

UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS “JOSÉ MARTÍ PÉREZ”
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en
Eficiencia Energética**

**PRETRATAMIENTO BIOLÓGICO Y TERMO-ALCALINO DE LA
CACHAZA ORIENTADO A LA PRODUCCIÓN DE METANO**

Maestrante: Ing. Regla María Bernal Gutiérrez

Tutora: M.Sc. Lisbet López González

RESUMEN

Anualmente se producen millones de toneladas de residuos sólidos en todo el mundo, dentro de estos, la cachaza es uno de los de mayor problemática en Cuba, cuya disposición incluye el uso como acondicionador de suelos o el compostaje hasta materia orgánica. Sin embargo, la complejidad de estos residuos impone el estudio de métodos alternativos que contribuyan a mejorar la eficiencia del proceso de estabilización, donde el paso limitante es la etapa de hidrólisis y solubilización del material orgánico complejo.

La presente investigación se desarrolla con el objetivo de evaluar el efecto del pretratamiento biológico y termo-alcalino de la cachaza orientado a la producción de metano. Para ello, se realiza un trabajo experimental según procedimiento descrito en la literatura, que caracteriza al residuo, se evalúa el proceso de digestión anaerobia en régimen discontinuo, para los pretratamientos estudiados en condiciones de temperatura mesofílica y se analiza la cinética del proceso. Con los criterios que emergen del trabajo experimental se realiza una propuesta tecnológica para la producción de biogás en la UEB central azucarero “Melanio Hernández”, como caso de estudio, que incluye el análisis de factibilidad económica de la inversión de los pretratamientos estudiados.

Se demuestra con el análisis experimental, que la cachaza posee las mejores características y potenciales como sustrato para producir metano. En el estudio de los pretratamientos biológico con ME y termo-alcalino con NaOH se alcanzó incrementos de rendimientos de metano de 8,5% y 11,1% respectivamente a la cachaza sin tratar, sin embargo, los resultados estuvieron por debajo a los reportados por la literatura. En el análisis cinético los resultados se ajustan a todos los modelos, pero los mejores resultados fueron con los modelos de Hill modificado y Chapman. Los criterios permitieron arribar a una propuesta tecnológica para el pretratamiento termo-alcalino con NaOH viable según los indicadores económicos con un valor del Valor Actual Neto (VAN) de \$1 607 838,8 y un período de recuperación de la inversión (PRI) de 4 años.

ABSTRACT

Millions of tones of solid wastes are produced annually all over the world. Among them, pressmud is one of the most troublesome in Cuba. The deposition of this waste includes its use as soil conditioner or its composting into organic matter. However, the complexity of this waste imposes the study of alternative methods contributing to improve the efficiency of the stabilization process, where the limiting step is the hydrolysis and solubilization of the complex organic material.

This research is developed with the objective of assessing the effect of the biological and thermo-alkaline pre-treatment of pressmud oriented towards methane production. For this, an experimental work is carried out according to a procedure described in literature for the characterization of wastes, the assessment of the anaerobic digestion in batch experiments in mesophilic conditions of the pre-treatments studied, and the kinetic analysis of the process. With the criteria emerging from the experimental work, a technological proposal is presented for methane production in the Agro-industrial Complex "Melanio Hernández", as a study case, which includes the investment economic pre-feasibility analysis of the pre-treatments studied.

The experimental analysis proves that pressmud possesses the best characteristics and potentials as a substrate for producing methane. In the study of the biological pre-treatment with effective microorganisms and the thermo-alkaline pre-treatment with NaOH, increases of methane yield of 8,5 % and 11,1 %, respectively, were achieved, as compared to untreated pressmud. However, the results were below those reported in literature. In the kinetic analysis, the results fit all kinetics models, but the best results were obtained with the modified Hill and the Chapman models. The criteria made possible to reach a viable technological proposal for the thermo-alkaline pre-treatment with NaOH according to the economic indicators, with a Net Present Value (NPV) of \$1 607 838,8 and a Payback Period (PP) of 4 years.

ÍNDICE	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
 CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL	
1.1 Introducción.....	4
1.2 Uso de fuentes renovables de energía.....	5
1.3 Composición de la Biomasa Lignocelulósica.....	6
1.4 Proceso de digestión anaerobia para obtención de metano.....	11
1.4.1 Cinética del proceso.....	12
1.4.2 Modelos cinéticos que describen el comportamiento de la digestión anaerobia.....	15
1.5 Residuos sólidos de la industria azucarera para su conversión a biogás.....	18
1.6 Desarrollo del biogás en Cuba.....	19
1.7 Consideraciones económicas relacionadas con la producción de biogás en Cuba.....	20
1.8 Conclusiones parciales.....	22
 CAPÍTULO 2 ESTUDIO DEL PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA DE LA CACHAZA	
2.1 Introducción.....	23
2.2 Procedencia y caracterización del residual de la cachaza.....	23
2.3 Metodos Analíticos.....	23
2.3.1 Pretratamiento biológico y termo-alcálido del residual cachaza.....	24

2.3.2 Ensayo en discontinuo	25
2.4 Análisis cinético.....	41
2.4.1 Análisis Estadístico.....	30
2.5 Análisis económicos de los pretratamientos biológicos y termo-alcálico.....	30

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LO RESULTADOS

3.1 Introducción.....	53
3.2. Caracterización del sustrato.....	53
3.3 Potencial de metano y cinética de los pretratamientos.....	54
3.4 Valoración económica de los pretratamientos.....	62
3.5 Conclusiones Parciales.....	68

CONCLUSIONES.....	70
--------------------------	-----------

RECOMENDACIONES.....	71
-----------------------------	-----------

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
--	-----------

ANEXOS

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora M.Sc. Lisbet López González, por la paciencia para realizar esa tarea, que contribuyó a mi crecimiento profesional y al desarrollo de este trabajo. Por ayudarme a creer que yo sí podía.

Las gracias especiales a mis amigas: Dayami, Janet, Geysell, Lisette y Zuleyki por el gran apoyo intelectual y emocional que me brindaron.

A mis padres, por el apoyo incondicional y constante durante toda mi vida y la confianza en que algún día yo iba a llegar a la meta.

A mi esposo por su Amor, apoyo y confianza depositada en mi.

A mis vecinos trinitarios por su cariño y apoyo cuando más falta me hacía.

A todos los amigos que con sus palabras de aliento me ayudaron a vencer los momentos de desánimo...

Por último, no menos importantes, a Tania y Alexey que me han ayudado siempre y por demostrarme su amor y cariño hacia mis hijos.

En fin, desde lo más profundo de mi, gracias a todos los que me acompañaron en hacer de este sueño una realidad.

DEDICATORIA

A mis padres, por el regalo de la vida.



*A mis hijos José Javier y Jorge Javier, que son mi mayor tesoro,
por quienes puse todo el empeño.*

*A mis padres, mi esposo, amigos y el resto de la familia, por ser la
otra parte de mí.*

*A quien, desde su silencio y omnipresencia, me protege, fortalece y
restaura cada día.*

PENSAMIENTO

*“Produce una inmensa tristeza pensar que
la naturaleza habla mientras el género
humano no escucha...”*

Victor Hugo

INTRODUCCIÓN

La crisis energética y la preservación del medio ambiente, constituyen dos cuestiones trascendentales para el mundo actual. El aumento de la densidad demográfica, aparejado con el desarrollo industrial y la ilimitada explotación de los yacimientos de combustibles fósiles, traen como consecuencia el surgimiento de nuevos problemas debido a la generación de desperdicios ya la crisis energética dada por el creciente consumo de recursos energéticos fósiles.

Cuba no presenta una situación diferente al respecto, se considera que la producción de energía eléctrica siempre ha estado afectada por los problemas que provocan los elevados costos de las importaciones de combustible fósil. En el país se reconoce que el desarrollo de las energías renovables produce varios beneficios dados por menores costos, mayor estabilidad de suministro y minimización de efectos ambientales. En los últimos años, se ha producido un incremento del uso energético de la biomasa, la energía eólica, la energía solar y la producción de biogás, a pesar de que se considera un país en vías de desarrollo.

Ante esta problemática energética y ambiental, la tecnología del biogás emerge y se ha consolidado con impacto internacional. A través de ella, además de facilitarse la depuración o el tratamiento de residuales orgánicos biodegradables mediante un proceso biológico, se obtiene un gas con valor combustible, que adquiere altos niveles de utilización como recurso energético (Montalvo y Guerrero, 2003; Chandra et al., 2012). El biogás se considera una fuente renovable de energía versátil ya que puede reemplazar combustibles fósiles en la producción de energía y calor, y más recientemente como combustible alternativo para vehículos (Weiland, 2010).

Se reconoce por la literatura especializada, que este proceso biológico posee amplias virtudes, por lo que su tecnología hoy adquiere altos niveles de utilización (Montalvo y Guerrero, 2003; Boletín Clips de Energía, 2012; Chandra et al., 2012).

Los procesos de digestión anaerobia se han convertido en uno de los procedimientos más adecuados para el tratamiento de residuales tanto líquidos como sólidos. Esta alternativa resulta una variante biotecnológica sencilla y económica que permite aprovechar el contenido de materia orgánica y los nutrientes de los desechos como fertilizante o mejorador de suelo, posibilita disminuir la carga contaminante del residuo y generar productos valiosos como son el sustrato orgánico y el biogás como fuente de energía renovable versátil.

Dentro de los residuos agroindustriales de mayor disponibilidad en Cuba se encuentran la cachaza procedente del sistema de purificación de los jugos de caña y las vinazas residuales del proceso de destilación de alcohol, ambos residuos encuentran vías de tratamiento y deposición actualmente en las producciones cañeras, pero existen aún reservas en su tratamiento y posible utilización como materia prima para nuevas producciones.

La cachaza se considera uno de los residuos sólidos industriales más contaminantes que se generan en Cuba, su producción oscila entre 0,03 y 0,04 toneladas por tonelada de caña molida, equivalentes a una carga contaminante por concepto de disposición sin previo tratamiento, de 1 300 Ton. DQO/d (González, 1995; TRANSECO, 1997).

Los principales usos que se reportan de la cachaza son: como mejorador de suelos en la agricultura cañera, en la alimentación del ganado vacuno y para la extracción de ceras y aceites (ICIDCA, 1990). Hasta el presente solo un 26% se emplea en la agricultura y un 7% como alimento animal.

Pese a los múltiples usos, la disponibilidad de cachaza es considerable, lo cual trae como consecuencia serios problemas de contaminación en las zonas destinadas a su disposición, con la consecuente proliferación de insectos y roedores tan perjudiciales para la salud, la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (producto de su escurrimiento), además de la emanación de malos olores (MINAZ, 1996).

En Cuba se ha recurrido a la descomposición anaerobia de la cachaza como alternativa de tratamiento (Cruz, 1991; González y col., 1995). Para ello se emplean grandes volúmenes de agua (relación en volumen 1: 4, cachaza: agua) con el objetivo de diluir el elevado contenido de sólidos en suspensión. La estabilización del residuo se realiza en digestores de última generación (principalmente reactores anaerobios de cama expandida y reactores horizontales de flujo en pistón) diseñados para el tratamiento de residuos líquidos, con repercusión en el costo del tratamiento teniendo en cuenta el volumen de residuo que genera.

Si bien hay avances en el estudio del tratamiento de residuos sólidos a nivel internacional (Zheng, Zhao et al. 2014), aún quedan aspectos por dilucidar sobre la posibilidad de una etapa previa de tratamiento, que permita la estabilización final del material orgánico complejo sin necesidad de grandes diluciones. Más aún, cuando se conoce de la aplicabilidad de la hidrólisis

para diversos fines en materiales con elevado contenido de carbohidratos (Rodríguez-Vázquez y col., 1992), lo que constituye el paso limitante en el proceso de digestión anaerobia.

Sin embargo, nunca antes se ha considerado la potencialidad del tratamiento anaerobio a una elevada concentración de sólidos, lo que pudiera alcanzarse introduciendo etapas previas de tratamiento que garanticen una adecuada estabilización del material orgánico, en un período relativamente corto. Por lo que la autora considera la investigación es de gran aporte para el tratamiento anaerobio de los residuos sólidos, en este caso la cachaza, cuyas soluciones hasta el presente se centran en el consumo de grandes volúmenes de agua para poder llevar a cabo la estabilización del material orgánico.

La base científica en la que descansa la investigación de esta tesis consiste en establecer un proceso de pre tratamiento biológico y otro termo-alcalino de la cachaza con el fin de mejorar la eficiencia de la digestión anaerobia de estos materiales. Teniendo en cuenta lo anterior se formula el siguiente **Problema científico**:

La falta de estudios sobre el pretratamiento biológico y termo-alcalino de la cachaza, limita conocer su efecto sobre el rendimiento de metano.

Hipótesis

Si se aplica un pretratamiento biológico y termo-alcalino a la cachaza, se podrá conocer su efecto sobre el rendimiento de metano.

Objetivo General: Evaluar el efecto del pretratamiento biológico y termo-alcalino de la cachaza sobre el rendimiento de metano.

Objetivos Específicos:

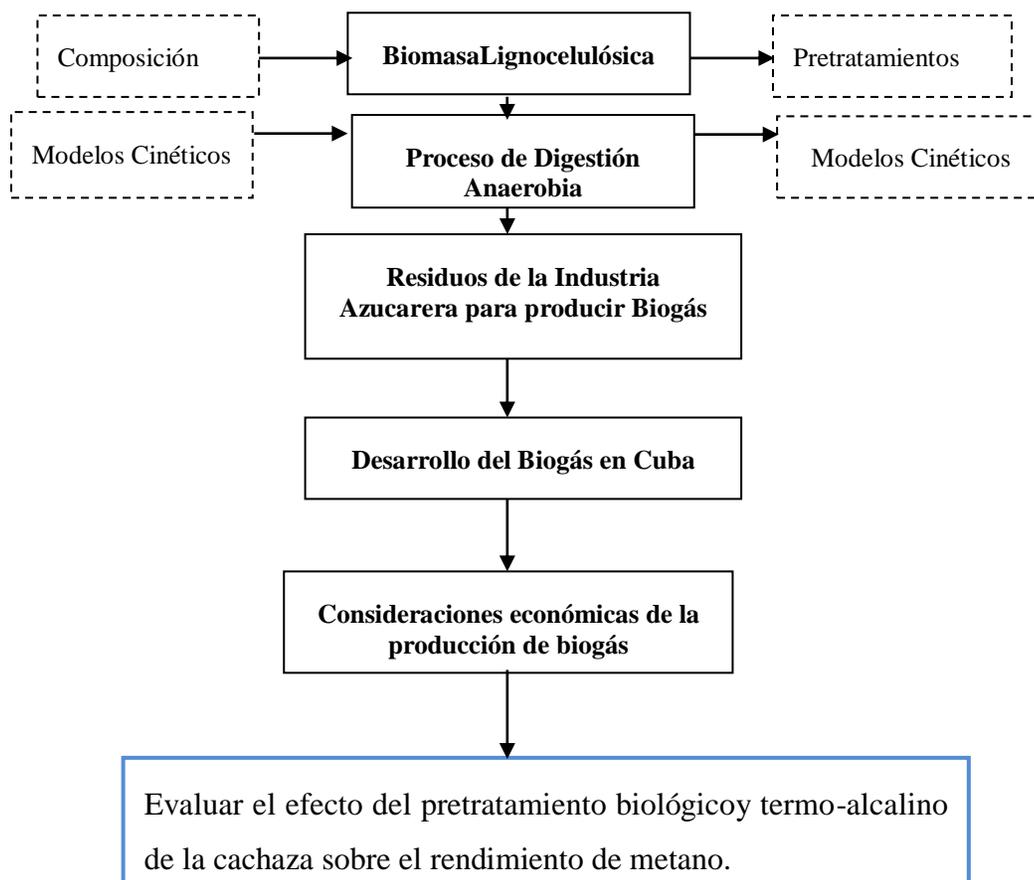
- Determinar el efecto del pretratamiento biológico y termo-alcalino de la cachaza sobre el rendimiento de metano.
- Determinar el comportamiento cinético de la digestión anaerobia de la cachaza con y sin pretratamiento.
- Valorar la factibilidad económica de la aplicación del pretratamiento biológico y termo-alcalino de la cachaza para la producción de metano.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

1.1 Introducción

En el presente capítulo se exponen las bases conceptuales y se identifican las brechas epistemológicas sobre el uso de las fuentes renovable de energía, la utilización de los residuos sólidos lignocelulósico haciendo un análisis de los pretratamientos más utilizados, sus efectos positivos y desventajas para el incremento del rendimiento de metano, con énfasis en el pretratamiento biológico y termo-alcalino de la cachaza para la producción de energía por conversión a biogás y el desarrollo que ha tenido esta tecnología en Cuba, donde la autora enfatiza en la generación de energía a partir de biomasa. Se abordan aspectos esenciales sobre el proceso de digestión anaerobia, así como la cinética y los modelos cinéticos que describen el comportamiento de la digestión anaerobia.

En la Figura 1.1 se muestra el hilo conductor seguido para la construcción del Marco teórico referencial.



1.2 Uso de fuentes renovables de energía

El mundo actual necesita realizar una transformación completa de la matriz energética mundial en la búsqueda de un mayor liderazgo de las energías renovables con un mejor aporte del biogás, por ser una tecnología con bondades reconocidas dentro de las bioenergías (Chandra et al., 2012). De esta forma se podría minimizar el agravado peligro de agotamiento de los combustibles fósiles, así como las consecuencias ambientales de su utilización para la producción de energía, responsable en gran medida del calentamiento global y el consecuente cambio climático.

En el caso de Cuba, el aporte de las fuentes renovables es de vital importancia, estas fuentes están distribuidas en la utilización de las energías eólica, cinética del agua, solar y fundamentalmente, por el uso de la biomasa como energético. Estas fuentes renovables de energía tienen un potencial Estimación en Cuba en el orden de 1140200 toneladas de combustible equivalentes anuales, de estas representa la biomasa 1101700 toneladas. (Indicadores Socio-económicos, 2014).

La generación de energía a partir de biomasa es una de las fuentes renovables con mayor potencialidad en Cuba, proveniente de residuales de vacunos y de porcinos, de la producción de azúcar, alcohol, despulpadoras de café y de vertederos sanitarios, que constituyen hoy día, en su conjunto, una vía de contaminación ambiental. (Contreras Velásquez, 2006).

A juicio de la autora los recursos de biomasa para uso energético se pueden clasificar en seis grandes grupos que se denominan: recurso forestal, agrícola, acuático, pecuario, industrial y urbano. La biomasa de acuerdo a su contenido de humedad puede utilizarse en diferentes procesos para su conversión en energía. En este sentido, se recomiendan los procesos bioquímicos (digestión aeróbica o anaeróbica) cuando la humedad es superior al 60% (IDAE 2002). Sin embargo, existen experiencias con el uso de otros sustratos con un contenido de humedad inferior, los cuales pueden utilizarse con algún tipo de pretratamiento que aumente su biodegradabilidad (Fernández Sánchez, 1999; Smith 1988).

La autora considera que adquieren gran significación las investigaciones encaminadas a definir los potenciales reales de generación de energía por la ruta de bioconversión de biomasa, específicamente a partir de los residuos sólidos con que cuenta el país y que su disposición final actualmente contribuye al deterioro del medioambiente. Para ello es necesario comprender los

elementos que rigen el proceso de digestión anaerobia, así como la complejidad de los residuos a estudiar.

1.3 Composición de la Biomasa Lignocelulósica

La lignocelulosa está compuesta principalmente de tres tipos diferentes de polímeros, (celulosa, hemicelulosa y lignina), envueltos en una compleja estructura. Este tipo de material es el más abundante componente de la biomasa, anualmente se forman 200,000 millones de toneladas en el mundo (Ragauskas et al., 2006). La pared celular de las plantas está formada por lignocelulosa, la composición y porcentajes de los polímeros varían entre las especies de plantas, incluso la lignocelulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina) es el principal componente de la biomasa producida por la fotosíntesis).

