fermentativas que solubilizan la materia orgánica, dado que las bacterias no pueden absorber polímeros orgánicos complejos directamente en sus células (Boe, 2006). Para la biomasa, esta es la etapa limitante de la velocidad en la digestión anaeróbica (Boone, Chynoweth, Mah, Smith, & Wilkie, 1993).

2.3.1.2 Acidogénesis

Las bacterias fermentativas transforman las moléculas orgánicas obtenidas de la hidrólisis en ácidos grasos volátiles (AGV) de cadena corta (ácidos fórmico, acético, propiónico, butírico y cantidades más pequeñas y ácidos valérico e isovalérico). (Chernicharo, 2007; Zhou & Nanqi, 2007)

2.3.1.3 Acetogénesis

Los AGV de 3 a 8 átomos de carbono y el etanol son oxidados a acetato, dióxido de carbono e hidrógeno por las bacterias acetogénicas y microorganismos metanogénicos que

consumen hidrógeno del medio en forma sintrófica como se muestra en el Cuadro 2.6. (Demirel & Scherer, 2008)

Cuadro 2.6. Degradación de ácidos grasos volátiles

Sustrato	Reacción
Propionato	$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$
Butirato	$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$
i-valerato	$CH_3(CHCH_3)CH_2COOH + 2H_2O + CO_2 \rightarrow 3CH_3COOH + H_2$
Lactato	$CH_3CHOHCOO^- + 2H_2O \rightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2$

Fuente: Schinks, citado por Boe, 2006.

2.3.1.4. *Metanogénesis*

Esta fase se diferencia por dos grandes grupos de metanógenos que definen las rutas paralelas para la obtención del metano: metanógenos acetoclásticos cuyo sustrato es el acetato y metanógenos hidrogenotróficos, cuyo sustrato es el hidrógeno y el dióxido de carbono (Ziemiński & Frac, 2012). Las reacciones relacionadas con el consumo de acetato e hidrógeno se muestran en el Cuadro 2.7, donde el acetato es el precursor de hasta un 70% de la formación total de metano (Demirel & Scherer, 2008)

Cuadro 2.7. Reacciones de la metanogénesis

	Reacción	$\Delta G^o \left(\frac{kJ}{mol} \right)$
Oxidación del acetato	$CH_3COOH + 2H_2 \rightarrow 4H_2 + 2CO_2$	+104,0
Metanogénesis hidrogenotrófica	$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-135,0
Homoacetogénesis	$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$	-104,0
Metanogénesis acetoclástica	$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$	-31,0

Fuente: Schinks, citado por Boe, 2006

De acuerdo con la energía libre de Gibbs, a temperaturas normales, el consumo de hidrógeno por metanogénesis hidrogenotrófica es más favorable que la homoacetogenesis, mientras que el consumo de acetato por metanogenesis acetoclástica también es más favorable que la oxidación del acetato. Así también, si las concentraciones de acetato son altas, la metanogénesis acetoclástica es más favorable que la oxidación del acetato. (Schinks, citado por Boe, 2006)

2.3.2. Parámetros operacionales de digestores anaerobios

2.3.2. 1. Macro y micronutrientes

Los macro y micronutrientes son necesarios para la función óptima y crecimiento de los microorganismos, no obstante en cantidades excesivas ralentizan el crecimiento y pueden causar inhibición o toxicidad grave (Cuadro 2.8) (Chen et al., 2008).

Durante la digestión anaeróbica (DA) se utiliza el carbono 25-30 veces más rápido que el nitrógeno, por lo que para cumplir con los requerimientos de las bacterias este debe estar disponible en una relación de 20–30:1 C/N (Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, Kohli, & Rana, 2004). Según Bouallagui, Touhami, Ben Cheikh, & Hamdi, (2005) y Babae & Shayegan (2008) sustratos lignocelulósicos reportan una relación equilibrada de C:N de 100:4.

Cuadro 2.8. Límites de concentración de los principales nutrientes para microorganismos de digestión anaerobia

Nutrientes	Concentración	Concentración	Concentración
	óptima (mg/L)	tolerada (mg/L)	tóxica (mg/L)
Calcio (Ca ²⁺)	100-200	<2500	> 8000
Sodio (Na ⁺)	100-350	<3500	>8000
Potasio (K ⁺)	200-400	<400	>5800
Magnesio (Mg ²⁺)	75-150	<720	>400

Fuente: Adaptado de Chen et al., 2008

2.3.2. 2. Temperatura

La metanogénesis puede darse en el ámbito psicrófilico (10 -20 °C), mesófilico (30-40 °C) y termófilico (45-60 °C), siendo la diferencia entre estos la tasa de crecimiento microbiana directamente proporcional al incremento de la temperatura (Van Lier, 1995). La Figura 2.1 ilustra las diferencias entre los distintos intervalos de temperatura para el desarrollo de la actividad metanogénica.

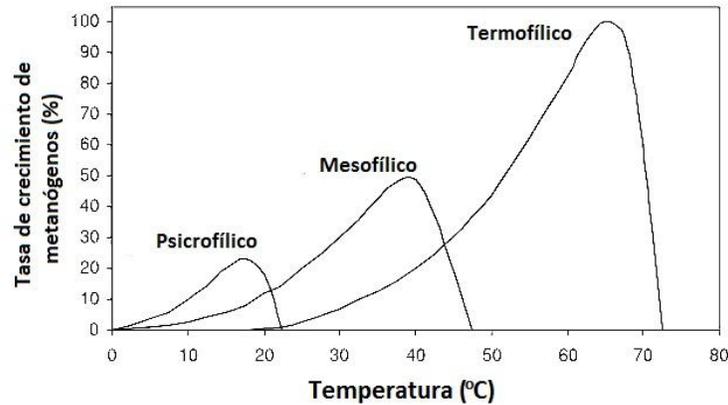


Figura 2.1. Influencia de la temperatura en la tasa de crecimiento de los microorganismos metanogénicos
Fuente: Adaptado de Chernicharo, 2007

Mantener la temperatura constante permite a los diferentes grupos metabólicos alcanzar un equilibrio y consecuentemente no hay acumulación de productos intermedios. Ante cambios repentinos de temperatura, la respuesta de los diversos grupos de bacterias es distinta y el equilibrio se pierde (Leitão, van Haandel, Zeeman, & Lettinga, 2006).

2.3.2. 3. pH

El valor de pH adecuado para la digestión anaerobia está sujeto a la actividad enzimática de las poblaciones bacterianas dentro del reactor. Para las archae metanogénicas, el intervalo de pH que soportan es 5,5-8,5 con un ámbito óptimo entre 6.5-8.0; mientras que las bacterias fermentativas se adaptan a un intervalo más amplio de pH de 4- 8,5 (Hwang et al., 2004; Nielsen, 2006). Otros compuestos que normalmente se encuentran en el digestor también influyen en el equilibrio del pH si están presentes en una concentración elevada (amoníaco, sulfuro de hidrógeno y fosfato de hidrógeno) (Lahav & Morgan, 2004).

2.3.2. 4. Ácidos grasos volátiles

La acumulación de AGV se debe en gran parte a que las bacterias productoras de acetato tienen una tasa de crecimiento ocho veces menor comparada con las bacterias fermentativas (Ziemiński & Frąç, 2012) El efecto tóxico de la acumulación es dependiente de la composición y concentración de los ácidos. Como se observa en el Cuadro 2.9, las

concentraciones de acetato y propionato que inhiben al 50% de las bacterias metanogénicas son ínfimas a pH 5 en comparación con las concentraciones a pH 8 (Oh & Martin, 2010).

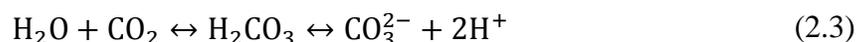
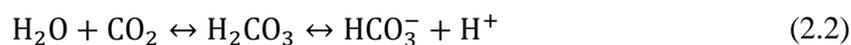
Cuadro 2.9. Concentraciones de AGV inhibidoras del 50% de la actividad metanogénica
Concentración inhibidora de 50% de AME

pH	Acetato (mg DQO/L)	Propionato (mg DQO/L)
5,0	44	13
5,5	100	30
6,0	300	80
6,5	912	241
7,0	2851	745
8,0	28368	7398

Fuente: Zeeman, citado por Oh & Martin, 2010

2.3.2. 5. Alcalinidad

En la digestión anaerobia, el principal equilibrio químico que controla la alcalinidad es el sistema dióxido de carbono-acido carbónico descrito en la Ecuación 2.2 y Ecuación 2.3 (Rojas, 1987)



Funcionalmente la alcalinidad se mide sobre la base de la concentración de HCO_3^- debido al ámbito de pH (6 a 8) en comparación con el CO_3^{2-} (11 a 13) y debe mantenerse por encima de 2500 mg CaCO_3/L para asegurar la estabilidad del digestor (Torres, Cajigas, Pérez, González, & Otero, 2008). Field (1987) reportan valores no menores a 1500 mg CaCO_3/L como eficientes para neutralizar el exceso de iones de hidrógeno libres y evitar la saturación de las bacterias metanogénicas. Si la alcalinidad es insuficiente, el medio se acidifica (Cajigas et al., 2005; Rojas, 1987).

2.3.2. 6. Índice Ai/AP

Se utiliza como un parámetro de control y corresponde a la relación entre la alcalinidad de los ácidos volátiles y la alcalinidad bicarbonática (Ecuación 2.4).

Cuando los ácidos volátiles aumentan, son neutralizados por la alcalinidad al bicarbonato y se forma la alcalinidad debida a los ácidos volátiles. En este caso, la alcalinidad total es debida a la alcalinidad al bicarbonato y a los ácidos volátiles (Rojas, 1987). El ámbito aceptado del índice A_i/A_p es de 0,2 a 0,4 e inclusive valores superiores a 0,35 indican el inicio de acidificación del sistema. (Pérez & Torres, 2008; Pacheco & Magaña, 2003)

$$\frac{\text{Alcalinidad AGV}}{\text{Alcalinidad } HCO_3^-} \left(\frac{mg \text{ CaCO}_3}{L} \right) = 0,2 - 0,4 \quad (2.4)$$

2.3.2.7. Remoción de sólidos volátiles

El proceso anaerobio se lleva a cabo en el llamado nivel técnico de operación cuando aproximadamente 50% de la materia orgánica total es asimilada y transformada (Cimochowicz-Rybicka y Rybicki, 2013). A partir de la Ecuación 2.5 del porcentaje de remoción de sólidos volátiles (SV), una estimación aproximada del rendimiento del proceso se puede hacer. Sin embargo es una estimación muy amplia dado que una porción de los SV no está disponible para los microbios como sustrato, así también algunos de los ácidos volátiles del sustrato se volatilizan durante la determinación de los SV. (Zainol , 2010, Monge, Certucha, & Almendariz, 2013).

$$\% \text{ Remoción SV} = \frac{\text{lodo crudo} - \text{lodo digerido}}{\text{lodo crudo} - (\text{lodo crudo} \times \text{lodo digerido})} \times 100 \quad (2.5)$$

2.4 OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

2.4.1. Tratamiento a la lignocelulosa

El objetivo principal del pre-tratamiento apunta a la descomposición parcial o total de la materia prima en productos solubles fermentables (Frigon y Guiot, 2010). Esto se logra aumentando la porosidad del sustrato y reduciendo la cristalinidad de la celulosa (Laurinovica et al., 2013). Las técnicas que lo facilitan se desarrollan a continuación.

2.4.1.1. Fragmentación mecánica

La trituración aumenta el rendimiento total de la hidrólisis en 5-25% y disminuye el tiempo de digestión en 23-59% (Kratky et al., 2012). En un estudio de Sharma et al. (2002) el efecto del tamaño de partícula se investigó para la paja de trigo y paja de arroz en cinco tamaños (0,088, 0,40, 1,0, 6,0 y 30,0 mm) y se concluyó que el rendimiento máximo de biogás se produce con un tamaño de partícula de 0,088 y 0,40 mm, siendo la diferencia mayor entre los rendimientos de producción entre la variante de 30,0 mm con respecto a la de 6,0 mm y variantes más cortas, pero no entre las variantes con tamaños menores a 6,0 mm. La molienda de 0,40 mm o menos no es rentable sin embargo (Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, Kohli, & Rana, 2004).

2.4.1.2. Pre-tratamiento biológico

Las principales ventajas del tratamiento biológico son el alto rendimiento del producto, las condiciones moderadas de la reacción, una mínima demanda de energía y la poca generación de compuestos tóxicos de manera que los residuos del procesamiento se pueden utilizar como sustratos adicionales; sin embargo los métodos de tratamiento biológico requieren tiempos de residencia largos, lo cual limita su aplicación a nivel industrial (Avfall Sverige, 2012). Ejemplos de los microorganismos utilizados son las bacterias del género *Cellulomonas* y *Streptomyces*, así como los hongos basidiomicetos responsables de la pudrición de la madera (Cuervo et al., 2009). No obstante, la degradación de la lignina se produce en el metabolismo secundario y sólo un conjunto especial de organismos producen metabolitos secundarios a través de vías especializadas (Leisola, Pastinen, & Axe, 2012; Laurinovica et al., 2013).

2.4.1.3. Pre-tratamiento alcalino

El pretratamiento alcalino se basa en la saponificación de los enlaces éster intermoleculares entre la lignina y la hemicelulosas, causando la separación de dichas uniones (Avfall Sverige, 2012).

Xiao et al (2013) fotografiaron la estructura física del rastrojo de maíz con un microscopio electrónico de barrido con ampliación de 250, antes y después del tratamiento

alcalino. Como se muestra en la Figura 2.2b, la superficie del sustrato tratado se observa desgastada, parcialmente agrietada y con agujeros, lo que señala que la lignina es disuelta y se exponen las fracciones degradables de la materia prima.

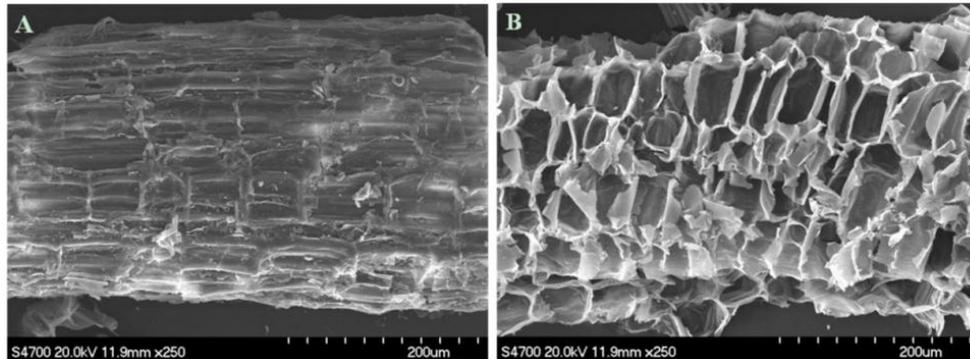


Figura 2.2. a) Rastrojo de maiz sin tratamiento alcalino. b) Rastrojo de maiz con tratamiento alcalino de 4% NaOH y 2% Ca(OH)₂ en base seca. Tamaño de partícula de 0,25-10 mm. Fuente: Xiao et al., 2013

El Cuadro 2.10 condensa la revisión de diversos métodos de tratamiento y pretratamiento con solución alcalina aplicados para el sustrato lignocelulósico.

Cuadro 2.10. Metodología del tratamiento alcalino para sustratos lignocelulósicos

Sustrato	Pretratamiento			Tratamiento durante DA (% NaOH)	% ST	T (°C) & TRH (días)	Incremento (%) en producción de CH ₄ *	Referencias
	g NaOH/g base seca	T (°C)	Tiempo (h)					
Pasto elefante	0,056						43	Rekha & Pandit, 2013
	0,112	80	2	---	5	35 & 8	70	
	0,168						68	
Rastrojo maíz								
0,25-1 mm	0,48	20	72	---	NR	37 &	15,1	Xiao et al., 2013
5-20 mm						20	47,8	
Paja de trigo	0,04	37	120	4			111,6	Chandra et al., 2012
	Pretratamiento hidrotérmico			6	5	37 & 60	20	
Hojas caídas (SS-AD**)		----		2			11,7	Liew, Shi & Li, 2011
				3,5	20	25 &	21,5	
				5		30	4,0	

NR. No reporta

*Comparado con una muestra sin tratamiento alcalino (blanco)

**Digestión anaerobia en estado sólido

2.5. ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE METANO DE UN SUSTRATO

En la actualidad, no se cuenta aún con uniformidad y difusión de un protocolo único para la medición de la producción de metano de un sustrato (Angelidaki et al., 2009). La dificultad de estandarizar la metodología recae en diversos factores como la composición y naturaleza del sustrato, origen y homogeneidad del inóculo, relación alimento/microorganismos, temperatura, tiempo de retención hidráulica (TRH), etc. De ahí la importancia de la calidad del análisis de los datos experimentales para reportar los resultados del estudio, por ejemplo mediante el estudio de Actividad Metanogénica Específica y Potencial Bioquímico de Metano (Aquino et al., 2007; Brulé, Oechsner & Jungbluth, 2014).

2.5.1. Actividad Metanogénica Específica (AME)

La AME permite cuantificar la capacidad de asimilación que tienen las bacterias metanogénicas de un sustrato determinado. Así, a partir de cantidades conocidas de biomasa (sólidos volátiles totales), bajo condiciones establecidas, se puede evaluar la producción de CH₄ a lo largo de un periodo de incubación (Torres, Rodríguez, Cajigas, & Pérez, 2002). Es una herramienta que además evalúa el comportamiento de dicha biomasa y la carga orgánica máxima que puede aplicarse a un sistema sin causar su desestabilización, tanto bajo condiciones ideales o potencialmente inhibitoras y tóxicas (Aquino, Chernicharo, Foresti, Florencio Dos Santos, & Monteggia, 2007).

La AME se expresa generalmente en gramos de DQO por gramos de sólidos volátiles por día (gDQOCH₄/gSV.d) y se calcula según la ecuación siguiente (Cimochowicz-Rybicka & Rybicki, 2013):

$$AME = \frac{24}{SV \times V_R \times f_1} \times \frac{d(V_{CH_4})}{dt} \left[\frac{\text{gDQO}}{\text{g SV}} \right] \quad (2.6)$$

Donde:

SV = Masa de los sólidos volátiles en la muestra por litro de agua en el reactor (g/l)

V_R = Volumen líquido efectivo en el reactor (l)

f₁ = Factor de conversión para gramos de DQO removida por unidad de volumen de metano (ml CH₄/g DQO)

$d(VCH_4)/dt =$ tasa máxima de producción de metano (ml CH₄/d)

La tasa máxima de producción de metano se obtiene a partir de la pendiente máxima de la curva de producción del gas durante el período de incubación de la muestra y que corresponda al consumo mínimo de 50 % del sustrato añadido (Aquino et al., 2007). El factor de conversión hace referencia a la oxidación estequiométrica de metano (Ecuación 2.1) que permite determinar la equivalencia de 0,35 L CH₄ por gramo de DQO removida.

2.5.2. Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

El PBM, como AME, mide la digestibilidad anaerobia de un sustrato reportada como L CH₄/gSV.día; sin embargo, el tratamiento para los datos recolectados es distinto en cuanto no se considera una tasa de mayor producción de metano sino el conjunto de las mediciones rescatadas durante la incubación del sustrato a través del modelo cinético de primer orden que se describe a continuación (Ecuación 2.13) (Kratky, Jirout, y Nalezenc, 2012; Chynoweth, Turick & Owens, 1993). Dicho modelo se fundamenta en el modelo cinético de Monod (1950) que asume la tasa de crecimiento de una colonia de bacterias afectada por un sustrato limitante que se acaba por efecto de saturación. Los efectos de saturación se desprecian y la tasa de crecimiento bacteriana es proporcional a la formación del producto final, metano (Moody, Burns, Wu-haan, & Robert, 1996; Borja, Martín, Duran, & Duran, 1992).

2.5.2.1. Modelación del PBM a través de la expresión exponencial

La modelación del PBM parte de la expresión general de balance de masa para reactores anaeróbicos, “Acumulado = Entrada - Salida + Generación” desarrollada en la Ecuación 2.7, donde S es la concentración de sustrato (gSV) en un tiempo (t), S₀ es la concentración inicial de sustrato (gSV), Q es el caudal de entrada de sustrato, V es el volumen del reactor y R_c es la tasa de reacción. La Ecuación 2.8 es dicha expresión para un reactor discontinuo donde no hay un flujo de sustrato continuo (Sahito, Mahar, & Brohi, 2013).

$$\frac{dS}{dt}V = QS_0 - QS + RcV \quad (2.7)$$

$$\frac{dS}{dt} = Rc \quad (2.8)$$

Se introduce entonces la producción de metano como el modelo de Monod donde la tasa de utilización del sustrato es proporcional a la concentración del sustrato en el medio con k como la constante cinética de primer orden y S como la cantidad de sustrato sin degradar remanente a un tiempo t (Borja et al., 1992).

$$R = k \times S_t \quad (2.9)$$

Dicha velocidad de reacción, k , se determina a partir de resultados experimentales, y mediante el uso de integración (límites $S_0 - S$ y $0 - t$) como se observa en la Ecuación 2.10.

$$S = S_0 e^{-kt} \quad (2.10)$$

La concentración de sustrato se correlaciona con la cantidad de metano a través del coeficiente de rendimiento de metano (Y_c) (Ecuación 2.11) y finalmente se integra para obtener el volumen de metano en un tiempo específico como se da en la Ecuación 2.12:

$$Y_c = \frac{-dB}{dS} \quad (2.11)$$

$$\int_0^G dB = \int_{S_0}^S -Y_c dS \quad (2.12)$$

Sustituyendo la Ecuación 2.10 en la Ecuación 2.12, se obtiene la Ecuación 2.13, donde $B(t)$ es el rendimiento de metano acumulada en el tiempo (t), B_0 es la máxima generación de metano y se supone igual a la B final (después de acabo el periodo de digestión, $B_0 = Y_c S_0$) y k es la constante de velocidad de reacción que corresponde al recíproco del tiempo de incubación (días^{-1}) (Kryłow & Tal-Figiel, 2003; Gunaseelan, 2004; Angelidaki et al., 2009; Zainol, 2010; Raposo et al., 2011).

$$B(t) = B_0 (1 - e^{-kt}) \quad (2.13)$$

Los parámetros B_0 y k tienen dependencia no lineal entre sí y para ajustar los datos experimentales al modelo, debe utilizarse la regresión no lineal de forma iterativa (Chapra & Canale, 2007).

2.5.2.1.1. Método Gauss Newton

Este es un algoritmo de iteración que intenta encontrar una aproximación a la solución que sea lo más cercana posible tanto si los datos tienen una solución única como si no tiene solución. Esto mediante la suma de mínimos cuadrados de los residuos entre los datos experimentales y la Ecuación 2.13. Para ello, primero debe establecerse la relación entre la ecuación exponencial y los datos, mostrada en la Ecuación 2.14, donde y_i es la producción de metano, $f(t; B_0, k)$ la ecuación que es una función de tiempo (t) y una función no lineal de los parámetros B_0 y k ; con e_i como error aleatorio.

$$y_i = f(t; B_0, k) + e_i \quad (2.14)$$

El modelo no lineal se expande en una serie de Taylor (Ecuación 2.15), que es el concepto clave para linealizar de forma aproximada la ecuación exponencial y realizar entonces la suma de los cuadrados de los residuos (Ecuación 2.16) hasta que la solución converge según un criterio de paro establecido o tolerancia, el cual se interpreta como la precisión de error del método (Chapra & Canale, 2007):

$$f(t_i)_{j+k} = f(t_i)_j + \frac{\partial f(t_i)}{\partial B_0} \Delta B_0 + \frac{\partial f(t_i)}{\partial k} \Delta k \quad (2.15)$$

$$S_r = \sum_{i=1}^n [y_i - B_0(1 - e^{-kx_i})]^2 \quad (2.16)$$

Así se obtiene la mejor estimación de las variables desconocidas en el modelo teórico, y es posible trazar la función con los datos experimentales y ver cuánto se ajusta a la ecuación teórica. Sin embargo la convergencia de los datos experimentales depende de los valores que se introduzcan como aproximaciones iniciales, si estos se encuentran en un ámbito adecuado o no (Griva, Nash, & Sofer, 2009).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevaron a cabo cuatro series de experimentos de digestión anaerobia en reactores tipo Batch a escala de laboratorio con los siguientes sustratos lignocelulósicos: pasto elefante, hojas de piña, vástago de banano y hojas de malanga (Figura 3.1). Estos se obtuvieron de la finca de agricultura orgánica “Río Las Minas” ubicada en el Valle Central, en la región de Guápiles en las cercanías del Parque Nacional Braulio Carrillo.

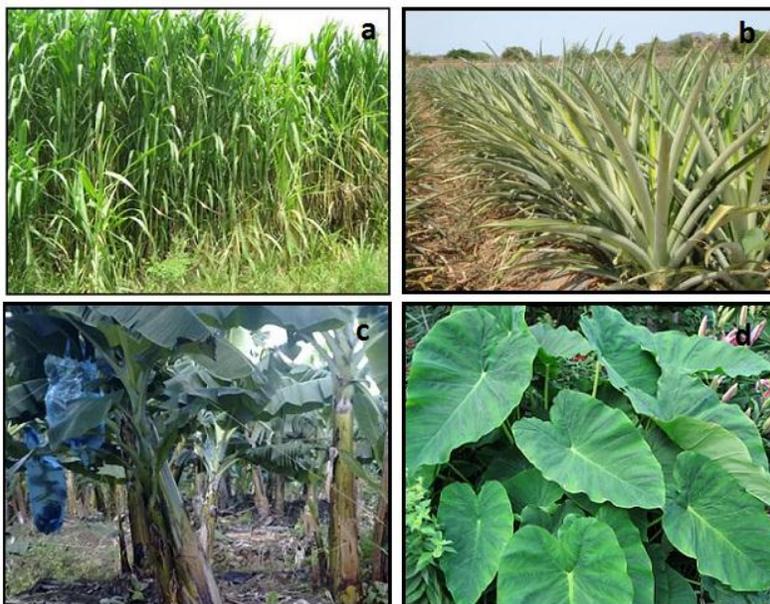


Figura 3.1. Sustratos lignocelulósicos de estudio a) Pasto elefante b) Hojas de piña c) Vástago de banano d) Hojas de malanga

3.1 DISEÑOS DE EXPERIMENTOS

La caracterización previa para los sustratos fue su contenido de humedad, sólidos totales y sólidos volátiles de acuerdo con el procedimiento 2540 de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1999); y su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina se recopiló de la literatura como se muestra en el Cuadro 2.3.

Las cuatro series de experimentos se diferencian entre sí según la composición de los residuos lignocelulósicos utilizados como sustrato (Cuadro 3.1) y según las condiciones de operación a las que se sometieron los reactores (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.1. Composición del sustrato para cada serie de experimentos

Serie 1		Serie 2		Serie 3		Serie 4 (Mezcla A,B,C,D)*	
SUSTRAT	%	SUSTRAT	%	SUSTRAT	%	SUSTRAT	%
O		O		O		O	
Pe	100	Pe	100	Pe	100	Hm-Hp-Vb	33 c/u
Pe-Hm	40- 60	Pe-Hm	50- 50	Pe-Hm	50- 50	Hm-Hp-Vb +ac	33 c/u
Pe-Hp	40- 60	Pe-Hp	50- 50	Pe-Hp	50- 50	Pe-Hm-Hp- Vb (Mezcla A)	60-13- 13-13
Pe-Vb	40- 60	Pe-Vb	50- 50	Pe-Vb	50- 50	Pe-Hm-Hp- Vb+ac (Mezcla B)	60-13- 13-13
Pe-Hm-Hp- Vb	25 c/u	Pe-Hm- Hp- Vb	25 c/u	Pe- Hm Hp- Vb	25 c/u	Pe-Hm-Hp- Vb (Mezcla C)	50-10- 10-30
---		Hp	100	Hp	100	Pe-Hm-Hp- Vb+ac (Mezcla D)	50-10- 10-30
---		Hm	100	Hm	100	---	---
---		Vb	100	Vb	100	---	---
---		Pe-Hm- Hp- Vb +ac	25 c/u	Pe-Hm-Hp- Vb+ac	25 c/u	---	---
---		Pe(ac)	100	---	---	---	---

Pe = pasto elefante, Hm= hojas de malanga, Hp = hojas de piña, Vb= vástago de banano.

Ac = 1,5 g de microorganismos eficientes añadidos como tratamiento biológico

*Los sustratos de la Serie 4 se referenciaron como Mezcla A, Mezcla B, Mezcla C y Mezcla D.

Cuadro 3.2. Condiciones operacionales de las series de experimentos

Serie de experimentos	Contenido de sólidos (%)	Temperatura media (°C)	TRH (días)	Volumen reactor (L)
1	7	24,2	25	19
2	8	24,6	60	2,5
3	6	24,6	50	2,5
4	6	21,8	35	2,5

Se trabajó con un intervalo de contenido de sólidos de 6 a 8% pues según reporta Bouallagui et al. (2005) la digestión anaerobia en lotes de residuos vegetales mixtos es exitosa a un 5% de concentración total de sólidos mientras que al 8% se reporta el fallo del proceso por inhibición de AGV.

Como prueba inicial, en la Serie experimental 1, el volumen del reactor fue de 19 L con el objetivo de analizar cualitativamente la digestión anaerobia y producción de biogás de los residuos lignocelulósicos seleccionados a escala piloto (Figura 3.2). No se cuantificó la producción de metano en la Serie 1.



Figura 3.2. Montaje de reactores anaerobios de la Serie 1

Para las demás series de experimentos se utilizó un reactor de volumen menor (2,5 L) por facilidad de control del sistema y se realizó la cuantificación del metano producido. Para dicha medición se utilizó el método volumétrico mediante la conexión de cada

digestor a un sistema de desplazamiento de volumen graduado (probeta) con una botella externa con una disolución de hidróxido de sodio al 5% (NaOH) para lavar el biogás como se observa en el diagrama de la Figura 3.3 y en la Figura 3.4.

