

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DEL BAGAZO CERVECERO.

CARLOS ANDRÉS RODRÍGUEZ VENANDY

Santiago, Chile

2012

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DEL BAGAZO CERVECERO.

BIOGAS PRODUCTION FROM BREWERS SPENT GRAIN

CARLOS ANDRÉS RODRÍGUEZ VENANDY

Santiago, Chile

2012

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DEL BAGAZO CERVECERO.

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero Agrónomo.
Mención: Manejo de Suelos y Aguas.

CARLOS ANDRÉS RODRÍGUEZ VENANDY

	Calificaciones
Profesor Guía	
María Teresa Varnero Químico Farmacéutico	6,5
Profesores Evaluadores	
Ian Homer Bannister Ingeniero Agrónomo Dr.	6,3
Sr. Werther Kern F. Ingeniero Agrónomo, MBA	5,7

Santiago, Chile

2012

A mis padres, hermanos y maestros.

ÍNDICE

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
MATERIALES y Métodos	6
Lugar de estudio	6
Materiales	6
Digestores anaeróbicos.....	6
Bagazo cervecero	8
Estiércol de Bovino.....	11
Metodología	13
Materias primas.	13
Digestión anaeróbica.....	14
Residuo.....	15
Tratamientos.....	15
Análisis Estadístico	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
Materias primas	16
Caracterización fisicoquímica.....	16
Fitotoxicidad.....	17
Bagazo Acondicionado	18
Estiércol de bovino	20
Digestión anaeróbica.....	21
Residuos	28
CONCLUSIONES	31
BIBLIOGRAFÍA	32

RESUMEN

El bagazo cervecero es el residuo que se obtiene de la industria cervecera, luego de los procesos de prensado y filtrado del mosto obtenido tras la sacarificación del grano de cereal malteado. Este residuo es el mayor subproducto de la industria cervecera, con un volumen de producción del 85% en relación al total de los residuos generados. El bagazo, conforme su composición, tiene un importante valor nutritivo lo que le confiere atributos para ser utilizado en alimentación animal, además de otras alternativas para su utilización como son: alimentación humana, elaboración de ladrillos, fabricación de papel y enmiendas de suelo. Como residuo agroindustrial, tiene la posibilidad de utilización en la producción de energía, a través de la elaboración de carbón, combustión directa o bien mediante la producción de biogás.

El presente estudio, evaluó el potencial productivo del bagazo cervecero para la generación de biogás bajo condiciones controladas. Se determinó una caracterización fisicoquímica del residuo, se desarrolló el tratamiento Bagazo Acondicionado (BA) y se sometió a comparación con un tratamiento a base de Estiércol de Bovino (EB). Ambos tratamientos fueron evaluados en un biodigestor de régimen estacionario, determinando: Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) de 144 días para BA y de 98 días para EB; Volúmenes máximos de producción de 27,7 L. para BA y de 21,5 L para EB, mientras que para ambos tratamientos los valores mínimos obtenidos fueron de 0 L; El volumen total promedio de producción fue de 650,14 litros en los 144 día para BA y de 392 Litros en los 98 días para EB, los cuales representan un volumen de producción de $0,0144 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ y $0,0087 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ respectivamente; las concentraciones de biogás para EB fueron de un 55% de CH_4 y 45% de CO_2 , mientras que para BA no se lograron determinar.

Si bien los resultados obtenidos no concluyen sobre el producto final, como son la calidad y cantidad de los gases producidos, si se logran determinar factores de corrección del proceso siendo estos: El establecimiento de dos grandes etapas que permitan la degradación del material lignocelulósico y formación de ácidos orgánicos, en una primera etapa para luego desarrollar la formación de metano previa corrección de pH, inoculación de bacterias, corrección de sólidos totales y relación carbono-nitrógeno. Además, considerar la incorporación de materiales ricos en Carbono para el desarrollo de mezclas más estables.

Palabras claves: Digestión anaeróbica, biometanización, cerveza.

ABSTRACT

Brewers spent grain is the residue that is obtained from the brewing industry, then of the processes of pressing and filtration of must which is obtained after the saccharification of malting cereal grain. This residue is the largest byproduct of the brewing industry, with a production volume of 85% in relation to the total of the waste generated. Brewers spent grain, in accordance with its composition, has an important nutritional value which gives it attributes to be used in animal feed, in addition to other alternatives to their use as are: food, manufacturing of bricks, paper manufacturing and soil amendments. As agro-industrial residue, you have the possibility to use in the production of energy, through the development of coal, direct combustion or through the production of biogas.