La autora considera que la biomasa lignocelulósica es un recurso valioso, que puede ser empleada para la conversión a biogás por digestión anaerobia y utilizar el efluente como mejorador de suelos en los cultivos de Cuba.

Celulosa:

Está conformada por subunidades de D-glucosa, unidas por β -1,4 glicosídicos (Fengel y Wegener, 1984), monosacárido de gran importancia en la fermentación. La celulosa posee dos estructuras una cristalina (organizada) y otra amorfa. Las cepas de celulosa son “empaquetados” denominados fibrillas de celulosa. Estas fibrillas de celulosa son en su mayoría independientes y débilmente vinculados a través de uniones de hidrógeno (Laureano-Pérez et al., 2005).

Hemicelulosa:

Carbohidrato complejo y heterogéneo ya que su estructura posee diferentes polímeros como pentosas (como xilosa y arabinosa), hexosas (como manosa, glucosa y galactosa), azúcar y ácidos, entrelazadas entre sí glucosídicamente. Muchas de ellas, en la degradación hidrolítica, dan, junto a glucosa, manosa, galactosa, etc (Palacio, 1956). La hemicelulosa sirve de conexión entre la lignina y las fibras de celulosa y da toda la rigidez a la red de celulosa, hemicelulosa y lignina (Laureano-Pérez et al., 2005).

Lignina:

Heteropolímero amorfo que consta de tres diferentes unidades de fenilpropano (p- coumaril, coniferil y sinapil alcohol) que se mantienen unidos por diferentes enlaces. El heteropolímero

amorfo no es soluble en agua y ópticamente inactivo; todo esto hace que la degradación de la lignina sea muy complicada (Fengel y Wegener, 1984).

La biomasa lignocelulósica se considera uno de los recursos más abundantes en el planeta que puede ser empleada como materia prima para la síntesis de productos químicos y obtención de energía. La autora considera que la complejidad de estos residuos impone el estudio de métodos alternativos de pretratamientos que contribuyan a mejorar la eficiencia del proceso de biometanización.

1.3.1 Transformación de la Biomasa Lignocelulósica

Pretratamiento

El pretratamiento es la etapa indispensable para el procesamiento de biomasa lignocelulósica que complementa la hidrólisis enzimática y posibilita la obtención de altos rendimientos. Se hace necesario principalmente porque la lignina en las paredes celulares de la planta forma unas barreras contra el ataque enzimático. Un pretratamiento ideal es reducir el contenido de lignina, disminuir la cristalinidad de la celulosa e incrementar el área superficial (Krishna and Chowdary, 2001).

Los principales efectos que un pretratamiento tiene sobre un sustrato, según los reportes de la literatura existente, pueden ser: reducción del tamaño de la partícula, solubilización, incremento de la biodegradabilidad, formación de compuestos refractarios y pérdida del material orgánico (Carlsson et al., 2012).

A continuación, se presenta un resumen con los principales pretratamientos reportados en la literatura especializada en el que se aborda los siguientes aspectos: definición del procedimiento, ventajas y desventajas. Un análisis más detallado se encuentra en el anexo 1.

Pretratamientos	Ventajas	Desventajas
Pretratamiento mecánico: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Trituración mecánica: Molienda para reducción de partícula. ▪ Ultrasonido: Es una técnica empleada para extraer lignina y hemicelulosa. 	Incrementos reportados en el rendimiento de metano entre 5-25% (Delgenés et al., 2002), y no producción de inhibidores a la digestión anaerobia.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Trituración mecánica: Altos requerimientos de energía hacen que no sea factible económicamente su aplicación (Holtzaple et al., 1989). ▪ Pretratamiento ultrasonido su efecto sobre la biomasa es muy superficial.

<p>Pretratamiento térmico:</p> <p>Dentro de estos se encuentran la Explosión con vapor y el pretratamiento por agua caliente presurizada (LHW).</p> <p>En este tipo de pretratamiento la materia prima es calentada en un rango de 150 °C a 230°C.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pretratamiento con explosión por vapor el tamaño de partícula del material requerido (15-30 mm) es considerablemente superior a los utilizados en otros pretratamientos, reduciéndose costos en la molienda (Ballesteros et al., 2000). Además, no emplea catalizadores ácidos (en el caso de las maderas duras) con lo que se reducen los efectos medioambientales. ▪ Pretratamiento por agua caliente presurizada (LHW), es altamente efectivo en el incremento del área de superficie accesible de la celulosa y, por tanto sus degradabilidad enzimática (Zheng et al., 2014) y no se necesitan de químicos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pretratamiento con explosión por vapor, una de las desventaja es la destrucción de una parte de los xilanos contenido en la hemicelulosa, la incompleta rotura de la matriz lignina-carbohidratos y la generación de compuestos que pueden resultar tóxicos a la digestión anaerobia. Entre los compuestos tóxicos se encuentran furfural y 5-hydroxymethylfurfural,hexosas, los ácidos fórmico y levulínico, de la degradación de estos compuestos. También un amplio rango de compuestos fenólicos son generados a partir de la ruptura de la lignina (Hendriks and Zeeman, 2009) ▪ Pretratamiento por agua caliente presurizada (LHW) la formación de compuestos tóxicos e inhibitorios al crecimiento de bacterias y arqueas como los compuestos fenólicos, furfural y 5-hidroximetilfurfural HMF (Hendriks and Zeeman, 2009) .
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pretratamiento químico: ▪ El oxidativo, el ácido y el alcalino. ▪ Pretratamiento oxidativo agente oxidante peróxido de hidrogeno es suspendido en agua y añadido a la biomasa. ▪ El pretratamiento ácido está entre los métodos más estudiados. Incluye el pretratamiento con 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pretratamiento oxidativo parcial degradación de la hemicelulosa y deslignificación de la biomasa. ▪ En el pretratamiento ácido cuando el pretratamiento es con ácido fuerte la lignina y la hemicelulosa son solubilizadas, no así para el diluido, donde la lignina es redistribuida 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pretratamiento oxidativo la pérdida de materia orgánica, alto riesgo de formación de inhibidores al proceso de DA tales como furfural y compuestos aromáticos derivados de la oxidación de la lignina. Su aplicación a la producción de biogás está limitada, siendo más usado en la producción de bioetanol (Zheng et al., 2014). ▪ El pretratamiento ácido requiere altos costos operacionales y de mantenimiento requerido para el

<p>ácido concentrado o diluido. Se han usado principalmente H₂SO₄, HCl y HNO₃, a altas temperaturas.</p> <ul style="list-style-type: none"> El pretratamiento alcalino consiste en la adición de bases diluidas (ej. NaOH, Ca(OH)₂, KOH, and NH₃. H₂O) a la biomasa y su eficiencia depende del contenido de lignina de los materiales. 	<p>(Hendriks and Zeeman, 2009)</p> <ul style="list-style-type: none"> El pretratamiento alcalino puede causar un hinchamiento de la fibra, lo que conduce a un aumento del área superficial interna, un descenso de la cristalinidad, una separación de las uniones estructurales entre la lignina y los carbohidratos, y una rotura de la estructura de la lignina (Hendriks and Zeeman, 2009) En el caso de la cal los niveles de inhibitorios son bajo a la digestión anaerobia (compuestos fenólicos principalmente), y la capacidad buffer adicional, producto de la incorporación de álcalis. 	<p>ácido concentrado y se requiere una neutralización previa a un proceso de digestión anaerobia con el objetivo de obtener un pH en el rango recomendado.</p> <ul style="list-style-type: none"> El pretratamiento alcalino con cal como es una base débil y tiene una baja solubilidad en agua es menos efectiva que otros álcalis y provoca incrustaciones en los reactores. Pretratamiento con NaOH debe ser estudiado el digestato por las trazas de sodio que pueden estar presentes, para poderlo utilizar como mejorador del suelo.
<p>Pretratamiento termo-alcalino con Ca(OH)₂ y NaOH</p>	<p>Los principales efectos de este pretratamiento es la solubilización de la hemicelulosa y de una parte de la lignina. El pretratamiento con NaOH resulta en una mayor solubilización que el Ca(OH)₂ (Zheng et al., 2014).</p>	<p>La oxidación de la lignina a compuestos fenólicos solubles es un riesgo por su posible efecto inhibitorio sobre el proceso de digestión anaerobia (Hendriks and Zeeman, 2009).</p>
<p>Pretratamiento biológico: Dentro de estos están los hongos basidiomicetos, los biosolventes orgánicos, el cual emplea solventes orgánicos y hongos y el</p>	<p>Degradan la lignina y la celulosa, y en menor medida la hemicelulosa.</p>	<p>El pretratamiento biológico presenta problemas asociados principalmente con el largo tiempo requerido para lograr un adecuado grado de deslignificación, susceptibilidad a cambios en las condiciones del</p>

pretratamiento con (ME).		proceso, baja actividad enzimática y el costo generado por el sustrato.
--------------------------	--	---

Combinaciones de pretratamientos

El efecto del pretratamiento termo-químico de residuos sólidos municipales denotó un ligero incremento de la DQO (demanda química de oxígeno) soluble al aplicar temperaturas entre 150-225°C, disminuyendo marcadamente la hidrólisis por encima 225°C (Stuckey y McCarty, 1978). Ying-Chih (1997) reportó las mayores velocidades de hidrólisis (211,9 mg/L. min.) en el estudio del tratamiento simultaneo de vibración ultrasónica (120 w y 20 KHz) y alcalino (40 meq/L). La combinación de los pretratamientos resultó más efectiva que el propio tratamiento alcalino bajo igualdad de condiciones, con el que se alcanzó una velocidad de hidrólisis de 97,8 mg/L. min.). Si bien es cierto que los tratamientos químicos y térmicos reportan un incremento de la biodegradabilidad de residuos con alto contenido de sólidos, en fines como el de la obtención de proteína unicelular (Rodríguez-Vázquez, 1992), deberá estudiarse a profundidad, la combinación con el tratamiento anaerobio de residuos sólidos industriales, con vistas a obtener mejores condiciones operacionales y menores costos por concepto de uso de agentes químicos e insumos energéticos.

En el pretratamiento termo-alcalino varios trabajos confirman lo mencionado anteriormente (Gossett et al., 1982; Teghammar et al., 2010). Gossett et al. (1982) concluyó que la lignina pretratada por tratamiento termo-alcalino en concentraciones por encima de un g L⁻¹ tuvo un mayor efecto inhibitorio para los metanógenos. Teghammar et al. 2010 atribuyeron la baja producción de metano obtenida para residuos lignocelulósicos (residuos de tubos de papel), tratados con NaOH y/o H₂O₂ (2%) a altas temperaturas (190°C, 220°C por 30 min), a la alta concentración de compuestos fenólicos en el hidrolizado. Penaud et al. (1999) encontró que la adición de NaOH (>5 g L⁻¹ NaOH) causó un incremento en la solubilización de la DQO, y consecutivamente la posible formación de melanoidinas a partir de los carbohidratos y proteínas contenidas en la biomasa cruda.

En la agroindustria azucarera, la cual genera grandes cantidades del residual cachaza, que trae grandes problemas medio ambientales, pudiera pensarse en utilizar las aguas de limpieza de los equipos que contiene NaOH para pretratar este residuo sólido lignocelulósico y abaratar el pretratamiento en cuanto al agua y la compra de este producto químico para su posterior

conversión a bioetanol o biogás, lo que ofrecen alternativas de solución para el aprovechamiento del potencial económico y ambiental de dicha biomasa.

En general, para todos los métodos de pretratamiento abordados la selección de los parámetros durante del pretratamiento resulta un aspecto importante desde que las producciones de compuestos tóxicos pueden inhibir el proceso de digestión anaerobia, decreciendo la productividad y/o el rendimiento de metano. Así los polisacáridos son degradados, y los azúcares resultantes pueden ser descompuestos a ácidos carboxílicos, furanos derivativos y fenólicos (Palmqvist and Hahn-Hagerdal 2000). Los furanos derivativos incluyen furfural y HMF, y son derivados de la degradación de las pentosas y hexosas, respectivamente. El ácido fórmico es producido durante la degradación de furfural y HMF, mientras el ácido levulínico es formado por la degradación de HMF. Los fenólicos compuestos son generados a partir del rompimiento parcial de la lignina y de la degradación de los carbohidratos. Los ácidos inhiben el crecimiento celular, específicamente los ácidos débiles no disociados atraviesan la pared celular y se requiere energía para ser exportados fuera de la célula (Palmqvist y Hahn-Hagerdal 2000). El furfural decrece la velocidad específica de crecimiento, y el HMF tiene un mecanismo similar al furfural, pero produce una fase de retardo más larga durante el crecimiento. Los fenólicos interactúan con la membrana celular ocasionando una pérdida de la integridad de la membrana y decreciendo su permeabilidad. Sin embargo, las bacterias productoras de metano son capaces de adaptarse a tales compuestos en un cierto periodo de tiempo, hasta una cierta concentración (Barakat et al., 2012; Monlau et al., 2013b).

1.4 Proceso de digestión anaerobia para obtención de metano

La digestión anaerobia para la obtención de metano La digestión anaerobia ocurre espontáneamente en la naturaleza para degradar la materia orgánica hasta la forma más reducida del carbono: el metano (CH_4), además se produce CO_2 y trazas de otros gases (H_2S , H_2 , NH_3 , etc.). Esta mezcla conocida como biogás, fue llamada gas de pantanos, gas natural de yacimientos subterráneos o gas metabólico de rumiantes (Madigan et al., 2010). El CH_4 es un hidrocarburo gaseoso saturado, incoloro e inodoro, con propiedades combustibles y puede formar mezclas explosivas con el aire, siendo también constituyente del gas natural (Stams et al., 2003). A pesar de que la actividad humana genera CH_4 por sí misma, este no siempre puede ser capturado para ser utilizado como combustible, es por ello que son necesarias tecnologías para su producción en forma controlada. Como proceso de tratamiento, la digestión anaerobia tiene

algunas ventajas sobre la aerobia. En la digestión anaerobia el 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en CH_4 y sólo un 10% de la energía se consume en el crecimiento microbiano, frente al 50% consumido en un sistema de tratamiento aerobio. Además, se obtiene un efluente estabilizado con propiedades biofertilizantes, dado por su mayor mineralización, menor contenido de patógenos, menor fitotoxicidad y menor volumen de lodo (Campos, 2001). No obstante, la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero y su uso como fuente de energía renovable, son las ventajas más aprovechadas de la digestión anaerobia (Stams et al., 2003).

1.4.1 Cinética del proceso

Los modelos tradicionales de digestión anaerobia la dividen en varias etapas: hidrolítica, acidogénica, acetogénica y metanogénica. Muchas de estas reacciones ocurren simultáneamente sin una separación clara de fases (Campos, 2001), lo cual respalda las asociaciones simbióticas microbianas encontradas en estos ecosistemas (Stams et al., 2003).

La etapa hidrolítica es llevada a cabo por enzimas extracelulares, excretadas por bacterias fermentativas. Esta etapa puede ser la limitante de la velocidad del proceso global, cuando se trata de materia orgánica con alto contenido de sólidos. Incluso, en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar el conjunto del proceso (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

Uno de los principales componentes de la materia orgánica y de los residuos ganaderos y agrícolas, son los materiales lignocelulósicos, compuestos por lignina, celulosa y hemicelulosa. La lignina es un polímero (complejo aromático, no carbohidrato) altamente resistente a la digestión anaerobia, que limita la hidrólisis de la celulosa y de otros sustratos (Myint et al., 2007; Vavilin et al., 2008).

La celulosa se hidroliza principalmente a celobiosa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. Las proteínas son hidrolizadas por proteasas en peptonas, péptidos y aminoácidos. Hay proteasas extracelulares (proteinasas) que atacan a la proteína entera y las peptidasas intracelulares cortan aminoácidos del extremo de proteínas y péptidos. Generalmente, la tasa de hidrólisis de proteínas es menor que la de carbohidratos (Gavala et al., 2003).

La degradación de lípidos consiste en una ruptura inicial de las grasas por lipasas, donde se forman ácidos grasos de cadena larga y moléculas de glicerol. Una molécula de fosfolípidos

produce un equivalente de ácido fosfórico, uno de glicerol y dos de ácidos grasos (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

La etapa fermentativa o acidogénica consiste en la fermentación de productos solubles de la hidrólisis, donde se obtiene ácido láctico, etanol, ácido propiónico y ácido butírico, entre otros (Stams et al., 2003), cuyas concentraciones varían en función del consumo de H₂. Cuando el H₂ es eliminado de forma eficiente, las bacterias fermentativas no producen compuestos reducidos como el etanol, que favorece la producción de H₂ y ATP. La actividad de algunas bacterias fermentativas y acetogénicas se favorece a valores bajos de presión parcial de H₂ (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

La fermentación de azúcares la realizan diferentes grupos bacterianos, principalmente las que pertenecen al género *Clostridium*. La principal ruta que utilizan estos grupos es la de Embden-Meyerhof-Parnas. El acetyl-CoA se reduce empleando, como transportador de electrones, el NADH derivado de las reacciones de la ruta. Las proporciones de los productos dependen de la duración y las condiciones de reacción, donde el butírico y el acético son los productos mayoritarios, si el pH se mantiene alcalino (Madigan et al., 2010). Sin embargo, otros estudios muestran que el propiónico puede ser mayoritario en ciertas condiciones (Hashimoto, 1986).

Otras bacterias del género *Propionibacterium*, llevan a cabo un proceso distinto, conocido como fermentación ácido-propiónica, en la que se produce ácido propiónico, succínico, acético y CO₂. Sus requerimientos nutricionales son complejos y crecen con lentitud. Las bacterias ácido-propiónicas difieren de las del género *Clostridium*, en que su fermentación se basa en la conversión del piruvato a oxalacetato por carboxilación, y la conversión a través de succinato y succinil-CoA a metilmalonil-CoA y propionil-CoA, donde dos tercios de la glucosa se transforman en propionato y un tercio en acetato (Madigan et al., 2010).

Por su parte, la fermentación de aminoácidos y de otras moléculas nitrogenadas es realizada por varios grupos de bacterias cuyos productos son: ácidos orgánicos volátiles, ácido succínico, amonio, sulfuro reducido, ácido aminoaléico, CO₂ y H₂. Esta fermentación es un proceso rápido y no limita la velocidad de la degradación de compuestos proteicos (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

Algunas bacterias del género *Clostridium* fermentan aminoácidos, cuyos productos finales de la oxidación son NH₃, CO₂ y un ácido carboxílico con un átomo de carbono menos que el aminoácido oxidado. Según el aminoácido fermentado se producen los ácidos n- butírico,

isobutírico, isovalérico, caproico, además de metilmercaptano, cadaverina, putrescina y H₂S, fundamentalmente (Madigan et al., 2010).

La degradación de ácidos grasos de cadena larga (AGCL) ocurre mediante la β -oxidación. El AGCL entra a la célula y es activado por la Coenzima A (formando el tio-éster-CoA), lo que disminuye su efecto tóxico. Si es un ácido con un número n impar de átomos de carbono, se obtendrían n-1 acetil-CoA y un propionil-CoA (Madigan et al., 2010). Además, ocurre la deshidrogenación del ácido graso, liberándose H₂ a través del NADH. La β -oxidación de AGCL es una ruta muy dependiente de la acción simbiótica de los organismos consumidores de H₂.