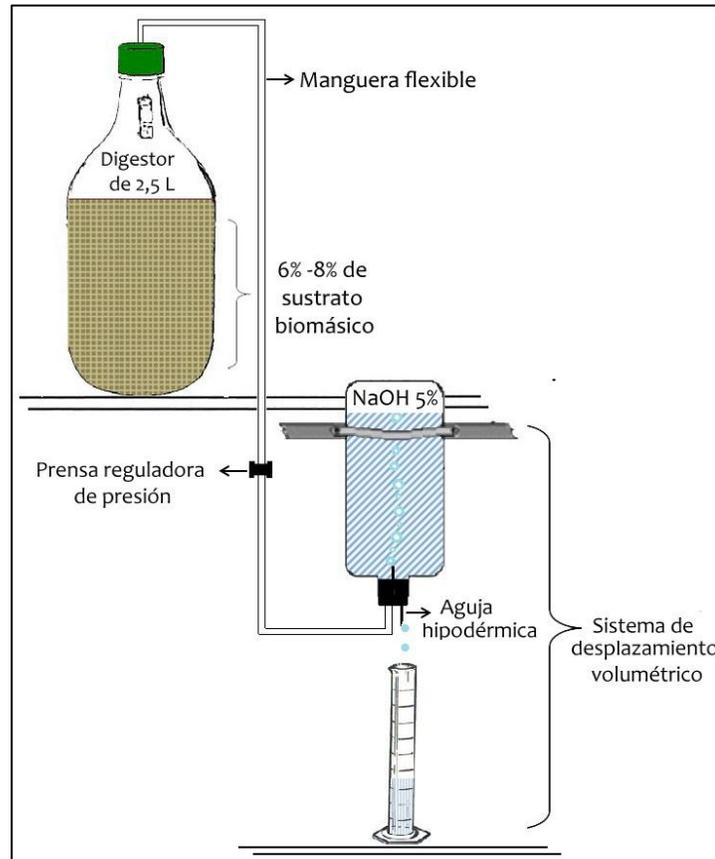


Figura 3.3. Digestor y trampa de NaOH para medición de metano por desplazamiento volumétrico

El NaOH atrapa el CO_2 y desplaza un volumen equivalente del metano gaseoso. Se añadió azul de timol a la disolución para observar la formación de NaHCO_3 . El viraje se observa de azul a amarillo en 8-9 unidades de pH (Zakarya, Tajaradin, Abustan, & Ismail, 2008). El desplazamiento volumétrico se monitoreó 3 veces por día.



Figura 3.4. Reactores anaerobios de la Serie 2 y Serie 3

3.1.1 Especificaciones para las series experimentales

El control y seguimiento de la digestión anaerobia para cada serie de experimentos siguió especificaciones determinadas como se observa en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Especificaciones para la digestión anaerobia

Serie de experimentos	Agitación	Inóculo	Solución de nutrientes	Tratamiento		
				Físico	Alcalino	Biológico
1	×	×	✓	×	×	×
2	✓	×	✓	✓	✓	✓
3	✓	×	✓	✓	✓	✓
4	✓	×	✓	✓	✓	✓

✓ Se realizó el procedimiento o se utilizó el aditivo en el reactor.

× No se realizó el procedimiento o no se utilizó el aditivo en el reactor.

La agitación se realizó manualmente una vez al día durante 1 minuto; no se añadió inóculo para reproducir las condiciones reales de un digestor a gran escala; y la solución de nutrientes fue de 2 ml por litro de volumen efectivo en cada reactor y compuesta por CaCl_2 al 2%, FeCl_3 2%, MgSO_4 2%, MgCl 2% de acuerdo con Angelidaki et al., 2009.

El tratamiento aplicado a los sustratos fue de tipo físico, biológico y químico. El primero consistió en la maceración de los residuos lignocelulósicos a un tamaño de 1 – 5

mm, con el uso de un triturador de residuos orgánicos marca Trapp, modelo TR 200; y posteriormente una licuadora doméstica. Los sustratos no fueron expuestos a ningún secado que facilitara su pulverización y se utilizó la base húmeda. El tratamiento biológico denominado acelerador en el experimento, consistió en agregar 1,5 gramos de microorganismos eficientes de marca BioAguas (Cuadro 3.4) al inicio del período de incubación. Finalmente el tratamiento alcalino consistió en añadir una solución de NaOH al 6% a cada reactor previo al inicio de la digestión anaerobia. Dicho tratamiento se formuló con base en la revisión del Cuadro 2.10.

Cuadro 3.4. Composición microbiológica del tratamiento BioAguas

Microorganismos	Cantidad UFC/g	Observaciones
Hongos y levaduras	$7,4 \times 10^6$	Predominancia de hongos
Saccaromyces sp	$6,1 \times 10^4$	Levaduras alimenticias
Bacterias Lactobacillus sp	<10	Bacterias alimenticias
Bacterias fotosintetizadoras	<10	Descomposición acelerada

Fuente: Fabricante BioAguas, 2014

3.2 MEDICIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES

Los parámetros operacionales medidos fueron pH, temperatura, alcalinidad y ácidos grasos volátiles. Para los valores de pH y temperatura se utilizó un pHmetro marca Denver Instrument, modelo UltraBasic Benchtop Meters; para el cálculo de alcalinidad y AGV, se utilizaron los procedimientos 2320 y 5560, definidos por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, respectivamente (APHA, 1999). Para la determinación del índice Ai/Ap, se modificó el procedimiento de alcalinidad anterior con las consideraciones establecidas por Jenkins (1977), donde se propone 5,75 como pH final de la valoración para no involucrar la capacidad buffer no útil de los AGV presentes en el medio (Field, 1987; Lahav, Shlafman, Morgan, Loewenthal, & Tarre, 2002).

3.3 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO

Los datos de producción de metano obtenidos por desplazamiento volumétrico diario de cada reactor se convirtieron a CNPT (Apéndice 2) y su análisis se desarrolló a partir del cálculo de la Actividad Metanogénica Específica (AME) y Potencial Bioquímico

de Metano (PBM) descritos en la sección 2.5 del capítulo 2 sobre Análisis de la producción de metano de un sustrato. Para la implementación del Método Gauss Newton se programó la modelación en Visual Basic de Windows Excel con una tolerancia de 0,05 y un máximo de 100 iteraciones para evitar que el algoritmo entre en un ciclo infinito, sin embargo suficiente para observar si el criterio de convergencia se cumple.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A través del software estadístico Minitab se realizó la prueba de análisis de varianza (ANOVA) de un factor para determinar diferencias significativas en la media de la producción diaria de metano del conjunto de sustratos evaluados. El factor de varianza considerado fue tanto como el contenido de sólido en sustratos iguales como el tipo de sustrato para igual contenido de sólido. Se escogió dicha prueba por la facilidad de evaluar la media de dos o más muestras simultáneamente, considerando que el tamaño de las muestras es relativamente grande (>30), cada una de las muestras independientes y la desviación estándar de la población desconocida (Park, 2009; Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2011). Finalmente para cada conjunto de sustratos con diferencia significativa en la media de la producción diaria de metano (hipótesis alternativa), se utilizó la prueba de Tukey del software Minitab para analizar cuáles sustratos causaron dichas diferencias.

:

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para justificar el rendimiento de la producción metanogénica debe evaluarse la digestión anaerobia del sustrato, es decir describir, en la medida de lo posible, el desarrollo de las etapas del proceso que permita identificar un desequilibrio entre los grupos de bacterias anaerobias y consecuentemente disminuya la generación de biogás. Los parámetros operacionales son clave para estimar dicha estabilidad, es por ello que la relación pH-alcalinidad-ácidos volátiles se estudia en este apartado para las diferentes variedades de reactores, además del estudio de AME y PBM.

4.1 ANÁLISIS DE ALCALINIDAD Y PH

4.1.1 Serie experimental 1

Independientemente del sustrato incubado, los valores de pH obtenidos están en el ámbito de 4 a 5 unidades con un promedio de 4,6 unidades, como se observa en la Figura 4.1. Estos valores de pH indican la acidificación del medio debido a la acumulación de iones de hidrógeno libres provenientes de la disociación de los AGV (Soto, Méndez & Lema, 1993).

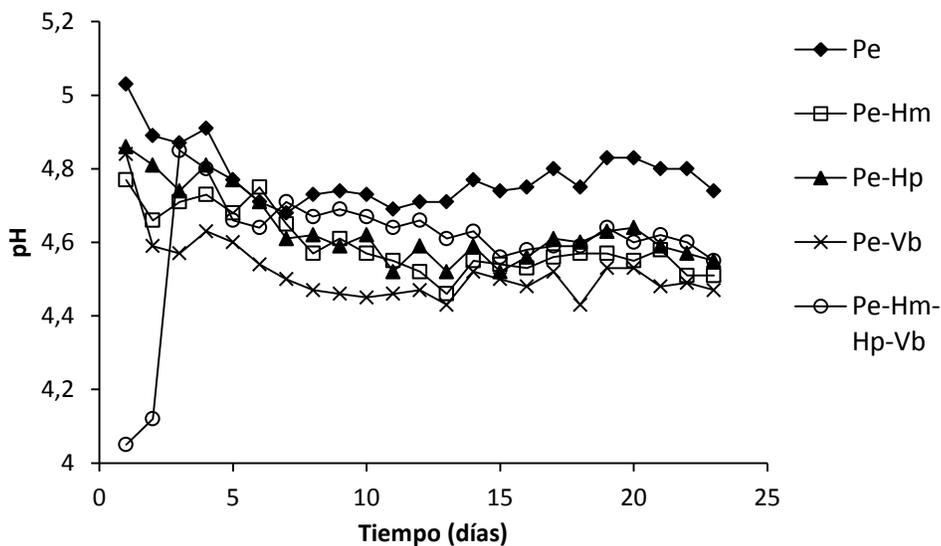


Figura 4.1. pH de reactores anaerobios según sustrato para un TRH de 25 días

De acuerdo con Soto, Méndez & Lema (1993) la metanogénesis es inhibida a un pH de 5 y Hwang, Jang, Hyum, & Kim (2004) afirman que a un pH de 4 todo proceso anaerobio cesa en la fase fermentativa. Lo anterior se corrobora con el persistente mal olor hasta el término del tiempo de incubación posiblemente por la producción de H_2S y con el color de las muestras de los reactores (Figura 4.2a), pues de acuerdo con Zitomer y Shroud, en condiciones anaerobias estrictas los caldos de cultivo tienen una coloración negra todo el tiempo (Botheju & Bakke, 2011).



Figura 4.2. Color de las muestras de los reactores anaerobios para el día 25 de la Serie 1 y Serie 2.

En la Figura 4.3 se observa la respuesta del sistema para amortiguar la acumulación de AGV en cada uno de los reactores y por ello durante los primeros 15 días la alcalinidad va en aumento. El análisis de alcalinidad indicó que dicha alcalinidad es 100% debida a bicarbonato, pero es incapaz de neutralizar la concentración de AGV producida por la materia orgánica.

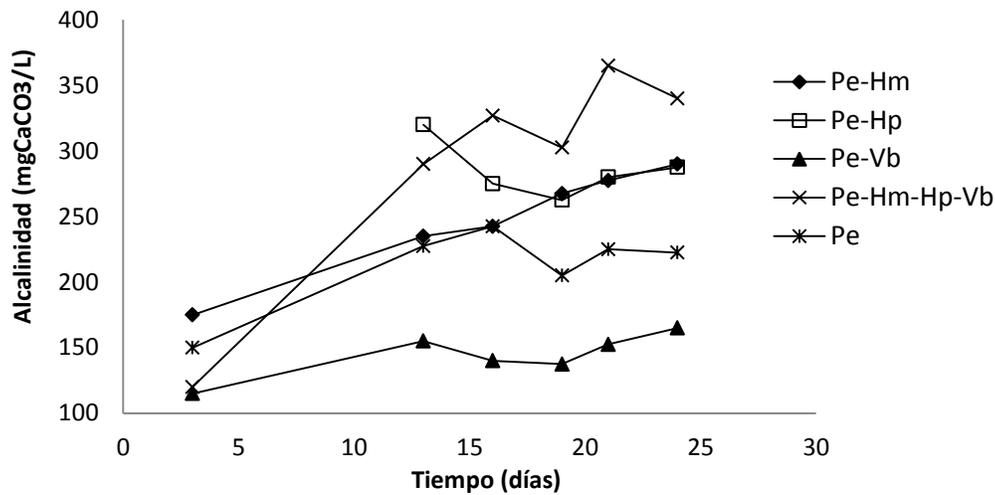


Figura 4.3. Alcalinidad según sustrato en un TRH de 25 días

La alcalinidad más baja (165 mg CaCO₃/L) correspondió al sustrato de Pe-Vb, el cual consecuentemente reportó el pH promedio más bajo de todos los reactores de la Serie 1 (4,5). El sustrato Pe-Hm-Hp-Vb presenta el pH más pequeño al inicio de la digestión anaerobia y su alcalinidad también sufre el mayor aumento. Se comprueba que el pH como parámetro de operación resulta poco eficiente para corregir fallas, sino más bien un indicador de estrés del sistema, pues solamente cuando se agota la capacidad buffer del medio y este se acidifica, ocurre la caída de pH.

Cuadro 4.1. Producción de metano de la Serie experimental 1

Sustrato	Pe	Pe-Hm	Pe-Hp	Pe-Vb	Pe-Hm-Hp-Vb
Burbujeo del reactor	×	✓	×	✓	✓

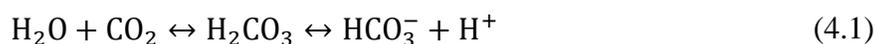
✓Se dio ×No se dio

La producción de metano no se cuantificó para estas pruebas, sino que a través del burbujeo de la manguera de salida de cada reactor se observó la producción del mismo. El burbujeo sucedió de manera muy esporádica para algunos de los reactores como se observa en el Cuadro 4.1. El burbujeo disminuyó con el tiempo y fue azaroso y despreciable. Para el día 25, cuando se destaparon los reactores, se encontró una capa gruesa en la nata del reactor, que obstruyó la salida del biogás, lo cual impera en la necesidad de agitación de los reactores. Se observó además una reducción del volumen del reactor, lo que implica que la hidrólisis fue efectiva a pesar de la falta de trituración fina que aumentase el área

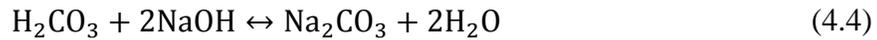
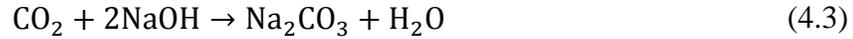
superficial accesible y por tanto facilitara el ataque de enzimas, descrito en el Cuadro 2.2. Sin embargo se concluyó que la carga orgánica alta fue la responsable del fracaso de la DA, pues como apunta Solera, Romero, & Sales, 2002 el bajo pH y la alta carga orgánica son factores que favorecen el establecimiento de la fase acidogénica e inhiben el desarrollo de los metanógenos.

4.1.2 Serie experimental 2 y Serie experimental 3

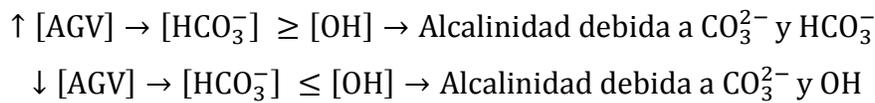
Ambas series de experimentos se realizaron paralelamente y con la diferencia única del contenido de sustrato, sin embargo sus resultados de alcalinidad y pH difieren considerablemente. En la Figura 4.4, se observa que las muestras de la Serie 3 (6% de sustrato) no reportan alcalinidad debida a hidróxidos a diferencia de la Serie 2 (8% de sustrato). Las alcalinidades más bajas corresponden en su mayoría a los reactores de la Serie 2 y a las muestras de la Serie 3 que presentaron HCO_3^- en la composición de su alcalinidad. En la Serie 3, a excepción del reactor Hm, la composición de la alcalinidad, basada en los resultados de fenoftaleína y la clasificación estequiométrica de las tres formas principales de la alcalinidad presentes en el agua, es de CO_3 y OH . Estas concentraciones dependen del equilibrio entre el gas carbónico y el ion bicarbonato que brinda capacidad buffer al sistema y su reacción con los hidróxidos disponibles en el medio, como se muestra en la Ecuación 4.1 y Ecuación 4.2.



La concentración de NaOH en los reactores cumple el objetivo primordial de facilitar la hidrólisis de los sustratos, pero es también una fuente de alcalinidad indirecta. Debido a que el CO_2 y el HCO_3^- son aceptores de electrones, reaccionan con la base dispuesta en el sistema (Aquino et al., 2007) y se genera Na_2CO_3 (Ecuación 4.3 y 4.4) y NaHCO_3 (Ecuación 4.5).



Según la Ecuación 4.4, para producir Na_2CO_3 , la concentración de NaOH debe duplicar la concentración de CO_2 y H_2CO_3 . No así sucede para la producción de NaHCO_3 , donde las concentraciones de CO_2 y NaOH son 1 a 1. Es decir, sin una generación suficiente de AGV que consuma el NaOH en exceso, el sistema mantiene la producción de Na_2CO_3 , lo cual explica la composición de la alcalinidad de la siguiente manera:



Por lo tanto, para un mayor porcentaje de sustrato en el reactor, mayor es la producción de AGV y la alcalinidad estará compuesta de carbonato y bicarbonato en mayor proporción que para un porcentaje de sustrato menor. Esto se observa fielmente en los resultados de alcalinidad y composición de la alcalinidad de los reactores al 8% y 6% presentados en la Figura 4.4.

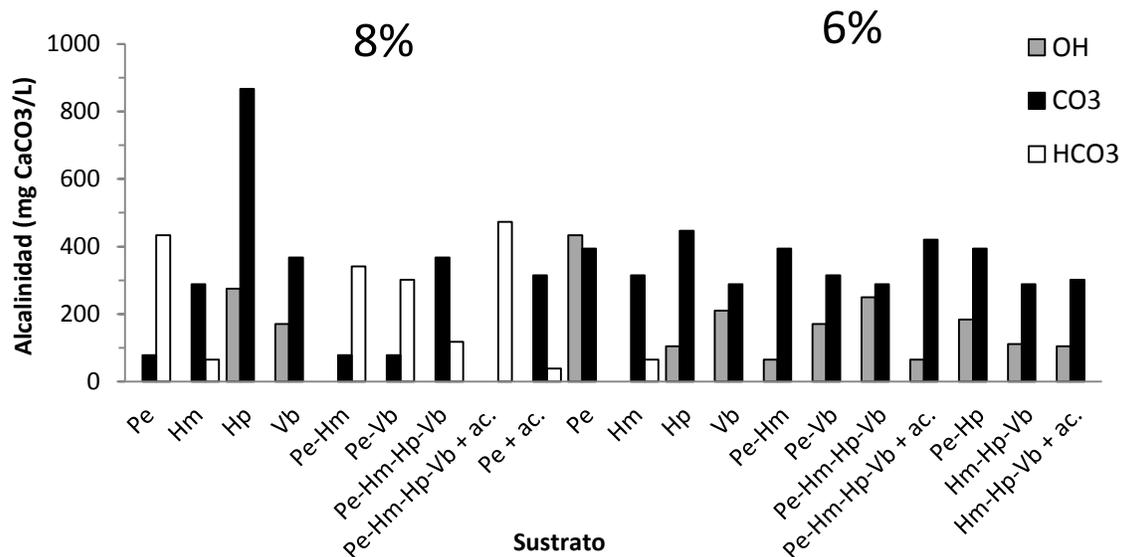


Figura 4.4. Composición de la alcalinidad de los sustratos al finalizar el TRH

Por ejemplo, con igual concentración de NaOH añadida al inicio de la DA, el sustrato Pe 8% reportó alcalinidad compuesta en 433 mg CaCO₃/L de bicarbonato (85% de la alcalinidad total), mientras que Pe 6%, la alcalinidad reportada fue 433 mg CaCO₃/L (52%) de hidróxidos, 394 mg CaCO₃/L (48%) de carbonato y 0% de bicarbonato. Se puede asumir que al 8% de sustrato Pe, la generación de AGV es capaz de consumir los hidróxidos en el medio, mientras que al 6% de sustrato no sucedió.

Cuadro 4.2. pH según sustrato al fin del TRH

Sustrato	pH	
	8%	6%
Pe	6,6	12,8
Pe + ac.	10,4	---
Hm	11,9	11,9
Hp	12,5	11,9
Vb	11,9	12,0
Pe-Hm	10,6	12,5
Pe-Hp	---*	12,0
Pe-Vb	9,4	11,8
Hm-Hp-Vb	---	11,7
Hm-Hp-Vb+ ac	---	11,7
Pe-Hm-Hp-Vb	12,0	12,0
Pe-Hm-Hp-Vb + ac	5,5	11,5

(---) No se montó reactor para dicho sustrato

(---*) El reactor no culminó el TRH debido a fugas

De acuerdo con los resultados de alcalinidad de los reactores en estudio, la capacidad buffer fue efectiva en la relación $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ y no solamente HCO_3^- . Esto se debió a la concentración de NaOH en el sistema como se desarrolló en las ecuaciones anteriores, siendo la predominancia de HCO_3^- y CO_3^{2-} sobre la alcalinidad por hidróxidos garante de la estabilidad del proceso. En consecuencia, los valores de pH se observan en un ámbito más amplio fuera de la neutralidad. El Cuadro 4.2 muestra dichos resultados de pH de los reactores y se observa que para la mayoría, el pH es básico. El reactor Pe 8% con 85% de alcalinidad bicarbonática reportó un pH de 6,6 mientras que Pe-Hm-Hp-Vb+ac 8%

cuya concentración de HCO_3 es 100%, tiene un pH de 5,5. Este pH indica el agotamiento de la alcalinidad e inicio de la acidificación del reactor.

Para todas las muestras de la Serie 3, el pH supera las 10 unidades para el final del tiempo de incubación. Dado que el parámetro de pH no tuvo seguimiento durante los 50 días de TRH, no se pudo corroborar el cambio de pH durante las fases de la DA. Sin embargo estudios realizados por Rekha & Pandit (2013), Chandra et al. (2012) y Xiao et al. (2013) de digestión anaerobia de paja de trigo y rastrojo de maíz en solución alcalina, comprobaron caídas de pH a lo largo del período de digestión y con un aumento de pH sobre la neutralidad hacia el término de la prueba. Por lo tanto, se considera la fluctuación del pH y la medición final de pH por encima de la neutralidad en el día 50-60 como resultado esperado de la digestión anaerobia con tratamiento alcalino para lignocelulosa. No obstante, el valor de pH final de los reactores del experimento está muy por encima del ámbito óptimo para el desarrollo de los metanógenos.

Poca es la investigación hecha sobre metanogénesis estable y exitosa en ambientes alcalófilos, sin embargo Oremland, Marsh, & Desmarais, 1982 reportaron importantes niveles de producción de CH_4 de lodos incubados provenientes del Big Soda Lake en Nevada a un pH óptimo de 9,7. No obstante, dicha producción de metano se vio estimulada por metanol, trimetilamina, y metionina y no por hidrógeno y acetato. Por lo tanto, el metabolismo para las bacterias metanogénicas en condiciones de pH superiores a 9 no se inhibe, pero las condiciones que favorecen la máxima producción del biogás son distintas de manera que es otra materia prima la que alimenta a los metanógenos y no los productos de la acetanogénesis.

Torres, Cajigas, Pérez, González, & Otero (2008) en su estudio sobre la capacidad buffer de varios alcalinizantes químicos en aguas residuales ácidas, reportaron que las muestras tratadas con NaOH presentan el mayor valor de actividad metanogénica, pero para concentraciones superiores al valor necesario, la actividad es inhibida.

Lo anterior comprueba que un exceso de NaOH en el sistema disminuye la producción de metano para las condiciones metabólicas normales en las que se desarrolla el proceso. El caso del reactor Hp al 8%, el cual presenta la alcalinidad total mayor (1143 mg CaCO_3/L), reportó 0% de concentración de HCO_3 , esto implica que su producción de AGV es muy baja en comparación con los demás sustratos aun cuando el sustrato Hp posee la

relación de celulosa, hemicelulosa y lignina más favorable para hidrólisis (Cuadro 2.3). Es válido asumir una inhibición del proceso por exceso de la base en el medio.

4.1.2.1 Índice Ai/Ap

Con respecto al índice Ai/Ap se toma el criterio de ámbito 0,2 -0,4 como indicador de la estabilidad del sistema, justificado como suficiente alcalinidad bicarbonática para neutralizar una acumulación de AGV. Sin embargo, para 10 de los 18 reactores totales de la Serie 2 y la Serie 3, la alcalinidad por HCO₃ es nula. Así también la concentración de HCO₃ para los reactores que la poseen es muy baja y predomina la alcalinidad por AGV.

Cuadro 4.3. Índice Ai/Ap según sustrato y contenido de sólidos para las Series 2 y 3

Sustrato	Ai/Ap	
	8%	6%
Pe	0,22	---
Pe + ac.	1,8	---
Hm	1,0	1,0
Hp	---	---
Vb	---	---
Pe-Hm	0,26	---
Pe-Hp	---	---
Pe-Vb	0,24	---
Hm-Hp-Vb	---	---
Hm-Hp-Vb+ ac	---	---
Pe-Hm-Hp-Vb	0,94	---
Pe-Hm-Hp-Vb + ac	0,20	---

(---) La muestra tiene alcalinidad bicarbonática 0 mg CaCO₃/L

Como se observa en el Cuadro 4.3, solamente los reactores Pe, Pe-Hm, Pe-Vb y Pe-Hm-Hp-Vb+ac al 8% son estables con índice de Ai/Ap 0,2 y el resto de los reactores se encuentran acidificados. Sin embargo dado que los pH registrados para estos reactores son básicos, la amortiguación de los AGV se debe también a la concentración de CO₃²⁻ y OH.

Cuadro 4.4. Índice Ai/Ap con HCO₃⁻ y CO₃²⁻ como Ap según sustrato y contenido de sólidos para las Series 2 y 3

Sustrato	Ai/Ap	
	8%	6%
Pe	0,20	0,41
Pe + ac	0,20	--
Hm	0,20	0,20
Hp	0,26	0,25
Vb	0,34	0,34
Pe-Hm	0,20	0,26
Pe-Hp	0,20	0,30
Pe -Vb	0,20	0,28
Hm-Hp-Vb	---	0,28
Hm-Hp-Vb + ac	---	0,31
Pe-Hm-Hp-Vb	0,20	0,41
Pe-Hm-Hp-Vb + ac	0,20	0,24

(---) No se realizó prueba de DA para el sustrato

Es claro que el índice Ai/Ap es un indicador limitado para diagnosticar la estabilidad de la DA. Para el caso de los reactores en estudio, donde el sistema HCO₃⁻/CO₃²⁻ provee capacidad buffer al medio, se consideró la concentración de ambas especies para el cálculo del índice mostrado en el Cuadro 4.4. Todos los sustratos se encuentran dentro del criterio de estabilidad.

4.1.3 Serie experimental 4

Para dicha serie de experimentos, las mediciones de alcalinidad y pH se realizaron en el día 15 y el día 35. Como se observa en la Figura 4.5, la alcalinidad para todas las muestras, a excepción de la mezcla B, se compone de carbonato e hidróxido; y los valores de pH presentados en el Cuadro 4.5 aumentan levemente entre el día 15 y el día 35.

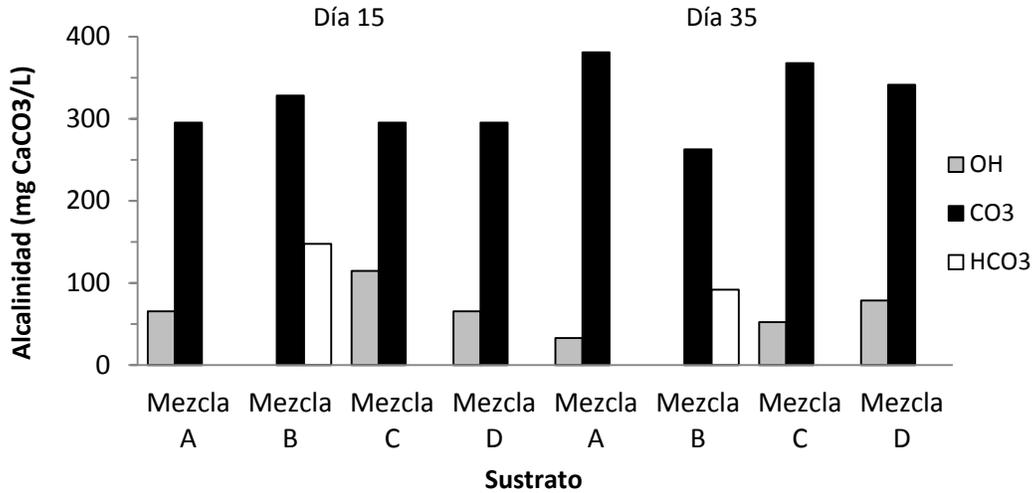


Figura 4.5. Alcalinidad (mg CaCO3/L) según sustrato y día de muestreo de la Serie 4

Sustrato	pH	
	Día 15	Día 35
Mezcla A	11,5	11,6
Mezcla B	10,9	11,0
Mezcla C	11,6	11,6
Mezcla D	11,4	11,7

El cálculo del índice de Ai/Ap para las muestras se basó en la relación $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$, el cálculo se muestra en el Cuadro 4.6. Conforme avanza el periodo de incubación, la relación de alcalinidades se mantiene constante y en el ámbito estable, lo cual indica que no hay acumulación de AGV que saturen la actividad metanogénica.

Sustrato	Ai/Ap	
	15 días	35 días
Mezcla A	0,24	0,22
Mezcla B	0,2	0,2
Mezcla C	0,28	0,23
Mezcla D	0,24	0,24

Los resultados de alcalinidad de las cuatro series experimentales no llegan a satisfacer el mínimo valor de alcalinidad (1500 mg CaCO₃/L), en su mayoría bicarbonática, reportado para la operación adecuada de la digestión anaerobia (Rojas, 1987; Field, 1987). No obstante, los pH son altos debido a la concentración de hidróxidos en el medio. Esto demuestra que el pH no es un parámetro capaz de diagnosticar la capacidad buffer del reactor.

4.2 ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE METANO POR VOLUMEN ACUMULADO

4.2.1 Residuos lignocelulósicos individuales

En la Figura 4.6, se observa que los sustratos siguieron un mismo comportamiento en su generación de metano hasta el día 45 cuando Pe presentó un marcado pico de producción en comparación con el resto de los sustratos que se mantienen estables.

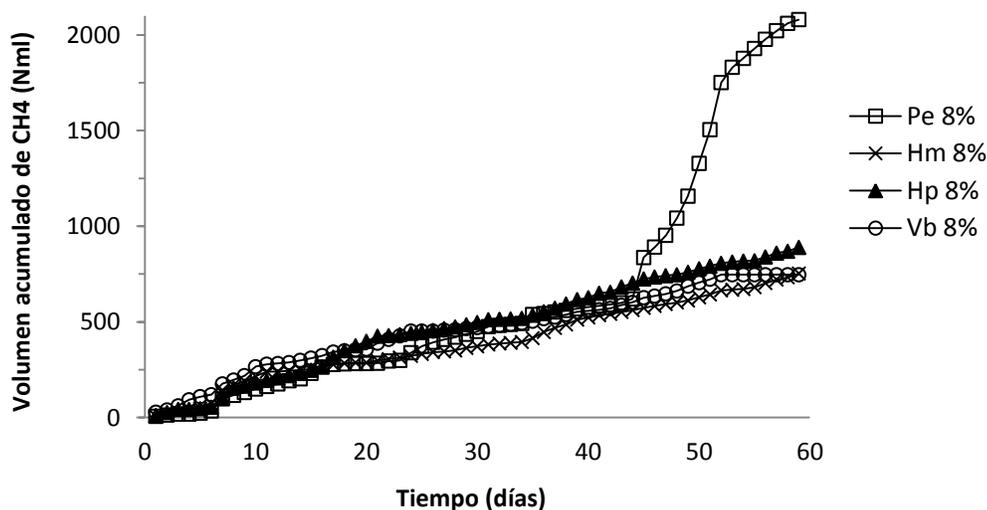


Figura 4.6. Volumen acumulado de metano según sustrato individual al 8% de contenido de sólidos

Es probable que el tratamiento alcalino sea el responsable del comportamiento similar entre sustratos a pesar de las diferencias en la composición de lignocelulosa de cada uno, tal cual se observa en el Cuadro 4.7. Independientemente de las diferencias en dicha relación, la producción de metano es baja para los 4 sustratos en la proporción de 8%.