The present study, evaluated the productive potential of the brewers spent grain for biogas generation under controlled conditions. It was determined a physicochemical characterization of the waste and the development of the brewers spent grain conditioning treatment (BA) and proceeded to comparison with a treatment based on cattle dung (EB). Both treatments were evaluated in a biodigester of steady-state, determining: Hydraulic retention time (HRT) of 144 days for BA and 98 days for EB; maximum production volumes of 27.7 L for BA and 21.5 L for EB, while that for both treatments minimum values obtained were of 0 L; the average total volume of production was 650.14 liters in the 144 day for BA and 392 liters in the 98 days for EB, which represent a production volume of 0.0144 m³kg⁻¹ and 0.0087 m³kg⁻¹ respectively; the concentrations of biogas for EB were 55% of CH₄ and 45% of CO₂, While not for BA has been successful in identifying.

While the results obtained did not conclude over the final product, as are the quality and quantity of the gases produced, if achieved determine correction factors of the process these being: the establishment of two major stages to allow for the degradation of the lignocellulosic material and formation of organic acids, in a first stage to then develop the formation of methane after pH correction, inoculation of bacteria, correction of total solids and relationship carbon-nitrogen. In addition, to be considered the incorporation of carbon-rich materials for the development of more stable.

Key Words: anaerobic digestion, biomethanisation, beer.

INTRODUCCIÓN

La volatilidad de los precios de los combustibles fósiles, los efectos del cambio climático sobre la agricultura, las exigencias medioambientales de los mercados de destino, los avances tecnológicos observados en las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), el costo interno de la energía, más el impacto nuclear ocurrido en Japón en marzo de 2011, constituyen una oportunidad para innovar e incorporar elementos de energías renovables en los procesos agroproductivos como factor de competitividad frente la encrucijada de una matriz energética «carbonizada» y a una demanda creciente por productos con indicadores ambientales positivos (Traub, 2011).

Las energías renovables se caracterizan porque en sus procesos de transformación y aprovechamiento en energía útil no se consumen ni se agotan en una escala humana. En Chile, estas energías suelen clasificarse en convencionales y no convencionales, según sea el grado de desarrollo de las tecnologías para su aprovechamiento y su grado de participación en el mercado eléctrico. Dentro de las ERNC se consideran la energía a escala pequeña hidráulica, la energía: eólica, solar, geotérmica, mareomotriz y las derivadas de la biomasa (CNE, 2007b).

Se entiende por biomasa, al conjunto de materias orgánicas renovables de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma. (CNE, 2007a), siendo los biocombustibles, aquellos productos que se obtienen a partir de la transformación de la biomasa, mediante diferentes procesos y que son capaces de sustituir a los combustibles fósiles (Acevedo, 2006), y la bioenergía, como aquella energía que deriva de los biocombustibles (FAO, 2011).

Diferentes tipos o fuentes de biomasa pueden ser utilizados energéticamente, una de las clasificaciones más aceptadas considera como: biomasa natural, aquella que se encuentra en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana (CNE, 2007a); cultivos energéticos, aquellos cultivos que poseen una gran capacidad metabólica para la generación de biomasa o que son eficientes en la síntesis de azúcares y aceites factibles de ser transformados en biocarburantes. (Acevedo, 2006) y biomasa residual, la cual se genera como consecuencia de cualquier proceso en que se consuma biomasa y se genere un residuo. Se produce tanto en explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas, así como también en industrias y núcleos urbanos (ACERA, 2011).

En la industria cervecera, el residuo de biomasa residual más abundante corresponde a bagazo cervecero, con un volumen de producción de un 85% en relación al total de los residuos generados por la industria (Mussatto *et al.*, 2004). El bagazo, se obtiene luego de los procesos de prensado y filtrado del mosto obtenido tras la sacarificación del grano de cereal malteado (FEDNA, 2004). Otros residuos de menor importancia por sus volúmenes producidos, son lúpulos y levaduras. (Ishiwaki *et al.*, 2000).

El mercado de la cerveza en Chile se encuentra en pleno desarrollo. Durante el año 2008, la industria representó el 64.3% de todas las ventas de bebidas alcohólicas, obteniendo un crecimiento de un 5,2% y un volumen total de ventas de seis millones de hectolitros (ACECHI, 2009). El mercado nacional es cerrado y dominado por dos grandes empresas: Compañía de Cervecerías Unidas (CCU), con un nivel de participación de 82,8% (CCU, 2011), y Cervecerías Chile abarcando el resto del mercado, para dejar solo con un 0,4% de participación al conjunto de microcervecerías presente en el país. (Gestión, 2008).