La etapa acetogénica es la transformación de ácidos y aminoácidos en compuestos que puedan metabolizar las archaeasmetanógenas. Este proceso involucra reacciones energéticamente desfavorables, donde las bacterias acetogénicas necesitan ser estimuladas por las metanógenas u otros consumidores de H₂ y la ΔG de la reacción depende de la presión parcial de H₂ (Stams, 1994; Campos, 2001). Algunos representantes de las especies acetogénicas son: *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*. Un tipo especial de acetogénicas, son las homoacetogénicas, que consumen H₂ y CO₂ y producen acetato. Estas bacterias son capaces de crecer heterotróficamente a partir de polisacáridos, al contrario de las metanógenas (Madigan et al., 2010). Los principales exponentes son *Acetobacterium woodii* y *Clostridium aceticum*.

La etapa metanogénica es llevada a cabo por archaeas metanógenas que forman el CH₄, de ahí el nombre: biometanización (Stams et al., 2003).

Las metanógenas son anaerobias obligadas y utilizan sustratos con uno o dos átomos de C unidos por enlace covalente (acetato, formato, metanol, algunas metilaminas y CO₂). Habitan asociadas a bacterias (como las acetoclásticas) que mantienen un bajo potencial redox (-300 mV) (Madigan et al., 2010). Se pueden establecer dos grandes grupos de metanógenas en función del sustrato principal: las hidrogenotróficas, que consumen H₂ y ácido fórmico y las metilotróficas o acetoclásticas, que consumen grupos metilos del acetato, metanol y algunas aminas.

En teoría, solo el 33% del CH₄ se produce a partir de reducir CO₂, utilizando el H₂ generado durante la degradación de los sustratos iniciales al nivel del acetato. Estas reacciones redox están involucradas en los procesos de fijación de C y ambos procesos son acoplados a la formación de acetil-CoA, principal precursor del C para la biosíntesis celular (Madigan et al., 2010). Otros estudios han mostrado que el 70% del CH₄ es producido a partir de acetato. Por lo tanto, el acetato es un intermediario clave en todo el proceso.

Las reacciones llevadas a cabo por estos grupos microbianos han sido muy estudiadas, con énfasis en la conservación de la energía durante la metanogénesis, que es el paso final donde interviene la enzima metilreductasa (Madigan et al., 2004).

1.4.2 Modelos cinéticos que describen el comportamiento de la digestión anaerobia

Dentro de los distintos modelos que se pueden desarrollar en la digestión anaerobia son de interés los de tipo cinético, ya que están fundamentados en la cinética celular que se desarrolla en el proceso y en las relaciones celulares que establezcan las poblaciones involucradas, dándole a los modelos una sólida base teórica (López M., 2000).

La modelación de la digestión anaerobia data de los años 70, cuando se evidenció la necesidad de diseñar y operar de eficientemente los sistemas de digestión anaerobia existentes (Ahring et al., 2003). Los modelos clásicos, así como sus correspondientes ecuaciones de diseño para procesos discontinuos y continuos han sido ampliamente abordados en la literatura (Monod, 1949; Grau, 1975; Hashimoto et al., 1979, Linke et al., 2006).

El conocimiento de los parámetros cinéticos del proceso facilita su optimización, una operación más estable y un mejor control del mismo. Permite profundizar en el desempeño del digestor, predecir el diseño apropiado y posibilita un mejor entendimiento de los mecanismos inhibitorios de la biodegradación (Rao y Singh, 2004).

La cinética del crecimiento biológico está basada en dos relaciones fundamentales: la velocidad de crecimiento de los microorganismos (dX/dt) y la velocidad de utilización del sustrato (dS/dt). El producto de ambas relaciones se describe por varios autores, (Pavlostasthis y Gosset, 1986; Borja et al., 1991; Jih-Gawetal., 1998), donde se define a partir de esta relación el coeficiente de rendimiento celular o biomasa ($Y_{x/s}$).

Varios modelos cinéticos se han empleado para describir el proceso de digestión anaerobia (Monod, 1949; Grau, 1975; Chen y Hashimoto, 1980 y Vavilin et al., 2008). El modelo de *Monod* se considera un modelo que simula adecuadamente las diferentes etapas de proceso, a excepción del paso de hidrólisis. Se ha empleado para describir la cinética de la degradación de sólidos suspendidos (lodos domésticos y excreta animal), a pesar de la limitante que no considera la concentración de sustrato en el efluente independiente de la del afluente. Una de las ventajas de este modelo es la connotación determinística que tienen los parámetros cinéticos (μ_{max} y K_S) que describen el proceso microbiológico, aunque no de forma adecuada en el caso de sustratos complejos (López M., 2000).

El modelo de *Contois* incluye el crecimiento de la biomasa hidrolítica/acidogénica y se considera más apropiado en el diseño óptimo de sistemas de tratamiento de residuos complejos, en dos fases. Su aplicabilidad para la descripción de procesos de degradación anaerobia de la materia orgánica particulada es demostrada por Vavilin et al. (2008).

Sin embargo, ambos modelos fueron desarrollados para sustratos disueltos y es válido que se critique su uso en la modelación de sustratos particulados, con la consecuente asimilación de nuevos modelos que describan dicho proceso.

Otro modelo que se emplea para la descripción de procesos de digestión anaerobia y en particular en la aplicación a residuos sólidos ha sido desarrollado por Chen y Hashimoto (1980), se basa en la velocidad específica de crecimiento máxima de los microorganismos e incluye bajos tiempos de retención hidráulica.

A fin de superar las desventajas inherentes al modelo de Monod, se desarrollan varias formas de modelos cinéticos de primer orden. Chen y Hashimoto (1980) desarrollaron su propia ecuación para la fermentación de residuales vacunos y lodos domésticos a partir del modelo de primer orden de *Contois*. Este se basa en la velocidad específica de crecimiento máxima de los microorganismos e incluye bajos tiempos de retención hidráulico, sin embargo, estas consideraciones no pueden ser aplicadas de forma similar a la digestión de otros sustratos sólidos como los cultivos energéticos (Mähnert, 2007).

El modelo de *Contois* y sus modificaciones son reconocidos para describir la etapa de hidrólisis de los sólidos en el tratamiento anaerobio, aunque estos fueron desarrollados originalmente para sustratos disueltos y es válido que se critique su uso en la modelación de sustratos particulados, con la consecuente asimilación de nuevos modelos que describan dicho proceso.

Al revisar la literatura se aprecia un consenso en cuanto a la aplicación de modelos cinéticos de primer orden, como el propuesto por Roediger (ecuación 1.1) (Borja et al., 1991), cuando se emplea la producción de biogás o metano como parámetro indicador de la cinética en un sistema discontinuo, debido a su relación directa con el consumo de sustrato y su facilidad de medición (Contreras, 2013; López, 2000; Pereda, 2007).

$$G = G_m (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (1.1)$$

Dónde:

G: Volumen acumulado de metano después de un tiempo dado (L)

k: Constante cinética de velocidad aparente (d^{-1})

t: Tiempo de digestión (d)

G_m: Volumen máximo de metano acumulado para un tiempo de digestión infinito (L)

Esta expresión empírica refleja el efecto acumulativo de varios procesos (Eastman and Ferguson, 1981) y se ha utilizado por (Contreras et al., 2012; Pagés et al., 2011) así como por (Mähnert, 2007; Mumme, 2008). En el caso de los dos últimos autores encontraron mejores correlaciones a través de modelos de primer orden modificado (modelo de Hill y modelo de Chapman) durante la degradación anaerobia de residuos lignocelulósicos.

(Sánchez et al., 1996) determinaron la ocurrencia de un fenómeno de inhibición durante la DA de la cachaza a través del modelo cinético de primer orden de Roediger. En el estudio, realizado en régimen mesofílico en discontinuo, se analizó el comportamiento de la constante de velocidad específica (k) en función de la carga aplicada. Los valores obtenidos de k decrecieron de 1,76 a 0,01 d^{-1} cuando la carga aplicada fue incrementada de 40 a 140 mL. Los autores atribuyeron la inhibición a una baja actividad enzimática.

En otro estudio, el efecto del pretratamiento térmico y por zonificación de la DA de diferentes sustratos, fue evaluado por varios modelos matemáticos, entre los que se incluyó el de Roediger. El modelo obtenido fijó bien los datos experimentales, con un $R^2=0,99$, y permitió determinar el rendimiento de metano máximo, así como comparar la cinética del proceso antes y después del pretratamiento aplicado (Donoso-Bravo et al., 2010).

Estos resultados ponen de manifiesto que el modelo de primer orden de Roediger, es el más simple para el seguimiento del proceso de digestión, permite de forma rápida y sencilla evaluar la cinética global de la digestión, así como posibles limitaciones durante el proceso. Ha tomado una gran trascendencia en el estudio cinético de diferentes residuos sólidos, por lo que podría ser apropiado para la descripción de la cinética de degradación de la cachaza antes y después de su pretratamiento. Adicionalmente, solo se reportan en la literatura consultada estudios cinéticos de la digestión anaerobia de la cachaza no tratada.

Para el propósito que se persigue con el análisis cinético, los modelos cinéticos de primer orden descrito en el epígrafe, son los que la autora considera más apropiado para el este estudio de caso.

1.5 Residuos sólidos de la industria azucarera para su conversión a biogás

Dentro de los residuos sólidos de no menos importancia provienen del sector agrícola y dentro de este, el originado durante el proceso de fabricación de azúcar: la cachaza.

Los residuos sólidos según Aguilera (1989), se pueden clasificar para el caso de la agroindustria azucarera en energéticos, basados en su contenido de carbohidratos y nitrógeno en cuatro grupos, aunque en el caso de los residuales azucareros, solo se encuentran dos:

- Los ricos en carbohidratos estructurales y de bajo contenido en nitrógeno: puntas o cogollos de caña de azúcar, bagazo y cachaza, aunque también aquí se pueden incluir la caña residual o de los residuos de cosecha, los cuales tienen como uno de sus principales inconvenientes es su bajo peso volumétrico, fenómeno que encarece su transportación y se restringe a zonas cercanas a los ingenios azucareros, además de su alta humedad limita su conservación y su utilización. Por otra parte, el caso de la cachaza, que posee alta humedad y disponibilidad de azúcares fermentables, sin embargo, estos pueden deteriorarse rápidamente y perder su valor nutrimental.
- Los bajos en carbohidratos estructurales y en nitrógeno: melaza, excelente fuente energética que, dados los precios actuales y su uso alternativo en la industria alcoholera, se restringe su utilización en la ganadería, aunque es opcional en caso de seguir los altos precios de los granos de cereal.

En el caso de este estudio, el residuo sólido lignocelulósico (la cachaza), conocida también como torta de filtro o lodos de la caña, es el producto que se obtiene de los residuos del proceso de la clarificación del jugo de la caña de azúcar durante la elaboración del azúcar crudo. En este proceso los iones de calcio de la lechada de cal se unen con impurezas coloidales y el contenido de P_2O_5 en el jugo. Este coloide Ca-P se precipita y se remueve en filtros rotativos en el ingenio, produciéndose de 30 a 50 Kg. por tonelada de materia prima procesada, lo cual representa entre 3 y 5% de la caña molida. Este porcentaje y su composición varían con las características de la zona, con el cultivar cosechado, eficiencia de fábrica, método de clarificación empleado, entre

otros factores, presenta aproximadamente un 25% de materia seca (CÁRDENAS, G.; S. GUSMÁN. 1983).

La digestión anaerobia específicamente de residuos sólidos en los últimos años se estudia con gran interés, debido a la creciente preocupación que en el ámbito mundial se tiene respecto a la problemática medio ambiental que ocasionan (Hobson, 1992; Jewell, 1992; Owens y Chynoweth, 1993, Vallini, 1993; Watson-Craick, 1993; Weiland, 1993). Este proceso constituye una solución viable para reducir el volumen y concentración de materia orgánica, mejorando la calidad de los desechos en su uso como fertilizante (Hobson, 1992; Vallini y col., 1993).

La cachaza al tratarse por digestión anaerobia (DA) para su conversión en energía se complejiza el proceso porque es un residuo sólido lignocelulósico por lo que es de suma importancia la etapa previa de pretratamiento para acelerar la etapa hidrolítica que es la que retarda el proceso de conversión a metano.

1.6 Desarrollo del biogás en Cuba

Aunque la aplicación de tecnologías de producción de biogás en el país data de los años 80, diversos factores incidieron en el fracaso de las primeras plantas de biogás. Entre los más significativos se enumeran: la importación fotográfica de tecnologías para producir biogás desde el exterior, el elevado empirismo en el diseño, construcción y operación, así como falta de infraestructura para desarrollar la tecnología en el país (Contreras et al., 2009). La aplicación de esta tecnología se ha dirigido al desarrollo local del sector agroganadero, para el tratamiento de excretas porcinas y vacunas fundamentalmente (Barreto, 2006) y en casos aislados al tratamiento de residuales en fábricas de azúcar y de derivados de la caña de azúcar (González et al., 1995).

Los digestores más difundidos son del tipo chino e hindú, a pequeña y mediana escala, los cuales presentan como desventajas comunes largos tiempos de retención hidráulica y baja eficiencia de conversión del sustrato, lo que trae como consecuencia una baja velocidad de producción volumétrica de biogás (López, 2000). El uso fundamental del biogás ha sido la cocción de alimentos e iluminación a viviendas, vaquerías y comedores, fundamentalmente (Guardado, 2006).

A mayor escala existen solo dos ejemplares de plantas de biogás en el país. La primera se trata de un reactor UASB (por sus siglas en inglés) de origen holandés para el tratamiento de

residuales azucareros y vinazas de destilería de la Empresa Heriberto Duquezne en la provincia de Villa Clara. Tiene una capacidad de 3000 m³ lo que permitiría obtener 16 000 m³ de biogás, para utilizar en las calderas de la destilería y la cocción de alimentos en la empresa (Obaya et al., 2004; Obaya et al., 2005). La segunda ubicada en La Habana en áreas del vertedero de la calle 100 y considerada única de su tipo en el país para el tratamiento de residuos sólidos. Recibe unas 15 toneladas diarias de residuos provenientes de agromercados y podas de árboles fundamentalmente, con posibilidades de entregar 60 kWh de energía eléctrica.

La literatura consultada demuestra la escasa información que se tiene en cuanto al desarrollo de tecnologías para el tratamiento de los residuos sólidos de cachaza, a pesar de los grandes volúmenes que se obtienen en los países tropicales productores de azúcar.

Desde 1989 el Instituto Cubano de Investigación del Azúcar (ICINAZ) cuenta con una tecnología a escala industrial para el tratamiento de los efluentes líquidos azucareros. En el período de no zafra se le adiciona cachaza con el fin de mantener los niveles de producción de biogás. En estos momentos se encuentran en construcción dos plantas industriales (provincias de Matanzas y Villa Clara) con esta concepción (González y col., 1995).

Hoy en día existe en la provincia de Las Tunas una planta de tratamiento cuyo fin es la producción de biogás para uso de la comunidad.

La dificultad encontrada con estas tecnologías es su elevado consumo de agua (proporción en volumen 1 de agua por 4 de cachaza) que genera un gran volumen a tratar.

Un análisis de los resultados alcanzados en el país en la temática, dan evidencias de que el desarrollo de la tecnología del biogás en Cuba, a pequeña escala, ha estado más dirigido al otorgamiento de licencias ambientales, que a la producción de biogás para la generación de energía (Guardado, 2006). En tanto en el mundo ya se construyen plantas más eficientes enfocadas a la generación de energía eléctrica y el aprovechamiento del calor residual.

1.7 Consideraciones económicas relacionadas con la producción de biogás en Cuba

En el mundo económico actual, se exige con gran anticipación determinar la conveniencia de implementar una cierta iniciativa de conversión mediante la estimación de los costos y beneficios que se asocian a su puesta en marcha y su futura operación, el inversionista se mueve casi siempre en el campo de la incertidumbre. Lo anterior es así porque este carácter anticipado

determina que el resultado del proyecto pueda estar del todo equivocado, y no necesariamente por un mal trabajo del evaluador, ya que el resultado final dependerá del comportamiento de las variables que lo condicionan y sobre las cuales este no tiene ningún grado de control. Estas variables pueden ser: la Tecnológica, la Económica y Ambiental (López González, 2005).

En el caso de los proyectos de biogás es importante al realizar el análisis de factibilidad económica, contar con la oferta precisa de un proveedor que establece los parámetros técnicos y costos reales de la inversión a realizar. Por lo anterior y teniendo en cuenta la opinión de autores como Pardo (2013) y Rocha (2013) se recomienda que en la fase de estudios de potencialidades y utilización de residuales para generar energía a partir de biogás, lo más conveniente es centrarse en un estudio de factibilidad que busca acercarse a las características y potencialidades generales del proyecto, así como determinar los elementos relativos a los costos de inversión y el efecto económico de la posible instalación.

En este sentido, se recomienda trabajar con índices de la literatura, expresados generalmente en unidad monetaria por unidad de potencia eléctrica a instalar, para la determinación de los costos de inversión y operación, que permitan obtener un acercamiento a los mismos y estimar la posible recuperación o no de una inversión, como reportan Pérez et al. (2009), Grubert (2010), y Botero (2011) para inversiones en energías renovables.

Con los resultados del análisis de factibilidad, que sustentan generalmente los resultados de investigaciones, los tomadores de decisiones pueden decidir si se trabaja o no en la profundización del proyecto en cuestión. En este análisis se utilizarán los índices de costo de las energías dados por el Ministerio de Energía y Minas de Cuba (2012), así como precios de portadores energéticos y otros elementos, que ayudan a realizar la evaluación con valores establecidos en el país, aunque al hacer referencia al precio de la electricidad obtenida por cogeneración, solo considera a la industria azucarera. Se asumirá que el precio que se paga por la electricidad cogenerada a la industria azucarera puede ser similar en proyectos referidos a otras esferas productivas que igualmente entregan electricidad a la red pública.

Para realizar un análisis económico conclusivo sobre una inversión energética y específicamente en el tema de biogás, es necesario disponer de información de los proveedores acerca de las características tecnológicas y precios de la tecnología, pues en ocasiones los índices de cálculo no coinciden con los precios disponibles en el mercado que, a su vez, varían rápidamente.

En este sentido, en el presente trabajo se utilizarán para el análisis económico los índices de costos reportados en la literatura (Leitfaden Biogás, 2010) y los indicadores dinámicos de rentabilidad aplicados por López M. (2000); Romero (2005) y Pereda (2007).

1.8 Conclusiones parciales

1. El cambio de la matriz energética mundial y específicamente la de Cuba es de importancia debido al protagonismo que tienen las fuentes renovables como consecuencia de la situación energética actual.
2. En la literatura consultada se aborda con énfasis la deposición de los residuos sólidos en millones de toneladas, que no disponen de un tratamiento adecuado y que contaminan el entorno.
3. Los residuos sólidos de la agroindustria azucarera, como la cachaza que se genera en grandes cantidades, tiene un potencial energético a considerar por su contenido orgánico y por su complejidad para la digestión anaerobia se hace necesario el estudio de métodos alternativos de pretratamientos que contribuyan a mejorar la eficiencia del proceso de biometanización.
4. La tecnología del biogás produce un aporte energético y contribuye a la mitigación de gases de efecto invernadero, en Cuba ha estado dirigida hacia soluciones ambientales sin evaluar sus amplias posibilidades energéticas y aun no se aprovecha en función de la mejora de la matriz energética cubana.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA CACHAZA

2.1 Introducción

El presente capítulo trata el estudio experimental de dos pretratamientos: uno biológico y otro termo-alcalino de la cachaza con fines energéticos, la cual constó de dos etapas, la primera consistió en un diseño experimental en el que se compara el rendimiento de metano de la cachaza pretratada y sin pretratar. Tomando en consideración los resultados de esta etapa y previa consulta con la literatura especializada se realiza un estudio de la cinética del proceso mediante un análisis de regresión no lineal, por medio de los modelos de Hill modificado, Chapman, Roediger y el modelo Factor de Transferencia. Además de un análisis económico para ver la viabilidad económica con fines energéticos de los pretratamientos.