Cuadro 4.7. Relación de celulosa:hemicelulosa: lignina según sustrato

Sustrato al 100%	Relación* celulosa/hemicelulosa/lignina
Pe	1:6:1
Hm	1:4:0
Hp	1:0,3:0,1
Vb	1:0,02:0,3

*Relación calculada a partir del Cuadro 2.3.

En la Figura 4.7, se observa que las diferencias en la producción de metano entre sustratos son más notorias si el contenido de sólidos es menor. La mayor generación de metano del conjunto de sustratos la presentó el sustrato Pe 6%, el cual a diferencia de Pe 8%, inició su curva de producción alrededor del día 10. Sin embargo la media de la producción diaria de metano de Pe 6% no es significativamente diferente ($P > 0,05$) que la media de la producción diaria de metano de Pe 8%.

Se puede asumir que al 6% hubo un equilibrio entre los productos generados durante la acidogénesis para dar abasto a las bacterias metanogénicas sin saturarlas, mientras que a una mayor proporción de sustrato se saturan. Esto también considerando la gran concentración de hemicelulosa del sustrato Pe (Cuadro 4.7). La hemicelulosa de acuerdo con J. Pérez et al. (2002) es biodegradada directamente a ácido acético y azúcares monoméricos.

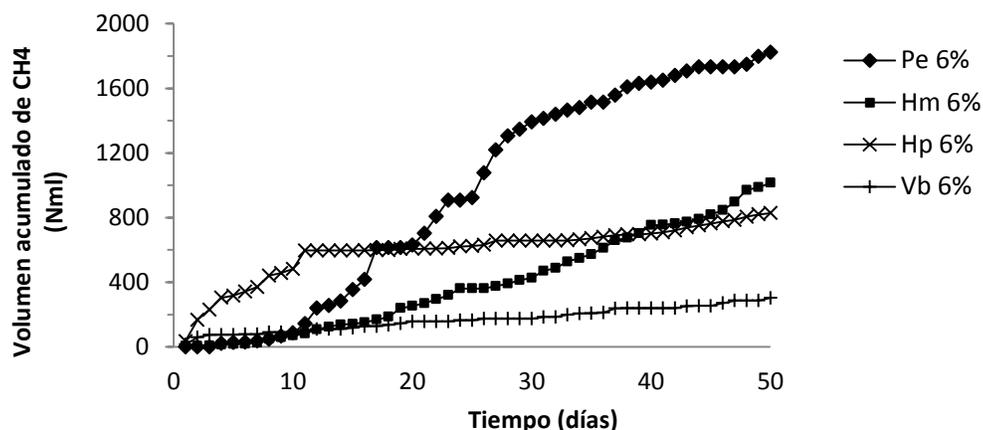


Figura 4.7. Volumen acumulado de metano según sustrato individual al 6% de contenido de sólidos

Independientemente del contenido de sólido en el reactor, no se observó fácilmente un descenso en la generación de metano al final del período de incubación. Para todos los sustratos, anteriormente al día 10, la baja producción de metano puede considerarse como fase de latencia. La fase de latencia sucede para Hm de manera similar al 6% y 8%. Para Hp 6% hay un período de estancamiento en la generación del metano desde el día 11 y hasta el final del tiempo de incubación, con un marginal aumento hacia el final. La producción de metano de Vb 6% es la menor del conjunto de todos los reactores (303 ml para el día 50), mientras que la producción de metano de Vb 8% es un 133% mayor (705 ml para el día 50).

En el Cuadro 2.3, se observa que los sustratos Hp y Vb poseen porcentajes de celulosa altos (69,5% y 63,9% respectivamente), no así de hemicelulosa (19,5% y 1,3%) y de lignina (4,4% y 18,6%). Esto es acorde al comportamiento de sus curvas de producción de metano, donde Hp 6% tuvo un pico de producción mayor que Vb 6%, debido a la baja hemicelulosa y a la barrera de lignina de Hp.

Para Hp, no hubo diferencia significativa ($P > 0,05$) en la producción de metano entre el contenido de sustrato de 8% y 6%. Para el sustrato Vb, el aumentar la razón de sustrato al 8% se generó 2,5 veces más metano que el contenido de 6%, así también la media de la producción diaria de metano es significativa ($P < 0,05$).

Tanto para el 8% como el 6% de sólidos, el sustrato con mayor producción es Pe. La segunda mejor producción es Hp, sin embargo la media de su producción diaria de metano es significativamente menor al sustrato Pe ($P < 0,05$).

La producción de metano mayor y más rápida se da en los sustratos al 6%, esto es posible indicio de que el aumento de la carga orgánica al 8% causa inhibición de la metanogénesis.

4.2.2 Co-digestión de sustratos lignocelulósicos

En la Figura 4.8 y Figura 4.9 se muestra la producción de metano de los reactores cuyo sustrato estuvo compuesto por una co-digestión de residuos lignocelulósicos. Se observa que Pe-Hp 8% tuvo la mayor producción en comparación con el resto de sustratos al 6%. El éxito de su co-digestión podría deberse al alto porcentaje de celulosa de Hp y al

alto porcentaje de hemicelulosa de Pe, ambos con una baja proporción de lignina de acuerdo con el Cuadro 2.3.

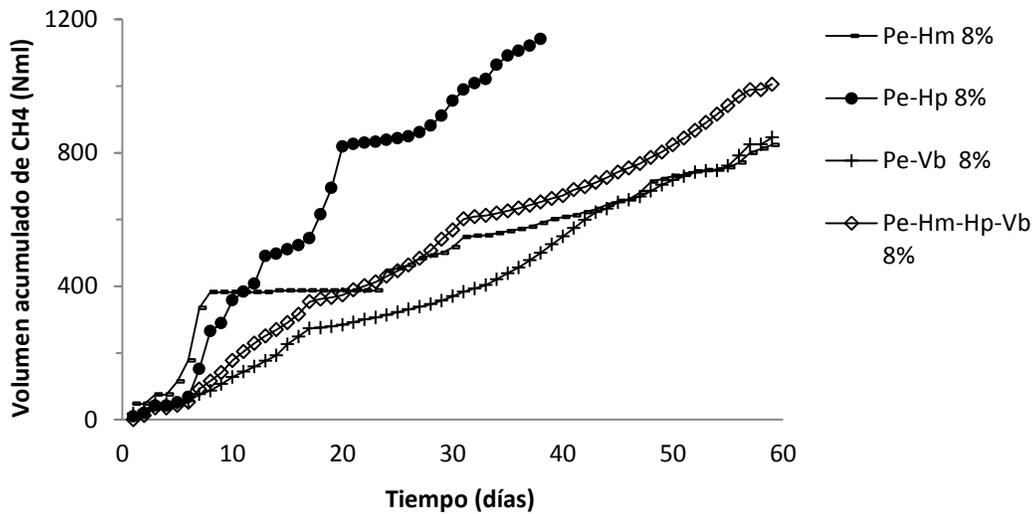


Figura 4.8. Volumen acumulado de metano según combinación de sustratos al 8% de contenido de sólidos

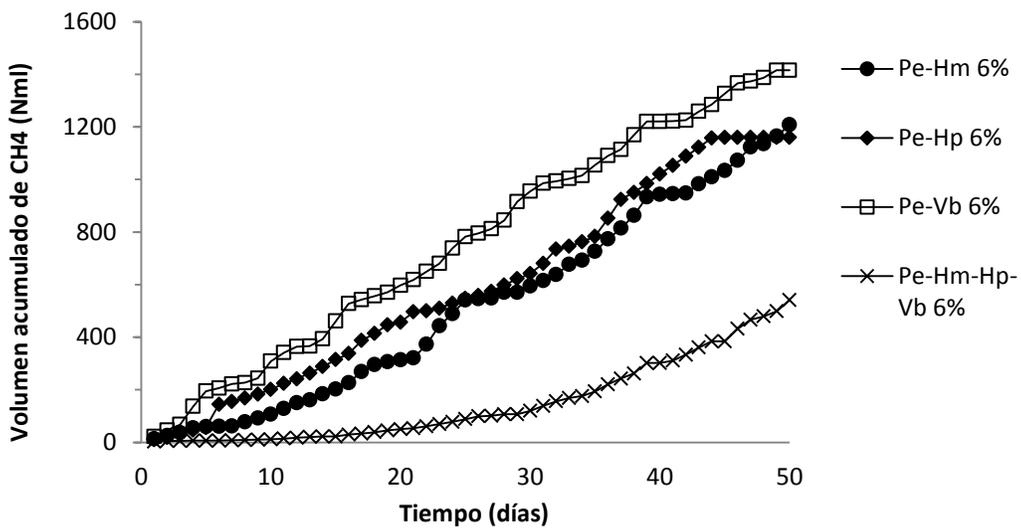


Figura 4.9. Volumen acumulado de metano según combinación de sustratos al 6% de contenido de sólidos

En el Cuadro 4.8 se observa que dicha relación de celulosa-hemicelulosa es 1 a 1 con muy poca lignina.

Cuadro 4.8. Relación de celulosa:hemicelulosa: lignina según co-digestión de sustrato

Sustrato	Relación celulosa/hemicelulosa/lignina según sustrato					
	40%- 60%	50%- 50%	33% c/u	25% c/u	60%-13%- 13%-13%	50%-10%- 10%-30%
Pe-Hm	1:4,5:0,3	1:5:0,3	---	---	---	---
Pe-Hp	1:0,8;0,1	1:1:0,2	---	---	---	---
Pe-Vb	1:0,7:0,4	1:1:0,4	---	---	---	---
Hm-Hp-Vb	---	---	1:0,7:0,2	---	---	---
Pe-Hm-Hp-Vb	---	---	---	1:1:0,2	1:2:0,3	1:1,3:0,3

Si se compara la producción media diaria de metano de Pe-Hp 6% con Pe-Hp 8% no hay diferencia significativa ($P > 0,05$) sin embargo hay una producción de metano mayor a una proporción mayor de sustrato en el reactor. La causa de esto puede deberse a la mayor producción de AGV y de acetato que alimenta a las bacterias metanogénicas y mantiene su actividad estable, mientras que si el contenido de sustrato es menor, el alimento puede ser insuficiente. Otra causa, el caso opuesto, es donde el menor contenido de sustrato en el reactor genera una sobreproducción de AGV que satura a las bacterias metanogénicas. Esto considerando que la cantidad de NaOH utilizada en el reactor y que facilitó la hidrólisis del sustrato es igual a la utilizada para el reactor a una proporción de sustrato mayor. Es decir si se reduce la carga orgánica en el reactor, la solubilización de la lignocelulosa no requerirá de la misma concentración de NaOH que para una carga orgánica mayor. El exceso de la base entonces puede tener un efecto inhibitorio para los metanógenos y acetógenos. Según reportan Rekha y Pandit (2013) para el tratamiento alcalino del pasto elefante, hay un límite de concentración de NaOH antes de que la acumulación sea tóxica para los microorganismos y los rendimientos de producción de metano decrezcan.

De acuerdo con la curva de producción de metano de Pe-Hm al 8% y comparada con la curva de producción de Pe 8%, se observa que Pe-Hm 8% acortó la fase de latencia de 10 días de Pe 8% y hay un pico de producción antes del día 10. Sin embargo, Pe 8% tiene una media de producción de metano significativamente mayor que Pe-Hm 8% ($P < 0,05$) para el final del período de incubación.

La producción de metano aumentó en un 367% para Pe-Vb 6% en comparación con Vb 6% de la Figura 4.7 y la diferencia de producción media diaria es significativa ($P < 0,05$). Se observa que Pe potencia la generación de metano de Vb, y efectivamente es debido al aumento de la cantidad de hemicelulosa en una relación 1 a 1 con la celulosa, en comparación con Vb cuya relación de celulosa y hemicelulosa es 1:0,02 como se tiene en el Cuadro 4.8.

Sobre la curva de producción de Vb 8% (Figura 4.6) en comparación con la curva de producción de Pe-Vb 8% (Figura 4.8), se observa que en el día 55 la generación por Vb 8% se estancó mientras que la generación por Pe-Vb 8% continúa. Se comprueba que la digestión de Pe requiere de mayores períodos de incubación que el resto de los sustratos y puede aumentar después del día 40. En el caso de una co-digestión de Pe con sustratos con porcentajes de celulosa mayores y cuyo período de latencia sea pequeño (Vb) se observa el caso de una generación de metano continua de más de 40 días.

Se observa que Pe mejora la producción de metano en la co-digestión de Pe-Hp y Pe-Hm que Hp y Hm individuales. Sin embargo, la producción de metano media por día de Pe-Hp y Pe-Hm es significativamente menor ($P < 0,05$) que la producción de Pe (tanto al 6% y 8%). Para las cuatro co-digestiones, el contenido de sólido de 6% muestra una producción de metano mayor y más estable durante el periodo de digestión.

Retomando el análisis de alcalinidad para los reactores al 6% y 8% en sus concentraciones de CO_3 y HCO_3 , se asumió una mayor producción de AGV en las muestras del 8%. Sin embargo como se dijo los rendimientos de generación de metano son mejores al 6% de sólidos, por ello se puede afirmar que en los reactores con carga orgánica de 8% se da una acumulación de los productos de la fermentación que satura a las bacterias metanogénicas y no hay una remoción adecuada de hidrógeno y acetato para una mayor generación de metano.

4.2.3 Efecto del tratamiento biológico

Como se muestra en la Figura 4.10, la generación de metano para el reactor Pe sin acelerador es aproximadamente 3 veces mayor que la producción de Pe+ac. Lo contrario sucede para Hm-Hp-Vb (Figura 4.11) donde el acelerador mejora la producción de metano en cerca de un 450%.

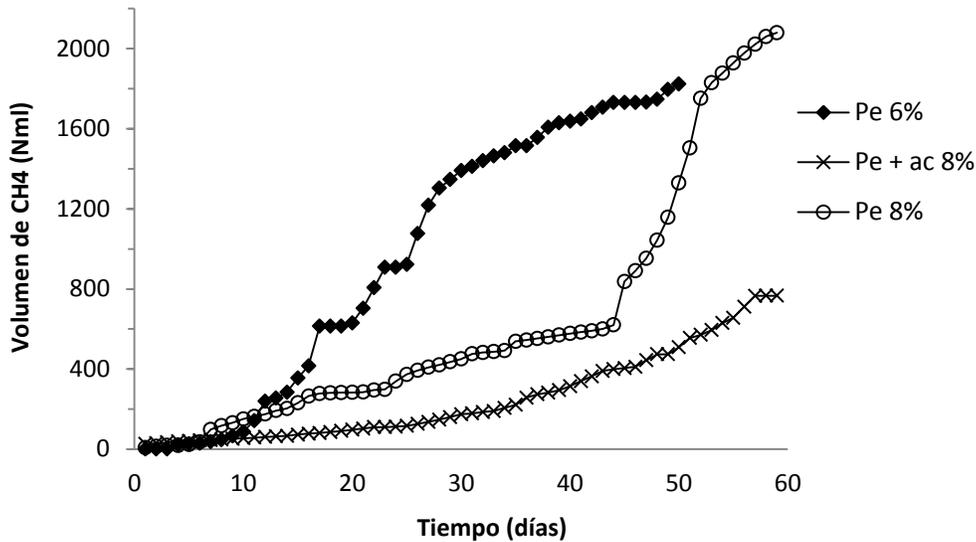


Figura 4.10. Efecto del acelerador y contenido de sólido en la producción acumulada de metano para Pe

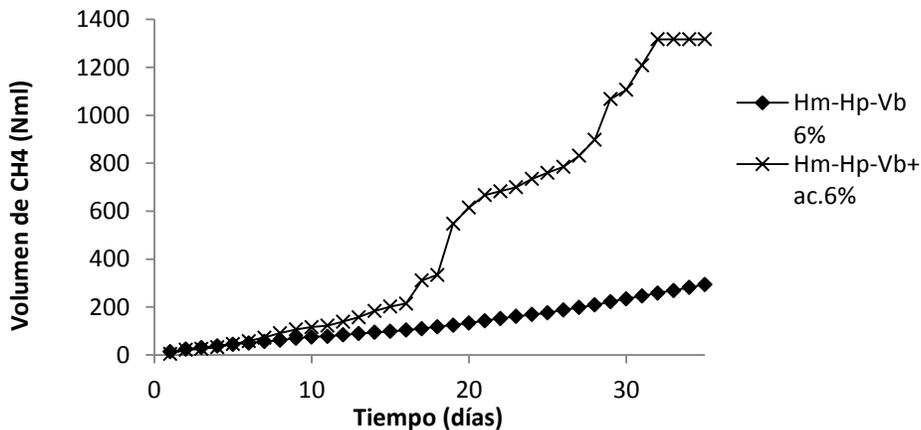


Figura 4.11. Efecto del acelerador en la producción acumulada de metano de Hm-Hp-Vb

Es posible explicar la producción menor de metano con tratamiento biológico para Pe debido a la composición lignocelulósica de este sustrato relacionado con el funcionamiento metabólico de los hongos para degradar la lignina. Estos microorganismos oxidan la lignina en su metabolismo secundario y necesitan de una fuente de energía que es elementalmente glucosa (Leisola et al., 2012). Por lo tanto, si la glucosa se agota, la degradación de la lignina por los hongos no sucede. En el caso de Pe, a pesar de no poseer el porcentaje mayor de lignina de los sustratos, la relación de celulosa, hemicelulosa y lignina es 1:6:1 (Cuadro 4.8) y la acción oxidativa de los hongos se ve limitada por el

acceso restringido a la celulosa. Este no es el caso de Hm-Hp-Vb, donde la relación de celulosa, hemicelulosa y lignina es más favorable, 1:0,7:0,2.

La Figura 4.12 presenta la producción de metano para la co-digestión de los 4 sustratos y se observa que la curva de producción de Pe- Hm-Hp-Vb +ac se eleva sobre la curva de Pe-Hm-Hp-Vb para ambas razones de sólido. A diferencia de Pe+ ac, el tratamiento biológico fue favorable para la generación de metano debido a celulosa que aportan Hp, Hm y Vb, cuya relación con la hemicelulosa y lignina es 1:1:0,2 (Cuadro 4.8)

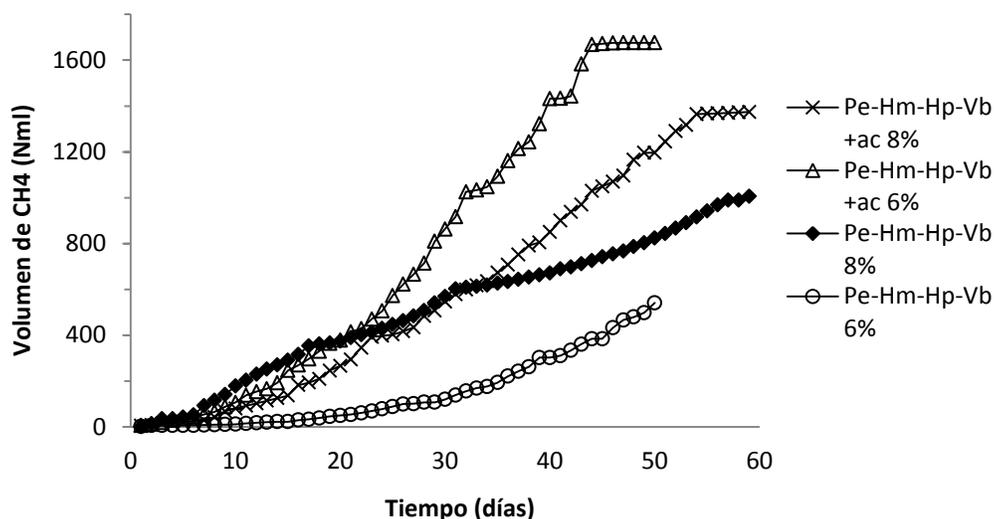


Figura 4.12. Co-digestión de sustratos con acelerador y sin acelerador a diferentes razones de sólido

La co-digestión de Pe-Hm-Hp-Vb 6% reportó una producción de metano menor que Pe-Hm-Hp-Vb 8% pero dicha diferencia no es significativa ($P > 0,05$). Se ha observado que a mayor contenido de materia orgánica en el reactor, mayor es la producción de AGV cuando las barreras recalcitrantes de la lignocelulosa no inhabilitan el proceso. Para el sustrato Pe-Hm-Hp-Vb, la proporción de hemicelulosa y lignina juntas supera a la celulosa disponible, por lo que con el mismo tratamiento alcalino el contenido menor de sustrato tendrá la mayor producción de AGV, la cual es posible que haya saturado la actividad metanogénica y consecuentemente disminuido la producción de metano del reactor Pe-Hm-Hp-Vb 6%.

La Figura 4.13 muestra la producción de metano de las mezclas A, B, C y D de la Serie 4. Para la mezcla A, la relación de celulosa, hemicelulosa y lignina en el reactor es de

1:2:0,3 (Cuadro 4.8). Las barreras físicas de la hemicelulosa y la lignina superan a la celulosa de fácil acceso para ser digerida y por ello la producción de metano es baja (520 ml en 35 días). El máximo pico de producción se dio en el día 24 y posteriormente la producción se estabilizó. La mezcla B que posee la misma relación de celulosa, hemicelulosa y lignina que A, disminuye la producción de metano debido a la adición del acelerador y a la baja proporción de celulosa que imposibilita la capacidad oxidativa de los hongos.

La mezcla C muestra la producción más baja de metano en 35 días de digestión. A pesar de su proporción mayor de Pe y Vb en la co-digestión, no se reprodujo el comportamiento de Pe-Vb 6% sino que su curva de producción es similar a Vb 6%, donde la digestión anaerobia se inhibió. Para Pe-Vb 6% la relación entre celulosa, hemicelulosa y lignina fue 1:0,7:0,2 y la producción de metano es 10 veces mayor, mientras que para la mezcla C dicha relación es 1:1,3:0,3. Se observa que las barreras recalcitrantes de la lignocelulosa causaron inestabilidad en el reactor.

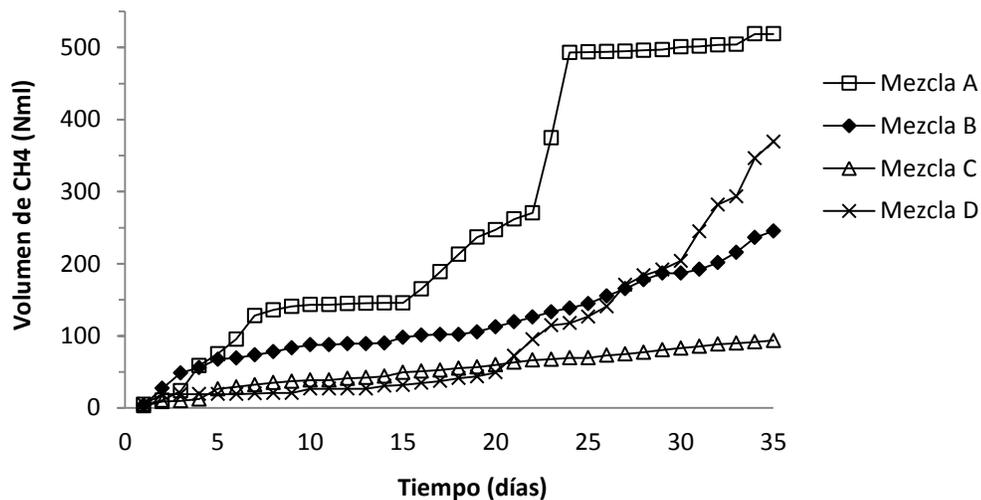


Figura 4.13. Producción de metano de la co-digestión de las mezclas A, B, C y D

La mezcla D sigue el mismo comportamiento de C hasta el día 20, cuando su producción de metano aumentó y continuó creciendo hasta el término del periodo de incubación, posiblemente por la degradación efectiva de las barreras recalcitrantes a causa del acelerador y el tratamiento alcalino, sin embargo la producción de metano total no fue significativamente mayor en el conjunto de muestras ($P > 0,05$).

Los resultados de producción de metano de la Serie experimental 4 fueron los más bajos de todo el experimento y posiblemente esto se debió a las condiciones de la DA. La temperatura del sistema fue menor comparada con el resto de las series experimentales, esto afectó negativamente la producción de metano dado que retarda la actividad enzimática de los microorganismos en el tiempo de incubación dado. Dicho tiempo de incubación fue de 35 días y se escogió observando el tiempo promedio de máxima producción de metano reportado por los reactores de las series anteriores.

4.3 ANÁLISIS DE AME Y PBM

4.3.1 Remoción de sólidos volátiles

De acuerdo con el Cuadro 4.9 del porcentaje de sólidos totales de los sustratos en estudio, las muestras están compuestas por agua en su mayoría, siendo la masa sólida efectiva menor al 10% para los cuatro sustratos. De dicho 10%, en promedio 90,3% corresponde a la materia biodegradable o sólidos volátiles.

Cuadro 4.9. Promedio del contenido de sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV) en los sustratos lignocelulósicos en estudio

Sustrato crudo	% ST	%STV
Pe	15,8	14,0
Hm	8,5	7,7
Hp	10,6	9,6
Vb	7,1	6,5
Pe-Hp-Hm-Vb	11,0	10,0

Chernicharo (2007) y Cimochowicz-Rybicka & Rybicki, (2013) señalan que un digester anaerobio correctamente operado tiene porcentajes de remoción de sólidos volátiles de 50-60%, lo cual confirma que el sistema se encuentra estable para todos los reactores de acuerdo con los resultados del Cuadro 4.11, de acuerdo con los valores de lodo digerido de la Serie 4 del Cuadro 4.10.

Cuadro 4.10. Promedio del contenido de sólidos totales (ST) y sólidos totales volátiles (SV) en los sustratos lignocelulósicos digeridos de la Serie 4

Sustrato digerido	% ST	% STV
Hm-Hp-Vb	4,9	4,3
Hm-Hp-Vb + ac	4,6	4,1
Mezcla A	5,5	4,9
Mezcla B	5,8	5,3
Mezcla C	6,0	5,4
Mezcla D	5,4	4,9

La mayor remoción del SV fue para la mezcla A con un 60% de remoción, A también reportó el mayor rendimiento de producción de metano de la Serie 4 (Figura 4.13). Los resultados de remoción de SV apuntan a la eficacia del tratamiento alcalino para la degradación de la lignocelulosa debido al resquebrajamiento y desgaste de la superficie de los residuos agrícolas.

Cuadro 4.11. Remoción de sólidos volátiles totales para la Serie 4

Sustrato	%STV de sustrato crudo	%SV de sustrato digerido	% Reducción
Hm-Hp-Vb	7,9	4,3	47,6
Hm-Hp-Vb +ac	7,9	4,1	50,2
Mezcla A	11,5	4,9	60,3
Mezcla B	11,5	5,3	56,9
Mezcla C	10,7	5,4	52,4
Mezcla D	10,7	4,9	57,0

4.3.2 Actividad Metanogénica Específica

De acuerdo con los valores reportados en el Cuadro 4.12 sobre AME de los sustratos en estudio, el valor de AME de Hm-Hp-Vb + ac y Pe-Hm-Hp-Vb + ac se encuentre entre los resultados mayores del conjunto de datos, seguido por Pe 8%, Hp 6% y Pe-Hm 8%. El resto de los sustratos son valores dentro de la media del conjunto de datos.

Los valores de AME para los sustratos individuales Pe y Hp se encuentran dentro del ámbito esperado según las referencias del Cuadro 2.5. Sin embargo, se observa que los valores de AME no son consecuentes con los resultados de la producción de metano según volumen acumulado de la sección anterior para Pe, Pe-Hp, Vb y Pe-Hm-Hp-Vb.

Cuadro 4.12. AME según sustrato lignocelulósico a CNPT

Sustrato	AME		AME	
	(gDQO/gSV.d)		(L CH ₄ /gSV.d)	
	8%	6%	8%	6%
Pe	0,746	0,391	0,264	0,138
Pe+ ac	0,167	--	0,059	--
Pe-Hm	0,614	0,370	0,217	0,131
Hm	0,383	0,536	0,135	0,190
Pe-Hp	0,407	0,422	0,144	0,149
Hp	0,223	0,674	0,079	0,239
Pe-Vb	0,140	0,390	0,050	0,138
Vb	0,309	0,239	0,084	0,084
Pe-Hm-Hp-Vb	0,159	0,270	0,056	0,096
Pe-Hm-Hp-Vb + ac	0,295	0,792	0,104	0,280
Hm-Hp-Vb	--	0,093	--	0,033
Hm-Hp-Vb + ac	--	1,519	--	0,538

Cuadro 4.13. Comparación de los resultados de AME según sustrato con y sin adición de acelerador a CNPT

Sustrato	AME (gDQO/gVS.d)		AME (L CH ₄ /gVS.d)	
	+ acelerador		+ acelerador	
Pe-Hm-Hp-Vb 8%	0,159	0,295	0,056	0,104
Pe-Hm-Hp-Vb 6%	0,270	0,792	0,096	0,280
Mezcla A-B	0,583	0,101	0,206	0,036
Mezcla C-D	0,075	0,240	0,027	0,085

De acuerdo con la Ecuación 2.6 para el cálculo de AME, se utiliza la pendiente de cada curva de producción de metano, independientemente de si el comportamiento de la

producción en el tiempo es constante o se trata de un único pico de producción. Este es el caso de Pe 8%, cuyo valor de AME es superior a Pe 6% (Figura 4.14).

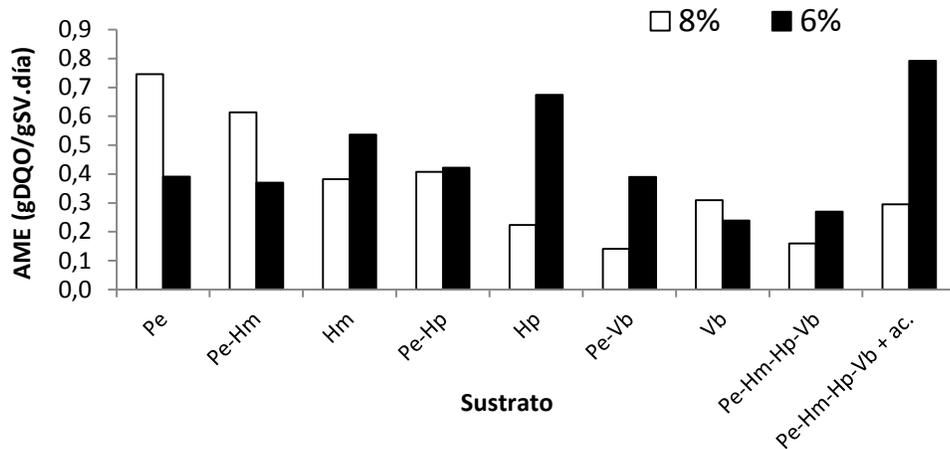


Figura 4.14. Actividad metanogénica (gDQO/gSV.d) de sustrato según contenido de sólidos

La Figura 4.15 muestra la producción diaria de metano para los sustratos que reportan la mayor actividad metanogénica y se observa que el comportamiento entre sustratos difiere entre sí por lo que el valor de AME es independiente del desempeño del sustrato en el tiempo. Así Pe-Hm al 8% y Hp al 6% cuya producción máxima sucede en los primeros 15 días, luego disminuye y no se vuelve a dar un pico de producción importante, mientras que Pe 8% presentó una producción de metano baja hasta el día 45.