El bagazo, conforme su composición, tiene un importante valor nutritivo debido a sus altos contenido de proteínas y fibra (FEDNA, 2004; Mussatto *et al.*, 2004; Afshar *et al.*, 2008), lo que le confiere atributos para ser utilizado en rumiantes además de una buena aceptación por los animales luego de un corto período de acostumbamiento (AIANER, 2010). Aun así esta práctica es parcial y existen alternativas de manejo, como son: en alimentación humana, elaboración de ladrillos, fabricación de papel y enmiendas de suelo (AIANER, 2010, Mussatto *et al.*, 2004). Como residuo vegetal, se tiene la posibilidad de utilización del bagazo cervecero en la producción de energía, a través de la elaboración de carbón, combustión directa o bien mediante la producción de biogás (Mussatto *et al.*, 2004). Este último se produce a través de la digestión metanogénicas

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo a través del cual, en ausencia de oxígeno, la materia orgánica es transformada en biogás (Montes, 2008). Traub (2008) define al biogás como un combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos (digestores), a causa de las reacciones de biodegradación de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos y de otros factores, en ausencia de oxígeno. El biogás está compuesto por un 50% a un 70% de metano (CH₄) y un 30% a 50% de dióxido de carbono (CO₂) conteniendo pequeñas cantidades de nitrógeno (N₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), vapor de agua, amoníaco (NH₃), hidrógeno (H₂), pudiendo existir otros compuestos azufrados como mercaptanos y siloxanos, sulfuro de carbonilo y disulfuro de carbono, considerados elementos traza. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. El biogás tiene propiedades específicas que se indican en la Cuadro 1 (Deublein y Steinhauser (2008) citado por FAO, 2011).

Cuadro 1: Características generales del biogás

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Traza de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo m ⁻³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente: Deublein y Steinhauser (2008) citado por FAO, 2011.

El proceso de la digestión anaeróbica es muy complejo, debido tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases: Hidrólisis, etapa fermentativa o acidogénica, etapa acetogénica y etapa metanogénica (FAO, 2011).

Hilbert (2000), señala que los principales factores que afectan la producción de biogás son: composición y concentración del sustrato (nutrientes disponibles), temperatura del sistema, la velocidad de carga orgánica (VCO), tiempo de retención hidráulico (TRH), nivel de acidez (pH), relación Carbono/Nitrógeno y la presencia de compuestos inhibidores del proceso.

De estos parámetros, el TRH y el VCO, determinados por el tipo de sustrato, son los principales parámetros de diseño que definen el volumen del digestor (FAO, 2011). Donde, el TRH es el tiempo que requieren las bacterias para degradar la materia orgánica para la elaboración de biogás. (Varnero, 1992), mientras que la VCO es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el reactor por unidad de volumen, siendo directamente dependiente de la concentración de sustrato y del tiempo de retención (FAO, 2011).

Dentro de sus usos más comunes se encuentra la utilización en calderas para generación de calor o electricidad y su utilización en motores o turbinas para la generación de electricidad. También, es posible su purificación para su incorporación en redes de gas natural y su utilización como material base en la síntesis de productos de elevado valor agregado como metanol o gas natural licuado (Biodisol, 2010).

Considerando esto, así como la importancia de la industria cervecera en Chile respecto a sus volúmenes de producción y consumo energético de sus procesos, junto a la generación de residuos de esta industria, especialmente el bagazo cervecero que no es comercializado ni da utilidades a la empresa, es que se pretende evaluar el potencial de producción de biogás, mediante el uso del bagazo cervecero, en un sistema de digestión anaeróbica bajo condiciones controladas.

Objetivo general

Evaluar cantidad y calidad de biogás producido a partir del bagazo cervecero como materia prima para un sistema de digestión anaeróbica, bajo condiciones controladas.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la composición del bagazo cervecero para generar biogás.
2. Determinar el tiempo de retención hidráulico (TRH) del bagazo cervecero en un sistema de biodigestión.
3. Determinar la cantidad y calidad de biogás producido.
4. Caracterizar la composición del efluente resultante de la biodigestión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de estudio

El presente trabajo, se desarrolló en la planta piloto de tratamiento residuos orgánicos del Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED) y en el laboratorio de Reciclaje Orgánico, ambos pertenecientes a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. El ensayo se llevo a cabo desde inicios del mes de mayo del año 2011 hasta finales del mes de Enero del año 2012.