Se realizó la caracterización físico-química de la cachaza, donde se determinaron pH, sólidos volátiles y sólidos totales.

Se determinó, mediante ensayos de fermentación en discontinuo a temperatura de 36 ± 2 °C, el rendimiento de metano para ambas alternativas de digestión de la cachaza, pretratada con ME y con NaOH.

2.2 Procedencia y caracterización del residual de cachaza

La cachaza usada en los experimentos se recolectó durante la zafra 2013 procedente de la Unidad Empresarial de Base Central Azucarero “Melanio Hernández” de la provincia de Sancti Spíritus. La cachaza se secó al aire por 72 horas, y posteriormente se almacenó en bolsas de nylon a temperatura ambiente.

2.3 Métodos Analíticos

La caracterización físico-química de la cachaza consistió en el análisis de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y pH, según los métodos estándares (APHA, 2012).

El pH se midió con un electrodo Crison 52-11, conectado a un medidor de pH/mV Crison GLP 22. La resolución de la lectura es de 0,01 unidades de pH y la precisión de $\pm 0,01$. Se realizó la calibración con disoluciones tampón estándar CRISON de pH 7,02 y 4,00 a 20 °C. Las muestras se mezclaron con agua a una proporción 1:10 y se agitaron a 150 rpm por espacio de 20 minutos (VDI 4630 2005).

Se realizó además una caracterización de los reactores una vez terminado el ensayo para cada pretratamiento, que consistió en la determinación del pH, y la relación de alcalinidades. Se determinó la alcalinidad a dos puntos de pH (5.00 y 4.40). La primera (pH=5.00) representa la capacidad amortiguadora debida a bicarbonatos; la segunda (pH=4.40) representa la alcalinidad total del sistema y se debe a los bicarbonatos más la formación ácidos grasos volátiles (AGV), (Jenkins, *et al.*, 1991). La alcalinidad intermedia (AI), asociada a la concentración de AGV, es estimada como diferencia de ambas. La relación de alcalinidades (AGV/AI), según los métodos VDI 4630 (2006) debe estar entre 0,3-0,4 para evitar la acidificación de un reactor.

2.3.1 Pretratamiento biológico y termo-alcálico del residual cachaza

✓ Pretratamiento biológico con microorganismos eficientes (ME)

En el pretratamiento biológico se utilizaron microorganismos eficientes producidos en la UNISS en el departamento de agropecuario utilizando inóculo de *ME50*. Estos microorganismos eficientes fueron obtenidos a partir de la fermentación de un consorcio de bacterias fototróficas, lactobacillus y levaduras utilizando melasa y suero de leche como sustrato (fuente de carbono y nitrógeno).

Para este estudio se utilizó una solución de ME al 20%, concentración que en estudios anteriores con residuos lignocelulósicos de paja de caña, mostró los mejores resultados en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) soluble (Palma, 2014), siendo la mayor liberación de materia orgánica a las 48 h.

Para la preparación de la solución de ME a esa concentración se tomaron 200 g ME y se vertieron en frascos volumétricos de 1000 mL enrazándolos con agua destilada. Como reactores de pretratamiento se utilizaron Erlenmeyer de borosilicato de capacidad 250 mL a temperatura ambiente. Las pruebas se realizaron por triplicado, donde en cada Erlenmeyer previamente esterilizados, se depositaron 18,43 g de cachaza y se añadió 92,13 g de las soluciones de ME al 20%, para cada lote. Finalmente, este pretratamiento fue incubado durante 48 h.

✓ Pretratamiento termo-alcálico

Las variables de control usadas en el experimento fueron la carga de NaOH y el tiempo de pretratamiento (t). Los niveles de las variables fueron seleccionados de acuerdo a la búsqueda bibliográfica realizada. Una cantidad de agua de 10 g agua g⁻¹ST⁻¹ cachaza se mantuvo fija para

todas las corridas, de acuerdo a estudios previos reportados (Chang et al., 1998). El pretratamiento fue realizado a una temperatura de 75 °C. Se usaron Erlenmeyer de borosilicato de capacidad 500 mL, capaces de soportar temperaturas de hasta 140 °C. Cuando el tiempo de pretratamiento se alcanzó, los reactores se colocaron en un baño con hielo granizado con el objetivo de finalizar la reacción. El contenido de los Erlenmeyer se mezcló y almacenó a 4 °C hasta su posterior uso.

En el pretratamiento termo-alkalino con NaOH, se realizó en dos tiempos, las primeras dos repeticiones en un tiempo de 1 h y las otras dos en 2 h. A la mezcla se le añadieron 3,8 g de hidróxido de sodio, 40 g de cachaza y 380 g de agua para mantener la dilución de 10 partes, los mismos fueron hermetizados y cubiertos con papel de aluminio para evitar la pérdida de calor al medio y puestos en un termoreactor, alcanzando la temperatura requerida al cabo de los 29 minutos de haberlos puestos en el termoreactor. Una cantidad determinada de cachaza pretratada y sin pretratar se utiliza para los ensayos en discontinuo como se explica a continuación.

2.3.2 Ensayo en discontinuo

Para determinar el potencial de metano de la cachaza antes y después de los pretratamientos se realizaron ensayos en discontinuo en reactores de polietileno de 2 L de capacidad, a temperatura constante de $37\pm 1^{\circ}\text{C}$. Los reactores fueron puestos en una incubadora para mantener una temperatura constante.

Se realizaron dos ensayos en discontinuo. Para el pretratamiento biológico se utilizó como fuente de inóculo una mezcla de dos digestatos en igual proporción: lodo procedente de un reactor anaerobio de 9 L de capacidad el cual había operado con residual de cachaza (Inóculo 1), y digestato de una planta de biogás familiar con excreta porcina de sustrato. Para el pretratamiento termo-alkalino se utilizó digestato de una planta de biogás familiar con excreta porcina de sustrato (Inóculo2).

Los experimentos se realizaron por triplicado, reportándose los resultados promedios de cada experiencia. En la figura 2.1, se muestran una foto de la instalación experimental.



Fig. 2.1 Instalación experimental en los ensayos en discontinuo para los pretratamientos estudiados

La muestra de inóculo fue tamizada con el objetivo de eliminar los sólidos de tamaño considerable, que pueden ocasionar interferencias en la transferencia de masa de la fermentación en discontinuo. Para ello se utilizaron dos tamices una malla de 10 mm con orificios redondos y otra con orificios cuadrados para separar fracciones menores de 10 mm.

Antes de comenzar el experimento, con el fin de agotar la materia orgánica, aún presente en el inóculo, se adicionó a cada reactor 1,5 L de inóculo ($m_i=1,5$ kg), aproximadamente. Estos permanecieron cerrados con tapón de goma, conectados cada uno con mangueras a medidores de volumen de gas en forma cilíndrica. Se mantuvieron los reactores bajo estas condiciones por espacio de 15 días, sin adición de sustrato. Posteriormente se les adicionó a cada frasco la masa de sustrato (cachaza) m_s , calculada a partir de la ecuación 2.1, para una relación inóculo/sustrato p_i igual a 2, recomendada en la literatura en el caso de digestión en discontinuo a altas cargas de sólidos, con el fin de evitar una fase de retraso muy grande o prevenir la inhibición del proceso (Linke y Schelle, 2000; VDI 4630, 2006; Angelidaki et al., 2009).

$$p_i = \frac{m_i \cdot c_i}{m_s \cdot c_s}$$

Ec. (2.1)

Donde:

m_i : masa de inóculo (kg)

m_s : masa de sustrato (kg)

c_i : concentración de sólidos volátiles del inóculo (gkg^{-1})

c_s : concentración de sólidos volátiles del sustrato (gkg^{-1})

Los valores de los principales parámetros químicos analizados al inóculo se muestran en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Parámetros químicos analizados a los inóculos utilizados en los ensayos en discontinuo.

Inóculo	pH	ST (%)	SV(%MF)	SV(% MT)
Inóculo 1	7,63	3,56	2,22	62,35
Inóculo 2	7,88	3,19	1,78	55,79

En el experimento se utilizó un reactor de control (frasco con inóculo sin sustrato), con el objetivo de restar en la determinación del rendimiento de metano del sustrato, el metano formado a partir de la materia orgánica aportada por el inóculo. Todos los frascos fueron agitados manualmente una vez al día para favorecer el contacto entre el sustrato y los microorganismos, re-suspender los sedimentos y romper la capa de material flotante.

El metano producido fue burbujeadado en una solución de NaOH al 3%, con el objetivo de remover el CO₂ generado. El volumen de CH₄ producido diariamente fue medido por desplazamiento de la solución, de este modo, la producción acumulada de CH₄ fue registrada en cada corrida.

Los experimentos fueron realizados por triplicados, reportándose los resultados promedios de cada experiencia. La cantidad de metano producido se midió diariamente durante los días que duró el ensayo, en el caso del pretratamiento biológico duró 21 días y el pretratamiento termo-alcalino 29 días, se registró además la temperatura y presión ambiental para los dos experimentos.

Para referir el volumen de gas producido v_1 , medido a temperatura y presión ambiental T_1 y p_1 , a condiciones estándares T_0 y p_0 como volumen normalizado v_0 , se aplicó la expresión 2.2 según el manual VDI-4630 (2006). Antes de normalizar el volumen de metano se le restó el volumen producido en el reactor de control (inóculo sin sustrato).

$$v_0 = v_1 \cdot \frac{(p_1 - p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T_1} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Donde:

v_0 : Volumen de metano normalizado (Nm³)

v_1 : Volumen de etano medido a temperatura T1 y presión p1 (m³)

p_1 : Presión a la que se midió el metano (mbar)

p_w : Presión de vapor del agua a la temperatura T1 (mbar)

T1: Temperatura a la que se midió el metano (K)

p_0 : Presión normal (1013,25 mbar)

T0: Temperatura normal (273,15 K)

El potencial de metano, definido como la cantidad de metano generado por cantidad de sustrato se determinó según la ecuación 2.3 (VDI-4630, 2006), durante un tiempo de digestión para ambas alternativas. Los valores obtenidos son representados en una curva acumulativa de rendimiento de biogás y_B (Nm³kgsv⁻¹) en el tiempo.

$$y_B = \frac{\sum_{t=0}^{t=21-29} V_B}{m_s} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde:

V_B : Volumen de metano acumulado durante el tiempo de digestión t (Nm³)

m_s : Masa de sustrato adicionada al reactor en términos de sólidos volátiles (kgsv)

2.4 Análisis cinético

En este estudio la aproximación a la cinética del proceso se realizó aplicando los modelos de Roediger (ecuación 2.4) (Borja et al., 1991), de Chapman (Mähnert, 2007; Linke y Schelle 2000) (ecuación 2.5), Hill (ecuación 2.6) (Mähnert, 2007) y el modelo de transferencia (ecuación 2.7). El ajuste a los modelos se realizó mediante un análisis de regresión no lineal, se utilizó el Software Statgraphics Centurion XVI para Windows y de esta forma fue posible obtener los parámetros cinéticos y_{\max} y k .

$$y(t) = y_{\max} \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad \text{Ec. (2.4)}$$

$$y(t) = y_{\max} \cdot (1 - e^{-b \cdot t})^c \quad \text{Ec. (2.5)}$$

$$y(t) = y_{\max} \cdot (t^b / (c^b + t^b)) \quad \text{Ec. (2.6)}$$

$$y(t) = y_{\max} \cdot (1 - e^{-Rm(t-d)/y_{\max}}) \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Donde:

$y(t)$: Producción de metano acumulativa ($\text{mL}_{\text{NgSV}}^{-1}$)

y_{\max} : Rendimiento máximo de metano ($\text{mL}_{\text{NgSV}}^{-1}$)

t : Tiempo de digestión (d)

k : Constante de velocidad aparente (d^{-1})

b, c : Constantes del modelo

Rm : Máxima producción de metano alcanzada en un día ($\text{mL}_{\text{N}} \text{gSV}^{-1} \text{d}^{-1}$)

Otro parámetro de interés en la evaluación del proceso de digestión anaeróbica en discontinuo, es la productividad específica de metano $r_s(t)$. Su determinación se realizó empleando el modelo de Hill (Mähnert, 2007) de acuerdo a la expresión 2.8

$$r_{s(t)} = y'_{\text{CH}_4(t)} = y_{\text{CH}_4\max} \cdot \frac{b \cdot c^b \cdot t^{b-1}}{(c^b + t^b)^2} \quad \text{Ec. (2.8)}$$

Donde:

$y_{\text{CH}_4(t)}$: Producción de metano acumulativa ($\text{mL}_{\text{NgSV}}^{-1}$)

y_{CH_4max} : Rendimiento máximo de metano (mL_NgSV^{-1})

t: Tiempo de digestión (d)

b, c: Coeficientes del modelo

2.4.1 Análisis estadístico

El Análisis de varianza (ANOVA) simple fue aplicado para probar si existen diferencias significativas entre los valores medios para las variables de respuesta y_{max} , y las constantes cinéticas, así como estimar el tamaño experimental de los errores. Para la comparación de la media entre los pares de tratamientos se usó el test de rango múltiples de Duncan (Montgomery, 2005). La normalidad de los datos y la homogeneidad de las varianzas fueron determinadas por la prueba de Kolmogorov–Smirnov y el test de Fischer, respectivamente. Los datos fueron analizados con el Statgraphics versión 5.1 para un nivel de significación del 5%.

2.5 Análisis económico de los pretratamientos biológico y termo-alcalino

En el estudio de factibilidad para determinar los elementos relativos a los costos de inversión y el efecto económico de la posible instalación para los pretratamientos biológico ME y termo-alcalino con NaOH, se tomaron numerosos criterios para esta evaluación que son los más comúnmente usados en la actualidad (MINAZ, 1996) entre los que se encuentran:

- ✓ Valor Presente Neto (VPN)
- ✓ Tasa Interna de Rendimiento (TIR)
- ✓ Período de Recuperación (PRI)

La técnica del VPN se determina como:

$$VPN = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{F_c i}{(1 + D)^i}$$

Donde:

K_0 - Inversión o capital inicial.

$F_c i$ - Flujo de caja en el año i .

D - Tasa de descuento real utilizada.

De forma general, el flujo de caja se puede calcular como:

$$Fc_i = (I_i - G_i - Dep) \cdot (1 - t/100) + Dep$$

Donde:

I- Ingresos en el año i, \$

G- Gastos en el año i, \$.

t- Tasa de impuestos sobre ganancia, %.

Dep- Depreciación del equipamiento o amortización de la inversión, \$.

Algunos de los parámetros económicos utilizados en este trabajo son:

Tasa de descuento -----10%

Tasa de inflación ----- 8%

Margen de riesgo -----0,03%

Tasa de impuestos -----0,3%

Margen de riesgo -----0,03%

Vida útil estimada -----20 años

Otros parámetros económicos además de los definidos anteriormente, es:

Costo de venta de electricidad al SEN \$/kW ----- 0,131 \$/kWh

Analíticamente la TIR se determina como:

$$0 = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{Fc_i}{(1 + TIR)^i}$$

Como se puede observar, esta ecuación no se puede resolver directamente, sino que se requiere de un análisis iterativo para obtener el valor de la TIR.

El PRI es el tiempo en que se recupera la inversión inicial para una tasa de descuento D considerada. Se calcula como el momento para el cual el VPN se hace cero.

$$0 = -K_0 + \sum_{i=1}^{PRI} \frac{Fc_i}{(1 + D)^i}$$

Esta ecuación no puede resolverse directamente, por lo que para obtener el valor del PRI se le van adicionando gradualmente a la inversión inicial los flujos de caja anuales hasta que el resultado sea cero, en ese momento se ha recuperado la inversión. (Aníbal et al.,2002).

Se realizó además un Análisis de Sensibilidad, la cual es una técnica que indica en forma exacta la magnitud en la que cambiarán el VAN y la TIR como respuesta a un cambio dado en una variable de insumo, manteniéndose constantes las demás. Cada variable se modifica en razón de unos cuantos puntos porcentuales específicos por encima y por debajo de los valores esperados, manteniéndose constante el resto; posteriormente se calcula un nuevo VAN para cada uno de estos valores y finalmente los conjuntos de VAN se grafican contra la variable que se ha cambiado. Las pendientes de las líneas que aparecerán en las gráficas mostrarán qué tan sensible es el VAN a los cambios en cada uno de los insumos.

A partir de la información necesaria asociada con la inversión de la tecnología, así como de los costos y ganancias relacionadas a la producción de biogás, se realiza el análisis de factibilidad de las propuestas. Los costos de inversión se estimaron a partir de índices tomados de la literatura (Leitfaden für Landwirte im Land Brandenburg, 2011) que incluyen los costos específicos en pesos/kW eléctrico producido, además de los costos de operación que tienen en cuenta los gastos energéticos de la planta, de agua, de materia prima, de micronutrientes, así como los costos de la purificación del biogás. Se determinaron los indicadores económicos dinámicos antes mencionados: valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión (PRI) con ayuda del EXCEL. Las posibles conclusiones a las que se puede llegar con este análisis es si acepto el proyecto o no para los pretratamientos estudiados en esta investigación.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de rendimiento de metano para cada una de las alternativas de pretratamientos estudiadas por digestión anaerobia de la cachaza en régimen discontinuo, así como el ajuste de los modelos cinéticos a los valores experimentales y finalmente se realiza un análisis de factibilidad económica mediante indicadores dinámicos financieros para fundamentar la viabilidad de la propuesta.

3.2 Caracterización del sustrato

En la tabla 3.1 se recogen los valores de los parámetros químicos analizados para el residuo sólido utilizado en el estudio (cachaza), luego de su secado, con el objetivo de preservar sus propiedades, del estudio experimental de la cachaza se obtuvo un contenido de sólidos totales de 94,95%, de los cuales el 76,32% son volátiles, un pH de 5,4, similar al reportado por Radjaram and Saravanane (2011).

Tabla 3.1. Caracterización del sustrato

Parámetros	Unidad	Cachaza	Valores reportados
pH		5,4(0,06)	7,5 ^a , (4,5 - 5) ^c , 7,7 ^d , 5,5 ^f
ST	%MF	94,95 (2,01)	10 ^a , 29 ^c , 20 ^e , 6,28 ^f
SV	%ST	80,38(5,02)	83,91 ^f
SV	% MF	76,32 (5,22)	

Los datos están expresados como el valor medio \pm desviación estándar. Todos los % son sobre base seca, excepto para los ST.

^a Rouf et al. (2010); ^b Gangavati et al. (2005); ^c Radjaram and Saravanane (2011); ^d Meunchang et al. (2005); ^e Baez-Smith (2008); ^f Sánchez et al., (1996), ^gLeite et al.(2015).

El valor medido de pH fue de 5,4 este valor está en el rango reportado por otros trabajos (Meunchang et al., 2005; Radjaram and Saravanane, 2011; Rouf et al., 2010; Sánchez et al.,

1996). Diferentes valores de pH encontrados en la literatura se deben a diferencias en el proceso de generación de cachaza, método de colección, preservación y determinación.

De hecho, la composición química de la cachaza depende de una diversidad de factores como son: la variedad de la caña de azúcar, edafología del suelo, nutrientes aplicados, proceso de clarificación adoptado, operación de filtración, y otros factores ambientales (Velarde et al., 2004).