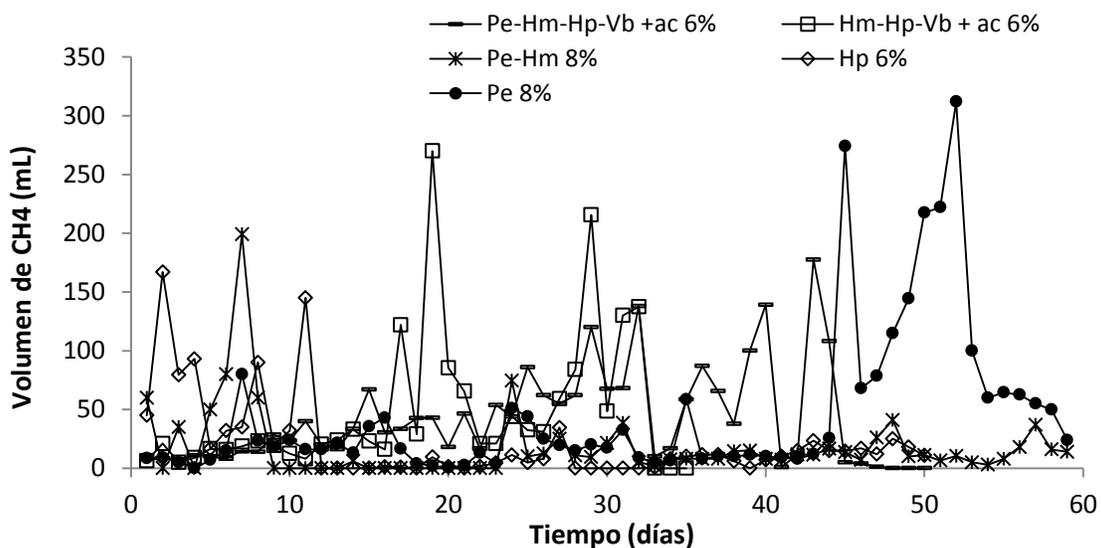


Figura 4.15. Producción diaria de metano (mL) de sustratos seleccionados según AME

4.3.3 Potencial Bioquímico de Metano

En el Cuadro 4.14, 4.15 y 4.16 se muestran los valores de máxima generación de metano (B_0) y coeficiente de crecimiento bacteriano (k) calculados por el método Gauss Newton al modelar la información experimental a la forma exponencial de la Ecuación 2.13. Algunos de los valores modelados son imposibles de obtener en la práctica, por ejemplo, el ajuste que hace el método para los datos experimentales de producción de metano de la mezcla de Pe-Hm-Hp-Vb+ ac al 6% dice que 1 gramo de sólidos volátiles de dicho sustrato llegara a producir un máximo de 16895,83 L de CH_4 en los 50 días de TRH con una tasa de crecimiento bacteriano de 6,210 (d^{-1}). Si se observa el Cuadro 2.5 donde se tiene un ámbito de B_0 para la mayor parte de los sustratos del estudio, es claro que para algunos sustratos la modelación sobrepasa los valores esperados y son casos irreales.

Dado que el método Gauss- Newton intenta encontrar una aproximación a la solución lo más cercana posible tanto si el sistema de datos tiene una solución única como si no tiene solución, los valores obtenidos indican que los datos experimentales de algunos de los sustratos no convergen, es decir no siguen la forma exponencial y no pueden ser modelados a la misma bajo el criterio de tolerancia establecido.

Como se observa en el Cuadro 4.14, 4.15 y 4.16, los valores de B_0 y k introducidos para inicializar el algoritmo de Gauss Newton coinciden con los valores de B_0 y k de sustratos lignocelulósicos reportados en la literatura. Sin embargo, también se modificaron dichos parámetros iniciales a valores mayores para observar la convergencia (es el caso de Pe 6%, Pe-Hm-Hp-Vb+ ac 6% y Hm 6%) y se muestra la suma mínima de los cuadrados de los residuos entre los datos experimentales y la ecuación exponencial encontrada con los parámetros iniciales (S_r), pero la convergencia no se da en todos los casos. Cuando el sistema converge con los valores iniciales dados, sin importar cuantas iteraciones realice el algoritmo, S_r se mantiene en un valor, pues este es el valor que difiere del modelo exponencial en la distancia mínima. La curva que se grafica con dichas estimaciones tiene la forma exponencial, en el rango más cercano a los parámetros iniciales dados. Estos valores son, como apunta Griva et al., (2009) una conjetura cercana a la solución, es por ello que debe tenerse criterio de los datos esperados de B_0 y k .

Cuadro 4.14. Máxima producción de metano (Bo) y coeficiente cinético (k) modelados para los sustratos al 8% y su suma de residuos (Sr) con una tolerancia de convergencia de 0,005 y un máximo de 100 iteraciones

Sustrato	Bo inicial	Bo modelado	k inicial	k modelado	$S_r = \sum_{i=1}^n [y_i - B_o(1 - e^{-kx_i})]^2$
Pe	1,75	8,273	0,2	0,086	80,6972
Pe+ ac	0,80	49,53	0,165	0,254	8,88739
Pe-Hm-Hp-Vb	0,70	3,778	0,005	0,005	0,03951
Pe-Hm-Hp-Vb+ ac	1,55	11,616	0,09	0,065	25,12757
Pe-Hm	1,00	0,861	0,2	0,034	0,19443
Pe-Hp	0,50	3,395	0,09	0,011	0,13238
Pe-Vb	1,00	4,334	0,005	0,020	4,61704
Hm	0,50	1,957	0,01	0,008	0,05657
Hp	0,55	1,347	0,02	0,015	0,02724
Vb	1,00	1,005	0,025	0,022	0,052512

Cuadro 4.15. Máxima producción de metano (Bo) y coeficiente cinético (k) modelados para los sustratos al 6% y su suma de residuos (Sr) con una tolerancia de convergencia de 0,005 y un máximo de 100 iteraciones

Sustrato	Bo inicial	Bo modelado	k inicial	k modelado	$S_r = \sum_{i=1}^n [y_i - B_o(1 - e^{-kx_i})]^2$
Pe	4,50	4,77	0,05	0,034	23,62493
Pe-Hm-Hp-Vb	0,70	9,55	0,075	0,091	5,84817

Sustrato	Bo inicial	Bo modelado	k inicial	k modelado	$S_r = \sum_{i=1}^n [y_i - B_o(1 - e^{-kx_i})]^2$
Pe-Hm-Hp-Vb+ ac	4,00	16895,83	0,015	6,210	44,81644
Pe-Hm	1,00	3,73	0,076	0,009	4,58939
Pe-Hp	1,00	2,41	0,063	0,003	2,77596
Pe-Vb	1,00	8,20	0,05	0,004	0,02944
Hm	5,00	1,56	0,4	0,0001	24,5622
Hp	1,50	0,72	0,7	0,110	0,09514
Vb	2,00	0,35	0,05	0,023	0,03043

Cuadro 4.16. Máxima producción de metano (Bo) y coeficiente cinético (k) modelados para los sustratos de la Serie 4 y su suma de residuos con una tolerancia de convergencia de 0,005 y un máximo de 100 iteraciones

Sustrato	Bo inicial	Bo modelado	k inicial	k modelado	$S_r = \sum_{i=1}^n [y_i - B_o(1 - e^{-kx_i})]^2$
Hm-Hp-Vb	2,00	0,84	0,058	0,0008	0,50503
Hm-Hp-Vb+ ac	4,50	0,08	0,25	0,0938	10,15940
Mezcla A	4,75	2,05	0,09	0,0006	4,83521
Mezcla B	2,00	1,08	0,05	0,0064	0,01012
Mezcla C	1,00	0,15	0,05	0,0282	0,00076
Mezcla D	6,00	3,55	0,2	0,0726	2,32068

No haber logrado el ajuste de los datos experimentales al modelo exponencial puede implicar que la dinámica de la digestión anaerobia presentó irregularidades. Los valores de B_0 y k del Cuadro 2.5 son utilizados como una guía del ámbito de producción por sustrato específico y no es posible saber que tan significativas son las diferencias en el comportamiento de los datos experimentales a lo largo del tiempo de incubación, basados únicamente en los resultados del modelo exponencial del PBM.

Puede considerarse que la expresión exponencial de la Ecuación 2.13 haya sido ineficaz para ajustarse a la información experimental. Dicha expresión es la base de la digestión anaerobia en su formación de producto (o consumo de sustrato) como se desarrolló en el capítulo 2, pero concretamente es una forma muy generalizada y resumida para modelar un proceso extremadamente complejo. Por ello, se han realizado numerosos estudios con el objetivo de afinar el modelo exponencial y las modificaciones propuestas, como las ecuaciones modificadas de Gompertz, han demostrado resultados más satisfactorios. Sin embargo, para este trabajo no fueron aplicadas dichas ecuaciones debido a la falta de información del proceso de digestión y de caracterización del sustrato.

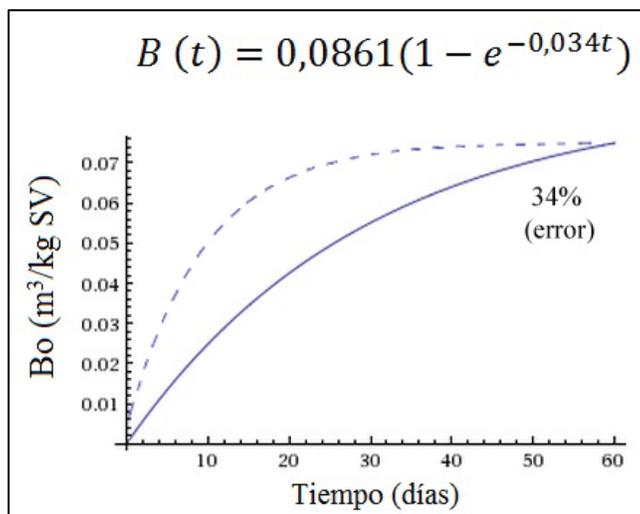
El Cuadro 4.17 muestra los datos experimentales según sustrato que convergieron con la forma exponencial de la producción de metano.

Cuadro 4.17. Sustratos cuyos datos experimentales convergieron con el modelo teórico de la ecuación exponencial

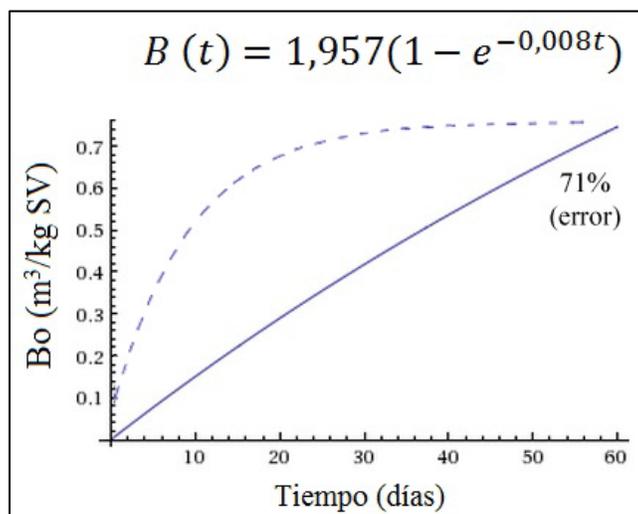
Sustrato	Parámetro inicial		i.c.*	Parámetro modelado		$S_r = \sum_{i=1}^n [y_i - B_o(1 - e^{-kx_i})]^2$
	B _o (NL/g SV)	k (d ⁻¹)		B _o (NL/g SV)	k (d ⁻¹)	
Pe-Hm-Hp-Vb (8%)	0,70	0,005	26	3,778	0,005	0,03951
Pe-Hm (8%)	1,00	0,2	6	0,861	0,034	0,19443
Pe-Hp (8%)	0,50	0,09	25	3,395	0,011	0,13238
Hm (8%)	0,50	0,01	11	1,957	0,008	0,05657
Hp (8%)	0,55	0,02	8	1,347	0,015	0,02724
Vb (8%)	1,00	0,025	3	1,005	0,022	0,05251
Pe-Vb (6%)	1,00	0,05	49	8,20	0,004	0,02944
Hp (6%)	1,50	0,7	9	0,72	0,110	0,09514
Mezcla B (6%)	2,00	1,08	8	1,08	0,0064	0,01012

*i.c. Número de iteración que dio la convergencia

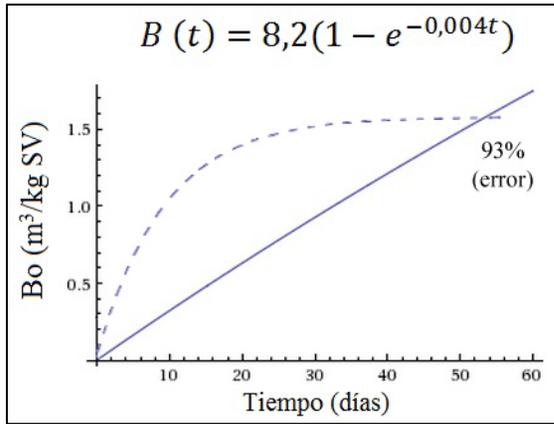
A continuación se muestran las curvas de producción de metano de los sustratos cuya información experimental convergió con el modelo exponencial con su respectivo B_0 y k modelado del cuadro anterior. La curva punteada corresponde a $B_0 = 0,57 \text{ NL/g SV}$ y $k = 0,1 \text{ d}^{-1}$ utilizados como referencia teórica de acuerdo con el Cuadro 2.5 y como margen de error para el ajuste de los datos experimentales.



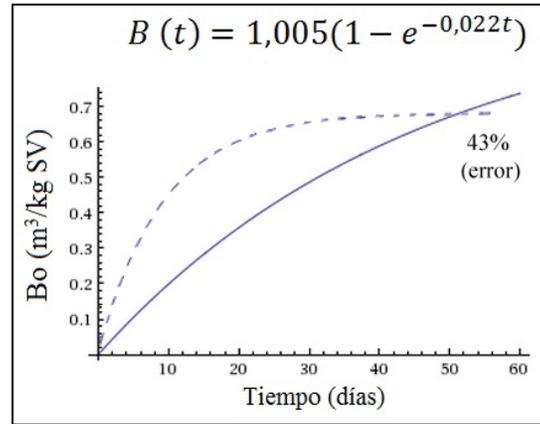
a) Pe-Hm 8%



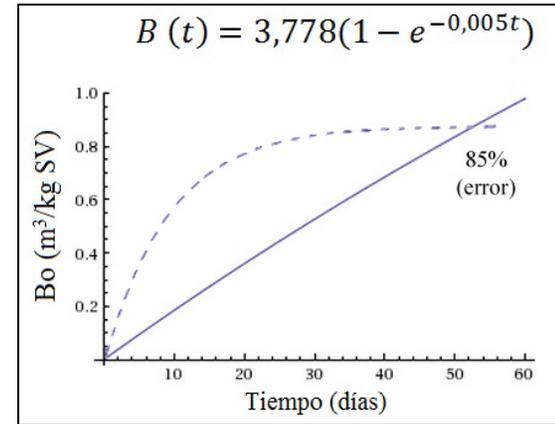
b) Hm 8%



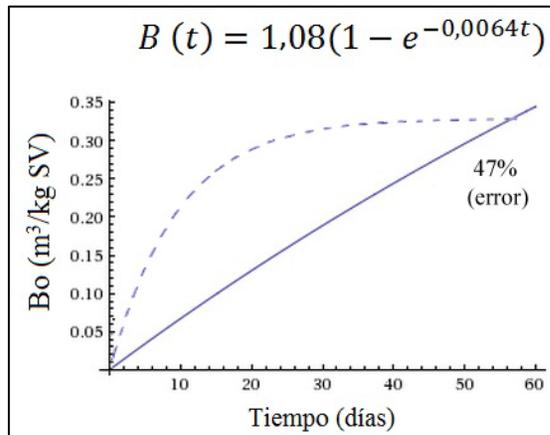
c) Pe-Vb 6%



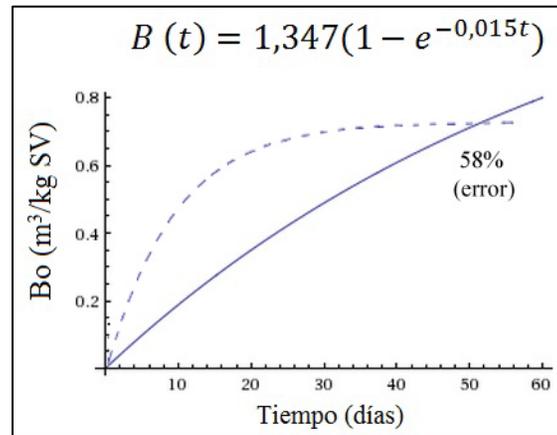
d) Vb 8%



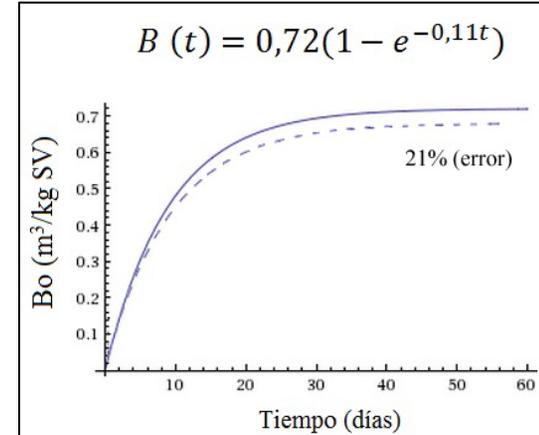
e) Pe-Hm-Hp-Vb 8%



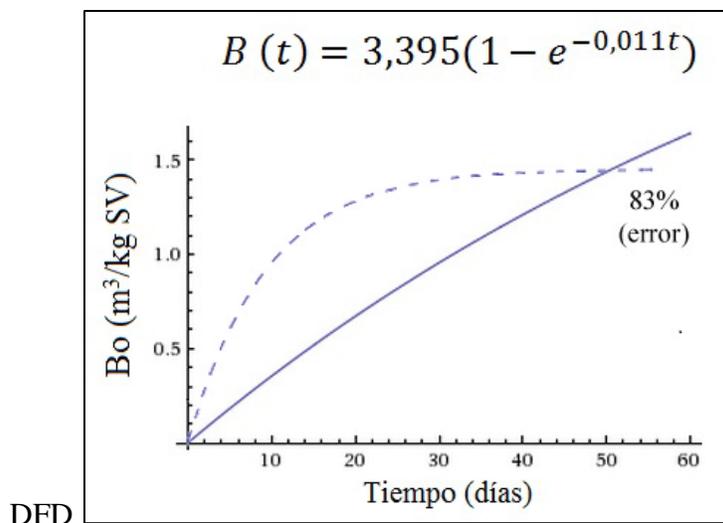
f) Mezcla B



g) Hp 8%



h) Hp 6%



i) Pe-Hp 8%

Figura 4.16. Potencial Bioquímico de Metano de sustratos determinados

Se observa que predomina el comportamiento de la curva que asemeja una recta y no el comportamiento exponencial. Los resultados de Pe-Hm-Hp-Vb (8%), Pe-Hp (8%) y Pe-Vb (6%) son casos no precedidos en la literatura, a pesar de la convergencia, su producción de metano máxima (Bo) es muy grande.

Lo anterior es consecuente con los resultados experimentales donde la producción de metano es continua y no se observa un estancamiento durante el TRH.

La modelación del PBM de Hp 6% es la más satisfactoria del conjunto, dado que las estimaciones de Bo y k se encuentran en el ámbito esperado para residuos lignocelulósicos, lo cual se refleja en la forma de la curva.

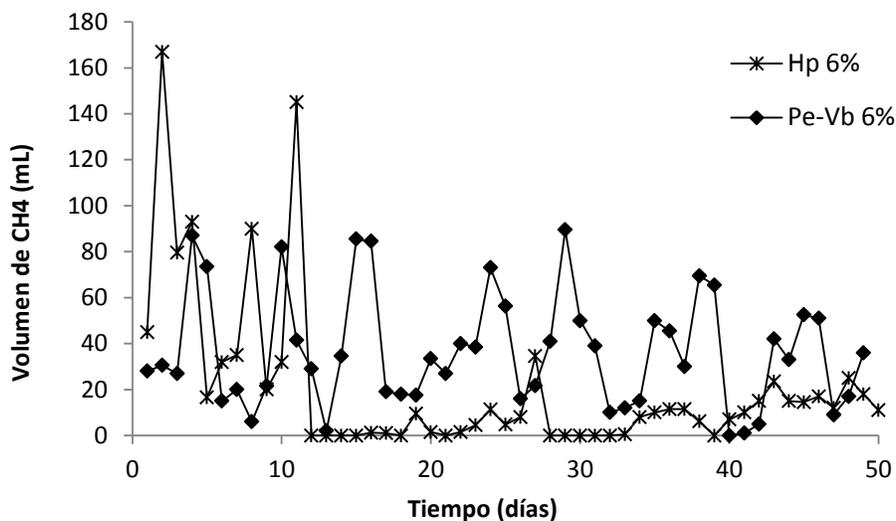


Figura 4.17. Producción diaria de metano de Hp 6% y Pe-Vb 6%.

En la Figura 4.17, se observa la comparación entre el mejor resultado de modelación de PBM (Hp 6%) y el peor resultado (Pe-Vb 6%) en su producción de metano diaria a lo largo del TRH. Se observa que Hp 6% se ajusta al modelo exponencial de DA porque una vez que las bacterias han consumido el sustrato disponible (y generado la máxima producción de metano) en el día 11, su tasa de crecimiento (y consecuentemente producción de metano) se estabiliza o decrece. Mientras que para Pe-Vb 6%, el consumo del sustrato es inconstante en el tiempo, lo que provoca picos de generación de metano. Este comportamiento indica que la disponibilidad de sustrato y el acceso de las bacterias al mismo es mayor para Hp que para Pe-Vb. En el Cuadro 4.7 y 4.8, según las relaciones de celulosa, hemicelulosa y lignina de ambos sustratos, se observa que efectivamente la Hp tiene ventaja en el porcentaje global de celulosa sobre el porcentaje de hemicelulosa y lignina juntos.

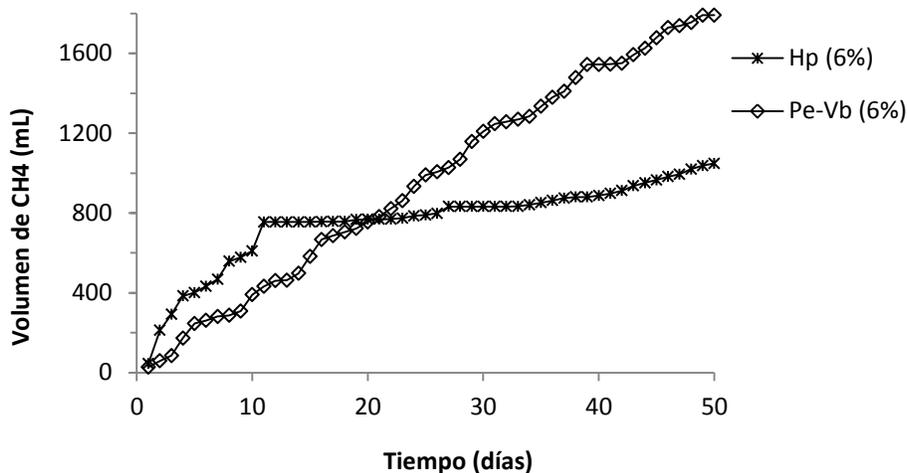


Figura 4.18. Curvas de producción de metano para mejor (Hp 6%) y peor (Pe-Vb 6%) resultado de PBM

La Figura 4.18 muestra que Pe-Vb 6% posee mayor producción de metano en el acumulado, a pesar de la inestabilidad de la producción en el tiempo, que Hp. Esto puede deberse a un efecto inhibitorio de la solución alcalina en el proceso porque como se referenció en el Cuadro 4.7, el contenido de celulosa del sustrato supera en más de 50% las barreras de hemicelulosa y lignina.

4.4 SUSTRATOS PARA COGENERACIÓN ELÉCTRICA

Se utilizaron dos criterios para determinar los sustratos con mejor rendimiento en su producción de metano y consecuentemente mejor aprovechamiento energético, dichos criterios son: producción de metano promedio en el período de incubación (desplazamiento volumétrico) y los valores de B_0 obtenidos al modelar los datos experimentales que sean similares a los valores del Cuadro 2.5.

En la Figura 4.19 se muestra la generación de metano diaria a lo largo de 50 días de los sustratos de mejor producción promedio; y la Figura 4.20 muestra los sustratos seleccionados según la modelación PBM. El análisis de los picos de producción de ambos grupos de sustratos permite determinar el TRH del reactor.

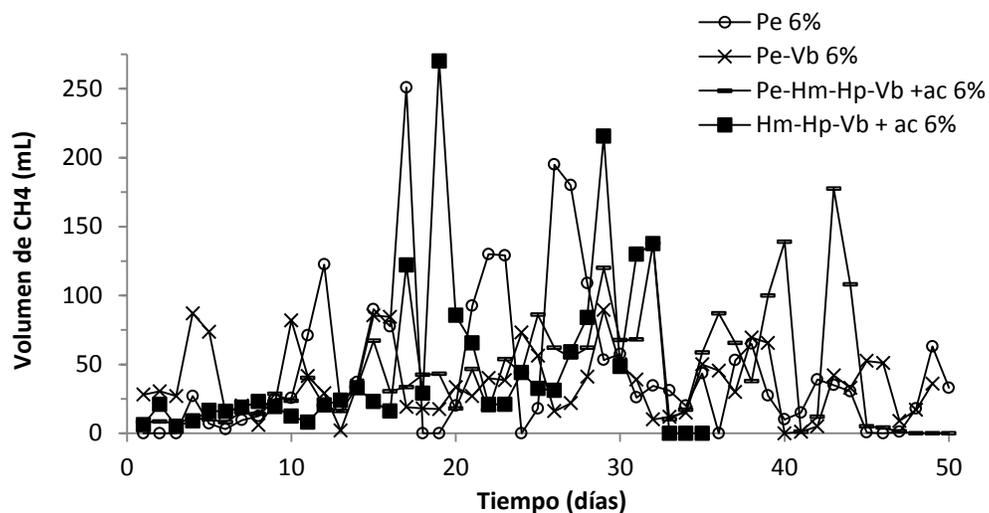


Figura 4.19. Producción diaria de metano (mL) de sustratos seleccionados según volumen acumulado

Se observa un comportamiento de varios picos de producción durante el tiempo de incubación y no se observa una caída de la producción de metano en la Figura 4.19, mientras que en la Figura 4.20 dichos picos de producción se concentran aproximadamente en 10 días y posteriormente la producción de metano es constante.

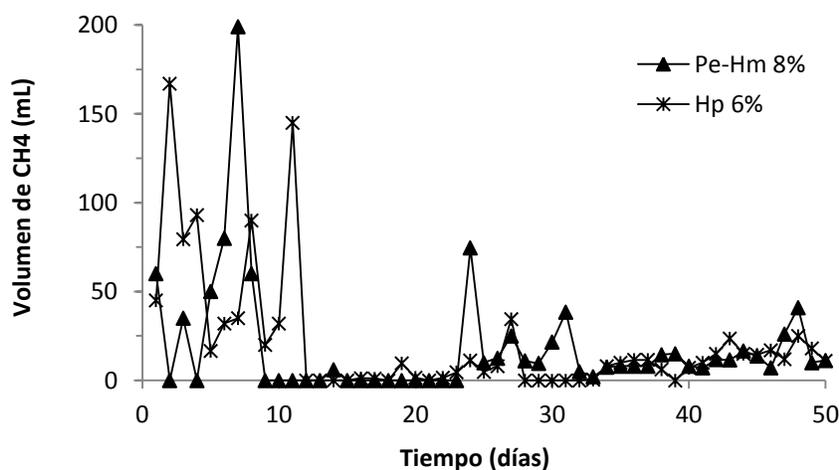


Figura 4.20. Generación diaria de metano (mL) de sustratos seleccionados según PBM

Por ello, se considera el TRH de 40 días para los sustratos de la Figura 4.19 y de 15 días para los sustratos de la Figura 4.20. AME como valor de optimización de la producción de metano del sustrato no se utiliza para la determinación del TRH.

En el Cuadro 4.18, se presenta la producción de metano por kg de sólido volátil diario de los sustratos escogidos. Se observa que el valor promedio de producción de metano es efectivamente menor que el valor de AME, lo mismo sucede para los valores de de PBM.

Cuadro 4.18. Mejores sustratos de acuerdo a resultados de producción de metano promedio, PBM y AME

Sustrato	Producción	PBM	AME
	promedio (Nm ³ CH ₄ /kgSV.d)	(Nm ³ CH ₄ /kgSV.d)	(Nm ³ CH ₄ /kgSV.d)
Pe (6%)	0,00243	---	0,138
Pe-Vb (6%)	0,00186	---	0,138
Pe-Hm-Hp-Vb + ac (6%)	0,00298	---	0,280
Hm-Hp-Vb + ac (6%)	0,00400	---	0,538
Hp (6%)	---	0,014	0,239
Pe-Hm (8%)	---	0,002	0,217

A partir de la producción de metano por kg de SV se calculó la producción efectiva de metano para una tonelada de materia fresca y se realizó la conversión a electricidad y calor de dichos resultados con un motor de combustión para cogeneración de 35% de electricidad (3,80 kWh/m³ CH₄) y 65% de calor (7,06 kWh/m³ CH₄). Los datos se muestran en el Cuadro 4.19.