Materiales

Digestores anaeróbicos

Un digestor anaeróbico o biodigestor es en su forma más simple un contenedor dentro del cual se transforma la materia orgánica mediante el proceso de fermentación anaeróbica para la producción de biogás. Existen diversos diseños como tipos de biodigestores. Pero en su principio operacional, estos pueden ser clasificados básicamente en dos tipos:

Digestores de régimen estacionario o del tipo Batch

Biodigestores en donde la alimentación o carga del digestor con la materia prima se realiza una única vez en su inicio para luego ser sellados herméticamente impidiendo entradas o salidas del material. Bajo este sistema el proceso fermentativo, pasa por todas sus fases por lo cual se utiliza en principal medida para la caracterización de los productos y residuos.

Digestores de carga continúa

Biodigestores en donde ocurre una incorporación diaria de un volumen determinado de materia prima (aficiente), y a su vez, se retira la misma cantidad de digestato del sistema (efluente), permitiendo así, un flujo continuo de producción de biogás en una etapa deseada (metanogénica).

Para el presente estudio se trabajó con digestores anaeróbicos del tipo Batch, los cuales se fabricaron con tambores metálicos de medidas: 36,5cm de diámetro y 67cm de alto, con un volumen total de capacidad de 70L. Los tambores (Biodigestores) fueron identificados y llenados con las mezclas sometidas a estudio a un volumen de 45L correspondiente al 64% de la capacidad total, dejando un 36% de espacio libre, volumen que permitió la acumulación de gases producidos y la interacción gas-residuo en el proceso fermentativo.

El sistema completo se consideraba además de los biodegestores, una piscina de contención para el control de temperatura y un panel de control el cual manejaba el flujo de gases (Figura 1).



Figura 1: Sistema completo para la biodigestión.

En la piscina donde se encontraban inmersos los biodigestores, se le incorporó un sistema para la regulación de la temperatura, sistema que consistió en una resistencia eléctrica regulada por un termostato. Lo cual permitía el control de la temperatura, evitando que el sistema se enfriara por debajo de los 30°C, manteniendo la temperatura constante y favoreciendo el desarrollo de los microorganismos dentro del rango mesofílico.

Para cada biodigestor se le adaptaron dos mangueras de 9 y 12 mm, las cuales permitían el flujo de gases para su medición y posterior quema y el control de presión al interior de los digestores, respectivamente. La primera se conectaba a un sistema compuesto por manifold, uniones y válvulas (Figura 2a) los cuales permitían agrupar los gases o manejarlos de manera independiente según fuera la necesidad del estudio. Mientras que la segunda manguera, se conectó a un manómetro de baja presión (16 Kpa máximo) (Figura 2b) para el control de la presión dentro del biodigestor.

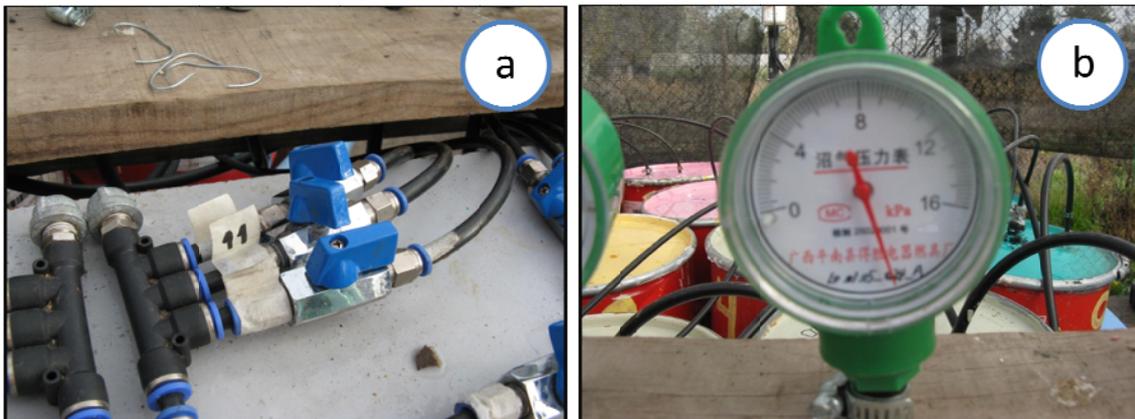


Figura 2a: Sistema de conexión de mangueras; Figura 2b: manómetro de baja presión.