3.3 Potencial de metano y cinética de los pretratamientos

✓ Pretratamiento biológico (ME)

El pretratamiento biológico de la cachaza mejoró el rendimiento de metano con respecto a la cachaza sin tratar para un incremento de un 8,5% , este valor pudo estar condicionado por el efecto potenciador de la mezcla de estos microorganismos; que trabajan en sinergia para degradar lignina y en menor medida la hemicelulosa, lo que logra mejoras en la hidrólisis , la solubilización del material orgánico y en el rendimiento de metano acumulado, a partir de los resultados experimentales del ensayo en discontinuo, como se muestra en la tabla 3.2

Tabla 3.2 Incremento de metano con el pretratamiento biológico

Incremento en γCH_4 (%)	Cachaza+ME
Modelo de Roediger	13,7
Modelo de Hill modified	4,3
Modelo de Chapman	8,5
Función de Transferencia	13,2

Fuente: elaboración propia

Los modelos que más se ajustaron a los datos experimentales fueron los modelos de Hill y el de Chapman, pero el que seleccionamos fue Chapman con un rendimiento de metano de 330,7 mL_N gSV⁻¹ respecto a la cachaza sin pretratar, con un incremento de (8,5%).

En la literatura consultada no se encontraron estudios sobre el pretratamiento biológico de la cachaza con (ME), pero sí hay estudios con enzimas hidrolíticas (Lacasa, manganeso peroxidasa y lignina peroxidasa) extraídas del hongo basidomicetos aplicadas a la biomasa, con buenos resultados en el rendimiento de metano.

Anderson, W. et. al., (2005) estudiaron el pretratamiento enzimático de las gramíneas: *Panicum virgatum*, *Cynodon dactylon* y *Pennisetum purpureum*, y demostraron que los subproductos

presentan un valor añadido como materia prima para la elaboración de antioxidantes nutricionales, absorbentes ultravioleta y resinas. Taniguchi, M. et al., (2005) estudiaron el efecto del pretratamiento de cascarilla de arroz usando cuatro hongos de podredumbre blanca, y 60 días de cultivo en fermentación sólida. La pérdida de peso fue de 25%, y los grados de deslignificación de 41, 37, 21 y 18% para *Pleurotus ostreatus*, *Trametes versicolor*, *Phanerochaete chrysosporium* y *Ceriporiopsis subvermispora* respectivamente. Igualmente, se han evaluado otros sustratos (cáscaras de mandarina, manzana y banano, paja de trigo y hojas de árboles) para la producción de complejos enzimáticos lignocelulolíticos (Elisashvili, V. et al., (2008).

El pretratamiento aplicado al rastrojo de maíz con enzima lacasa mostró, luego de 24 h de incubación, un incremento de un 25% en la producción de metano (Schroyen et al., 2014). La producción de metano fue incrementada en 106%, 26% y 54%, después de la aplicación de una mezcla de enzimas hidrolíticas de hongos a la fracción sólida de la excreta de vaca, ensilaje de hierba y ensilaje de maíz, respectivamente (Suárez Quiñones et al., 2012).

También han sido ampliamente estudiados los hongos filamentosos y los basidiomicetos para la degradación de compuestos orgánicos persistentes, entre ellos los colorantes textiles. Estudios comparativos entre estos dos grupos fúngicos demostraron que los hongos filamentosos decoloran de manera limitada estos compuestos, mientras que las especies de basidiomicetos ligninolíticos muestran una amplia capacidad decolorativa. De estos últimos los que han demostrado mayor eficiencia en la degradación de colorantes presentes en los residuales textiles son los hongos basidiomicetos de la podredumbre blanca (Asgher et al., 2009).

Sin embargo, en la mayoría de los casos, de acuerdo a una revisión publicada recientemente, el efecto ha sido mínimo, y el costo de las enzimas alto, lo cual hace que la aplicación del pretratamiento enzimático sea limitado (Zheng et al., 2014). En el caso del ensilaje, sin embargo no se reportó incrementos significativos en un estudio realizado por Vervaeren et al. (2010).

En el caso de estudio el incremento de metano (8,5%) está por debajo a lo reportado por la literatura con las enzimas hidrolíticas extraídas del hongo de la putrefacción blanca para los diferentes sustratos estudiados.

El comportamiento cinético de la degradación anaerobia de sustratos complejos, como se plantea en el Capítulo 1, se puede describir a través de modelos de reacciones de primer orden, ya que

estos se consideran una base sencilla para poder comparar la estabilidad de un proceso con otro, bajo condiciones similares a la práctica (Mähnert, 2007; Lei et al., 2010).

Estos modelos permiten analizar el comportamiento de la producción acumulada de biogás. Así para el tiempo de digestión cero, la producción acumulativa de metano se corresponde con el valor cero mientras que, cuando el tiempo tiende a infinito, (y) se aproxima a su valor máximo (y_{max}).

En el análisis cinético realizado al pretratamiento biológico para analizar el comportamiento del proceso de digestión anaerobia se pudo constatar los resultados mostrados en la tabla 3.3 donde aparecen los rendimientos de metano y los parámetros cinéticos de acuerdo a los diferentes modelos aplicados.

Tabla 3.3 Rendimientos de metano y los parámetros cinéticos para el pretratamiento biológico de la cachaza (ME) y la cachaza sin pretratar.

Pretratamiento biológico (ME) de la Cachaza							
Modelos cinéticos	y_{CH_4max}	R^2	k	Rm	λ	b	c
Roediger	317,31	98,3	0,21				
Hill modified	370,69	99,4				1,02	3,43
Chapman	330,77	99,3				0,15	0,64
Transferencia	320,06	98,5		70,7	0,26		
Cachaza sin pretratar							
Modelos cinéticos	y_{CH_4max}	R^2	k	Rm	λ	b	c
Roediger	273,7	95,5	0,19				
Hill modified	354,9	99,3				0,79	3,85
Chapman	302,7	99,0				0,10	0,46
Transferencia	277,9	96,0		63,8	0,41		

Fuente: Elaboración propia

y_{CH_4max} ($mL_N gSV^{-1}$), R^2 (%), k (d^{-1}), Rm ($mL_N gSV^{-1}d^{-1}$), λ (d), b, c(d)

En el análisis cinético del pretratamiento biológico de la cachaza (ME) y de la cachaza sin pretratar, se obtuvo un ajuste de los datos experimentales a los modelos de Hill, Chapman, Roediger, Factor de transferencia, además de conocer las constantes cinéticas k (d^{-1}) por el modelo de Roediger, la productividad específica de metano R_m ($mL/gSV/d$) y la fase de retardo λ (d), por el modelo de Factor de transferencia y la constante de tiempo c por el modelo de Hill, a la cual la mitad de este máximo valor es alcanzado el mayor rendimiento de metano y la constante c por el modelo de Chapman. Comparando el comportamiento de los modelos en el caso del pretratamiento biológico con (ME) y de la cachaza sin pretratamiento (Fig. 3.1), se puede afirmar que los que más se ajustaron fueron los modelos de Hill y Chapman con una R^2 de 99,4% y 99,3% respectivamente; lo cual significa que estos pueden explicar el 99% de la variabilidad de los datos. Con el modelo de Chapman hay un incremento de 8,5% de rendimiento de metano mientras que Hill de 4,3% respecto a la cachaza sin pretratar.

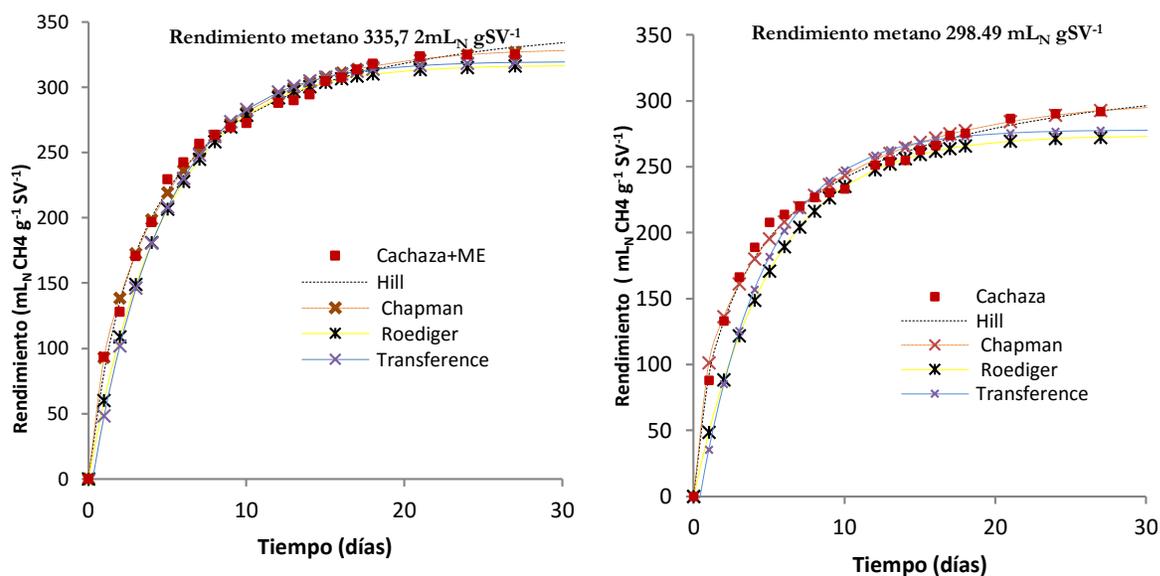


Fig 3.1. Rendimiento de metano ajustados a los modelos cinéticos para el pretratamiento con (ME) y la cachaza sin pretratar.

El tiempo de retardo fue despreciable para todos los casos ($\lambda \approx 0$), lo cual indica que el material soluble fue rápidamente consumido por la biomasa presente.

La máxima producción de metano R_m para el pretratamiento biológico (ME) es de 70,7 $mLCH_4/gSV/d$, mostrando la alta disponibilidad de materia orgánica degradable en la mezcla alimentada.

La productividad específica de metano $r_s(t)$, se considera otro parámetro que describe el comportamiento cinético del proceso de degradación anaeróbica (Mähnert, 2007). A continuación, en la Fig. 3.2 se muestra su evolución para este pretratamiento. La $r_s(t)$ fue incrementada rápidamente durante los primeros días, alcanzando el valor máximo de $65,3 \text{ L}_N \text{ kg}^{-1} \text{ VS}^{-1} \text{ d}^{-1}$ antes del segundo día.

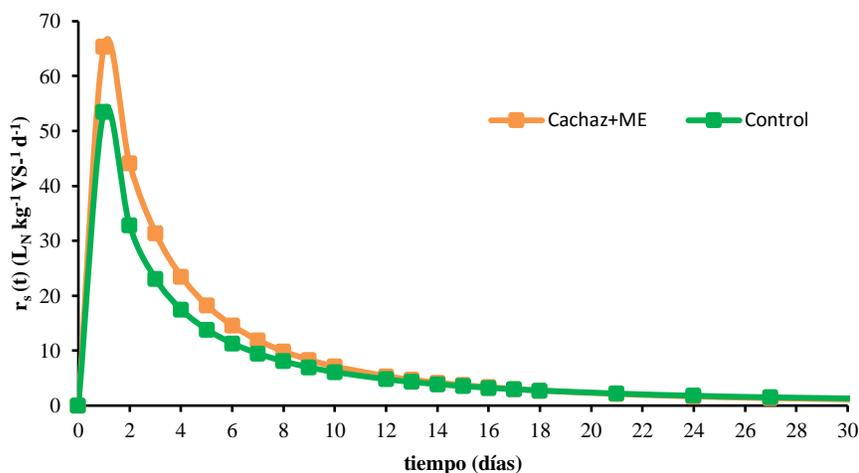


Fig. 3.2 Productividad específica de metano $r_s(t)$ para el pretratamiento biológico (ME)

✓ **Pretratamiento termo-alcalino (TA)**

En el pretratamiento termo-alcalino a $75 \text{ }^\circ\text{C}$ a partir de los resultados experimentales del ensayo en discontinuo, se obtuvo incrementos en el rendimiento de metano respecto a la cachaza sin tratar para los modelos cinéticos estudiados, según se observa en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Incremento de metano con el pretratamiento termo-alcalino

Incremento en y_{CH_4} (%)	Pret-Term-Alcalino 1h	Pret-Term-Alcalino 2h
Modelo de Roediger	9,1	1,6
Modelo de Hill modified	11,1	8,3
Modelo de Chapman	10,2	7,6
Función de Transferencia	9,2	2,0

Fuente: elaboración propia

El pretratamiento termo-alcalino para 1h fue el de mejores incrementos de metano y el modelo de Chapman fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales, con un rendimiento de

metano de 250,3 mL_N gSV⁻¹ y el de mejor incremento de 11,1% respecto a la cachaza sin tratar. Al comparar los resultados con otros estudios reportados el incremento obtenido es menor.

El pretratamiento alcalino de la cachaza fue previamente estudiado con Ca(OH)₂ a 30 °C con una adición de 3,18 g L⁻¹ de Ca(OH)₂ para un tiempo de pretratamiento de 7,33 h (López et al., 2005), y a 100 °C con la adición de 10 g Ca(OH)₂ 100 g ST (López González 2013). Atendiendo a la imposibilidad de comparar los resultados obtenidos con los publicados por López 2010, las condiciones reportadas por la autora fueron reproducidas por López González 2015 (resultados no publicados). El rendimiento de metano en comparación con la cachaza sin pretratar fue incrementado en 12% y 28% para el pretratamiento a 30 °C y a 100 °C, respectivamente.

Otros estudios concernientes al pretratamiento termo-alcalino (TA) con hidróxido de sodio, han sido aplicados para varios tipos de biomasa con resultados positivos (Teghammar et al., 2010) utilizando tubos de papel con las condiciones de 20 g L⁻¹ /190 °C/30 min donde se obtuvo un incremento de metano de 21%; Sambusiti et al., 2013 utilizando paja de trigo al 10% g g⁻¹ ST/40 °C/24 h tuvo un incremento de 43% y Xie et al., 2011) con ensilaje de hierba seca con 12,5 g L⁻¹ /100°C/1,9 h se obtuvo 39% de incremento de rendimiento de metano.

Los menores rendimientos alcanzados comparados con la literatura para otros sustratos pueden estar afectados por compuestos no deseados que pudieran solubilizarse y afectar el proceso de digestión anaerobia. La oxidación de la lignina a compuestos fenólicos solubles es un riesgo por su posible efecto inhibitorio sobre el proceso de digestión anaerobia. Entre ellos, se encuentran ácidos, aldehídos y alcoholes aromáticos. Dentro de estos, los compuestos aromáticos de bajo peso molecular son los que se han mostrado como los más tóxicos para bacterias y Archaeas metanogénicas (Gossett et al., 1982). También las reacciones de Maillard pueden ocurrir bajo condiciones termo-alcalinas con sustratos que contienen proteínas y carbohidratos, como es el caso de estudio, con la formación de compuestos recalcitrantes como son las melanoidinas (Hendriks and Zeeman, 2009; Penaud et al., 1999).

En el análisis cinético en el pretratamiento termo-alcalino (TA) (Fig. 3.3 y 3.4), se pudo observar que hubo un buen ajuste de los datos experimentales a los modelos, pero los mejores ajustes fueron los modelos de Hill y Chapman, con una R² del termo-alcalino a 1h (Hill a 98,47% y Chapman a 98,0%), R² termo-alcalino 2h (Hill a 98,51% y Chapman a 98,20%) y la R² de la cachaza de 98,27% y 98,88 % correspondiente a cada uno de los modelos.

En la tabla 3.5 se recogen los valores de rendimientos de metano y los parámetros cinéticos del pretratamiento termo-alkalino (TA) de la cachaza y de la cachaza si tratar para los modelos estudiados.

Tabla 3.5 Rendimiento de metano y parámetros cinéticos de los modelos estudiados para el pretratamiento termo-alkalino

Pretratamiento termo-alkalino de la Cachaza 1 h							
Modelos cinéticos	yCH₄máx	R²	k	Rm	λ	b	c
Roediger	214,5	96,49	0,25				
Hill modified	250,3	98,47				0,96	3,19
Chapman	224,4	98,00				0,13	0,55
Transferencia	215,9	96,64		49,0	0,29		
Pretratamiento termo-alkalino de la Cachaza 2 h							
Modelos cinéticos	yCH₄máx	R²	k	Rm	λ	b	c
Roediger	198,2	95,38	0,26				
Hill modified	242,6	98,51				0,84	3,38
Chapman	218,0	98,20				0,12	0,50
Transferencia	199,9	95,69		45,7	0,35		
Cachaza sin pretratar							
Modelos cinéticos	yCH₄máx	R²	k	Rm	λ	b	c
Roediger	194,9	97,74	0,25				
Hill modified	222,5	99,27				1,02	3,01
Chapman	201,5	98,88				0,15	0,60
Transferencia	195,9	97,91		45,8	0,24		

Fuente: elaboración propia

yCH₄máx (mLNgSV-1), R² (%), k (d-1), Rm (mLN gSV-1d-1), λ (d), b, c(d)

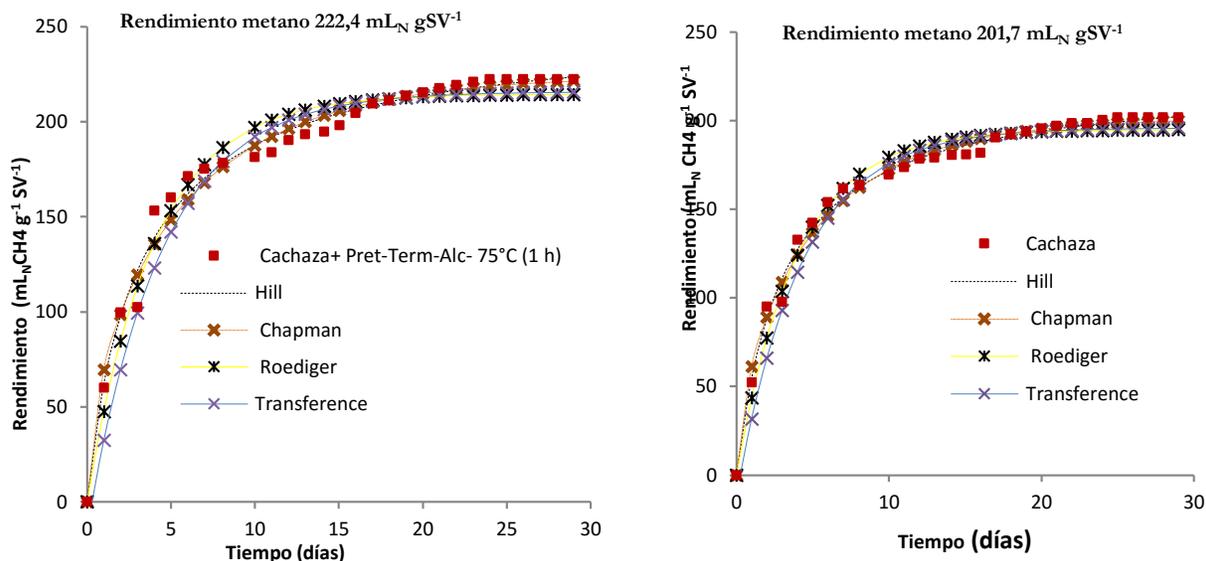


Fig. 3.3. Rendimiento de metano y modelos cinéticos para el pretratamiento termo-alcantino 1h y la cachaza sin pretratar.