Cuadro 4.19. Generación eléctrica y térmica por tonelada de materia fresca (mf) según producción de metano promedio y según modelación PBM

Sustrato	Estimación según producción promedio de CH ₄		
	CH ₄ (m ³ /ton mf)	Electricidad (kWh/ton mf)	Calor (kWh/ton mf)
TRH = 40 días			
Pe (6%)	14	52	96
Pe-Vb (6%)	8	29	54
Pe-Hm-Hp-Vb + ac (6%)	12	45	84
Hm-Hp-Vb + ac (6%)	13	48	90

Sustrato	Estimación según producción promedio de CH ₄		
	CH ₄ (m ³ /ton mf)	Electricidad (kWh/ton mf)	Calor (kWh/ton mf)
	TRH = 15 días		
Hp (6%)	20	76	142
Pe-Hm (8%)	3	12	23

Con la producción de metano por tonelada de materia fresca es posible visualizar a escala real la factibilidad de la inversión en un proyecto de cogeneración con los sustratos escogidos, considerando además la tecnología que debe ser adquirida para la depuración y combustión del biogás. Sin embargo para los sustratos en estudio y de acuerdo con el Cuadro 2.5 y valores reportados por Gerlach, Grieb, & Zerger (2013) y Al Seadi et al. (2008) la generación de metano esperada para pastizales y residuos orgánicos es mayor a 60 m³/ton materia fresca. Como se observa, el rendimiento de la producción de metano promedio por kg de SV y también según la modelación del PBM, es considerablemente inferior al valor reportado en la teoría. Así, la producción eléctrica y térmica es significativamente menor.

El Cuadro 4.20 muestra los valores de generación eléctrica y térmica diarios para los sustratos seleccionados utilizando como ejemplo un digestor de carga discontinua de 30 m³ con 15 m³ de volumen efectivo, 6% y 8% de sólido introducido y tiempos de retención de 40 y 15 días.

Cuadro 4.20. Generación eléctrica y térmica diaria promedio y optimizada para un digestor de 30 m³ con 6% y 8% de sólidos

Sustrato	Producción promedio de CH ₄			Producción de CH ₄ optimizada (AME)		
	CH ₄	Generación		CH ₄	Generación	
	(m ³ / día)	electricidad (kWh por día)	calor (kWh por día)	(m ³ / día)	electricidad (kWh por día)	calor (kWh por día)
TRH = 40 días						
Pe (6%)	0,30	1,20	2,15	17	66	122
Pe-Vb (6%)	0,20	0,65	1,20	13	48	90
Pe-Hm-Hp-Vb+ac (6%)	0,30	1,02	1,90	25	96	178
Hm-Hp-Vb+ac (6%)	0,30	1,10	2,00	38	146	271
TRH = 15 días						
Hp (6%)	1,20	4,60	8,50	21	78	145
Pe-Hm (8%)	0,30	1,00	1,80	28	107	199

La carga orgánica que debe ser introducida para dicho reactor cada 15 días (para sustratos Hp y Pe-Hm) y cada 40 días (para sustratos Pe, Pe-Vb, Pe-Hm-Hp-Vb+ac y Hm-Hp-Vb+ac) equivale a 900 kg y 1200 kg. Sin embargo, el aprovechamiento efectivo para la generación de metano se da sobre la base de SV y para los sustratos lignocelulósicos en estudio, el contenido de biomasa activa es bajo (Cuadro 4.9).

Es por ello que la base de SV y una aproximación anual del tonelaje de producción agrícola por hectárea (y residuos) que puede incorporarse al digestor son fundamentales para identificar los cultivos promisorios. Si no es posible suplir la demanda de la materia prima que debe alimentar al reactor para alcanzar los rendimientos de metano previstos, el sustrato no es rentable en la práctica.

No obstante, los resultados de producción eléctrica son relativamente favorables de acuerdo a un estudio realizado en el año 2006 por la Dirección Sectorial de Energía, donde

se caracterizó el consumo energético del sector residencial costarricense según grupo socioeconómico. El sector medio que correspondió al 53% de la población nacional reportó un consumo promedio diario de 8,6 kWh (Solórzano, 2009). A pesar de que la producción de metano promedio por día es insuficiente para el abasto eléctrico de una residencia, una producción mensual de 30 kWh promedio puede abastecer 3 o más residencias como se muestra en el Cuadro 4.21.

Cuadro 4.21. Número de residencias del sector socioeconómico medio que pueden abastecerse con electricidad producida por biometano

Sustrato	Producción promedio de CH ₄		Producción de CH ₄ optimizada (AME)	
	Generación eléctrica mensual (kWh)	No. de residencias abastecidas	Generación eléctrica mensual (kWh)	No. de residencias abastecidas
Pe (6%)	36	4	1980	230
Pe-Vb (6%)	20	2	1440	167
Pe-Hm-Hp-Vb + ac (6%)	31	3	2880	334
Hm-Hp-Vb + ac (6%)	33	3	4380	509
Promedio	30	3	2670	310

Lo primordial es considerar el tamaño del digester y su capacidad de carga de materia prima. Para un digester de 30 m³ que no requiere de más de 1 tonelada de sustrato y genera biometano durante 40 días, se observa que la opción de almacenar el gas para su posterior uso resulta más rentable. Ahora, la producción promedio de CH₄ reportada será optimizada mediante el calentamiento del digester, medida que no se utilizó en las pruebas de laboratorio por limitaciones físicas, pero que las unidades cogeneradoras realizan. En una planta industrial donde fácilmente aumenta el tonelaje y puede además optimizarse la operación del digester de varias formas, incluido un diseño del reactor en 2 o más cámaras de digestión, los resultados de AME son posibles de alcanzar con los sustratos en estudio.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Es posible obtener biogás a partir de la poda del pasto elefante, de las hojas residuales del cultivo de malanga y piña y a partir del vástago de banano. La producción de metano de cada uno de estos sustratos así como la co-digestión entre ellos varía de acuerdo a su composición lignocelulósica, es así evidente que la co-digestión de biomasa no debe realizarse de manera azarosa.
- La co-digestión aleatoria de materia orgánica vegetal puede retardar la digestión anaerobia e incluso inhibir la metanogénesis. Cada tipo de biomasa cuenta con una composición específica de lignocelulosa y para asegurar que la mezcla de los residuos agrícolas permite el desarrollo de la digestión anaerobia, la biomasa debe mantener una relación favorable del contenido de celulosa sobre el contenido de hemicelulosa y lignina.
- El estudio de la composición de la alcalinidad y su relación con la concentración de AGV es necesario para diagnosticar la estabilidad de la digestión anaerobia de los residuos lignocelulósicos con tratamiento físico, biológico y químico dado que permite comprender el desarrollo de las etapas iniciales del proceso y posibles causas de inhibición del mismo.
- El tratamiento físico previo a la digestión anaerobia disminuye el volumen del sustrato en el reactor y disminuye la duración total del proceso. El tratamiento biológico con microorganismos eficientes es catalítico de la digestión para aquellos sustratos cuya composición de lignina y hemicelulosa es comparablemente menor que su parte de celulosa. El tratamiento químico con solución de NaOH al 6% es efectivo para degradar la biomasa, por ello de acuerdo con el contenido de sólido en el reactor y la composición lignocelulósica del sustrato es capaz de inhibir la metanogenesis debido a sobreproducción de AGV.

- La reacción de NaOH (del tratamiento alcalino) con HCO_3^- del medio es capaz de modificar la capacidad buffer, el pH, el índice A_i/A_p y la composición de la alcalinidad del sistema.
- La modelación del PBM con la función exponencial $B(t) = B_0 (1 - e^{-kt})$ permite evaluar la estabilidad del proceso anaerobio al brindar información sobre el comportamiento de los datos experimentales. Sin embargo dicha modelación, con el Método de Gauss Newton y sin modificaciones a la expresión exponencial que incluyan más información experimental de los sustratos, puede ofrecer soluciones no convergentes o hábiles en la realidad.
- La mejor opción de co-digestión de los residuos lignocelulósicos para cogeneración según la modelación de PBM es hojas de piña al 6% con una producción diaria de 4,6 kWh de electricidad y 8,5 kWh de calor; y de acuerdo con la producción de metano promedio, la mejor opción para cogeneración es pasto elefante al 6% con una producción eléctrica diaria de 1,20 kWh y 2,15 kWh de calor seguido por pasto elefante, hojas de malanga, hojas de piña y vástago de banano al 6% con tratamiento biológico con una producción diaria de 1,10 kWh de electricidad y 2,00 kWh de calor.
- Utilizar pasto elefante, hojas de malanga, hojas de piña y vástago de banano al 6% con tratamiento biológico es la opción de sustrato más factible para garantizar que la materia orgánica esté disponible en cantidad suficientes a lo largo del año.
- El cálculo de la Actividad Metanogénica Específica se puede considerar como un dato de optimización de la producción de metano en el tiempo y no un dato que ofrece información sobre el comportamiento del sustrato. Por ello se prefieren los datos de producción de metano obtenidos por modelación de PBM y producción de metano promedio para diagnosticar la digestibilidad del sustrato.
- La limitación principal para el uso generalizado de la biomasa para generar energía es el porcentaje de biomasa activa disponible por hectárea; y pueden ser los costos

de logística para la recolección y transporte del sustrato los que afecten la viabilidad económica del proyecto por encima de los costos de tratamiento físico, químico y biológico.

5.2 RECOMENDACIONES

Se promueve continuar y complementar la investigación sobre la co-digestión de materia prima lignocelulósica con tratamiento alcalino para aumentar el rendimiento de su producción de metano con enfoque y mejora en los siguientes aspectos metodológicos, los cuales por limitaciones en este estudio no fueron implementados:

- Método de medición de biogás alternativo y complementario al desplazamiento volumétrico de disolución lavadora con dispositivos medidores de metano por inyección.
- Ensayos a escala piloto para perfeccionar el criterio de diseño y las mejoras al sistema según condiciones operacionales, con análisis periódicos de pH, alcalinidad, AGV y remoción de DQO
- Ampliar la evaluación del tratamiento alcalino para lignocelulosa con la opción de combinar soda cáustica con lima o cal hidratada. Se recomienda dicho tratamiento en el tanque mismo de digestión anaerobia y no como pretratamiento para minimizar costos y residuos posteriores.
- Ensayos de tratamiento biológico con fungi especializada en lignina para observar la reproducibilidad con los resultados obtenidos y discutidos en dicho trabajo.
- Evaluación de la resistencia y/o adaptabilidad de las bacterias fermentativas y metanogénicas en medio alcalófilo.

6 REFERENCIAS

- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., & Janssen, R. (2008). *The Biogas Handbook* (pp. 1–126). Retrieved from <http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, a J., ... van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology : A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 59(5), 927–34. doi:10.2166/wst.2009.040
- Aquino, S. F., Chernicharo, C. A., Foresti, E., Florencio Dos Santos, M. de L., & Monteggia, L. O. (2007). Methodologies for determining the Specific Methanogenic Activity (SMA) in Anaerobic Sludges. *Eng.Sanit. Ambient*, 12(2), 192–201. Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522007000200010&script=sci_arttext
- Bach, O. (2013). *DECIMONOVENO INFORME ESTADO DE LA NACIÓN EN DESARROLLO HUMANO SOSTENIBLE. Agricultura- rumbo hacia la sostenibilidad*. San José, Costa Rica. Retrieved from http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/019/bach_2013.pdf
- Baena, A., & Pueyo, A. (2006). *Competitividad y cambio climático. Nuevos retos para la industria española* (p. 53). Madrid.
- Banik, S., Nag, D., & Debnath, S. (2011). Utilization of pineapple leaf agro-waste for extraction of fibre and the residual biomass for vermicomposting. *Indian Journal of Fibre Textile Research*, 36(June), 172–177. Retrieved from [http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/11894/1/IJFTR_36\(2\)_172-177.pdf](http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/11894/1/IJFTR_36(2)_172-177.pdf)
- Boe, K. (2006). *Online monitoring and control of the biogas process*. Technical University of Denmark. Retrieved from http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:82736/datastreams/file_5083454/content
- Boone, D., Chynoweth, D., Mah, R., Smith, P., & Wilkie, A. (1993). Ecology and Microbiology of Biogasification. *Biomass and Bioenergy*, 5(3-4), 191–202. Retrieved from http://abe.ufl.edu/chyn/download/Publications_DC/Refereed/1993_-7- Ecology and Microbiology.pdf
- Borja, R., Martín, A. M., Duran, M. M., & Duran, R. (1992). Estudio cinético comparativo del proceso de digestión anaerobia del alpechín en los intervalos mesofílico y termofílico de temperatura . *Grasas Y Aceites*, 43(6), 341–346. Retrieved from <http://grasasyaceites.revistas.csic.es/index.php/grasasyaceites/article/viewFile/1130/1137>

- Botheju, D., & Bakke, R. (2011). Oxygen Effects in Anaerobic Digestion – A Review. *The Open Waste Management Journal*, 411(1), 1–19. Retrieved from <http://benthamopen.com/towmj/articles/V004/1TOWMJ.pdf>
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., & Hamdi, M. (2005). Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry*, 40(3-4), 989–995. doi:10.1016/j.procbio.2004.03.007
- Cajigas, Á. A., Pérez, A., & Torres, P. (2005). Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. *Scientia et Technica Año XI*, 27(Abril 2005), 243–248. Retrieved from <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/download/6955/4079>
- Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T., & Kumar, R. (2012). Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. *Energy*, 43(1), 273–282. doi:10.1016/j.energy.2012.04.029
- Chapra, S., & Canale, R. (2007). *Métodos Numéricos para Ingenieros*. (McGraw-Hill, Ed.) (5ta Edición., pp. 448–499).
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99, 4044–4064. doi:10.1016/j.biortech.2007.01.057
- Chernicharo, C. A. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series. Volumen Four. Anaerobic Reactors* (pp. 1–175).
- Cimochowicz-Rybicka, M., & Rybicki, S. (2013). Application of Respirimetric Tests for Assessment of Methanogenic Bacteria Activity in Wastewater Sludge Processing. *Journal of Ecological Engineering*, 14(3), 44–52. doi:10.5604/2081139X.1056039
- Cuervo, L., Folch, J. L., & Quiroz, R. E. (2009). Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol, 13(3), 11–25. Retrieved from http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Lignocelulosa.pdf
- D.P. Chynoweth, C.E. Turick, J.M. Owens, D. E. J. & M. W. P. (1993). Biochemical Methane Potential of Biomass and Waste Feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 5(1), 95–111. Retrieved from http://abe.ufl.edu/chyn/download/Publications_DC/Refereed/1993-4-BMPofBiomass.pdf
- Daud, Z., Zainuri, M., Hatta, M., Sari, A., Kassim, M., & Aripin, A. M. (2013). Suitability of Malaysia's Pineapple Leaf and Napier Grass as a Fiber Substitution for Paper Making Industry. In *6th Engineering Conference "Energy and Environment"* (pp. 2–

- 5). Kuching, Sarawak. Retrieved from http://eprints.uthm.edu.my/4046/1/encon2013_submission_153.pdf
- De Graaf, D., & Fendler, R. (2010). *Biogas production in Germany* (pp. 1–25). Dessau-Rosslau. Retrieved from http://spin-project.eu/downloads/0_Background_paper_biogas_Germany_en.pdf
- Demirel, B., & Scherer, P. (2008). The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2), 173–190. doi:10.1007/s11157-008-9131-1
- Ferreira, S., Ortiz, E., & Pardo, C. (1990). Estudio químico bromatológico de la Colocasia Esculenta (taro). *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, (18), 53–59. Retrieved from <http://www.ciencias.unal.edu.co/unciencias/data-file/farmacia/revista/V18P53-59.pdf>
- Frigon, J.-C., & Guiot, S. R. (2010). Biomethane production from starch and lignocellulosic crops: a comparative review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(4), 447–458. doi:10.1002/bbb.229
- Galante, C., Pezzola, L., Priano, N., Scaramellini, S., & Sottocornola, A. (2012). Methane from Biogas. Norwegian University of Science and Technology, Politecnico di Milano. Retrieved from <http://www.ipt.ntnu.no/~jsg/undervisning/naturgass/oppgaver/Oppgaver2012/12Galante.pdf>
- Gerlach, F., Grieb, B., & Zerger, U. (2013). *Sustainable biogas production. A handbook for organic farmers* (pp. 1–51). Frankfurt. Retrieved from http://www.sustaingas.eu/fileadmin/sustaingas/documents/handbook/SUSTAININGAS_handbook_EN.pdf
- Griva, I., Nash, S., & Sofer, A. (2009). Nonlinear Least Squares Data Fitting. In *Linear and Nonlinear Optimization* (Second Edi., Vol. 1, pp. 743–758). Fairfax, Virginia: SIAM. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Gunaseelan, V. N. (2004). Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 26(4), 389–399. doi:10.1016/j.biombioe.2003.08.006
- Ho, L. ., Aziah, N., & Bhat, R. (2012). Mineral composition and pasting properties of banana pseudo-stem flour from *Musa acuminata* X *balbisiana* cv . Awak grown locally in Perak , Malaysia. *International Food Research Journal*, 19(4), 1479–1485. Retrieved from [http://www.ifrj.upm.edu.my/19 \(04\) 2012/27 IFRJ 19 \(04\) 2012 Noor Aziah \(005\).pdf](http://www.ifrj.upm.edu.my/19%20(04)%202012/27%20IFRJ%2019%20(04)%202012%20Noor%20Aziah%20(005).pdf)

- Hwang, M. H., Jang, N. J., Hyum, S. H., & Kim, I. S. (2004). Anaerobic bio-hydrogen production from ethanol fermentation: the role of pH. *Journal of Biotechnology*, *111*(3), 297–309.
- Jutglar, L., Miranda, Á., & Villarubia, M. (2011). *Manual de Calefacción* (Primera., pp. 535–546). España: MarCombo.
- Kavitha, S., & Joseph, K. (2007). Biomethanation of vegetable waste. *Journal of the IPHE, India*, *2007-2008*(3), 9–12. Retrieved from <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/JIPHE.pdf>
- Khalil, H. P. S. A., Alwani, M. S., & Omar, A. K. M. (2006). Distribution and cell wall structure of malaysian plant waste fibers. *BioResources*, *1*(2), 220–232. Retrieved from http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_01/BioRes_01_2/BioRes_01_2_220_232_AbdulKhalil_SM_MalaysionPlantCellWalls.pdf
- Kun, L., Shiyu, F., Huaiyu, Z., Yao, Z., & Lucian, A. . (2010). Analysis of the chemical composition and morphological structure of banana pseudo-stem. *BioResources*, *5*(2), 576–585. Retrieved from http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_05/BioRes_05_2_0576_Li_FZZL_Anal_Chem_Comp_Morph_Banana_Stem_834.pdf
- Lahav, O., Shlafman, E., Morgan, B. E., Loewenthal, R. E., & Tarre, S. (2002). Accurate on-site volatile fatty acids (VFA) measurement in anaerobic digestion – verification of a new titrative method. In *VII Latin American Workshop and Symposium on anaerobic digestion*. (pp. 111–118). Merida, Yucatan. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/unam7/accurate.pdf>
- Laurinovica, L., Jasko, J., Skripsts, E., & Dubrovskis, V. (2013). Biochemical methane potential of biologically and chemically pretreated sawdust and straw. In *12th International Scientific Conference Engineering for Rural Development* (pp. 468–471). Jelgava. Retrieved from http://tf.llu.lv/conference/proceedings2013/Papers/086_Laurinovica_L.pdf
- Leisola, M., Pastinen, O., & Axe, D. D. (2012). Lignin — Designed Randomness, *2012*(3), 1–11. doi:10.5048/BIO-C.2012.3
- Leitão, R. C., van Haandel, A. C., Zeeman, G., & Lettinga, G. (2006). The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: a review. *Bioresource Technology*, *97*(9), 1105–18. doi:10.1016/j.biortech.2004.12.007
- Mckendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, *83*(July 2001), 37–46. Retrieved from <http://refman.et->

model.com/publications/1700/download/McKendry_2002_Energy production from biomass overview of biomass.PDF?1331890497.

- Monge, O., Certucha, M., & Almendariz, J. (2013). Microbial Biomass in Batch and Continuous System. In *Biomass Now - Sustainable Growth and Use* (pp. 449–476). InTech. Retrieved from <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/44384.pdf>
- Moody, L., Burns, R., Wu-haan, W., & Robert, S. (2009). Use of Biochemical Methane Potential (BMP) Assays for Predicting and Enhancing Anaerobic Digester Performance. In *44th Croatian & 44th International Symposium on Agriculture* (pp. 930–934). Opatija. Retrieved from <http://sa.pfos.hr/sa2009/radovi/pdf/Radovi/r10-009.pdf>
- Morero, B., Gropelli, E., & Campanella, E. A. (2009). Biogás obtenido de la digestión anaeróbica de diferentes residuos orgánicos: revisión de las principales tecnologías de purificación. In *VI Congreso de Medio Ambiente de AUGM* (pp. 1–16). Sao Carlos. Retrieved from <http://www.ambiente-augm.ufscar.br/uploads/A2-026.pdf>
- Niemczewska, J. (2012). Characteristics of utilization of biogas technology. *Oil-Gas*, 58, 293–297. Retrieved from <http://www.inig.pl/INST/nafta-gaz/nafta-gaz/Nafta-Gaz-2012-05-03.pdf>
- Niesner, J., Jecha, D., & Stehl, P. (2013). Biogas Upgrading Technologies : State of Art Review in European Region. *AIDIC. The Italian Association of Chemical Engineering*, 35, 517–522. doi:10.3303/CET1335086
- Oh, S. T., & Martin, A. D. (2010). Long chain fatty acids degradation in anaerobic digester: Thermodynamic equilibrium consideration. *Process Biochemistry*, 45(3), 335–345. doi:10.1016/j.procbio.2009.10.006
- Oremland, R. S., Marsh, L., & Desmarais, D. J. (1982). Methanogenesis in Big Soda Lake, Nevada: an Alkaline, Moderately Hypersaline Desert Lake. *Applied and Environmental Microbiology*, 43(2), 462–468. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC241849/pdf/aem00183-0210.pdf>
- Pacheco, J., & Magaña, A. (2003). Arranque de un reactor anaerobio. *Ingeniería*, 1(1), 21–25. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/467/46770102.pdf>
- Park, H. M. (2009). Comparing Group Means : T-tests and One-way ANOVA. Indiana University. Retrieved from <http://rt.uits.iu.edu/visualization/analytics/docs/hlm-docs/ttest.pdf>
- Pérez, A., & Torres, P. (2008). Indices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. *Ingeniería Y Competitividad*, 52(2), 41–52. Retrieved from

<http://revistaingenieria.univalle.edu.co:8000/index.php/incompe/article/viewFile/150/151>

- Pérez, J., Muñoz-Dorado, J., de la Rubia, T., & Martínez, J. (2002). Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *International Microbiology : The Official Journal of the Spanish Society for Microbiology*, 5(2), 53–63. doi:10.1007/s10123-002-0062-3
- Raposo, F., Fern, V., Rubia, M. A. De, Borja, R., B, F., Fern, M., ... Wilde, V. De. (2011). Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates : evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 86(January), 1088–1098. doi:10.1002/jctb.2622
- Rekha, B. N., & Pandit, A. B. (2013). Performance Enhancement Of Batch Anaerobic Digestion Of Napier Grass By Alkali Pre-Treatment. *International Journal of ChemTech Research*, 5(2), 558–564. Retrieved from [http://sphinxesai.com/2013/conf/PDFS ICGSEE 2013/CT=01\(558-564\)ICGSEE.pdf](http://sphinxesai.com/2013/conf/PDFS ICGSEE 2013/CT=01(558-564)ICGSEE.pdf)
- Ryckeboscha, E., Drouillonb, M., & Vervaerenc, H. (2011). Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1633–1645.
- Sahito, A. R., Mahar, R. B. U. X., & Brohi, K. M. (2013). Assessment of Ex-Vitro Anaerobic Digestion Kinetics of Crop Residues Through First Order Exponential Models: Effect of LAG Phase Period and Curve Factor, 32(4), 649–660. Retrieved from http://publications.muett.edu.pk/research_papers/pdf/pdf821.pdf
- Sánchez, A. M., Gutiérrez, A. I., Muñoz, J. A., & Rivera, C. A. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga*, 5, 61–91. Retrieved from dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3628225.pdf
- Sogari, N. (2003). Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos. *Comunicaciones Científicas Y Tecnológicas. Universidad Nacional Del Nordeste*, (2), 2–5. Retrieved from <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2003/comunicaciones/07-Tecnologicas/T-027.pdf>
- Solera, R., Romero, L., & Sales, D. (2002). The Evolution of Biomass in a Two-phase Anaerobic Treatment Process During Start-up. *ChemBioChem*, 16(1), 25–29. Retrieved from http://www.cabeq.pbf.hr/pdf/16_1_2002/Solera.pdf
- Solórzano, C. (2009). *Alternativas para la conservación de la energía eléctrica en las residencias de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica. Retrieved from http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb2009/pb2009_068.pdf

- Soto M, Méndez R & Lema, J. . (1993). Methanogenic and non-methanogenic activity tests. Theoretical basis and experimental set up. *Wat. Res*, 27(8), 1361–1376. Retrieved from http://www.researchgate.net/publication/223314284_Methanogenic_and_non-methanogenic_activity_tests._Theoretical_basis_and_experimental_set_up
- Strauch, S., Krassowski, J., & Singhal, A. (2013). *Biomethane Guide for Decision Makers. Policy guide on biogas injection into the natural gas grid* (pp. 1–38). Oberhausen. Retrieved from http://www.greengasgrids.eu/fileadmin/greengas/media/Downloads/Documentation_from_the_GreenGasGrids_project/Biomethane_Guide_for_Decision_Makers.pdf
- Torres, P., Cajigas, Á. A., Pérez, A., González, M., & Otero, A. M. (2008). Selección de acondicionadores químicos para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. *Revista Eidenar*, 7(Enero-Diciembre 2008).
- Torres, P., Rodríguez, J. A., Cajigas, Á., & Pérez, A. (2002). La Actividad Metanogénica como herramienta para optimización del proceso anaerobio en el tratamiento de aguas residuales fácilmente acidificables. In *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental* (pp. 1–8). Cancún. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-132.pdf>
- Van Lier, J. B. (1995). *Thermophilic Anaerobic Wastewater Treatment; Temperature Aspects and Process Stability*. Wageningen Universidad de Agricultura. Wageningen, Holanda. Retrieved from <http://edepot.wur.nl/200091>
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2011). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists* (9th ed., pp. 507–516). Pearson Education.
- Walsh, J., Ross, C., Smith, M., Harper, S., & Wilkins, W. A. (1988). *Handbook of Biogas Utilization* (p. 156). Retrieved from <http://infohouse.p2ric.org/ref/22/21262.pdf>
- Xiao, X., Zhang, R., He, Y., Li, Y., Feng, L., Chen, C., & Liu, G. (2013). Influence of Particle Size and Alkaline Pretreatment on the Anaerobic Digestion of Corn Stover. *BioResources*, 8(4), 5850–5860. Retrieved from http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_08_4_5850_Xiao_Alkaline_Pretreatment_Corn_Stover/2380
- Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, T. R., Kohli, S., & Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques--a review. *Bioresource Technology*, 95(1), 1–10. doi:10.1016/j.biortech.2004.02.010
- Zakarya, I. A., Tajaradin, H. ., Abustan, I., & Ismail, N. (2008). Relationship between Methane Production and Chemical Oxygen Demand (COD) in Anaerobic Digestion of Food Waste. In *International Conference on Construction and Building Technology* (pp. 29–36). Retrieved from

[http://www.uniten.edu.my/newhome/uploaded/coe/iccbt/iccbt 2008/conference d extract/UNITEN ICCBT 08 Relationship between Methane Production and Chemical Oxygen.pdf](http://www.uniten.edu.my/newhome/uploaded/coe/iccbt/iccbt%202008/conference%20extract/UNITEN%20ICCBT%2008%20Relationship%20between%20Methane%20Production%20and%20Chemical%20Oxygen.pdf)

- Zhao, X., Zhang, L., & Liu, D. (2012). Biomass recalcitrance. Part I: the chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(4), 465–482. doi:10.1002/bbb
- Zhou, X., & Nanqi, R. (2007). Acid resistance of methanogenic bacteria in a two-stage anaerobic process treating high concentration methanol wastewater. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 1(1), 53–56. doi:10.1007/s11783-007-0010-8
- Ziemiński, K., & Frąc, M. (2012). Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms. *African Journal of Biotechnology*, 11(18), 4127–4139. doi:10.5897/AJBX11.054

APÉNDICES

APÉNDICE 1: CUADROS DE PH, ALCALINIDAD Y COMPOSICIÓN DE LA ALCALINIDAD DE LAS SERIES EXPERIMENTALES

pH de los reactores de la Serie 1					
Día	Pe	Pe-Hp	Pe-Vb	Pe-Hm-Hp-Vb	Pe-Hm
2	5,03	4,86	4,84	4,05	4,77
3	4,89	4,81	4,59	4,12	4,66
4	4,87	4,74	4,57	4,85	4,71
5	4,91	4,81	4,63	4,80	4,73
6	4,77	4,77	4,60	4,66	4,68
7	4,71	4,71	4,54	4,64	4,75
8	4,68	4,61	4,50	4,71	4,65
9	4,73	4,62	4,47	4,67	4,57
10	4,74	4,59	4,46	4,69	4,61
11	4,73	4,62	4,45	4,67	4,57
12	4,69	4,52	4,46	4,64	4,55
13	4,71	4,59	4,47	4,66	4,52
14	4,71	4,52	4,43	4,61	4,46
15	4,77	4,59	4,52	4,63	4,55
16	4,74	4,52	4,50	4,56	4,54
17	4,75	4,56	4,48	4,58	4,53
18	4,80	4,61	4,52	4,59	4,56
19	4,75	4,60	4,43	4,59	4,57
20	4,83	4,63	4,53	4,64	4,57
21	4,83	4,64	4,53	4,60	4,55
23	4,80	4,59	4,48	4,62	4,58
24	4,80	4,57	4,49	4,60	4,51
25	4,74	4,55	4,47	4,55	4,51
Promedio	4,78	4,64	4,52	4,60	4,60
Desv. estándar	0,08	0,10	0,09	0,17	0,08
Error estándar	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02

Alcalinidad (mg CaCO₃/L) según sustrato de los reactores de la Serie 1

Día	Pe	Pe-Hm	Pe-Hp	Pe-Vb	Pe-Hm-
					Hp-Vb
3	150,0	175,0	---	115,0	120,0
13	227,5	235,0	320,0	155,0	290,0
16	242,5	242,5	275,0	140,0	327,0
19	205,0	267,5	262,5	137,5	302,5
21	225,0	277,5	280,0	152,5	365,0
24	222,5	290,0	287,5	165,0	340,0
26	227,5	292,5	295,0	165,0	347,5
Promedio	214,3	254,3	286,7	147,1	298,9
Desviación estándar	28,2	38,3	18,0	16,5	76,8
Error estándar	10,6	14,5	6,8	6,2	29,0

Alcalinidad y pH según sustrato de los reactores de la Serie 4

Día	Sustrato	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)			
			OH	CO ₃	HCO ₃	Total
15	Mezcla A	11,5	65,7	295,5	0,0	361,2
	Mezcla B	10,9	0,0	328,4	147,8	476,0
	Mezcla C	11,6	114,9	295,5	0,0	410,0
	Mezcla D	11,4	65,7	295,5	0,0	361,2
35	Mezcla A	11,6	32,8	380,9	0,0	413,7
	Mezcla B	11,0	0,0	262,7	91,9	355,0
	Mezcla C	11,6	52,5	367,8	0,0	381,0
	Mezcla D	11,7	78,8	341,5	0,0	420,3

APÉNDICE 2: CUADROS DE DESPLAZAMIENTO DE NAOH PARA DETERMINAR LA PRODUCCIÓN DE METANO

SERIE 2

Desplazamiento de volumen de NaOH (ml) de reactores al 8%

Fecha	Día	Pe				Pe-Hm				Pe-Hp				Pe-Vb			
		9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*
02/10/2013	1	8,5	0	8,5	6,72	60	0	60	47,40	12	0	12	9,48	23	0	23	18,17
03/10/2013	2	9	0	9	13,83	0	60	60	47,40	13,5	0	13,5	20,15	12	0	12	27,65
04/10/2013	3	5	0	5	17,78	5	30	35	75,06	19	9	28	42,27	11	14	25	47,40
05/10/2013	4	0	7	7	23,31	0	50	50	114,56	0	12	12	51,75	4	0	4	50,56
06/10/2013	5	0	15	15	35,16	12	68	80	177,77	0	20	20	67,55	0	6	6	55,30
07/10/2013	6	10	70	80	98,36	55	144	199	334,99	11	95,5	106,5	151,69	0	26	26	75,85
08/10/2013	7	6	17,5	23,5	116,93	37	23	60	382,39	46	97,5	143,5	265,07	9	5	14	86,91
09/10/2013	8	8	10	18	131,15	0	0	0	382,39	8	22	30	288,77	11	14	25	106,66
10/10/2013	9	9	15	24	150,11	0	0	0	382,39	47	40	87	357,51	13	14	27	127,99
11/10/2013	10	0	16	16	162,75	0	0	0	382,39	0	33	33	383,58	0	20	20	143,79
12/10/2013	11	0	0	16	175,39	0	0	0	382,39	10	20	30	407,28	0	19	19	158,80
13/10/2013	12	10	11,5	21,5	192,38	0	0	0	382,39	40	65	105	490,24	17	5	22	176,18
14/10/2013	13	13	0	13	202,65	6	0	6	387,13	9	0	9	497,35	21	0	21	192,78
15/10/2013	14	11,5	24	35,5	230,70	0	0	0	387,13	5	11,5	16,5	510,38	20	21,5	41,5	225,56
16/10/2013	15	7	36	43	264,67	0	0	0	387,13	11	5	16	523,02	7	23	30	249,27
17/10/2013	16	11,5	5	16,5	277,71	0	0	0	387,13	5,5	21	26,5	543,96	22	8,5	30,5	273,36
18/10/2013	17	0	4	4	280,87	0	0	0	387,13	33	57	90	615,07	0	3	3	275,73
19/10/2013	18	0	2	2	282,45	0	0	0	387,13	4	96	100	694,07	0	5	5	279,68

Fecha	Día	Pe				Pe-Hm				Pe-Hp				Pe-Vb			
		Mediciones	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h
20/10/2013	19	0	0,5	0,5	282,84	0	0	0	387,13	106	51	157	818,11	3	3	6	284,42
21/10/2013	20	2	0,5	2,5	284,82	0	0	0	387,13	3,5	7	10,5	826,41	6,5	3	9,5	291,93
22/10/2013	21	6	7	13	295,09	0	0	0	387,13	3	1,5	4,5	829,97	6	5	11	300,62
23/10/2013	22	0	4	4	298,25	0	0	0	387,13	0	4	4	833,13	0	6,5	6,5	305,76
24/10/2013	23	49	2	51	338,54	0	74,5	74,5	445,99	6	1	7	838,66	9	1,5	10,5	314,05
25/10/2013	24	33	11	44	373,31	9	1	10	453,89	5,5	0	5,5	843,00	9,5	0,5	10	321,95
26/10/2013	25	0	25	25	393,06	0	12,5	12,5	463,77	7	0	7	848,53	0	11	11	330,64
27/10/2013	26	16	3,5	19,5	408,46	24	1	25	483,52	3,5	13	16,5	861,57	8	1,5	9,5	338,15
28/10/2013	27	15	0	15	420,32	9	2	11	492,21	0	25	25	881,32	3	7	10	346,05
29/10/2013	28	10	10	20	436,12	7	2,5	9,5	499,72	35	2,5	37,5	910,95	12	2	14	357,11
30/10/2013	29	11	6,5	17,5	449,94	15	6,5	21,5	516,70	42	14,5	56,5	955,59	11,5	4,5	16	369,75
31/10/2013	30	26,5	6	32,5	475,62	33	5,5	38,5	547,12	18,5	23,5	42	988,77	16,5	1	17,5	383,58
01/11/2013	31	0	9	9	482,73	0	5	5	551,07	0	25	25	1008,52	0	12	12	393,06
02/11/2013	32	0	5	5	486,68	0	2	2	552,65	4	11	15	1020,37	3	10	13	403,33
03/11/2013	33	3,5	6,5	6,5	491,82	4,5	3	7,5	558,58	7	48	55	1063,83	16	6	22	420,71
04/11/2013	34	55	3,5	58,5	538,04	4	4	8	564,90	26	8,5	34,5	1091,08	17	6	23	438,88
05/11/2013	35	6	2	8	544,36	4	4	8	571,22	9	8,75	17,75	1105,11	18,5	3,5	22	456,26
06/11/2013	36	0	10	10	552,26	0	8	8	577,54	0	20	20	1120,91	0	27	27	477,60
07/11/2013	37	0	10	10	560,16	0	14,5	14,5	589,00	0	25,5	25,5	1141,05	0	28,5	28,5	500,11
08/11/2013	38	0	11,5	11,5	569,24	0	15	15	600,85				-----	0	32	32	525,39
09/11/2013	39	2	8	10	577,14	3	5	8	607,17				-----	21	9	30	549,10
10/11/2013	40	0	9	9	584,25	1,5	5,5	7	612,70				-----	0	31,5	31,5	573,98

Fecha	Día	Pe				Pe-Hm				Pe-Hp				Pe-Vb			
		Mediciones	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h
11/11/2013	41	6	2	8	590,58	11,4	0,25	11,65	621,90					15,5	16,5	32	599,27
12/11/2013	42	11,5	0,5	12	600,06	11,5	0	11,5	630,99					28	0	28	621,39
13/11/2013	43	13,5	12	25,5	620,20	13	3,5	16,5	644,02					6	8	14	632,45
14/11/2013	44	11	263	274	836,68	9,25	4,5	13,75	654,89					8,75	15	23,75	651,21
15/11/2013	45	44	24	68	890,41	5,5	1,5	7	660,42					9	1,25	10,25	659,31
16/11/2013	46	30	48,5	78,5	952,43	0	26	26	680,96					12	0	12	668,79
17/11/2013	47	75	40	115	1043,28	20	21	41	713,35					9	12	21	685,38
18/11/2013	48	105	39,5	144,5	1157,45	5,75	4,25	10	721,25					11	12,5	23,5	703,95
19/11/2013	49	137	80,5	217,5	1329,29	7,75	3,5	11,25	730,14					14	3,5	17,5	717,78
20/11/2013	50	192	30	222	1504,68	5	1,5	6,5	735,28					15	0	15	729,63
21/11/2013	51	168	144	312	1751,18	6	4,5	10,5	743,57					10,5	4,75	15,25	741,68
22/11/2013	52	25	75	100	1830,19	0	5	5	747,52					0	5	5	745,63
23/11/2013	53	12	48	60	1877,59	3	0	3	749,89					0	2	2	747,21
24/11/2013	54	15	49,5	64,5	1928,55	1,5	6,5	8	756,21					3	14	17	760,64
25/11/2013	55	56	6,5	62,5	1977,93	15,5	2,5	18	770,43					23	16	39	791,45
26/11/2013	56	36	19	55	2021,39	11,5	25,5	37	799,67					22	21	43	825,42
27/11/2013	57	26	24	50	2060,89	0	16	16	812,31					0	0	0	825,42
28/11/2013	58	24	0	24	2079,85	14	0	14	823,37					25,5	0	25,5	845,57

*ACUM es el acumulado en el tiempo y reportado a CNPT.

SERIE 2

Desplazamiento de volumen de NaOH (ml) de reactores al 8%

Fecha	Día	Pe-Hm-Hp-Vb				Hm				Hp				Vb			
		9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*
02/10/2013	1	0	0	0	0,00	8	0	8	6,32	15	0	15	11,85	36	0	36	28,44
03/10/2013	2	16	0	16	12,64	14	0	14	17,38	19	0	19	26,86	14,5	0	14,5	39,90
04/10/2013	3	25	4	29	35,55	9,5	2,5	12	26,86	0	19,5	19,5	42,27	12	16	28	62,02
05/10/2013	4	0	9	9	42,66	0	15	15	48,19	0	5	5	46,22	0	20	20	109,42
06/10/2013	5	0	12	12	52,14	20	12	32	73,48	3	7,5	10,5	54,51	0	13	13	119,70
07/10/2013	6	0	50	50	91,65	10	78	88	143,00	7	56	63	104,29	0	72	72	176,58
08/10/2013	7	20	10	30	115,35	12,5	21,5	34	169,86	28	36	64	154,85	16,5	9	25,5	196,73
09/10/2013	8	22	10	32	140,63	17,5	9	26,5	190,80	7,5	5,5	13	165,12	20	8	28	218,85
10/10/2013	9	26	21	47	177,77	18	14	32	216,08	10	10,5	20,5	181,32	23	37	60	266,25
11/10/2013	10	0	33	33	203,84	0	31	31	240,58	0	15,5	15,5	193,57		15,5	15,5	278,50
12/10/2013	11	10	22	32	229,12	0	0	0	240,58	0	17	17	207,00	0	5	5	282,45
13/10/2013	12	7	21	28	251,24	1	4	5	244,53	10	5	15	218,85	4,5	2	6,5	287,58
14/10/2013	13	23	0	23	269,41	5	0	5	248,48	16	0	16	231,49	14	0	14	298,65
15/10/2013	14	21	6	27	290,74	4,5	1,5	6	253,22	15,5	4,5	20	247,29	13	1,5	14,5	310,10
16/10/2013	15	8	24	32	316,03	11,5	5	16,5	266,25	6	17	23	265,46	2,5	15	17,5	323,93
17/10/2013	16	22	25,5	47,5	353,56	4,5	9	13,5	276,92	12,5	51	63,5	315,63	14,5	9	23,5	342,49
18/10/2013	17	0	10	10	361,46	0	9	9	284,03	29	16	45	351,18	1	8	9	349,60
19/10/2013	18	0	6	6	366,20	0	3,5	3,5	286,79	0	30	30	374,89	0	6	6	354,35
20/10/2013	19	7	2,5	9,5	373,70	0	0,5	0,5	287,19	5	25	30	398,59	2	1	3	356,72
21/10/2013	20	13,5	5,5	19	388,71	8,5	5	13,5	297,86	32	2	34	425,45	26	15	41	389,11
22/10/2013	21	13	3	16	401,35	9	1,5	10,5	306,15	3,5	1	4,5	429,01	21,5	3	24,5	408,46
23/10/2013	22	0	14,5	14,5	412,81	0	9,5	9,5	313,66	0	6,5	6,5	434,14		24	24	427,43

Fecha	Día	Pe-Hm-Hp-Vb				Hm				Hp				Vb			
Mediciones		9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*
24/10/2013	23	18,5	3	21,5	429,80	8	2	10	321,56	7,5	1	8,5	440,86	31,5	0	31,5	452,31
25/10/2013	24	18	2,5	20,5	445,99	13,5	0,5	14	332,62	8	0,5	8,5	447,57	0	0	0	452,31
26/10/2013	25	0	22	22	463,37	0	12	12	342,10	0	10	10	455,47	0	0	0	452,31
27/10/2013	26	18	7	25	483,13	3,5	0,5	4	345,26	7,5	5	12,5	465,35	0	5	5	456,26
28/10/2013	27	12	18	30	506,83	5	2,5	7,5	351,18	3	7	10	473,25	0	3	3	458,63
29/10/2013	28	21	22	43	540,80	10	6,5	16,5	364,22	12,5	2,5	15	485,10	2,5	5	7,5	464,56
30/10/2013	29	26,5	9	35,5	568,85	6,5	4	10,5	372,52	12	3,5	15,5	497,35	5,5	1	6,5	469,69
31/10/2013	30	35	6,5	41,5	601,64	12	0	12	382,00	17	1	18	511,57	8,5	0	8,5	476,41
01/11/2013	31	3	6	9	608,75	0	6	6	386,74	0	3	3	513,94	4	4	8	482,73
02/11/2013	32	0	4,5	4,5	612,30	0	5	5	390,69	0	2	2	515,52	0	5	5	486,68
03/11/2013	33	0	8	8	618,62	3	3	6	395,43	3	1	4	518,68	4,5	3,5	8	493,00
04/11/2013	34	7	2,5	9,5	626,13	18	7	25	415,18	16	5	21	535,27	8,5	4,5	13	503,27
05/11/2013	35	8	2	10	634,03	19	21,5	40,5	447,18	16,8	5,5	22,3	552,89	9	9	18	517,49
06/11/2013	36	0	11,5	11,5	643,11	0	27,5	27,5	468,90	0	23,5	23,5	571,46	0	10	10	525,39
07/11/2013	37	0	12	12	652,60	0	22	22	486,29	0	27	27	592,79	0	16	16	538,04
08/11/2013	38	0	13	13	662,87	0	32	32	511,57	0	30	30	616,49	0	19	19	553,05
09/11/2013	39	0	11	11	671,56	0	15	15	523,42	9	3	12	625,97	0	5	5	557,00
10/11/2013	40	2,5	20	22,5	689,33	3,5	11	14,5	534,88	3,5	27	30,5	650,07	3	4,75	7,75	563,12
11/11/2013	41	0	11	11	698,02	8,5	1,25	9,75	542,58	6	1	7	655,60	9,25	0,25	9,5	570,63
12/11/2013	42	17	0	17	711,46	10,75	0	10,75	551,07	34	0	34	682,46	21	0	21	587,22
13/11/2013	43	0	17,75	17,75	725,48	9	4,25	13,25	561,54	18,5	7	25,5	702,61	15	4	19	602,23
14/11/2013	44	16	5,5	21,5	742,47	11,5	3,5	15	573,39	27	1	28	724,73	21,5	8,5	30	625,93

Fecha	Día	Pe-Hm-Hp-Vb				Hm				Hp				Vb			
Mediciones		9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*
15/11/2013	45	14	1,5	15,5	754,71	11	1,75	12,75	583,46	11	1,4	12,4	734,53	12	0	12	635,41
16/11/2013	46	11	5	16	767,35	8	4	12	592,95	3	6	9	741,64	0	14	14	646,47
17/11/2013	47	15	8,5	23,5	785,92	5,5	5,25	10,75	601,44	3	4	7	747,17	14	5,25	19,25	661,68
18/11/2013	48	0	21	21	802,51	0,5	13,5	14	612,50	0	15,5	15,5	759,41	14	17	31	686,17
19/11/2013	49	21	6,25	27,25	824,04	16,5	4	20,5	628,70	18	5	23	777,58	21	3,25	24,25	705,33
20/11/2013	50	21,5	3,5	25	843,79	17	2,25	19,25	643,90	17,5	0,75	18,25	792,00	22	0	22	722,71
21/11/2013	51	21,5	8	29,5	867,10	19	7,4	26,4	664,76	12,5	6,5	19	807,01	29	1,5	30,5	746,81
22/11/2013	52	23	7	30	890,80	2	3	5	668,71	2	6	8	813,33	0	0	0	746,81
23/11/2013	53	0	31	31	915,29	0	4	4	671,87	0	6	6	818,08	0	0	0	746,81
24/11/2013	54	15	18	33	941,36	10	1,5	11,5	680,96	0,5	2	2,5	820,05	0	0	0	746,81
25/11/2013	55	29,5	5	34,5	968,62	27	0,5	27,5	702,69	23	1,5	24,5	839,41	0	0	0	746,81
26/11/2013	56	22,5	4	26,5	989,56	23	0,5	23,5	721,25	22	3,5	25,5	859,55	0	0	0	746,81
27/11/2013	57	0	0	0	989,56	13	1	14	732,31	12	0	12	869,03	0	0	0	746,81
28/11/2013	58	20	0	20	1005,36	26	0	26	752,85	26	0	26	889,58	0	0	0	746,81

*ACUM es el acumulado en el tiempo y reportado a CNPT.

SERIE 2

Desplazamiento de volumen de NaOH (ml) de reactores al 8%

Fecha	Día	Pe-Hm-Hp-Vb + ac.				Pe + ac			
		9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*
02/10/2013	1	2,5	3	5,5	4,35	34	0	34	26,86
03/10/2013	2	3	1,5	4,5	7,90	0	3	3	29,23
04/10/2013	3	0	6,5	6,5	13,04	2	4	6	33,97
05/10/2013	4	8	2	10	20,94	3	0	3	41,08
06/10/2013	5	5	0	5	24,89	2	1	3	43,45
07/10/2013	6	2,5	2,5	5	28,84	1,5	0	1,5	44,64
08/10/2013	7	11	6	17	42,27	1	4,5	5,5	48,98
09/10/2013	8	0	32	32	67,55	0	4	4	52,14
10/10/2013	9	0	16	16	80,19	1	2	3	54,51
11/10/2013	10	0	15	15	92,04	2,5	1	3,5	57,28
12/10/2013	11	10	3	13	102,31	3,5	0,5	4	60,44
13/10/2013	12	14,5	0,5	15	114,16	3,5	1	4,5	64,00
14/10/2013	13	12	2	14	125,23	0	3	3	66,37
15/10/2013	14	0	14	14	136,29	7	0,5	7,5	72,29
16/10/2013	15	20	38	58	182,11	6	0	6	77,03
17/10/2013	16	14	0	14	193,17	0	5	5	80,98
18/10/2013	17	0	20	20	208,97	4,5	1	5,5	85,33
19/10/2013	18	20	26	46	245,32	7	0	7	90,86
20/10/2013	19	10	16	26	265,86	7	1,5	8,5	97,57
21/10/2013	20	8,5	26,5	35	293,51	4,5	2	6,5	102,71
22/10/2013	21	31,5	33,5	65	344,86	9	0,5	9,5	110,21
23/10/2013	22	45	15,5	60,5	392,66	0	0	0	110,21
24/10/2013	23	0	6	6	397,40	2	1	3	112,58
25/10/2013	24	0	6,5	6,5	402,54	1	4	5	116,53
26/10/2013	25	0	17,5	17,5	416,37	7	4,5	11,5	125,62
27/10/2013	26	16,5	6	22,5	434,14	9,5	4	13,5	136,29
28/10/2013	27	23	40	63	483,92	0	14	14	147,35
29/10/2013	28	0	30	30	507,62	0	16	16	159,99
30/10/2013	29	0	49	49	546,33	0	18,5	18,5	174,60
31/10/2013	30	0	40	40	577,93	0	5	5	178,56

Fecha	Día	Pe-Hm-Hp-Vb + ac.				Pe + ac			
Mediciones		9AM	4PM	24 h	ACUM*	9AM	4PM	24 h	ACUM*
01/11/2013	31	0	26	26	598,48	3,5	5	8,5	185,27
02/11/2013	32	13,5	10	23,5	617,04	6,75	0	6,75	190,60
03/11/2013	33	19,5	2,5	22	634,42	19,5	0	19,5	206,01
04/11/2013	34	45,5	2	47,5	671,95	0	19,5	19,5	221,42
05/11/2013	35	15	30	45	707,51	18,5	27	45,5	257,36
06/11/2013	36	24	32	56	751,75	18,5	2	20,5	273,56
07/11/2013	37	27,5	22	49,5	790,86	0	12	11,5	282,65
08/11/2013	38	0	18	18	805,08	10	4,5	14,5	294,10
09/11/2013	39	15,5	41,5	57	850,11	0	25	25	313,85
10/11/2013	40	29,5	34	63,5	900,28	27	6	33	339,93
11/11/2013	41	30,5	16,25	46,75	937,22	26,3	3,75	30	363,63
12/11/2013	42	25,5	15	40,5	969,21	24	9,5	33,5	390,10
13/11/2013	43	16,75	60	76,75	1029,85	0	12	12	399,58
14/11/2013	44	0	24	24	1048,81	0	7	7	405,11
15/11/2013	45	0	26	26	1069,36	6	1,5	7,5	411,03
16/11/2013	46	22	12	34	1096,22	35	6,5	41,5	443,82
17/11/2013	47	48	40	88	1165,74	33	5	38	473,84
18/11/2013	48	33	5	38	1195,77	0	0	0	473,84
19/11/2013	49	0,5	0	0,5	1196,16	35,5	9	44,5	509,00
20/11/2013	50	19	41,5	60,5	1243,96	30	28,5	58,5	555,22
21/11/2013	51	35	24	59	1290,57	0	20	20	571,02
22/11/2013	52	0	33	33	1316,65	15	15	30	594,72
23/11/2013	53	30	30	60	1364,05	34	10	44	629,49
24/11/2013	54	1,5	1,5	3	1366,42	0	33,5	33,5	655,95
25/11/2013	55	1,5	0	1,5	1367,61	42	28	70	711,26
26/11/2013	56	1	1,5	2,5	1369,58	44	25	69	765,77
27/11/2013	57	1,5	1,5	3	1371,95	0	0,25	0,25	765,97
28/11/2013	58	2,5	0	2,5	1373,93	0	0	0	765,97

*ACUM es el acumulado en el tiempo y reportado a CNPT.

SERIE 3

Desplazamiento de volumen de NaOH (ml) de reactores al 6%

Fecha	Día	Pe				Pe-Hm				Pe-Hp				Pe-Vb			
		9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*
17/10/2013	1	0	0	0	0,00	10	6,5	16,5	13,04	7	6	13	10,27	26	2	28	22,12
18/10/2013	2	0	0	0	0,00	15	1,5	16,5	26,07	4	6	10	18,17	26	4,5	30,5	46,22
19/10/2013	3	0	0	0	0,00	2	10,5	12,5	35,95	22	5,5	27,5	39,90	0	27	27	67,55
20/10/2013	4	0	27	27	21,33	9,5	14,5	24	54,91	0	7,5	7,5	45,82	36	51	87	136,29
21/10/2013	5	0	7	7	26,86	0	6	6	59,65	10,5	2,5	13	56,09	45	28,5	73,5	194,36
22/10/2013	6	3	0	3	29,23	1	0	1	60,44	105	6,5	111,5	144,19	0	15	15	206,21
23/10/2013	7	5	4,5	9,5	36,74	1	1	2	62,02	0	13	13	154,46	9	11	20	222,01
24/10/2013	8	6,5	6	12,5	46,61	6,5	13	19,5	77,43	9	9	18	168,68	0	6	6	226,75
25/10/2013	9	18	7	25	66,37	16	2,5	18,5	92,04	6	12	18	182,90	6	15,5	21,5	243,74
26/10/2013	10	0	25,5	25,5	86,51	0	18	18	106,26	12	11,5	23,5	201,47	27	55	82	308,52
27/10/2013	11	31	40	71	142,61	24,5	4	28,5	128,78	13	15	28	223,59	39,5	2	41,5	341,31
28/10/2013	12	86	36,5	122,5	239,39	26	0,5	26,5	149,72	22	0,25	22,25	241,17	0	29	29	364,22
29/10/2013	13	10	9	19	254,40	15	0	15	161,57	0	28	28	263,29	2	0	2	365,80
30/10/2013	14	20	17	37	283,63	11,5	17,5	29	184,48	2	29	31	287,78	3	31,5	34,5	393,06
31/10/2013	15	24	66	90	354,74	12	11	23	202,65	11	22,5	33,5	314,25	51,5	34	85,5	460,61
01/11/2013	16	43	34,5	77,5	415,97	4,5	25	29,5	225,96	21	8	29	337,16	36,5	48	84,5	527,37
02/11/2013	17	251	0	251	614,28	30,5	24	54,5	269,02	21	42	63	386,94	0	19	19	542,38
03/11/2013	18	0	0	0	614,28	33	0	33	295,09	0	35	35	414,59	0	18	18	556,60
04/11/2013	19	0	0	0	614,28	0	14	14	306,15	0	40	40	446,19	0	17,5	17,5	570,43
05/11/2013	20	6	14	20	630,08	0	10	10	314,05	0	13	13	456,46	28	5,4	33,4	596,82
06/11/2013	21	47	45,5	92,5	703,16	5	3,5	8,5	320,77	32	18	50	495,96	11	16	27	618,15

Fecha	Día	Pe				Pe-Hm				Pe-Hp				Pe-Vb			
Medición		9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*
07/11/2013	22	69	61	130	805,87	26,5	39	65,5	372,52	4	1	5	499,91	24	16	40	649,75
08/11/2013	23	102	27	129	907,79	42	48	90	443,62	12,5	0	12,5	509,79	13	25,5	38,5	680,17
09/11/2013	24	0	0	0	907,79	0	57	57	488,66	9,5	15	24,5	529,15	43	30	73	737,84
10/11/2013	25	0	18	18	922,01	0	67	67	541,59	13,5	10	23,5	547,71	53	3,25	56,25	782,28
11/11/2013	26	0	195	195	1076,07	0	6	6	546,33	13	0	13	557,98	0	16	16	794,93
12/11/2013	27	0	180	180	1218,28	0	3	3	548,70	12	8	20	573,79	15	6,75	21,75	812,11
13/11/2013	28	75	34	109	1304,40	2,5	24	26,5	569,64	15	16	31	598,28	33,5	7,5	41	844,50
14/11/2013	29	51	2,25	53,25	1346,47	0	0,75	0,75	570,23	14	16	30	621,98	69	20,5	89,5	915,21
15/11/2013	30	30,5	27	57,5	1391,90	30	0	30	593,93	20	4,25	24,25	641,14	31	19	50	954,72
16/11/2013	31	0	26	26	1412,44	20,5	6	26,5	614,87	30	20	50	680,64	39	0	39	985,53
17/11/2013	32	25,5	9	34,5	1439,70	24	5	29	637,78	41,5	26,5	68	734,37	0	10	10	993,43
18/11/2013	33	31	0	31	1464,19	25	24,5	49,5	676,89	0	15	15	746,22	3	9	12	1002,91
19/11/2013	34	11	9	20	1479,99	16	3	19	691,90	0	20	20	762,02	9	6	15	1014,76
20/11/2013	35	16,5	27	43,5	1514,36	9,5	34	43,5	726,27	12	15	27	783,35	24	26	50	1054,27
21/11/2013	36	0	0	0	1514,36	27	32,5	59,5	773,28	53	33,5	86,5	851,69	21	24,5	45,5	1090,21
22/11/2013	37	0	53	53	1556,23	40,5	11,5	52	814,36	56	35	91	923,59	0	30	30	1113,92
23/11/2013	38	35	30	65	1607,59	27,5	33,5	61	862,56	16	18	34	950,45	33	36,5	69,5	1168,83
24/11/2013	39	20,5	6,8	27,3	1629,16	50	40	90	933,66	22	20	42	983,63	34	31,5	65,5	1220,57
25/11/2013	40	0	10	10	1637,06	0	11	11	942,35	43,5	3,5	47	1020,77	0	0	0	1220,57
26/11/2013	41	4	11	15	1648,91	4	0	4	945,51	0	41	41	1053,16	0,5	0,5	1	1221,36
27/11/2013	42	12	27	39	1679,72	2	0,5	2,5	947,49	29,5	14	43,5	1087,53	0	5	5	1225,32

Fecha	Día	Pe				Pe-Hm				Pe-Hp				Pe-Vb			
Medición		9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*
28/11/2013	43	20,5	14,5	35	1707,37	8,5	36	44,5	982,65	33	10	43	1121,50	2,5	39,5	42	1258,50
29/11/2013	44	0,5	30	30,5	1731,47	33	0,25	33,25	1008,92	36	9,5	45,5	1157,45	26	7	33	1284,57
30/11/2013	45	0,5	0	0,5	1731,87	30	1,75	31,75	1034,00	2	0	2	1159,03	45,5	7	52,5	1326,05
01/12/2013	46	0	0	0	1731,87	46	2	48	1071,92	0	0	0	1159,03	44	7	51	1366,34
02/12/2013	47	0	1	1	1732,66	56	9	65	1123,28	0	0	0	1159,03	0	9	9	1373,45
03/12/2013	48	0	0	18	1746,88	3	12	15	1135,13	0	0	0	1159,03	14	3	17	1386,88
04/12/2013	49	18	45	63	1796,65	19	18	37	1164,36	0	0	0	1159,03	28	8	36	1415,33
05/12/2013	50	1	32	33	1822,72	45	10	55	1207,82	0	0	0	1159,03				1415,33

*ACUM es el acumulado en el tiempo y reportado a CNPT.