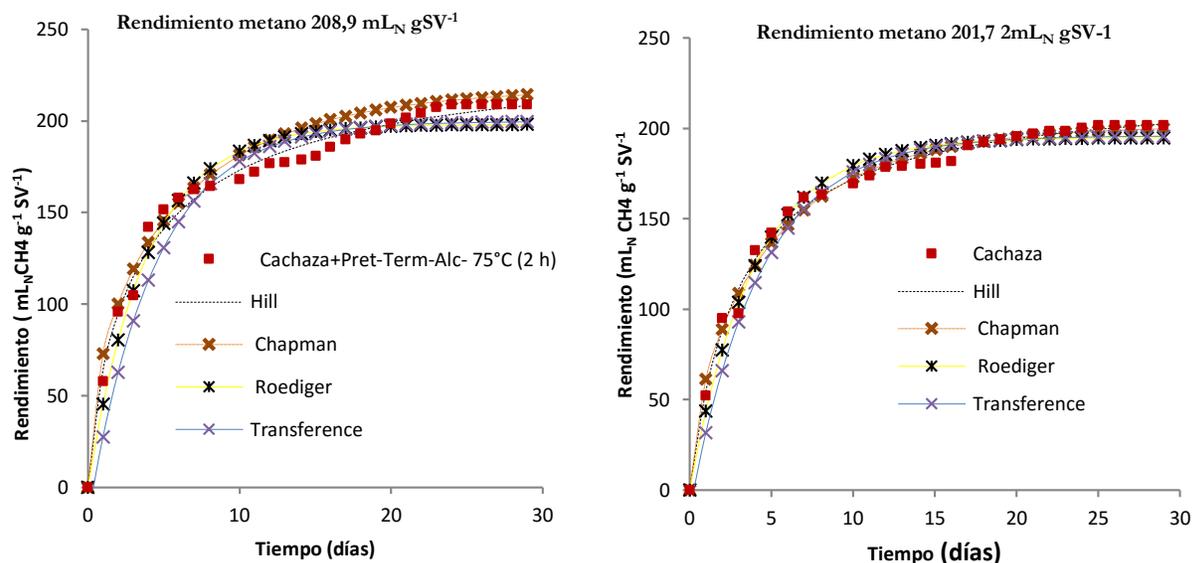


Fig. 3.4. Rendimiento de metano y modelos cinéticos para el pretratamiento termo-alcantino 2h y la cachaza sin pretratar.

El tiempo de retardo fue despreciable para este pretratamiento ($\lambda \approx 0$), lo cual indica que el material soluble fue rápidamente consumido por la biomasa presente.

La máxima producción de metano (R_m) fue de 49,73 mLCH₄/gSV/d en el pretratamiento termo-alcalino de 1h, mostrando la alta disponibilidad de materia orgánica degradable en la mezcla alimentada.

La productividad específica de metano $r_s(t)$ en el pretratamiento termo-alcalino ver Fig. 3.5 muestra su evolución para esta variante. La $r_s(t)$ fue incrementada rápidamente durante los primeros días, alcanzando el valor máximo de 44,73 L_N kg⁻¹VS⁻¹ d⁻¹ antes del segundo día.

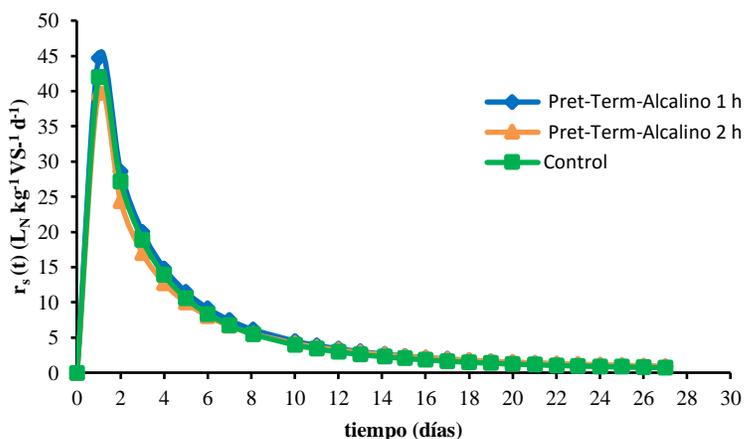


Fig. 3.5 Productividad específica de metano $r_s(t)$ para el pretratamiento termo-alcalino (TA)

Los valores de pH obtenido después de la digestión, estuvo en un rango entre (7,47-7,75), estos fueron superiores a los iniciales, debido a la capacidad buffer desarrollada por el CO₂ solubilizado y al contenido actual de HCO₃⁻. También los valores obtenidos de la relación de alcalinidades (AGV/AI) estuvieron en los valores establecidos.

3.4 Valoración económica de los pretratamientos

En este epígrafe se fundamenta, mediante una evaluación de factibilidad económica para los casos de estudio de la UEB central azucarero “Melanio Hernández” de la provincia de Sancti Spíritus.

En tabla 3.5 y 3.6, aparecen los costos y las ganancias asociados a la inversión relacionada con los dos pretratamientos estudiados, así como los índices de costos empleados en los cálculos y los elementos considerados en el dimensionamiento de la planta de biogás para el caso de estudio de la UEB central azucarero “Melanio Hernández”.

Otro dato a tener en cuenta fue el precio de venta de la electricidad, el cual se asumió como \$0,131 por kWh, según los indicadores energéticos para estudios de factibilidad ofrecidos por el Ministerio de Energía y Minas en Cuba (Ministerio de Energía y Minas, 2012). En los ingresos totales se incluyó el ahorro por sustitución del diesel, por la energía térmica disponible de la cogeneración, se asumió el precio del diesel a \$680 por tonelada, valor promedio a que fue importado este combustible en el país, durante el año 2011.

Tabla 3.5 Índices de costos, costos y ganancias asociados con la inversión para el caso de estudio de la UEB central azucarero “Melanio Hernández” para el pretratamiento biológico de la cachaza con (ME) al 20 %

Parámetro	Unidad	Valor
Índice de inversión	\$/kW _{elect.}	3000,0
Costos de inversión estimado	\$	1323041,16
Índice de costo energético de la planta	\$/kW	14,0
Índice de costo de micro nutrientes	\$/kW	3,0
Índice de costo de purificación del gas	\$/kW	5,0
Índice de costo de asesoría	\$/kW	6,0
Índice de costo de seguro de la planta	\$/kW	8,00
Costos anuales en energía	\$/a	674,2
Costos anuales de agua	\$/a	14542,5
Costos anuales del pretratamiento	\$/a	3675829,38
Costos anuales de micro nutrientes	\$/a	1323,04
Costos anuales purificación del gas	\$/a	2205,07
Costos anuales de mantenimiento	\$/a	1323,0
Costos anuales de recursos humanos	\$/a	17280,00
Costos anuales de asesorías	\$/a	2646,08
Costos anuales de seguro	\$/a	3528,11
Depreciación	\$/a	66152,06
Costos totales de operación por año	\$/a	3724851,42

Precio de venta de la electricidad al SEN	\$/kWh	0,131
Ventas anuales de electricidad	\$	415 964,14
Lodo biofertilizante generado	t	6678
Precio de lodo	\$/t	80
Venta de lodo	\$/a	534240
Precio CER	\$/t	5
Venta CER	\$/a	5467,779
Precio del petróleo	\$/t	339,33
Petróleo ahorrado	t	14
Ahorro petróleo	\$/a	4740,750
Ingresos equivalentes totales para el país	\$/a	955671,92

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2012

Tabla 3.6 Índices de costos, costos y ganancias asociados con la inversión para el caso de estudio de la UEB central azucarero “Melanio Hernández” para el pretratamiento termoalcalino (TA) de la cachaza 1 h.

Parámetro	Unidad	Valor
Índice de inversión	\$/kW _{elect.}	3000,0
Costos de inversión estimado	\$	1094146,73
Índice de costo energético de la planta	\$/kW	14,0
Índice de costo de micro nutrientes	\$/kW	3,0
Índice de costo de purificación del gas	\$/kW	5,0
Índice de costo de asesoría	\$/kW	6,0
Índice de costo de seguro de la planta	\$/kW	8,00
Costos anuales en energía	\$/a	5106,0
Costos anuales de agua	\$/a	14542,5
Costos anuales del pretratamiento	\$/a	377691,47
Costos anuales de micro nutrientes	\$/a	1094,1
Costos anuales purificación del gas	\$/a	1823,6

Costos anuales de mantenimiento	\$/a	1094,1
Costos anuales de recursos humanos	\$/a	17280
Costos anuales de asesorías	\$/a	2188,29
Costos anuales de seguro	\$/a	2917,72
Costos totales de operación por año	\$/a	423737,88
Precio de venta de la electricidad al SEN	\$/kWh	0,131
Ventas anuales de electricidad	\$	343999,73
Lodo biofertilizante generado	t	6678
Precio de lodo	\$/t	80
Venta de lodo	\$/a	534240
Precio CER	\$/t	5
Venta CER	\$/t	4521,82
Precio del petróleo	\$/t	339,33
Petróleo ahorrado	t	11,6
Ahorro petróleo	\$/a	3920,57
Ingresos equivalentes totales para el país	\$/a	882761,55

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2012

Otros elementos a tener en cuenta para el estudio de factibilidad económica de los pretratamientos estudiados: biológico con ME y el termo-alcalino con NaOH se muestran en las tablas 3.7 y 3.8 respectivamente.

Tabla 3.7 Elementos considerados en el dimensionamiento de la planta de biogás para el pretratamiento biológico con ME para el caso de la UEB central azucarero “Melanio Hernández”

Parámetro	Unidad	Valor
Cachaza fresca disponible	t/a	12 600
Relación alimentación de agua:cachaza	-	5:1
Días de operación anual	d	300
Densidad del agua	kgm ⁻³	1000
Rendimiento CH ₄ experimental	m ₃ /tonSV	302,70

Índice generación energía eléctrica ^a	kWhm ⁻³	2,23
Índice generación energía térmica ^a	kWhm ⁻³	3,32
Producción diaria de energía eléctrica esperada	kWh	8753,17
Alimentación diaria de biomasa	t/d	42
Potencia del sistema de generación eléctrica a instalar	MW	0,4
Potencia térmica disponible MW	MW	0,5
Alimentación diaria de agua	m ³ /d	193,9
Alimentación total diaria de agua (incluye el pretratamiento)	m ³ /d	316,9
Producción diaria de biogás	m ³ /d	4746,34
Producción diaria de energía eléctrica	kWh	10584,33
Potencia del sistema de generación eléctrica a instalar	MW	0,4
Energía térmica disponible diaria	kWh	15757,84

a Fuente: Tecnología Agraferm disponible en el sitio www.agraferm.de

✓ Pretratamiento termo-alcálico con NaOH a 1h

Parámetro	Unidad	Valor
Cachaza fresca disponible	t/a	12 600
Relación alimentación de agua:cachaza	-	10:1
Días de operación anual	d	300
Densidad del agua	kgm ⁻³	1000
Rendimiento CH ₄ experimental	m ₃ /tonSV	250,33
Índice generación energía eléctrica ^a	kWhm ⁻³	2,23
Índice generación energía térmica ^a	kWhm ⁻³	3,32
Alimentación diaria de biomasa	t/d	42
Potencia del sistema de generación eléctrica a instalar	MW	0,4
Potencia térmica disponible MW	MW	0,5
Alimentación diaria de agua	m ³ /d	193,9
Alimentación total diaria de agua (incluye el pretratamiento)	m ³ /d	316,9
Producción diaria de biogás	m ³ /d	3925,19
Producción diaria de energía eléctrica	kWh	8753,17
Potencia del sistema de generación eléctrica a instalar	MW	0,4
Energía térmica disponible diaria	kWh	13031,63

a Fuente: Tecnología Agraferm disponible en el sitio www.agraferm.de

Los resultados que arrojó este análisis aparecen en la tabla 3.9, la misma muestra los valores de los indicadores económicos de la inversión.

Tabla 3.8 Resultados de la valoración económica de la inversión.

Criterio	TIR (%)	PR (años)	VAN (\$)
Pretratamiento biológico (ME)	-	-2,5	-15484403,5
Pretratamiento termo-alcálico (1h)	16%	4	1607838,8

Fuente: elaboración propia

En la valoración económica realizada a los pretratamientos estudiados, solo dio resultados positivos el termo-alcálico (1h) con un mayor valor actual neto, un menor período de recuperación de la inversión y una mayor tasa interna de retorno; lo que demuestra que esta propuesta tecnológica se justifica por las importaciones de combustibles fósiles que se evitarían al país, a pesar del elevado monto de la inversión a realizar, con una recuperación de cuatro años.

En el caso del pretratamiento biológico (ME) no hubo rentabilidad económica de la inversión, esto está dado fundamentalmente por los costos de los ME que encarecen la propuesta. En esta alternativa se hizo un estudio de sensibilidad económica con los siguientes escenarios mostrados en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Estudio de sensibilidad con diferentes escenarios

ESCENARIOS	Precio de elect (\$/kWh)	Precio de lodo (\$/t)	Precio ME(\$/m ³)	VAN(\$)	PR(años)	TIR(%)
A0	0,131	80	1000	-15484403,5	-2,5	-
A1	0,226	160	1000	-11113842,6	-3,1	-
A2	0,226	160	500	-1504102,4	-51,0	-
A3	0,226	160	400	417845,6	9,7	-
A4	0,226	160	350	1378819,6	5,5	10%
A5	0,226	160	300	2339793,6	3,6	20%

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la tabla 3.9, el escenario A4 es donde empieza a dar una tasa de interés sobre el saldo no recuperado de la inversión (TIR), con un valor de 10%, un valor actual neto (VAN) de \$13 788 19,6 y un período de recuperación de la inversión (PRI) de cinco años.

Los mejores resultados alcanzados fueron con la variante A5 con un VAN de \$2 339 793,6, la TIR de 20% y un PRI de tres años ver Fig.3.6

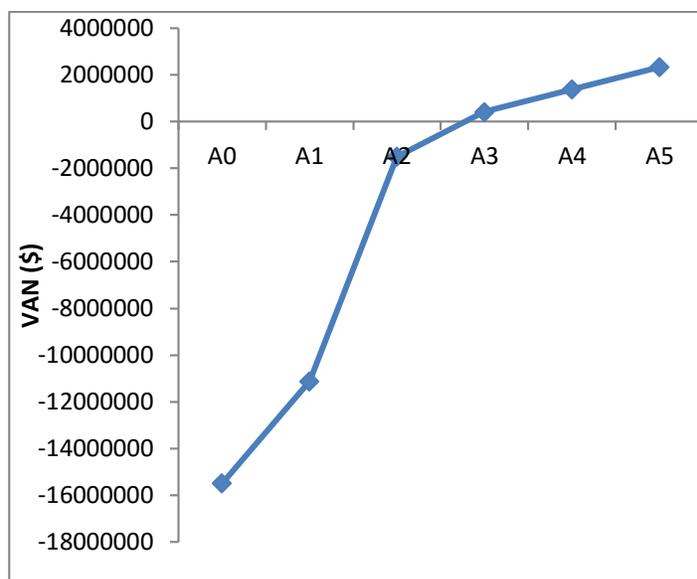


Fig. 3.6 Análisis de factibilidad económica para el pretratamiento biológico con diferentes escenarios.

3.5 Conclusiones Parciales

1. En el pretratamiento biológico (ME) incrementó el rendimiento de metano en 8,5% respecto a la cachaza sin pretratar.
2. El pretratamiento termo-alcalino (TA) incrementó el rendimiento de metano en 11,1% respecto a la cachaza sin pretratar.
3. Para el análisis cinético se utilizaron varios modelos con buenos resultados, con los modelos de Hill y Chapman se lograron los mejores ajustes.
4. Para el pretratamiento biológico se obtuvo un mejor comportamiento cinético con respecto a la cachaza sin tratar. Sin embargo, para el pretratamiento termo-alcalino el comportamiento de la cachaza tratada y sin tratar fue similar.
5. En el análisis económico realizado a los pretratamientos estudiados, el biológico mostró que no es rentable la propuesta y en el caso del termo-alcalino los resultados demostraron

la rentabilidad de la propuesta, con un VAN de \$1 607 838,8 y un período de recuperación de cuatro años.

6. En el estudio de sensibilidad económica que se hizo al pretratamiento biológico, variando diferentes escenarios como: aumento del precio de venta de la electricidad, aumento del precio de lodo y bajo precio de ME, la mejor variante fue A5 (precio de venta de electricidad de 0,226\$/Kwh, precio de lodo de \$160 y el precio ME de \$300) con un VAN de \$2 339 793,62, la TIR de 20% y un PRI de tres años.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Los residuos sólidos de la agroindustria azucarera tienen un potencial energético a considerar por su contenido orgánico, sin embargo, por su complejidad para la digestión anaerobia se hace necesario el estudio de métodos alternativos de pretratamientos que contribuyan a mejorar la eficiencia del proceso de biometanización.
2. El pretratamiento biológico y termo-alcalino incrementaron el rendimiento de metano respecto a la cachaza sin tratar, lo cual es una alternativa para la mejora de la etapa hidrolítica de la cachaza.
3. El comportamiento cinético de la cachaza tratada y sin tratar se determinó a través de los modelos de Hill y Chapman, esto facilitará la modelación matemática del proceso de digestión anaerobia de la cachaza.
4. En la valoración económica de las alternativas de pretratamiento se determinó que: el pretratamiento biológico no es rentable, y el pretratamiento termo-alcalino es rentable con un período de recuperación de la propuesta de cuatro años y un valor actual neto de \$2 912 196.

RECOMENDACIONES

1. En el pretratamiento termo-alkalino se debe estudiar el efecto de la aplicación de cargas inferiores de hidróxido de sodio en la solubilización de la cachaza y el rendimiento de metano.
2. Hacer un estudio de la cachaza con el pretratamiento termo-alkalino utilizando las aguas de limpieza de la UEB central azucarero “Melanio Hernández”, para disminuir los costos de agua y de hidróxido de sodio (NaOH) para que sea más rentable económicamente la propuesta.
3. En el pretratamiento biológico se debe estudiar el efecto de concentraciones inferiores de ME en la solubilización de la cachaza y el rendimiento de metano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, J. F. (1989). "Aprovechamiento de subproductos agroindustriales en la alimentación de rumiantes." *Rev. Arg. de Prod. Anim.* 9(4):253-267.
- Ahring, B. K. (2003). Perspectives for anaerobic digestion. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 81: 1-30.
- Alizadeh, H., Teymouri, F., Gilbert, T.I., y Dale, B.E., (2005). Pretreatment of switchgrass by ammonia fiber explosion (AFEX). *Applied Biochemistry and Biotechnology.* 121-124,1133-41.
- Aníbal E. Borroto Nordelo; Colectivo de Autores. (2002). *Gestión Energética Empresarial.*
- Anderson, W. F. and D. E. Akin (2008). "Structural and chemical properties of grass lignocelluloses related to conversion for biofuels." *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 35(5): 355-366.
- Asgher, M., Azim, N. & Bhatti, H. (2009). Decolorization of practical textile industry
- APHA-AWWA-WEF, Ed. (2012). *Standard Methods for examination of water and wastewater.* Washington DC, USA, American Public Health Association.
- Barakat, A., Monlau, F., Steyer, J.-P., Carrere, H. 2012. Effect of lignin-derived and furan compounds found in lignocellulosic hydrolysates on biomethane production. *Bioresour. Technol.*, 104(0), 90-99.
- Barreto, S. (2006). Estrategia para la inserción industrial de la digestión anaerobia en el desarrollo local. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba.
- Beall, F.C. y Eickner, H.W. (1970). Thermal degradation of wood components: a review of the Literature. Madison – USA. U.S.D.A. Forest service, research paper FPL 130.
- Berg, W., Brunsch, R. y Pazciciski, I. (2006). Greenhouse gas emissions from covered slurry compared with uncovered during storage. *Agr. Ecosyst. Environ.* 112, 129-34.
- Berglund, M. y Borjesson, P. (2006). Assessment of energy performance in the life-cycle of biogás production. *Biomasa and Bioenergy*, 30, 254-266.

- Bobleter, O. (1994). Hydrothermal degradation of polymers derived from plants. *Prog. Polym. Sci.* 19, 797-841.
- Bondesson, P.-M., Galbe, M., Zacchi, G. 2013. Ethanol and biogás production after steam pretreatment of corn stover with or without the addition of sulphuric acid. *Biotechnol Biofuels*, 6(11), 1-11.
- Borja, R., Martín, A., Durán, M., y Maestro R. (1992). Estudio cinético comparativo del proceso de digestión anaerobia del alpechín en los Límites mesofílico y termofílico de temperatura. *Grasas y aceites*, 43 (6), 341-346.
- Borja, R., Martín, A., Maestro R., et al. (1991). Cinética del proceso de depuración de alpechín previamente biotratado via aerobia. *Grasas y Aceites*, 42 (3), 194-201.
- Botero, S. (2011). Análisis de los costos de capital (o inversión) en la generación de energía y su impacto en los mercados eléctricos de América latina. Disponible en: <http://www.vocesenelfenix.com/content/an%C3%A1lisis-de-los-costos-de-capital-o-inversi%C3%B3n-en-la-generaci%C3%B3n-de-energ%C3%AD-y-su-impacto-en-los> (revisado en abril 2013).
- Campos, A. E. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Tesis Doctoral. Escola tècnica superior d'Enginyeria Agrària, Universitat de Lleida, España.
- CÁRDENAS, G, S.GUZMÁN (1983). Capacidad contaminante de las cachazas produidas por los ingenios azucareros de Tucumán. *Rev.Ind.Agr. de Tucumán*.60(1):59-67 .
- Carlsson, M., Lagerkvist, A., Morgan-Sagastume, F. 2012. The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review. *Waste Manage*, 32(9), 1634-1650.
- Chandra, R., Takeuchi, H. y Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 16, 1462-1476.
- Chang, V.S., y Holtzaple, M.T. (2000). Fundamental factors affecting enzymatic reactivity. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 84 – 86, 5–37.

- Chen, Y. R. y Hashimoto A. G. (1980). Substrate utilization kinetic model for biological treatment process. *Biotechnol. Bioeng.*, 22, 2081-2095.
- Contreras, A. M., Domínguez, E. R., Pérez, M., et al. (2009). Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of Cleaner Production*, 17, 772-779.
- Contreras, L. M., López, L. y Romero, O. (2006). Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico. *Revista Futuros No. 16, 2006 Vol. IV. ISSN: 1913-6196.* Disponible en: http://www.revistafuturos.info/raw_text/raw_futuro16/produccion_biogás.pdf.
- Contreras, L. M., Vera, A., Romero, O., et al. (2006, noviembre). Diagnóstico y perspectiva para la producción de biogás con fines energéticos en la provincia de Sancti Spíritus. Ponencia presentada en el II Simposio Internacional, Sociedad, Turismo y Desarrollo Humano Local, Sancti Spíritus, Cuba.
- Cruz, F. 1991. Biogás de cachaza. *Revista Energía*. 2, 23 - 35.
- Cuba, Ministerio de Energía y Minas (2012). Documento informativo para cálculos energéticos en Cuba, La Habana, Cuba.
- Dávila, G. & Vázquez-Duhalt, R. (2006). Enzimas ligninolíticas fúngicas para fines ambientales. *Mensaje Bioquímico*, 41: 29-55.
- Delgenes, J. P., Penaud, V., y Moletta, R. (2003). Pretreatments for the enhancement of anaerobic digestion of solid wastes. *ChemInform*. 34, edición 13, página no, Abril 1, 2003.
- Eastman, J. A. y Ferguson, J. F. (1981). Solubilization of particulate organic-carbon during the acid phase of anaerobic-digestion. *Journal Water Pollution Control Federation*, 53 (3), 352-366.
- Esquivel, L. 1999. Comunicación personal. Especialistas de tratamiento de aguas y Aguas Residuales del MINAZ.
- Fengel, D. y Wegener, G. (1984). *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter. Berlin.

- Fernandes, T.V., Klaasse Bos, G.J., Zeeman, G., Sanders, J.P.M., van Lier, J.B. 2009. Effects of thermo-chemical pre-treatment on anaerobic biodegradability and hydrolysis of lignocellulosic biomass. *BioreOrigen Technology*, 100(9), 2575-2579.
- Fernández, A. S., Hashsham, S. A., Dollhopf, S. L., Raskin, L., Glagoleva, O., Dazzo, F. B., Hickey, R. F., Criddle, C. S., Tiedje, J. M. (2000). Flexible community structure correlates with stable community funciónin methanogenic bioreactor communities perturbed by glucose. *Applied and Environmental Microbiology* 66(9): 4058-4067.
- Gadde, B., Christoph, M. y Reiner, W. (2009). Rice straw as a renewable energy Origen in India, Thailand, and the Philippines: Overall potential and limitations for energy contribution and greenhouse gas mitigation. *Biomass and Bioenergy*, 33, 1532-1546.
- Galbe, M., y Zacchi, G. (2002). A review of the production of ethanol from softwood. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 59, 618- 628.
- Gavala, H. N., Yenal, U., Skiadas, I. V., Westermann, P., Ahring, B. K. (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Research* 37(19): 4561-4572.
- González, H., Fernández, E. y Collazo, Y. (1995). Nueva tecnología para el tratamiento de efluentes. *Revista Ingeniería Química*, 312 (4), 46-49.
- Grau, P. (1975). Kinetics of multicomponent substrate removal by activated sludge. *Water Research*, 9, 637 - 642.
- Gregg D. y Saddler J.N. (1996). A technoeconomic assessment of the pretreatment and fractionation steps of a biomass-to-ethanol process. *Appl. Biochem. Biotech.* 57-58, 711-727.
- Gruber, S., Hilbert, J. A., Sheimberg, S. (2010). Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MWel con una planta de biogás de alta eficiencia.
- Guardado, J. A. (2006, mayo). Modelo G.B.V. para el saneamiento energético ambiental. Ponencia presentada en el X Taller Nacional con participación extranjera: Actualización y perspectiva para la producción de biogás, Sancti Spíritus, Cuba.
- Hashimoto, A. G. (1986). Ammonia Inhibition of methanogenesis from cattle wastes. *Agricultural Wastes* 17: 241-261.

- Hendriks, A.T.W.M., y Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *BioreOrigin Technology*. 100, 10–18.
- Hobson, P.N. 1992. Treatment of animal waste and uses of treated residues. In: *Biotechnologies for Pollution Control and Energy*. Proc. 3rd Workshop of the Working Group on Biogás Production Technologies, CNREE, Network on Biomass Production and Conversion for Energy, Braunschweig, Germany, pp. 48-70.
- Hon, D.N.S. y Shiraishi, N. (2001). *Wood and Cellulosic Chemistry*, second ed. Dekker, New York.
- Horn, S.J., Estevez, M.M., Nielsen, H.K., Linjordet, R., Eijsink, V.G.H. 2011. Biogás production and saccharification of *Salix* pretreated at different steam explosion conditions. *Bioresour Technol*, 102 7932–7936.
- ICIDCA-GEPLACEA-PNUD. 1990. *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. 2da edición. Colección GEPLACEA. Serie Diversificación.
- INDICADORES SOCIOECONÓMICOS DE CUBA 2013. (2014). *Revista Panorama Económico y Social de Cuba*. Consultado en enero de 2015, en sitio web: <http://www.one.cu/publicaciones/08informacion/panorama2013/Panorama2013.pdf>
- Isroi, Millati, R., Syamsiah, S., Niklasson, C., Cahyanto, M.N., Lundquist, K., Taherzadeh, M.J. 2011. Biological pretreatment of lignocelluloses with white- rot fungi and its application: A review. *Bioresources*, 6(4), 5224-5229.
- Itoh, H., (2003). Bioorganosolve pretreatments for simultaneous saccharification and fermentation of beech wood by ethanolysis and white rot fungi. *Journal of Biotechnology*. 103, 273-280.
- Jewell, W.J., Cumming, R.J. y Richards, B.K. 1992. Energy production from biomass and waste. In: *Biotechnologies for Pollution Control and Energy*. Proc. 3rd Workshop of the Working Group on Biogás Production Technologies, CNREE, Network on Biomass Production and Conversion for Energy, Braunschweig, Germany, pp. 7-36.
- Jih-Gaw, L., Ying-Shih, M. y Shou-Chung Ch. (1998). An operation constant for anaerobic digestion of waste activated sludge. *Proceeding Fifth Latin-American Workshop-Seminar. Wastewater Anaerobic Treatment*, Viñas del Mar, Chile.

- Kim, K.H., y Hong, J. (2001). Supercritical CO₂ pretreatment of lignocellulose enhances enzymatic cellulose hydrolysis. *BioreOrigen Technology*. 77, 139–144.
- Krishna, S.H., T. Reddy, J., y Chowdary, G.V. (2001). Simultaneous saccharification and fermentation of lignocellulosic wastes to ethanol using a thermotolerant yeast. *BioreOrigen Technology*. 77, 193–196.
- Kyung-Yub, H. y Eung-Bai, Sh. 1997. A Mechanical pretreatment of waste activated sludge for improvement of anaerobic digestion system. *Water Science and Technology*. 36, 12, 111 - 116.
- Laureano, P.L., Teymouri, F., Alizadeh, H., y Dale, B.E. (2005). Understanding factors that limit enzymatic hydrolysis of biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 124 (1-3): 1081–1099.
- Leitfaden Biogás (2010). Von der Gewinnung zur Nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow. ISBN 3-00-014333-5.
- Linke, B. and Schelle, H. (2000). Solid State Anaerobic Digestion of Organic Wastes. AgEng Warwick. EurAgEng. Paper Number 00-AP-025, pp. 1-10.
- Linke, B. y Heiermann, H. (2006). Regenerative Energieerzeugung auf Landwirtschaftsbetrieben durch die effiziente Nutzung nachwachsender Rohstoffe und biogener Reststoffe in einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft für Biomasse. Schlussbericht zur wissenschaftlichen Begleitung des Projektes. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Alemania.
- López, M. (2000). Procedimiento de pretratamiento para mejorar la digestión anaeróbica de residuos sólidos. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Departamento de estudios sobre contaminación ambiental, Ciudad de la Habana, Cuba.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Stahl, D., Clark, D. P. (2010). Brock: Biology of microorganisms San Francisco, USA, Benjamin Cummings.
- Mähnert, P. (2007). Kinetik der Biogásproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum agriculturalarum (Dr. rer. agr.). Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin.

- Menéndez, M. (2012). Cuba se propone cambiar su matriz energética. Boletín clips de energía N° 11. Publicación quincenal de Cubaenergía con la actualidad energética. ISSN 2077-8473.
- Meyer-Ulrich, A., Schattauer, A., Jürgen, H., et al. (2012). Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogás production from agricultural reOrigens. *Renewable Energy*, 37, 277-284.
- Milán, Z., Villa, P., Sánchez, E., et al. (2003). Effect of natural and modified zeolite addition on anaerobic digestion of piggery waste. *Water Science Technology*, 48, 263-269. 95.
- MINAZ, 1996. Situación de los sistemas de tratamiento de residuales en el sistema MINAZ. Informe Técnico.
- Mishra, A. & Kumar, F. (2009). Kinetics studies of laccase enzyme of *Coriolus unicolor* MTCC 138 in inexpensive culture media. *J. Biochem. Eng.*, 46: 251-256.
- Monlau, F., Trably, E., Barakat, A., Quemeneur, M., Steyer, J.P., Carrère., H. 2013b. Do by-products of thermochemical treatment of lignocellulosic materials inhibit anaerobic mixed cultures? Overview of recent findings. 13th World Congress on Anaerobic Digestion. Recovering (bio) ReOrigens for the World., 25-28 June 2013, Santiago de Compostela, Espana.
- Monod, J. (1949). The growth of bacterial cultures. *An. Rev. Microbiol.*, 3, 373-376.
- Montalvo, S. y Guerrero, L. (2003). Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás. Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico de Santa María.
- Mumme J., Linke B. y Tölle, R. (2010). Novel upflow anaerobic solid-state (UASS) reactor. *BioreOrigen Technology*, 101, 592-599.
- Mumme, J. (2008). Vergärung nachwachsender Rohstoffe im Aufstromverfahren. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum agriculturalarum. Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin.
- Myint, M., Nirmalakhandan, N., Speece, R. E. (2007). Anaerobic fermentation of cattle manure: Modeling of hydrolysis and acidogenesis. *Water Research* 41(2): 323-332.
- Obaya Abreu, et al (2004). Tratamiento combinado de las vinazas de destilería y residuales azucareros en reactores UASB. *Revista Tecnología del agua*. Nro 249. pp 78-85.

- Owens, J.M. y Chynoweth, D.P. 1993. Biochemical methane potencial of municipal solids wastes (MSW) components. *Water Science and Technology*, 27, 1-14.
- Palacio, H. (1956). Fabricación del alcohol. Barcelona – España. Salvat Editores, S.A.. pp. 279-305.
- Palmqvist E., y Hahn-Hägerdal. (2000). Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: Inhibition and detoxification. *BioreOrigen Technology*. 74,17-24.
- Pardo, J. A. Estudio de factibilidad de un proyecto para la prestación de servicios de acabados para viviendas de interés social en Bogotá. Disponible en <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis45.pdf> (revisado junio 2013)
- Pavlostasthis, S.G. y Gosset, J. M. (1986). A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge. *Biotechnology and Bioengineering*, 28, 1519-1530.
- Pavlostathis, S. G., Giraldo-Gómez, E. (1991). Kinetics of Anaerobic Treatment - a Critical-Review. *Critical Reviews in Environmental Control* 21(5-6): 411-490.
- Pereda, I. (2007). Potencialidad de los residuos mineros como estimulantes del proceso de digestión anaerobia. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, Facultad de Ingeniería Mecánica, Ciudad de La Habana, Cuba.
- Pérez, D., Oviedo, I. y Yera, B. (2009). Costos relacionados con las tecnologías energéticas. Cuba: Cubaenergía.
- Ragauskas AJ, Williams CK, Davison BH, Britovsek G, Cairney J, Eckert CA, Frederick WJ Jr, Hallett JP, Leak DJ, Liotta CL, Mielenz JR, Murphy R, Templer R & Tschaplinski T (2006) The path forward for biofuels and biomaterials. *Science*. 311: 484-489.
- Rao, M. S. y Singh, S. P. (2004). Bioenergy conversion studies of organic fraction of MSW: kinetic studies and gas yield–organic loading relationships for process optimization. *BioreOrigen Technology*, 95, 173-185.
- Rocha, W. H. (2013). Ciclo de vida de los proyectos. Disponible en: http://proyectosdeinversionwr.bligoo.com.co/media/users/10/534855/files/56394/CICLO_DE_VIDA_DE_LOS_PROYECTOS.pdf (revisado junio 2013)

- Rodríguez-Vázquez, R., Villanueva-Ventura, G. y Rios-Leal, E. 1992. Sugarcane Bagasse pith dry pretreatment for single cell protein production. *BioreOrigin Technology*, 39, 17-22.
- Romero Romero, O. (2005). Metodología para incrementar el aporte de electricidad con bagazo y alternativa de combustible para generar fuera de zafra. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Química y Farmacia.
- Sánchez, Ó.J., y Cardona, C.A. (2005). Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas. *Interciencia*. 30 (11): 671-678.
- Stams, A. J. M. (1994). Metabolic Interactions between Anaerobic-Bacteria in Methanogenic Environments. *Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology* 66(1-3): 271-294.
- Stams, A. J. M., Oude-Elferink, S. J. W. H., Westermann, P. (2003). Metabolic Interactions Between Methanogenic Consortia and Anaerobic Respiring Bacteria. *Advances in Biochemical Engineering / Biotechnology*. Springer. Berlin, Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. Biomethanation I: 32.
- Stuckey, D.C. y McCarty, P.L. 1978. Thermochemical pretreatment of nitrogenous materials to increase methane yield. *Biotechnology and Bioengineering.*, Symposium. 8, 219.
- Suárez Quiñones, T., M. Plöchl, et al (2012). “Results of batch anaerobic digestion test - effect of enzyme addition.” *Agric Eng Int: CIGR Journal* 14(1).
- Sun, Y., y Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *BioreOrigin Technology*. 83 (1), 1-11
- Taherzadeh, M. J. a. K. K. (2008). “Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogás production: A review.” *International Journal of Molecular Sciences* 9(9): 1621-1651.
- TRANSECO. 1997. Estudio de factibilidad. Utilización de gas metano que se obtiene de las plantas de tratamiento de residuales agrícolas. GRILAB - GRUPO IT.

- Vallini, G., Cecchi, F., Pavon, P., Pera, A., Mata-Alvarez, J. y Bassetti, A. 1993. Recovery and disposal of the organic fractions of municipal solid waste (MSM) by means of combined anaerobic and aerobic biotreatments. *Water Science and Technology*, 27, 121-132.
- Vavilin, V. A., Fernández, B., Palatsi, J. y Flotats, X. (2008). Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Management*, 28, 939-951.
- Veeken, A. y Hamelers, B. (1999). Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components. *BioreOrigen technology*, 29, 249-254.
- Vervaeren, H., K. Hostyn, et al (2010). "Biological ensilage additives as pretreatment for maize to increase the biogás production." *Renew Energy* 35: 2089-2093.
- Watson-Craick, I.A., Sinclair, K.I., James, A.G. y Sensor, E. 1993. Studies of the refuse methanogenic fermentation by use of laboratory systems. *Water Science and Technology*, 27, 15-24.
- Weiland, P. (2010). Biogás production: current state and perspectives. Mini-review. *Appl Microbiol Biotechnol*, 85, 849-860.
- Weiland, P. 1993. One and two step anaerobic digestion of solid agroindustrial residues. *Water Science and Technology*. 27, 2, 145 - 151.
- Ying-Chih, Ch., Cheng-Nam, Ch., Jih-Gaw, L. y Shwu-Juan, H. 1997. Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, 36, 11, 155 - 162.
- Yu, J., Zhang, J., He, J., Liu, Z. y Yu, Z. (2009). Combinations of mild physical or chemical pretreatment with biological pretreatment for enzymatic hydrolysis of rice hull. *Biore-Origen Technology*. 100, 903-908
- Zheng, Y., J. Zhao, et al. (2014). "Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogás production." *Progress in Energy and Combustion Science*.
- Zheng, Y-Z., Lin, H-M y Tsao, G.T. (1998). Pretreatment for cellulose hydrolysis by carbon dioxide explosion. *Biotechnology Progress*. 14 (6): 890-896.

ANEXOS

ANEXO 1 Análisis de regresión no lineal con el uso del Software Statgraphics Centurion XVI para Windows para el ajuste a los modelos cinéticos.