SERIE 3

Desplazamiento de volumen de NaOH (ml) de reactores al 6%

Fecha	Día	Pe-Hm-Hp-Vb				Hm				Hp			
		9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*
17/10/2013	1	2	0,5	2,5	1,98	0	7	7	5,53	0	45	45	35,55
18/10/2013	2	3	1,5	4,5	5,53	0	0	0	5,53	141	26	167	167,49
19/10/2013	3	0	0	0	5,53	0,5	2	2,5	7,51	17,5	62	79,5	230,30
20/10/2013	4	1	0,5	1,5	6,72	6	0	6	12,25	0	93	93	303,78
21/10/2013	5	0	0	0	6,72	6,5	0	6,5	17,38	0	16,5	16,5	316,82
22/10/2013	6	0	0	0	6,72	0	2	2	18,96	19	13	32	342,10
23/10/2013	7	0	1	1	7,51	1,5	6	7,5	24,89	11	24	35	369,75
24/10/2013	8	1	1	2	9,09	27,5	1,5	29	47,80	34	56	90	440,86
25/10/2013	9	1	0	1	9,88	13	0,5	13,5	58,46	7	13	20	456,66
26/10/2013	10	0	2	2	11,46	11	3	14	69,53	22,5	9,5	32	481,94
27/10/2013	11	3	1	4	14,62	0	15,5	15,5	81,77	47,5	97,5	145	596,50
28/10/2013	12	3,5	0	3,5	17,38	19	14	33	107,84	0	0	0	596,50
29/10/2013	13	0	4	4	20,54	20,5	0	20,5	124,04	0	0	0	596,50
30/10/2013	14	2	0	2	22,12	0	17	17	137,47	0	0	0	596,50
31/10/2013	15	0	0	0	22,12	5	0	5	141,42	0	0	0	596,50
01/11/2013	16	3	6	9	29,23	1,5	11	12,5	151,30	0	1,25	1,25	597,49
02/11/2013	17	4	0,5	4,5	32,79	2,5	18,5	21	167,89	1	0	1	598,28
03/11/2013	18	7,5	0	7,5	38,71	18,5	4	22,5	185,67	0	0	0	598,28
04/11/2013	19	0	8	8	45,03	47	20,5	67,5	239,00	0	9,5	9,5	605,78
05/11/2013	20	3	3	6	49,77	0	18	18	253,22	0	1,5	1,5	606,97
06/11/2013	21	3,5	1,5	5	53,72	4	17	21	269,81	0	0	0	606,97

Fecha	Día	Pe-Hm-Hp-Vb				Hm				Hp			
		9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*
07/11/2013	22	7	2	9	60,84	8	22,5	30,5	293,90	0	1,5	1,5	608,15
08/11/2013	23	7	3,5	10,5	69,13	23,5	9	32,5	319,58	3	1,5	4,5	611,71
09/11/2013	24	0	11	11	77,82	24	29	53	361,46	4,5	6,75	11,25	620,60
10/11/2013	25	0	13	13	88,09	0	0	0	361,46	1	3,75	4,75	624,35
11/11/2013	26	0	14	14	99,15	0	0	0	361,46	4,5	3,5	8	630,67
12/11/2013	27	0	2	2	100,73	0	18	18	375,68	24	10,5	34,5	657,93
13/11/2013	28	3,5	4,6	8,1	107,13	4	15	19	390,69	0	0	0	657,93
14/11/2013	29	0	0	0	107,13	9	20	29	413,60	0	0	0	657,93
15/11/2013	30	15,5	0	15,5	119,38	14,5	2	16,5	426,64	0	0	0	657,93
16/11/2013	31	9,5	14,5	24	138,34	56	0	56	470,88	0	0	0	657,93
17/11/2013	32	14,75	7,5	22,25	155,92	14	7	21	487,47	0	0	0	657,93
18/11/2013	33	14,5	1,75	16,25	168,76	23,5	27	50,5	527,37	0	0,5	0,5	658,32
19/11/2013	34	0	9	9	175,87	25	2,5	27,5	549,10	4	4	8	664,64
20/11/2013	35	7	15	22	193,25	0	30	30	572,80	2	8	10	672,54
21/11/2013	36	16	19	35	220,90	21,5	28	49,5	611,91	7	4,5	11,5	681,63
22/11/2013	37	24	3	27	242,23	20,5	39	59,5	658,92	10,5	1	11,5	690,72
23/11/2013	38	24	0,5	24,5	261,59	7,5	13	20,5	675,11	4,4	1,75	6,15	695,58
24/11/2013	39	24	27	51	301,88	14	21	35	702,76	0	0	0	695,58
25/11/2013	40	0	0	0	301,88	29	34	63	752,54	5,25	1,75	7	701,11
26/11/2013	41	0	11	11	310,58	0	3	3	754,91	8	2	10	709,01
27/11/2013	42	11	18	29	333,49	0	10	10	762,81	0	15	15	720,86

Fecha	Día	Pe-Hm-Hp-Vb				Hm				Hp			
		9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*
28/11/2013	43	34	0,25	34,25	360,55	0	12,5	12,5	772,69	12	11,5	23,5	739,42
29/11/2013	44	29	0,75	29,75	384,05	8,5	15	23,5	791,25	9,5	5,5	15	751,27
30/11/2013	45	0	0	0	384,05	26	9	35	818,90	9,5	5	14,5	762,73
01/12/2013	46	33,5	27	60,5	431,85	14	20	34	845,77	11,5	5,5	17	776,16
02/12/2013	47	36,5	7	43,5	466,22	27	38	65	897,12	8,5	3,5	12	785,64
03/12/2013	48	3	13	16	478,86	66	26,5	92,5	970,20	14	11	25	805,39
04/12/2013	49	18	6,5	24,5	498,22	0	22	22	987,58	4	14	18	819,62
05/12/2013	50	19	35	54	540,88	6	28,5	34,5	1014,84	5,5	5,5	11	828,31

ACUM* es el acumulado en el tiempo y reportado a CNPT.

SERIE 3

Desplazamiento de volumen de NaOH (ml) de reactores al 6%

Fecha	Día	Vb				Pe-Hm-Hp-Vb +ac			
		9AM	4PM	24 H	AC	9AM	4PM	24 H	AC
17/10/2013	1	0	19	19	15,01	0	8	8	6,32
18/10/2013	2	46	9	55	58,46	6,5	2	8,5	13,04
19/10/2013	3	11,5	8	19,5	73,87	0	7,5	7,5	18,96
20/10/2013	4	0	1	1	74,66	9	2	11	27,65
21/10/2013	5	0	0	0	74,66	9	1	10	35,55
22/10/2013	6	0	4	4	77,82	2	6	8	41,87
23/10/2013	7	0	0	0	77,82	4,5	11	15,5	54,12
24/10/2013	8	10,5	5	15,5	90,07	5	9	14	65,18
25/10/2013	9	0	0	0	90,07	8	20,5	28,5	87,70
26/10/2013	10	0,5	0	0,5	90,46	12,5	11	23,5	106,26
27/10/2013	11	0,25	11,5	11,75	99,75	28	12	40	137,87
28/10/2013	12	12	1,5	13,5	110,41	0	20	20	153,67
29/10/2013	13	0	0	0	110,41	7	9	16	166,31
30/10/2013	14	0	0	0	110,41	13	20,5	33,5	192,78
31/10/2013	15	0	9,5	9,5	117,92	20	47	67	245,71
01/11/2013	16	0	12	12	127,40	23	7,5	30,5	269,81
02/11/2013	17	0	0	0	127,40	0	33,5	33,5	296,28
03/11/2013	18	0	10	10	135,30	0	42,5	42,5	329,85
04/11/2013	19	0	12	12	144,78	0	43	43	363,83
05/11/2013	20	0	15,5	15,5	157,03	0	18	18	378,05
06/11/2013	21	0	0	0	157,03	8,5	38	46,5	414,79
07/11/2013	22	0	0	0	157,03	9	7,75	16,75	428,02
08/11/2013	23	0	0	0	157,03	47,75	6	53,75	470,48
09/11/2013	24	2,5	7	9,5	164,53	0	44	44	505,25
10/11/2013	25	0	0	0	164,53	46	40	86	573,19
11/11/2013	26	0	12	12	174,01	35	27	62	622,18
12/11/2013	27	0	0	0	174,01	23	32	55	665,63
13/11/2013	28	0	0	0	174,01	35	27	62	714,62
14/11/2013	29	0	0	0	174,01	97	23	120	809,42
15/11/2013	30	0	0	0	174,01	37	30,5	67,5	862,75
16/11/2013	31	0	14	14	185,07	37	31	68	916,48
17/11/2013	32	0	0	0	185,07	26	112	138	1025,51
18/11/2013	33	0	17	17	198,50	10	0	10	1033,41

Fecha	Día	Vb				Pe-Hm-Hp-Vb +ac			
Medición		9AM	4PM	24 H	AC	9AM	4PM	24 H	AC
19/11/2013	34	0	10	10	206,41	9	8	17	1046,84
20/11/2013	35	0	2	2	207,99	20,5	38	58,5	1093,06
21/11/2013	36	3,5	0,5	4	211,15	0	87	87	1161,79
22/11/2013	37	34	0,75	34,75	238,60	0	65,5	65,5	1213,54
23/11/2013	38	0	0,5	0,5	239,00	37	0,75	37,75	1243,37
24/11/2013	39	0	0	0	239,00	40	60	100	1322,37
25/11/2013	40	0	0	0	239,00	97	42	139	1432,19
26/11/2013	41	0	0	0	239,00	0	1	1	1432,98
27/11/2013	42	0	0	0	239,00	2	10	12	1442,47
28/11/2013	43	0	16,5	16,5	252,03	122,5	55	177,5	1582,70
29/11/2013	44	1	0,75	1,75	253,41	63	45	108	1668,03
30/11/2013	45	0	0	0	253,41	3	2	5	1671,98
01/12/2013	46	0	22	22	270,80	2	2	4	1675,14
02/12/2013	47	1	19	20	286,60	0	1,25	1,25	1676,13
03/12/2013	48	0	0	0	286,60	0	0	0	1676,13
04/12/2013	49	0	0	0	286,60	0	0	0	1676,13
05/12/2013	50	0	21	21	303,19	0	0	0	1676,13

ACUM* es el acumulado en el tiempo y reportado a CNPT.

SERIE 4

Desplazamiento de volumen de NaOH (ml) de reactores al 6%

Fecha	Día	Hm-Hp-Vb				Hm-Hp-Vb + ac				Mezcla A			
		8AM	5PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM *
07/01/2014	1	9	8	17	17	3,75	2,5	6,25	6,25	1,75	4	5,75	5,75
08/01/2014	2	3,75	11	14,75	31,75	2	19	21	27,25	4	1,5	7,5	13,25
09/01/2014	3	2	5	7	38,75	0,5	4,5	5	32,25	0	16,5	16,5	29,75
10/01/2014	4	4,25	5	9,25	48	5	4	9	41,25	23,5	21	44,5	74,25
11/01/2014	5	4	4,75	8,75	56,75	7,5	9	16,5	57,75	16,5	4,25	20,75	95
12/01/2014	6	4	2,25	6,25	63	3,75	12	15,75	73,5	16	9,5	25,5	120,5
13/01/2014	7	2,5	5,25	7,75	70,75	5,75	13	18,75	92,25	17,5	24	41,5	162
14/01/2014	8	2,5	4	6,5	77,25	5	18	23	115,25	0	10	10	172
15/01/2014	9	2,25	9	11,25	88,5	5,25	14	19,25	134,5	3,75	2,25	6	178
16/01/2014	10	3	3,5	6,5	95	7	5,5	12,5	147	2,5	0,75	3,25	181,25
17/01/2014	11	0	4	4	99	0	8	8	155	0	0	0	181,25
18/01/2014	12	0	7,5	7,5	106,5	13,5	7	20,5	175,5	1,5	0	1,5	182,75
19/01/2014	13	3,75	2,75	6,5	113	20	4	24	199,5	0	1	1	183,75
20/01/2014	14	0	6,75	6,75	119,75	26	7	33	232,5	0	0,5	0,5	184,25
21/01/2014	15	0	4,5	4,5	124,25	10	13	23	255,5	0	0	0	184,25
22/01/2014	16	0	7,25	7,25	131,5	0	16	16	271,5	12	12,5	24,5	208,75
23/01/2014	17	0	7,75	7,75	139,25	66	56	122	393,5	15	15	30	238,75
24/01/2014	18	0	10	10	149,25	15	14	29	422,5	21,5	9,25	30,75	269,5
25/01/2014	19	5	3	8	157,25	194	76	270	692,5	22,25	8	30,25	299,75
26/01/2014	20	5,25	6	11,25	168,5	68,5	17	85,5	778	6	7	13	312,75
27/01/2014	21	0	12	12	180,5	53	12,5	65,5	843,5	12,5	6,25	18,75	331,5
28/01/2014	22	0	12,5	12,5	193	10	11	21	864,5	0	11	11	342,5
29/01/2014	23	0	11	11	204	11	10	21	885,5	85	46,5	131,5	474
30/01/2014	24	0	10	10	214	24	20	44	929,5	100	50	150	624
31/01/2014	25	0	8,5	8,5	222,5	14	18,5	32,5	962	1,5	0,75	0,75	624,75
01/02/2014	26	8	7,5	15,5	238	17	14	31	993	0	0,5	0,5	625,25
02/02/2014	27	0	13	13	251	15	44	59	1052	0	1	1	626,25
03/02/2014	28	0	13	13	264	0	84	84	1136	0,75	0,75	1,5	627,75
04/02/2014	29	0	16,5	16,5	280,5	102,5	113	215,5	1351,5	0	1,25	1,25	629
05/02/2014	30	0	16	16	296,5	0	48,5	48,5	1400	3	1,75	4,75	633,75
06/02/2014	31	0	15	15	311,5	70	60	130	1530	0	1	1	634,75
07/02/2014	32	5	10,5	15,5	327	75	62,5	137,5	1667,5	2	0,5	2,5	637,25

SERIE 4

Desplazamiento de volumen de NaOH (ml) de reactores al 6%

Fecha	Día	Hm-Hp-Vb				Hm-Hp-Vb + ac				Mezcla A			
		8AM	5PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM*	9AM	4PM	24 H	ACUM *
08/02/2014	33	0	13,5	13,5	340,5	0	0	0	1667,5	0	1	1	638,25
09/02/2014	34	11,25	4,75	16	356,5	0	0	0	1667,5	12	6,25	18,25	656,5
10/02/2014	35	0	16	16	372,5	0	0	0	1667,5				-----

ACUM* es el acumulado en el tiempo y reportado a CNPT

SERIE 4

Desplazamiento de volumen de NaOH (ml) de reactores al 6%

Fecha	Día	Mezcla B				Mezcla C				Mezcla D			
		9AM	4PM	24 H	AC	9AM	4PM	24 H	AC	9AM	4PM	24 H	AC
07/01/2014	1	2	2,75	4,75	4,75	1,5	2	3,5	3,5	4,25	2	6,25	6,25
08/01/2014	2	1,5	28	29,5	34,25	0	7,5	7,5	11	0	18	18	24,25
09/01/2014	3	0,5	7	27	61,25	0	1,5	1,5	12,5	0	0	0	24,25
10/01/2014	4	6	3,75	9,75	71	0,5	2,5	3	15,5	0	0	0	24,25
11/01/2014	5	5,75	8,75	14,5	85,5	3	15	18	33,5	0	0	0	24,25
12/01/2014	6	0	2	2	87,5	1,5	1,75	3,25	36,75	0	0	0	24,25
13/01/2014	7	2	3,5	5,5	93	0	4	4	40,75	0	1	1	25,25
14/01/2014	8	2,5	3	5,5	98,5	1	2,5	3,5	44,25	0	1	1	26,25
15/01/2014	9	0	7	7	105,5	0	2,5	2,5	46,75	0	0	0	26,25
16/01/2014	10	1,5	3,75	5,25	110,75	0	2	2	48,75	7	0,5	7,5	33,75
17/01/2014	11	0	0	0	110,75	0	0	0	48,75	0	0	0	33,75
18/01/2014	12	0	2	2	112,75	0	3	3	51,75	0	0	0	33,75
19/01/2014	13	0	0	0	112,75	0	1,5	1,5	53,25	0	0	0	33,75
20/01/2014	14	0	1,25	1,25	114	0	2,25	2,25	55,5	0	5	5	38,75
21/01/2014	15	0	10	10	124	0	7	7	62,5	1,5	0	1,5	40,25
22/01/2014	16	0	3,5	3,5	127,5	0	2	2	64,5	0	3,5	3,5	43,75
23/01/2014	17	0	1,5	1,5	129	0	2	2	66,5	0	3,5	3,5	47,25
24/01/2014	18	0	0	0	129	0	3,25	3,25	69,75	0	5	5	52,25
25/01/2014	19	1,5	3	4,5	133,5	0	2	2	71,75	0	3	3	55,25
26/01/2014	20	0	9	9	142,5	0	3,75	3,75	75,5	0	7	7	62,25
27/01/2014	21	0	8,5	8,5	151	0	4,5	4,5	80	0	29	29	91,25
28/01/2014	22	0	8,5	8,5	159,5	0	4	4	84	17	12	29	120,25
29/01/2014	23	1	8	9	168,5	0	1,5	1,5	85,5	7	17,5	24,5	144,75
30/01/2014	24	0	6,75	6,75	175,25	0	2,5	2,5	88	0	4	4	148,75

Fecha	Día	Mezcla B				Mezcla C				Mezcla D			
Medición		9AM	4PM	24 H	AC	9AM	4PM	24 H	AC	9AM	4PM	24 H	AC
31/01/2014	25	2	5,5	7,5	182,75	0	0	0	88	6,25	5,25	11,5	160,25
01/02/2014	26	6,75	7	13,75	196,5	0	4,25	4,25	92,25	7	11	18	178,25
02/02/2014	27	7,75	5	12,75	209,25	0	2,25	2,25	94,5	29	8,5	37,5	215,75
03/02/2014	28	5	10,5	15,5	224,75	0	3,25	3,25	97,75	8,75	8	16,75	232,5
04/02/2014	29	0	11,75	11,75	236,5	0	4	4	101,75	3,25	7,25	10,5	243
05/02/2014	30	0	0	0	236,5	0	3,25	3,25	105	0	15	15	258
06/02/2014	31	0	6,75	6,75	243,25	0	3	3	108	32	20	52	310
07/02/2014	32	1,75	10	11,75	255	0	4	4	112	36	11	47	357
08/02/2014	33	14	4	18	273	0	1,5	1,5	113,5	0	14,5	14,5	371,5
09/02/2014	34	14	12	26	299	0	2,25	2,25	115,75	45	22	67	438,5
10/02/2014	35	0	11,5	11,5	310,5	0	2,5	2,5	118,25	18	11	29	467,5

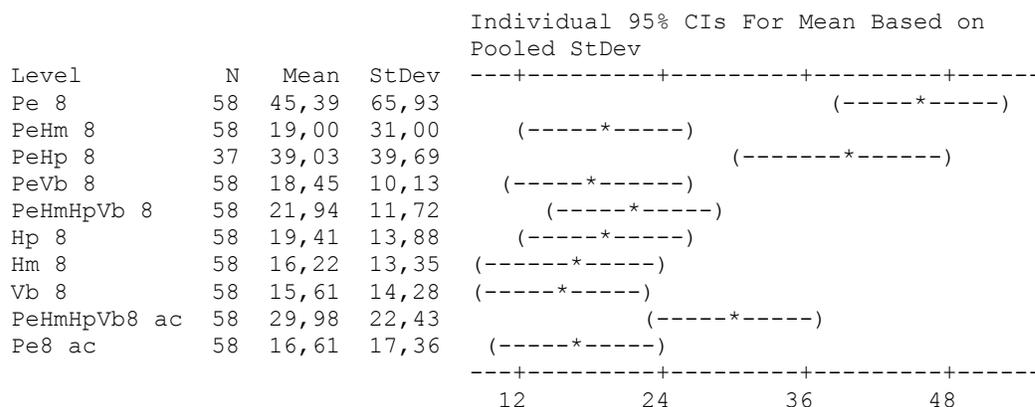
ACUM* es el acumulado en el tiempo y reportado a CNPT

7 APÉNDICE 3: RESULTADOS DE ANOVA DE UN FACTOR Y PRUEBA DE TUKEY PARA LA MEDIA DE PRODUCCIÓN DIARIA DE METANO DE LOS SUSTRATOS

Sustrato como factor de variabilidad (igual contenido de sólido)

Resultados de ANOVA para Pe 8%, Pe-Hm 8%, Pe-Hp 8%, Pe-Vb 8%, Pe-Hm-Hp-Vb 8%, Hp 8%, Hm 8%, Vb 8%, Pe-Hm-Hp-Vb+ac 8%, Pe+ac 8%

Source	DF	SS	MS	F	P	S	R-Sq	R-Sq (adj)
Factor	9	52343	5816	7,07	0,000	28,68	10,39%	8,92%
Error	549	451573	823	-	-	-	-	-
Total	558	503916	-	-	-	-	-	-



Pooled StDev = 28,68

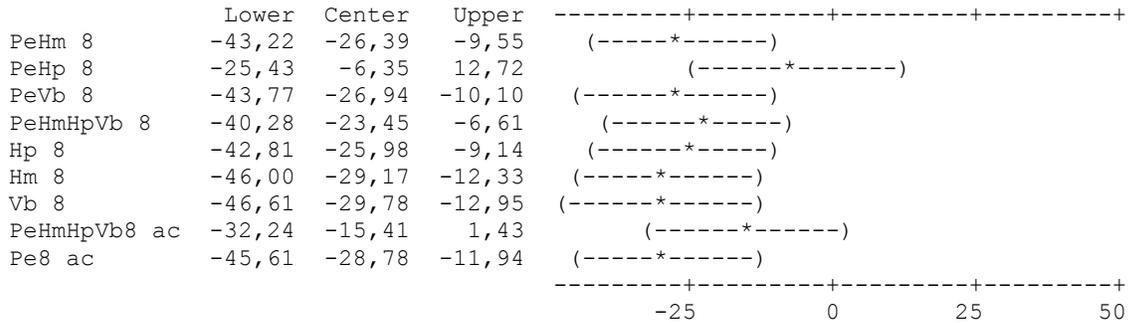
Resultados de la prueba de Tukey para Pe 8%, Pe-Hm 8%, Pe-Hp 8%, Pe-Vb 8%, Pe-Hm-Hp-Vb 8%, Hp 8%, Hm 8%, Vb 8%, Pe-Hm-Hp-Vb+ac 8%, Pe+ac 8%

Levels	N	Mean	Grouping
Pe 8%,	58	45,39	A
Pe-Hp 8%	37	39,03	AB
PeHmHpVb + ac 8%	58	29,98	ABC
PeHmHpVb 8%	58	21,94	BC
Hp 8%	58	19,41	C
PeHm 8%	58	19,00	C
PeVb 8%	58	18,45	C
Pe+ac 8%	58	16,61	C
Hm 8%	58	16,22	C
Vb 8%	58	15,61	C

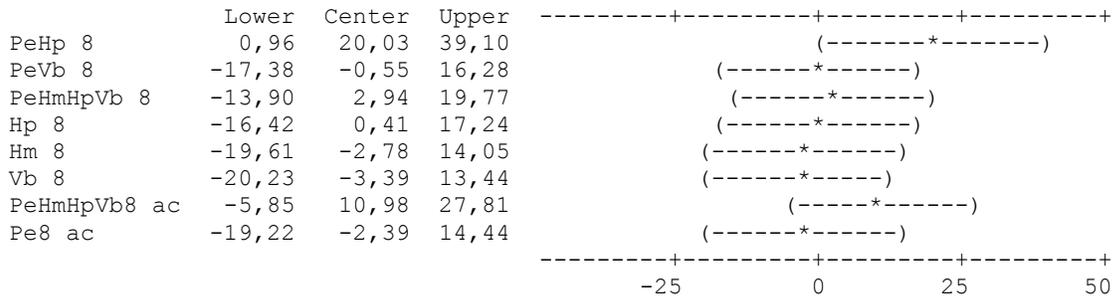
Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 99,83%

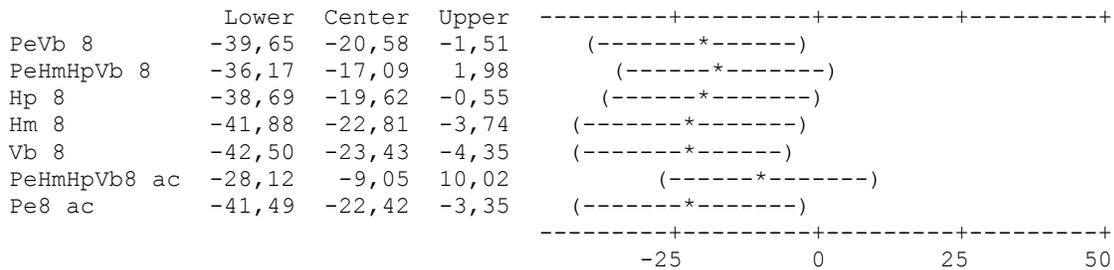
Pe 8 subtracted from:



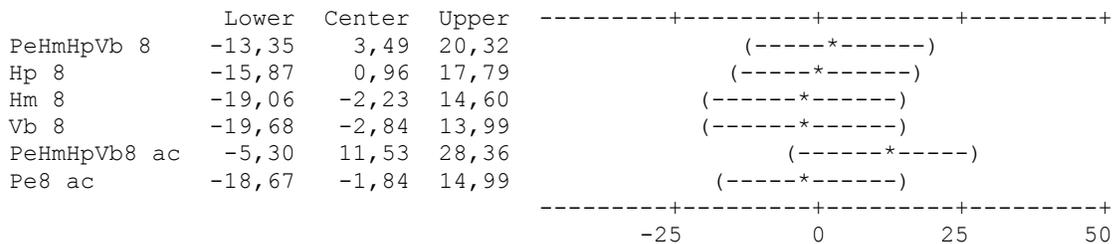
PeHm 8 subtracted from:



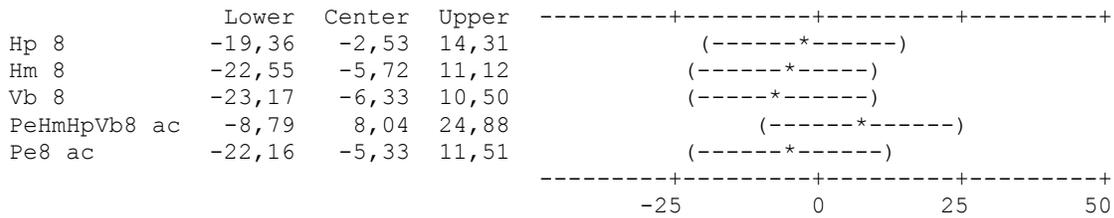
PeHp 8 subtracted from:



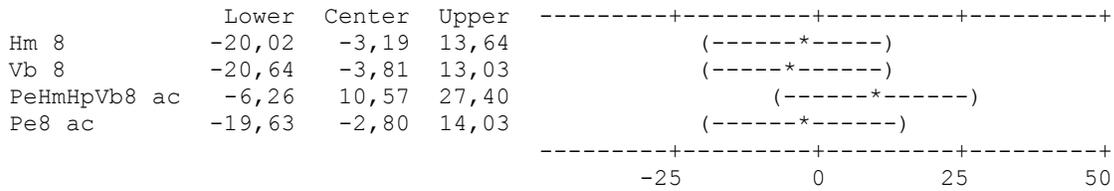
Pe-Vb 8 subtracted from:



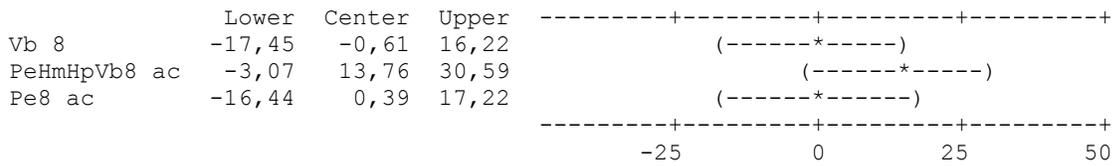
PeHmHpVb 8 subtracted from:



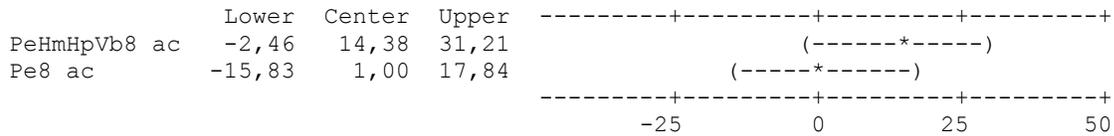
Hp 8 subtracted from:



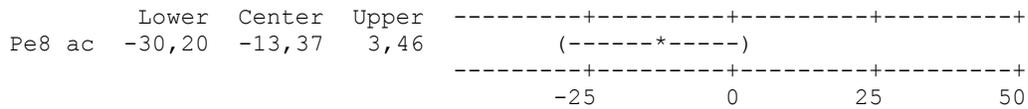
Hm 8 subtracted from:



Vb 8 subtracted from:

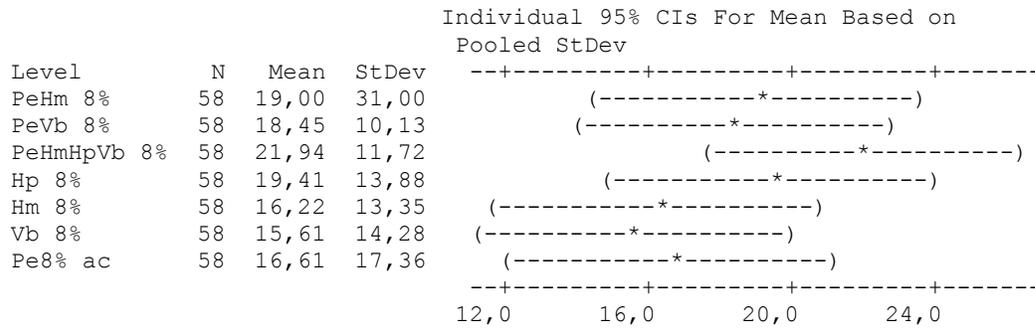


PeHmHpVb8 ac subtracted from:



Resultados de ANOVA para Pe-Hm 8%, Pe-Vb 8%, Pe-Hm-Hp-Vb 8%, Hp 8%, Hm 8%, Vb 8%, Pe+ac 8%

Source	DF	SS	MS	F	P	S	R-Sq	R-Sq (adj)
Factor	6	1700	283	0,95	0,456	17,23	1,42%	0,00%
Error	399	118422	297	-	-	-	-	-
Total	405	120122	-	-	-	-	-	-



Pooled StDev = 17,23

Resultados de la prueba de Tukey para Pe-Hm 8%, Pe-Vb 8%, Pe-Hm-Hp-Vb 8%, Hp 8%, Hm 8%, Vb 8%, Pe+ac 8%

Levels	N	Mean	Grouping
PeHmHpVb 8%	58	21,94	A
Hp 8%	58	19,41	A
PeHm 8%	58	19,00	A
PeVb 8%	58	18,45	A
Pe8% ac	58	16,61	A
Hm 8%	58	16,22	A
Vb 8%	58	15,61	A

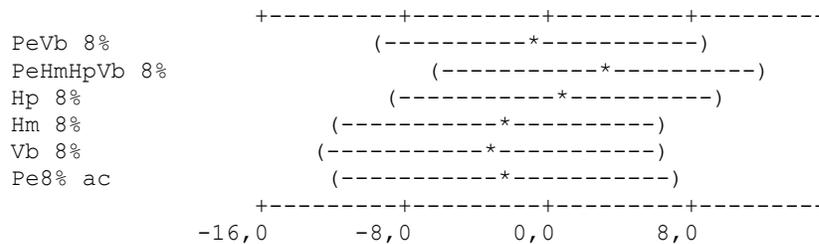
Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 99,66%

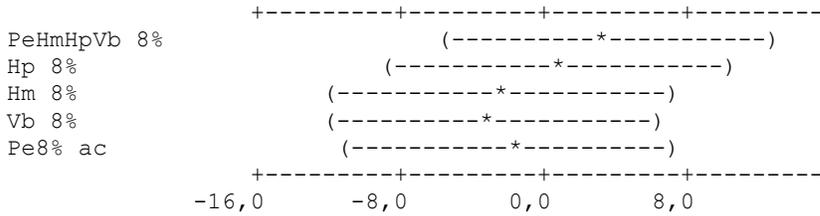
PeHm 8% subtracted from:

	Lower	Center	Upper
PeVb 8%	-9,98	-0,55	8,88
PeHmHpVb 8%	-6,50	2,94	12,37
Hp 8%	-9,02	0,41	9,84
Hm 8%	-12,21	-2,78	6,65
Vb 8%	-12,83	-3,39	6,04
Pe8% ac	-11,82	-2,39	7,04



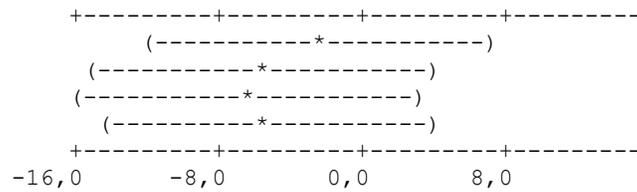
PeVb 8% subtracted from:

	Lower	Center	Upper
PeHmHpVb 8%	-5,95	3,49	12,92
Hp 8%	-8,47	0,96	10,39
Hm 8%	-11,66	-2,23	7,20
Vb 8%	-12,28	-2,84	6,59
Pe8% ac	-11,27	-1,84	7,59



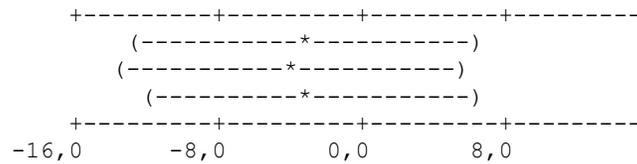
PeHmHpVb 8% subtracted from:

	Lower	Center	Upper
Hp 8%	-11,96	-2,53	6,91
Hm 8%	-15,15	-5,72	3,72
Vb 8%	-15,76	-6,33	3,10
Pe8% ac	-14,76	-5,33	4,11



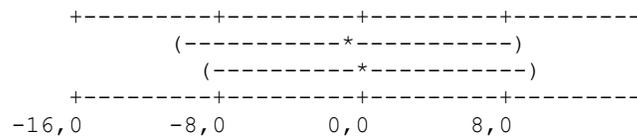
Hp 8% subtracted from:

	Lower	Center	Upper
Hm 8%	-12,62	-3,19	6,24
Vb 8%	-13,24	-3,81	5,63
Pe8% ac	-12,23	-2,80	6,63



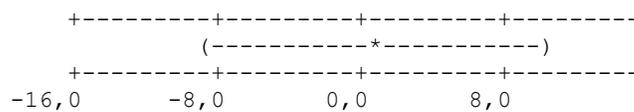
Hm 8% subtracted from:

	Lower	Center	Upper
Vb 8%	-10,05	-0,61	8,82
Pe8% ac	-9,04	0,39	9,82



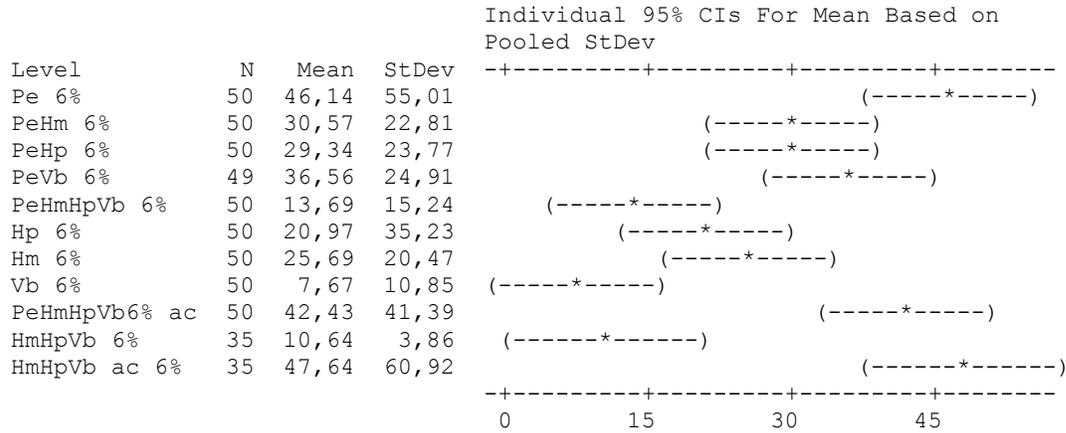
Vb 8% subtracted from:

	Lower	Center	Upper
Pe8% ac	-8,43	1,00	10,44



Resultados de ANOVA para Pe 6%, Pe-Hm 6%, Pe-Hp 6%, Pe-Vb 6%, Pe-Hm-Hp-Vb 6%, Hp 6%, Hm 6%, Vb 6%, Pe-Hm-Hp-Vb+ac 6%, Hm-Hp-Vb 6%, Hm-Hp-Vb+ac 6%.

Source	DF	SS	MS	F	P	S	R-Sq	R-Sq (adj)
Factor	10	88526	8853	8,32	0,000	32,62	14,08%	12,38%
Error	508	540423	1064	-	-	-	-	-
Total	518	628950	-	-	-	-	-	-



Pooled StDev = 32,62

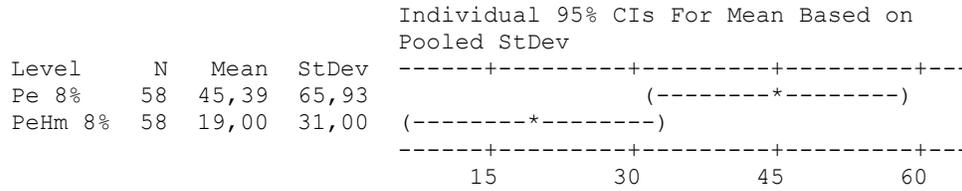
Resultados de la prueba de Tukey para Pe 6%, Pe-Hm 6%, Pe-Hp 6%, Pe-Vb 6%, Pe-Hm-Hp-Vb 6%, Hp 6%, Hm 6%, Vb 6%, Pe-Hm-Hp-Vb+ac 6%, Hm-Hp-Vb 6%, Hm-Hp-Vb+ac 6%.

Levels	N	Mean	Grouping
HmHpVb ac 6%	35	47,64	A
Pe 6%	50	46,14	A
PeHmHpVb6% ac	50	42,43	A
PeVb 6%	49	36,56	AB
PeHm 6%	50	30,57	ABC
PeHp 6%	50	29,34	ABC
Hm 6%	50	25,69	ABCD
Hp 6%	50	20,97	BCD
PeHmHpVb 6%	50	13,69	CD
HmHpVb 6%	35	10,64	CD
Vb 6%	50	7,67	D

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 99,86%



Pooled StDev = 51,52

Resultados de la prueba de Tukey para Pe 8%, Pe-Hm 8%

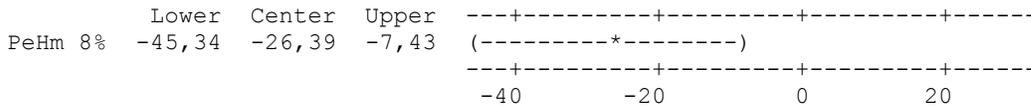
Levels	N	Mean	Grouping
Pe 8%	58	45,39	A
PeHm 8%	58	19,00	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons

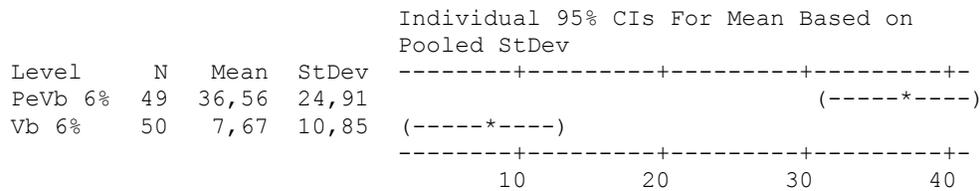
Individual confidence level = 95,00%

Pe 8% subtracted from:



Resultados de ANOVA para PeVb 6%, Vb 6%

Source	DF	SS	MS	F	P	S	R-Sq	R-Sq(adj)
Factor	1	20647	20647	56,32	0,000	19,15	36,74%	36,08%
Error	97	35557	367	-	-	-	-	-
Total	98	56203	-	-	-	-	-	-



Pooled StDev = 19,15

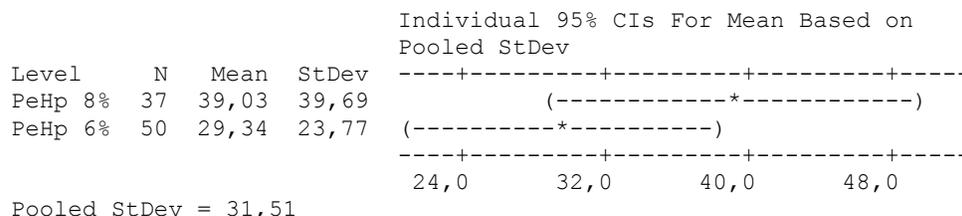
Resultados de la prueba de Tukey para PeVb 6%, Vb 6%

Levels	N	Mean	Grouping
PeVb 6%	49	36,56	A
Vb 6%	50	7,67	B

Means that do not share a letter are significantly different.
Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals

Resultados de ANOVA para Pe-Hp 8%, Pe-Hp 6%

Source	DF	SS	MS	F	P	S	R-Sq	R-Sq (adj)
Factor	1	1998	1998	2,01	0,160	31,51	2,31%	1,16%
Error	85	84402	993	-	-	-	-	-
Total	86	86400	-	-	-	-	-	-



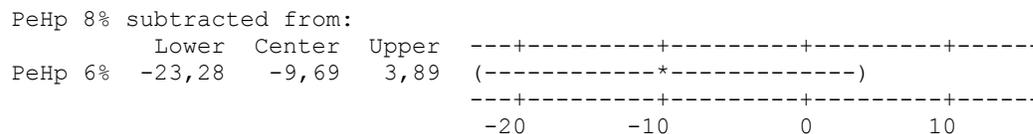
Resultados de la prueba de Tukey para Pe-Hp 8%, Pe-Hp 6%

Levels	N	Mean	Grouping
PeHp 8%	37	39,03	A
PeHp 6%	50	29,34	A

Means that do not share a letter are significantly different.

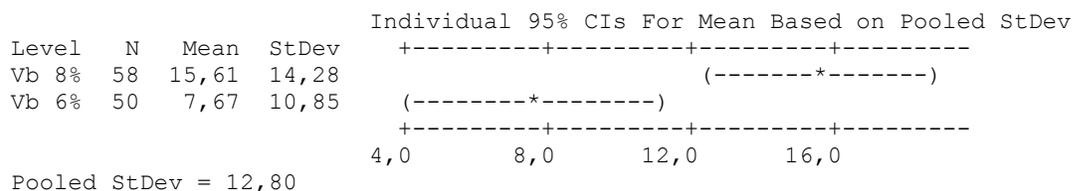
Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 95,00%



Resultados de ANOVA para Vb 8%, Vb 6%

Source	DF	SS	MS	F	P	S	R-Sq	R-Sq (adj)
Factor	1	1690	1690	10,31	0,002	12,80	8,86%	8,00%
Error	106	17380	164	-	-	-	-	-
Total	107	19070	-	-	-	-	-	-



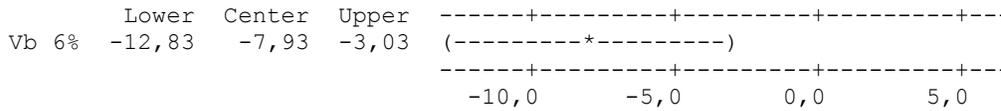
Resultados de la prueba de Tukey para Vb 8%, Vb 6%

Levels	N	Mean	Grouping
Vb 8%	58	15,61	A
Vb 6%	50	7,67	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
 All Pairwise Comparisons
 Individual confidence level = 95,00%

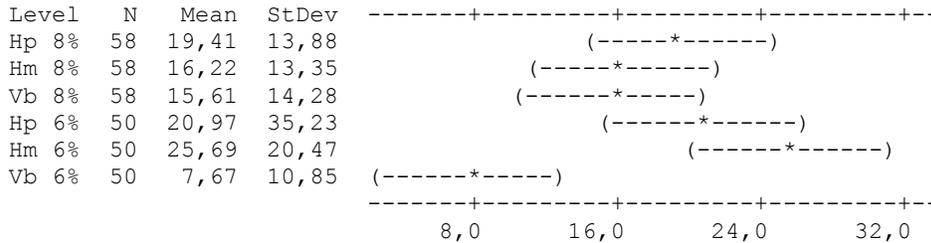
Vb 8% subtracted from:



Resultados de ANOVA para Hp 8%, Hm 8%, Vb 8%, Hp 6%, Hm 6%, Vb 6

Source	DF	SS	MS	F	P	S	R-Sq	R-Sq (adj)
Factor	5	9295	1859	4,93	0,000	19,42	7,20%	5,74%
Error	318	119894	377	-	-	-	-	-
Total	323	129189	-	-	-	-	-	-

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev



Pooled StDev = 19,42

Resultados de la prueba de Tukey para Hp 8%, Hm 8%, Vb 8%, Hp 6%, Hm 6%, Vb 6%

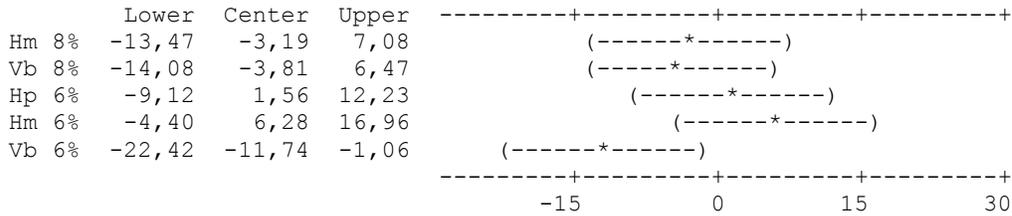
Levels	N	Mean	Grouping
Hm 6%	50	25,69	A
Hp 6%	50	20,97	A
Hp 8%	58	19,41	A
Hm 8%	58	16,22	AB
Vb 8%	58	15,61	AB
Vb 6%	50	7,67	B

Means that do not share a letter are significantly different.

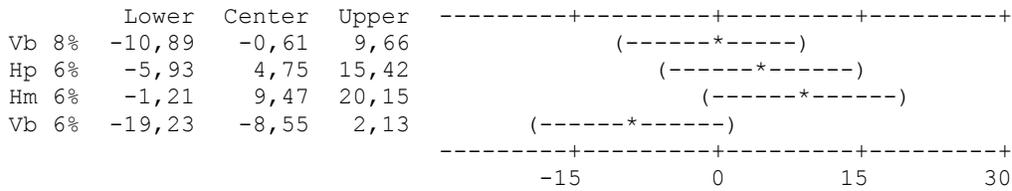
Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 99,53%

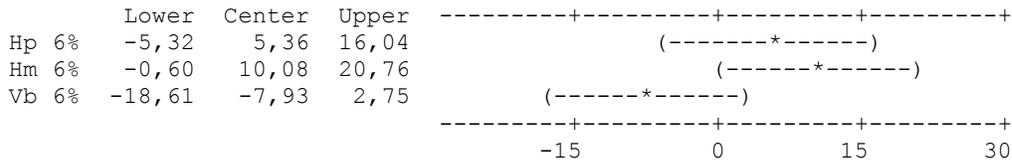
Hp 8% subtracted from:



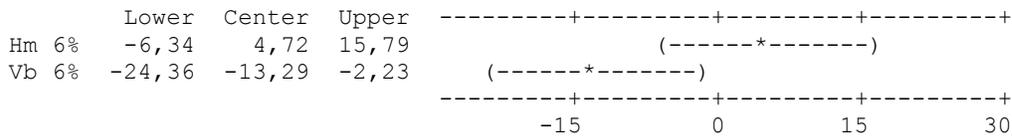
Hm 8% subtracted from:



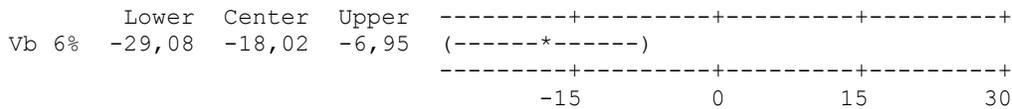
Vb 8% subtracted from:



Hp 6% subtracted from:

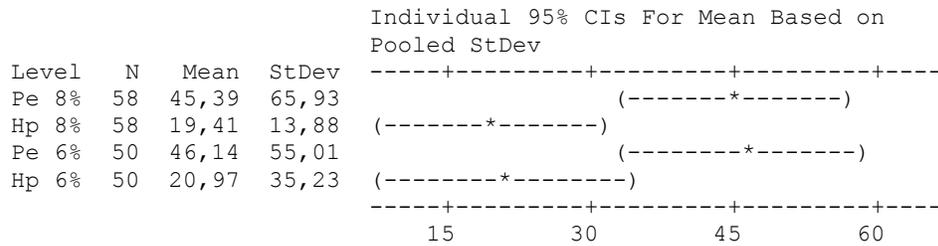


Hm 6% subtracted from:



Resultados de ANOVA para Pe 8%, Hp 8%, Pe 6%, Hp 6%

Source	DF	SS	MS	F	P	S	R-Sq	R-Sq (adj)
Factor	3	35480	11827	5,36	0,001	46,98	7,05%	5,73%
Error	212	467869	2207	-	-	-	-	-
Total	215	503349	-	-	-	-	-	-



Pooled StDev = 46,98

Resultados de la prueba de Tukey para Pe 8%, Hp 8%, Pe 6%, Hp 6%

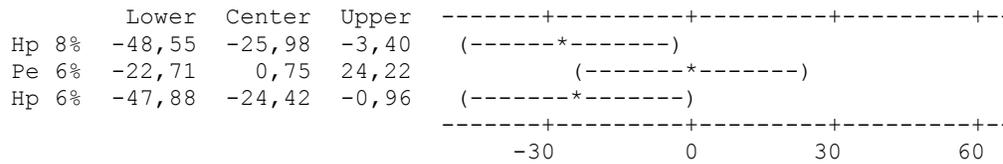
Levels	N	Mean	Grouping
Pe 6%	50	46,14	A
Pe 8%	58	45,39	A
Hp 6%	50	20,97	B
Hp 8%	58	19,41	B

Means that do not share a letter are significantly different.

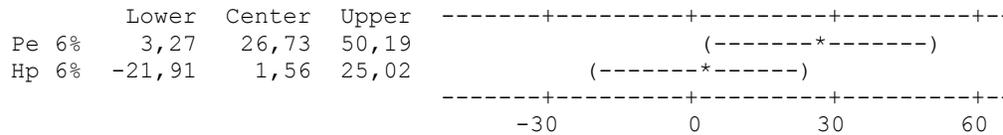
Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 98,97%

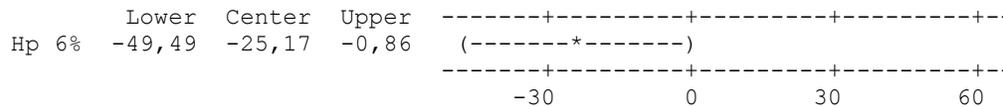
Pe 8% subtracted from:



Hp 8% subtracted from:

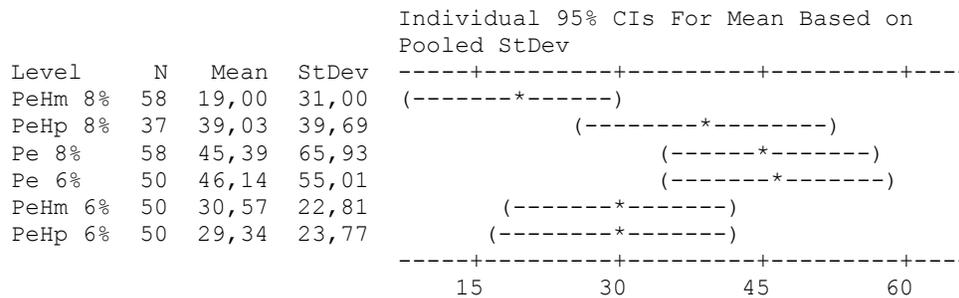


Pe 6% subtracted from:



Resultados de ANOVA para Pe-Hm 8%, Pe-Hp 8%, Pe 8%, Pe 6%, Pe-Hm 6%, Pe-Hp 6%

Source	DF	SS	MS	F	P	S	R-Sq	R-Sq (adj)
Factor	5	30441	6088	3,22	0,008	43,45	5,15%	3,55%
Error	297	560751	1888	-	-	-	-	-
Total	302	591192	-	-	-	-	-	-



Pooled StDev = 43,45

Resultados de la prueba de Tukey para Pe-Hm 8%, Pe-Hp 8%, Pe 8%, Pe 6%, Pe-Hm 6%, Pe-Hp 6%

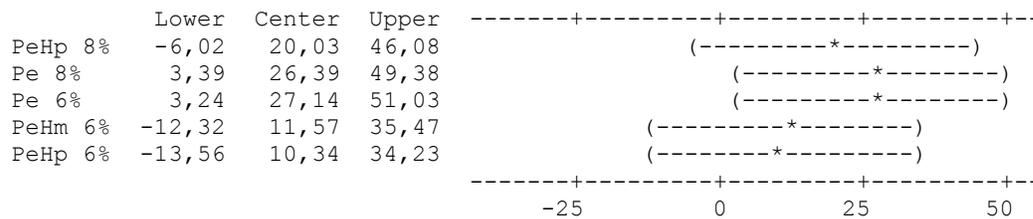
Levels	N	Mean	Grouping
Pe 6%	50	46,14	A
Pe 8%	58	45,39	A
PeHp 8%	37	39,03	AB
PeHm 6%	50	30,57	AB
PeHp 6%	50	29,34	AB
PeHm 8%	58	19,00	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 99,53%

PeHm 8% subtracted from:



ANEXOS

ANEXO 1: TECNOLOGÍAS DE LIMPIEZA Y MEJORAMIENTO DE BIOGÁS

Impurezas en el biogás y sus impactos (Ryckeboscha, Drouillonb, & Vervaerenc, 2011)

Impureza	Impacto
Agua	Corrosión de los compresores, tanques de almacenamiento de gas y motores debido a la reacción con H ₂ S, NH ₃ y CO ₂ . Acumulación de agua en las tuberías. Condensación y/o congelamiento por presiones altas.
Polvo	Obstrucción debido a deposición en compresores y tanques de almacenamiento de gas
H₂S	Corrosión en compresores, tanques de almacenamiento de gas y motores. Concentraciones tóxicas de H ₂ S (>5 cm ³ m ⁻³) permanecen en el biogás. SO ₂ y SO ₃ se forman debido a la combustión que son más tóxicas que H ₂ S y causan corrosión con agua
CO₂	Bajo valor calorífico
Siloxanos	Formación de SiO ₂ y cuarzos micro-cristalinos debido a la combustión, deposición en las bujías, válvulas y cabezales de cilindro que causan abrasión en la superficie.
Hidrocarburos	Corrosión en los motores debido a la combustión
NH₃	Corrosión en disolución con agua
O₂/aire	Mezclas explosivas debido a altas concentraciones de O ₂ en el biogás
Cl⁻	Corrosión en motores de combustión
F⁻	Corrosión en motores de combustión

Conjunto de procesos de remoción de CO₂ (Niemczewska, 2012)

Método de separación	Proceso	Principio de funcionamiento	Contenido final de metano
Adsorción	Adsorción por cambio de presión	Adsorción de CO ₂ a través de un tamiz molecular	> 96 Vol.-%
Adsorción física	Lavado de agua presurizada	Disolución de CO ₂ en agua a alta temperatura	> 96 Vol.-%
	Procesos con Selexol [®] , Rectisol [®] , Purisol [®]	Disolución de CO ₂ en un disolvente especializado	> 96 Vol.-%
Adsorción química	Lavado de monoetanolamina (MEA)	Reacción química de CO ₂ con MEA	> 99 Vol.-%
Membrana de separación	Separación de gas (seca) por membrana de polímero	La permeabilidad de la membrana de H ₂ S y CO ₂ es más alta que CH ₄	> 80 Vol.-%
	Separación de gas		

Método de separación	Proceso	Principio de funcionamiento	Contenido final de metano
	(húmeda) membrana	por	> 96 Vol.-%
Proceso criogénico	Proceso de temperatura	baja Transformación a la fase líquida de CO ₂ mientras que CH ₄ permanece gaseoso	> 99,9 Vol.-%

Métodos de mejora de biogás a biometano por remoción de CO₂ (Niemczewska, 2012)

Método	Proceso	Pérdida de metano (%)
Adsorción	Adsorción por cambio de presión	<2
Adsorción física	Lavado de agua presurizada	<2
	Procesos con Selexol ®	<6,5
Adsorción química	Lavado de monoetanolamina (MEA)	<3
Separación por membrana	Separación de gas por membrana	<3

Comparación de eficiencia energética de tecnologías de remoción de CO₂ (Niesner, Jecha, & Stehl, 2013)

Tecnología	Requerimiento energético [kWh/Nm ³]				
	TUV ¹ (2012)	Beil ² (2010)	Electrigaz ³ (2008)	Gunther ⁴ (2007)	Berndt ⁵ (2006)
Lavado con agua	0.46	0.2	0.3	0.391	0.28
Lavado químico	0.27	0.56	n/a	0.126	0.42
Lavado físico	0.49-0.67	0.43	0.67	0.511	0.32
Adsorción por cambio de presión	0.46	0.24	0.27	0.285	0.21
Separación por membranas	0.25-0.43	0.19	n/a	n/a	0.5

¹TUV (Vienna University of Technology). 2012. Biogas to Biomethane Technology Review <bio.methan.at/sites/default/files/BiogasUpgradingTechnologyReview_ENGLISH.pdf>

²Beil M., Hoffstede U. 2010. Guidelines for the implementation and operation of biogas upgrading systems. Biogasmax <www.biogasmax.eu/media/d3_5_iwes_biogasmax_v2_rev_nov2010__068764100_1109_10022011.pdf>

³Electrigaz Technologies Inc. 2008. Final report - Feasibility Study – Biogas upgrading and grid injection in the Fraser Valley. British Columbia <www.catalystpower.ca/pdf/fvf.pdf>

⁴Gunther L. 2007. DGE GmbH Presentation. Innogas symposium <www.dge-wittenberg.com/english/vortraege/DGE%20Fachtagung%20WB%202006%20teil1-EN.pdf>

⁵Berndt A. 2006. Intelligent Utilisation of Biogas - Upgrading and Adding to the Grid, Carbotech Engineering GmbH <www.biogas-infoboard.de/pdf/presentation_CarboTech%20Engineering%20GmbH.pdf>

Comparación de las pérdidas de metano de tecnologías de remoción de CO₂ (Niesner et al., 2013)

Tecnología	Pérdida de metano (%)			
	UTV (2012)	Dirkse (2009)	Gunther (2007)	Berndt (2006)
Lavado con agua	2	<2	4.7	Medio
Lavado químico	0.04	<0.1	0.03	Bajo
Lavado físico	4	<2	13,75	Alto
Adsorción por cambio de presión	2	2	5.5	Medio
Separación por membranas	0.5-20	>10	n/a	Alto

Ventajas y desventajas de métodos de remoción de agua del biogás (Ryckeboscha et al., 2011)

Método	Ventajas	Desventajas
Método de condensación -Anti-vaho -Ciclón -Trampa húmeda	Técnicas simples Usualmente usadas con pre-tratamiento de otras técnicas	Presión atmosférica: punto de rocío mínimo de 1 °C. Gas a altas presiones para alcanzar bajo punto de rocío (mínimo -18 °C) pero puede congelarse.
Secador por adsorción -Sílice -Aluminio	Remoción alta: punto de rocío -10 a -20 °C. Bajo costo operativo. Regeneración es posible.	Inversión más costosa. Polvo y aceite deben ser removidos anteriormente.
Adsorción con glicol	Remoción alta: punto de rocío -5 a -15 °C. No tóxico o peligroso	Inversión más costosa: presión alta y 200 °C para regeneración Altos volúmenes de gas (>500 m ³ /h) para ser económico
Adsorción con sales higroscópicas	Alta eficiencia de remoción. No tóxico o peligroso	No realiza regeneración

Ventajas y desventajas de métodos de remoción de H₂S del biogás (Ryckeboscha et al., 2011)

Método	Ventajas	Desventajas
Biológico con O ₂ /aire (filtro/depurador/digestor)	Inversión barata: bajo consumo eléctrico y térmico, sin adición de químicos extra o equipo Operación y mantenimiento simples	Concentración de H ₂ S alta (100-300 cm ³ m ⁻³). Exceso de O ₂ /N ₂ en el biogás implica limpieza adicional. Sobredosis de aire causa explosión
FeCl ₃ /FeCl ₂ /FeSO ₄ (en digestor)	Inversión barata: tanque de almacenamiento y bomba dosificadora. Bajo consumo eléctrico y térmico. Operación y mantenimiento simples. Técnica compacta. No hay aire en el biogás.	Baja eficiencia (100-150 cm ³ m ⁻³). Operación cara (sal de hierro). Cambios en el pH/temp no beneficiosos para la digestión. Dosificación correcta es difícil.
Fe ₂ O ₃ /Fe(OH) ₃ Lana de acero para herrumbre -con virutas de madera impregnada	Alta eficiencia de remoción (>99%) Captura de mercaptanos Inversión barata Simplicidad	Costos operativos altos. Regeneración es exotérmica: riesgo de ignición de las virutas. La superficie de reacción se reduce con cada ciclo. Polvo liberado puede ser tóxico.
Adsorción en agua	H ₂ S <15 cm ³ m ⁻³ Barato cuando hay agua disponible CO ₂ también es removido	Operación costosa: alta presión, baja temperatura. Técnica difícil. Posible obstrucción de la columna de adsorción.
Adsorción química -NaOH -FeCl ₃	Bajo consumo eléctrico Menor volumen, menor bombeo, vasos más pequeños. Bajas pérdidas de CH ₄	Inversión y operación costosa. Técnica difícil, no regenerativa.
Adsorción química -Fe(OH) ₃ -Fe-EDTA	Alta eficiencia de remoción: 95-100%. Operación barata. Pequeño volumen requerido. Bajas pérdidas de CH ₄	Técnica difícil. Regeneración a través de oxigenación. CO ₂ -> H ₂ CO ₃ (usando EDTA) conduce a la precipitación. Formación de tiosulfatos de quelatos + H ₂ S (usando EDTA)
Membranas	Remoción alta >98%. Remoción de CO ₂ .	Operación y mantenimiento costosos. Complejo

Método	Ventajas	Desventajas
Filtro biológico	Remoción alta >97%. Bajo costo operativo.	Tratamiento extra para calidad de tubería. O ₂ /N ₂ implica purificación extra
Adsorción con carbón activado	Alta eficiencia (H ₂ S < 3cm ⁻³ m ³) Alta tasa de purificación. Baja temperatura de operación. Técnica compacta. Capacidad de carga alta.	Inversión y operación costosos. Pérdidas de CH ₄ . Se necesitan H ₂ O y O ₂ para remoción de H ₂ S. Regeneración a 450 °C. Residuo presente hasta 850 °C.

Ventajas y desventajas de métodos de remoción de siloxanos del biogás (Ryckeboscha et al., 2011)

Método	Ventajas	Desventajas
Adsorción con solventes orgánicos	Alta eficiencia de remoción (97%)	Remoción completa no es posible
Adsorción con ácidos fuertes	Alta eficiencia de remoción (<95%)	Problemas ambientales Productos peligrosos
Adsorción con bases fuertes	No se realiza debido a la precipitación de CO ₃ ²⁻	Corrosión Precipitación de CO ₃ ²⁻
Adsorción con gel de sílice	Alta eficiencia de remoción (<95%) Alta capacidad de remoción vs carbón activado (50% extra)	Humedad disminuye la eficiencia
Adsorción con carbón activado	Alta eficiencia de remoción (95%) Regeneración posible	Se necesita alta presión (mayor capacidad de adsorción)
Separación criogénica	Alta eficiencia de remoción (99,3% a -70 °C) Remoción de variedad de impurezas	Humedad disminuye la eficiencia de remoción Inversión y operación costosa (alta presión y temperaturas bajas)