Pretratamiento biológico (ME)

Regresión no Lineal- ymo1 (1 Cachaza+ME)

Estimación de los resultados

Parámetros	Estimación	Error típico	Límite de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
a	341,914	7,88237	325,416	358,412
b	1,05479	0,0687719	0,910845	1,19873
c	2,79886	0,155705	2,47297	3,12476

Análisis de varianza

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Model	1,46095E6	3	486982,
Residual	826,564	19	43,5033
Total	1,46177E6	22	
Total (Corr.)	137840,	21	

R-cuadrado= 99,4003%

La ecuación del modelo es $ymo1 = 341,914 * (t^{1,05479} / (2,79886^{1,05479} + t^{1,05479}))$

Regresión no Lineal- ymo2 (2 cachaza+ME)

Estimación de los resultados

Parámetros	Estimación	Error típico	Límite de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
a	359,003	9,04308	340,075	377,93
b	1,08844	0,0743849	0,932749	1,24413
c	3,10193	0,183836	2,71716	3,48671

Análisis de varianza

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Model	1,56744E6	3	522479,
Residual	1076,97	19	56,6827
Total	1,56851E6	22	
Total (Corr.)	156974,	21	

R-cuadrado= 99,3139%

La ecuación del modelo es $ymo2 = 359,003 * (t^{1,08844} / (3,10193^{1,08844} + t^{1,08844}))$

Regresión no Lineal- ymo3 (3Cachaza+ME)

Estimación de los resultados

			Estimado de confianza 95%	
			Límite Inferior	Límite Superior
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	411,167	9,99263	390,252	432,081
b	0,9345	0,0429096	0,844689	1,02431
c	4,38344	0,264958	3,82887	4,938

R-cuadrado= 99,7375%

La ecuación del modelo es $y_{m3} = 411,167 * (t^{0,9345} / (4,38344^{0,9345} + t^{0,9345}))$

Regresión no Lineal- y_{m1} (1Cachaza+ME)

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,63694E6	3	545648,
Residual	467,286	19	24,594
Total	1,63741E6	22	
Total (Corr.)	178004,	21	

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza	
			Límite Inferior	Límite Superior
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	301,045	3,69921	293,328	308,761
b	0,270384	0,014091	0,24099	0,299777

R-cuadrado= 98,2 %

La ecuación del modelo es $y_{m1} = 301,045 * (1 - \text{EXP}(-0,270384 * t))$

Regresión no Lineal- y_{m2} (2Cachaza+ME)

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,45929E6	2	729646,
Residual	2481,1	20	124,055
Total	1,46177E6	22	
Total (Corr.)	137840,	21	

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite Inferior	Límite Superior
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	316,374	3,7144	308,626	324,122
b	0,247772	0,0117041	0,223358	0,272187

R-cuadrado= 98,5511 %

La ecuación del modelo es: $y_{m2} = 316,374 * (1 - \text{EXP}(-0,247772 * t))$

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,56624E6	2	783119,
Residual	2274,45	20	113,722
Total	1,56851E6	22	
Total (Corr.)	156974,	21	

Regresión no Lineal- ymo3 (3Cachaza+ME)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	334,571	4,67224	324,825	344,317
b	0,206398	0,0103504	0,184808	0,227989

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,63456E6	2	817280,
Residual	2850,53	20	142,526
Total	1,63741E6	22	
Total (Corr.)	178004,	21	

R-cuadrado= 98,3986 %

La ecuación del modelo es: $ymo3 = 334,571 * (1 - \text{EXP}(-0,206398 * t))$

Regresión no Lineal- ymo1 (1Cachaza+ME)

Estimación de los resultados

		Intervalo de confianza 95,0%		
		Límite	Límite	
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	302,941	3,78073	295,028	310,854
Rm	75,8534	4,31107	66,8302	84,8766
d	-0,211643	0,128978	-0,481597	0,0583115

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,45962E6	3	486541,
Residual	2150,88	19	113,204
Total	1,46177E6	22	
Total (Corr.)	137840,	21	

R-cuadrado= 98,4396 %

La ecuación del modelo es: $ymo1 = 302,941 * (1 - \text{EXP}(-75,8534 * (t - 0,211643) / 302,941))$

Regresión no Lineal- ymo2 (2Cachaza+ME)

Estimación de los resultados

		Intervalo de confianza 95,0%

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas

Parámetros	Estimación	Error típico	Límite	
			Inferior	Superior
a	318,257	3,81305	310,276	326,237
Rm	73,7304	3,7662	65,8477	81,6132
d	-0,200169	0,123361	-0,458366	0,0580284

Model	1,56654E6	3	522179,
Residual	1976,91	19	104,048
Total	1,56851E6	22	
Total (Corr.)	156974,	21	

R-cuadrado= 98,7406 %

La ecuación del modelo es: $y_{mo2} = 318,257*(1-EXP(-73,7304*(t--0,200169)/318,257))$

Regresión no Lineal- y_{mo3} (3Cachaza+ME)

Estimación de los resultados

Parámetros	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza de 95,0%	
			Límite Inferior	Límite Superior
a	339,003	4,61835	329,336	348,669
Rm	62,4373	3,09985	55,9492	68,9253
d	-0,377362	0,148514	-0,688206	-0,0665189

R-cuadrado= 98,8514 %

La ecuación del modelo es: $y_{mo3} = 339,003*(1-EXP(-62,4373*(t--0,377362)/339,003))$

Regresión no Lineal- y_{mo1} (1Cachaza+ME)

Estimación de los resultados

Parámetros	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza de 95,0%	
			Límite Inferior	Límite Superior
a	312,008	3,97687	303,684	320,332
b	0,164927	0,0177848	0,127702	0,202151
c	0,625598	0,052189	0,516364	0,734831

R-cuadrado= 99,239 %

La ecuación del modelo es: $y_{mo1} = 312,008*(1-EXP(-0,164927*t))^0,625598$

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,63537E6	3	545122,
Residual	2044,64	19	107,613
Total	1,63741E6	22	
Total (Corr.)	178004,	21	

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,46072E6	3	486908,
Residual	1049,01	19	55,2113
Total	1,46177E6	22	
Total (Corr.)	137840,	21	

Regresión no Lineal- ymo2 (2Cachaza+ME)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	326,021	4,25273	317,12	334,922
b	0,167453	0,0175298	0,130762	0,204143
c	0,685462	0,0574504	0,565216	0,805707

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,56731E6	3	522435,
Residual	1207,64	19	63,5599
Total	1,56851E6	22	
Total (Corr.)	156974,	21	

R-cuadrado= 99,2307 %

La ecuación del modelo es: $y_{mo2} = 326,021 * (1 - \text{EXP}(-0,167453 * t))^{0,685462}$

Regresión no Lineal- ymo3 (3Cachaza+ME)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	354,299	3,91805	346,099	362,5
b	0,117414	0,00849177	0,09964	0,135187
c	0,618938	0,0289254	0,558396	0,67948

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,63692E6	3	545640,
Residual	489,873	19	25,7828
Total	1,63741E6	22	
Total (Corr.)	178004,	21	

R-cuadrado= 99,7248 %

La ecuación del modelo es: $y_{mo3} = 354,299 * (1 - \text{EXP}(-0,117414 * t))^{0,618938}$

Regresión no Lineal- ymo3 (3 Cachaza+ME)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	339,003	4,61835	329,336	348,669
Rm	62,4373	3,09985	55,9492	68,9253
d	-0,377362	0,148514	-0,688206	0,0665189

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,63537E6	3	545122,
Residual	2044,64	19	107,613
Total	1,63741E6	22	
Total (Corr.)	178004,	21	

R-cuadrado= 98,8514 %

La ecuación del modelo es: $y_{m3} = 339,003 * (1 - \text{EXP}(-62,4373 * (t - 0,377362) / 339,003))$

Regresión no Lineal- yc1 (1 Cachaza)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	281,789	4,18367	273,062	290,516
b	0,263387	0,0163318	0,229319	0,297454

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,268E6	2	634001,
Residual	3088,02	20	154,401
Total	1,27109E6	22	
Total (Corr.)	119127,	21	

R-cuadrado= 97,4078 %

La ecuación del modelo es: $y_{c1} = 281,789 * (1 - \text{EXP}(-0,263387 * t))$

Regresión no Lineal- yc2 (2 Cachaza)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	265,606	5,80809	253,49	277,721
b	0,275619	0,0258517	0,221693	0,329545

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,14269E6	2	571346,
Residual	6236,68	20	311,834
Total	1,14893E6	22	
Total (Corr.)	104665,	21	

R-cuadrado= 94,0413 %

La ecuación del modelo es: $y_{c2} = 265,606 * (1 - \text{EXP}(-0,275619 * t))$

Regresión no Lineal- yc1 (1 Cachaza)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	338,091	8,06046	321,221	354,962
b	0,908929	0,0496136	0,805086	1,01277
c	3,15644	0,19141	2,75581	3,55706

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,27067E6	3	423557,
Residual	419,882	19	22,099
Total	1,27109E6	22	
Total (Corr.)	119127,	21	

R-cuadrado= 99,6475 %

La ecuación del modelo es: $yc1 = 338,091 * (t^{0,908929} / (3,15644^{0,908929} + t^{0,908929}))$

Regresión no Lineal- yc2 (2 Cachaza)

Estimación de los resultados

Parámetros	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite Inferior	Límite Superior
a	371,609	26,1785	316,817	426,402
b	0,674219	0,0718578	0,523818	0,824619
c	4,53744	1,02622	2,38954	6,68535

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,14804E6	3	382680,
Residual	889,383	19	46,8096
Total	1,14893E6	22	
Total (Corr.)	104665,	21	

R-cuadrado= 99,1503 %

La ecuación del modelo es: $yc2 = 371,609 * (t^{0,674219} / (4,53744^{0,674219} + t^{0,674219}))$

Regresión no Lineal- yc2

Estimación de los resultados

Parámetros	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite Inferior	Límite Superior
a	371,609	26,1785	316,817	426,402
b	0,674219	0,0718578	0,523818	0,824619
c	4,53744	1,02622	2,38954	6,68535

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,14804E6	3	382680,
Residual	889,383	19	46,8096
Total	1,14893E6	22	
Total (Corr.)	104665,	21	

R-cuadrado= 99,1503 %

La ecuación del modelo es: $yc2 = 371,609 * (t^{0,674219} / (4,53744^{0,674219} + t^{0,674219}))$

Regresión no Lineal- yc1 (1 Cachaza)

Estimación de los resultados

Parámetros	Estimación	Error típico	Intervalo de cofianza 95,0%	
			Límite Inferior	Límite Superior
a	299,147	3,98128	290,814	307,48

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,27045E6	3	423483,
Residual	641,543	19	33,7654
Total	1,27109E6	22	
Total (Corr.)	119127,	21	

b	0,127431	0,013192	0,0998193	0,155042
c	0,534098	0,0358109	0,459145	0,609052

R-cuadrado= 99,4615 %

La ecuación del modelo es: $yc1 = 299,147*(1-EXP(-0,127431*t))^{0,534098}$

Regresión no Lineal- yc2 (2 Cachaza)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	306,206	11,3902	282,366	330,046
b	0,0689121	0,0168018	0,0337455	0,104079
c	0,39138	0,0375761	0,312732	0,470028

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,14767E6	3	382557,
Residual	1259,63	19	66,2963
Total	1,14893E6	22	
Total (Corr.)	104665,	21	

R-cuadrado= 98,7965 %

La ecuación del modelo es: $yc2 = 306,206*(1-EXP(-0,0689121*t))^{0,39138}$

Regresión no Lineal- yc1 (1 Cachaza)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	284,826	4,26259	275,904	293,747
Rm	66,584	4,42821	57,3156	75,8524
d	-0,326912	0,164542	-0,671302	0,0174778

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,26859E6	3	422862,
Residual	2502,42	19	131,706
Total	1,27109E6	22	
Total (Corr.)	119127,	21	

R-cuadrado= 97,8994 %

La ecuación del modelo es: $yc1 = 284,826*(1-EXP(-66,584*(t--0,326912)/284,826))$

Regresión no Lineal- yc2 (2 Cachaza)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,14364E6	3	381214,

Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	270,893	6,35415	257,594	284,193
Rm	61,0513	6,43213	47,5886	74,5139
d	-0,491967	0,279741	-1,07747	0,0935384

Residual	5286,58	19	278,241
Total	1,14893E6	22	
Total (Corr.)	104665,	21	

R-cuadrado= 94,9491 %

La ecuación del modelo es: $yc2 = 270,893*(1-EXP(-61,0513*(t--0,491967)/270,893))$

Pretratamiento termo-alcálico Regresión no Lineal- TA1a (1pretratamiento TA 1h)

Estimación de los resultados

Análisis de Varianza

Parámetros	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite Inferior	Límite Superior
a	217,765	2,97763	211,655	223,874
b	0,229389	0,0146676	0,199294	0,259485

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,05357E6	2	526784,
Residual	3210,78	27	118,918
Total	1,05678E6	29	
Total (Corr.)	88378,3	28	

R-cuadrado= 96,367 %

La ecuación del modelo es: $TA1a = 217,765*(1-EXP(-0,229389*t))$

Regresión no Lineal- TA1b (2 pretratamiento TA 1h)

Estimación de los resultados

Parámetros	Intervalo de confianza 95,0%		Inferior	Superior
	Estimación	Error típico		
a	211,174	2,39155	206,267	216,081
b	0,273106	0,0160058	0,240265	0,305947

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,03372E6	2	516861,
Residual	2437,31	27	90,2706
Total	1,03616E6	29	
Total (Corr.)	75126,9	28	

R-cuadrado= 96,7557 %

La ecuación del modelo es: $TA1b = 211,174*(1-EXP(-0,273106*t))$

Regresión no Lineal- TA2a (1 pretratamiento TA 2h)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite Inferior	Límite Superior
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	200,661	2,76515	194,988	206,335
b	0,255573	0,0175483	0,219567	0,291579

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	919364,	2	459682,
Residual	3080,56	27	114,095
Total	922444,	29	
Total (Corr.)	70620,6	28	

R-cuadrado= 95,6379 %

La ecuación del modelo es: $TA2a = 200,661*(1-EXP(-0,255573*t))$

Regresión no Lineal- TA2b (2 pretratamiento TA 2h)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite Inferior	Límite Superior
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	195,654	2,69008	190,134	201,174
b	0,263906	0,0183982	0,226156	0,301656

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	880595,	2	440297,
Residual	2996,79	27	110,992
Total	883592,	29	
Total (Corr.)	65968,9	28	

R-cuadrado= 95,4573 %

La ecuación del modelo es: $TA2b = 195,654*(1-EXP(-0,263906*t))$

Regresión no Lineal- TA2b (pretratamiento TA 2h)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite Inferior	Límite Superior
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	195,654	2,69008	190,134	201,174
b	0,263906	0,0183982	0,226156	0,301656

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	880595,	2	440297,
Residual	2996,79	27	110,992
Total	883592,	29	
Total (Corr.)	65968,9	28	

R-cuadrado= 95,4573 %

La ecuación del modelo es: $TA2b = 195,654*(1-EXP(-0,263906*t))$

Regresión no Lineal- TA2b (2 pretratamiento TA 2h)

Estimación de los resultados

	Parámetros	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza 95,0%	
				Límite Inferior	Límite Superior
a		240,87	10,7837	218,703	263,036
b		0,827686	0,081515	0,660129	0,995243
c		3,36332	0,409332	2,52192	4,20472

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	882786,	3	294262,
Residual	805,574	26	30,9836
Total	883592,	29	
Total (Corr.)	65968,9	28	

R-cuadrado= 98,7789 %

La ecuación del modelo es: $TA2b = 240,87 * (t^{0,827686} / (3,36332^{0,827686} + t^{0,827686}))$

Regresión no Lineal- yc (cachaza)

Estimación de los resultados

	Parámetros	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza 95,0%	
				Límite Inferior	Límite Superior
a		201,537	2,31383	196,781	206,293
b		0,148198	0,0164539	0,114377	0,182019
c		0,601406	0,0512613	0,496037	0,706775

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	866556,	3	288852,
Residual	689,298	26	26,5115
Total	867246,	29	
Total (Corr.)	66759,8	28	

R-cuadrado= 98,9675 %

La ecuación del modelo es: $yc = 201,537 * (1 - \text{EXP}(-0,148198 * t))^{0,601406}$

Regresión no Lineal- TA1a (1 pretratamiento TA 1h)

Estimación de los resultados

	Parámetros	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza 95,0%	
				Límite Inferior	Límite Superior
a		227,751	4,99491	217,484	238,018
b		0,127493	0,0236322	0,078916	0,176069
c		0,595396	0,0777049	0,435671	0,755121

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,05461E6	3	351535,
Residual	2173,96	26	83,6139
Total	1,05678E6	29	
Total (Corr.)	88378,3	28	

R-cuadrado= 97,5402 %

La ecuación del modelo es: $TA1a = 227,751 \cdot (1 - \text{EXP}(-0,127493 \cdot t))^{0,595396}$

Regresión no Lineal- TA1b (2 pretratamiento TA 1h)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	221,152	3,10353	214,772	227,531
b	0,130094	0,0176467	0,0938203	0,166367
c	0,51339	0,0476612	0,415421	0,611359

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,03522E6	3	345075,
Residual	935,607	26	35,9849
Total	1,03616E6	29	
Total (Corr.)	75126,9	28	

R-cuadrado= 98,7546 %

La ecuación del modelo es: $TA1b = 221,152 \cdot (1 - \text{EXP}(-0,130094 \cdot t))^{0,51339}$

Regresión no Lineal- TA2a (2 pretratamiento TA 2h)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	214,905	5,2603	204,092	225,717
b	0,104211	0,0211753	0,0606843	0,147738
c	0,481512	0,0571505	0,364038	0,598987

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	920973,	3	306991,
Residual	1471,59	26	56,5995
Total	922444,	29	
Total (Corr.)	70620,6	28	

R-cuadrado= 97,9162 %

La ecuación del modelo es: $TA2a = 214,905 \cdot (1 - \text{EXP}(-0,104211 \cdot t))^{0,481512}$

Regresión no Lineal- TA2a (2pretratamiento TA 2h)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	214,905	5,2603	204,092	225,717
b	0,104211	0,0211753	0,0606843	0,147738
c	0,481512	0,0571505	0,364038	0,598987

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	920973,	3	306991,
Residual	1471,59	26	56,5995
Total	922444,	29	
Total (Corr.)	70620,6	28	

R-cuadrado= 97,9162 %

La ecuación del modelo es: $TA2a = 214,905 \cdot (1 - \text{EXP}(-0,104211 \cdot t))^{0,481512}$

Regresión no Lineal- TA1a (1pretratamiento TA 1h)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	219,211	3,18581	212,662	225,76
Rm	46,1294	3,48011	38,9759	53,2829
d	-0,267583	0,206442	-0,69193	0,156765

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,05377E6	3	351258,
Residual	3007,05	26	115,656
Total	1,05678E6	29	
Total (Corr.)	88378,3	28	

R-cuadrado= 96,5975 %

La ecuación del modelo es: $TA1a = 219,211 \cdot (1 - \text{EXP}(-46,1294 \cdot (t - -0,267583) / 219,211))$

Regresión no Lineal- TA1b (2pretratamiento TA 1h)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	212,599	2,44385	207,576	217,623
Rm	51,9753	3,52672	44,726	59,2246
d	-0,30686	0,166059	-0,648199	0,034479

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	1,03403E6	3	344676,
Residual	2131,09	26	81,9649
Total	1,03616E6	29	
Total (Corr.)	75126,9	28	

R-cuadrado= 97,1633 %

La ecuación del modelo es: $TA1b = 212,599 \cdot (1 - \text{EXP}(-51,9753 \cdot (t - -0,30686) / 212,599))$

Regresión no Lineal- TA2a (2pretratamiento TA 2h)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	202,368	2,92203	196,362	208,374
Rm	45,7751	3,70686	38,1556	53,3947
d	-0,344148	0,213317	-0,782629	0,0943328

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	919661,	3	306554,
Residual	2782,85	26	107,033
Total	922444,	29	
Total (Corr.)	70620,6	28	

R-cuadrado= 96,0594 %

La ecuación del modelo es: $TA2a = 202,368*(1-EXP(-45,7751*(t--0,344148)/202,368))$

Regresión no Lineal- TA2b (Cachaza)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	197,442	2,83167	191,621	203,262
Rm	45,5733	3,74559	37,8741	53,2725
d	-0,363739	0,213927	-0,803474	0,0759955

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	880912,	3	293637,
Residual	2679,97	26	103,076
Total	883592,	29	
Total (Corr.)	65968,9	28	

R-cuadrado= 95,9% La ecuación es: $TA2b = 197,442*(1-EXP(-45,5733*(t--0,363739)/197,442))$

Regresión no Lineal- yc (Cachaza)

Estimación de los resultados

			Intervalo de confianza 95,0%	
			Límite	Límite
Parámetros	Estimación	Error típico	Inferior	Superior
a	195,942	1,95152	191,931	199,954
Rm	45,7695	2,55851	40,5104	51,0286
d	-0,244322	0,139748	-0,531579	0,0429359

Análisis de Varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Medias cuadráticas
Model	865954,	3	288651,
Residual	1291,06	26	49,6563
Total	867246,	29	
Total (Corr.)	66759,8	28	

R-cuadrado= 98,06%

La ecuación del modelo es: $yc = 195,942*(1-EXP(-45,7695*(t--0,244322)/195,942))$