Además de los elementos ya mencionados, el sistema se componía de: una trampa de agua y un flujómetro ($L\ m^{-1}$) (figura 3a) los cuales permitían la captura de vapor de agua presente en el gas, para luego realizar la medición de la cantidad de gas producido; un analizador de gases Dräger X-am7000 (figura 3b) unido al sistema por un adaptador que permitía la conexión al sistema; trampa de sulfuro de hidrógeno (figura 3c) para la reducción de este compuesto en la mezcla de gas total, el cual se fabrico en tubos de PVC rellenos con viruta metálica y de quemadores (figura 3d) en dos líneas, una con trampa para sulfuro de hidrógeno y otra sin trampa para la quema directa del gas.

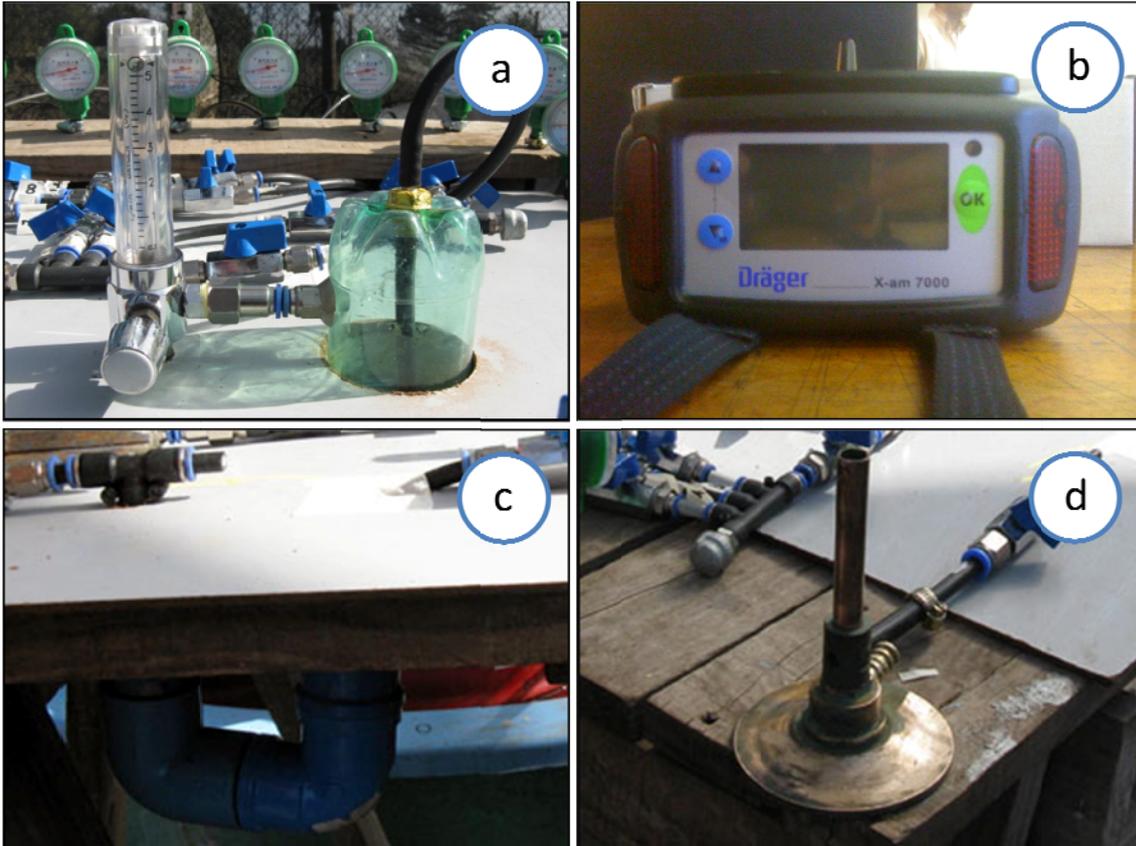


Figura 3a: Trampa de agua y contador de flujo; Figura 3b: medidor de gases Dräger X-am7000; Figura 3c: Trampa de sulfuro de hidrógeno; Figura 3d: quemador.

Bagazo cervecero

Obtención

El Bagazo cervecero, se obtiene del proceso de elaboración de cerveza (Figura 4), el cual se inicia con la cosecha, limpieza y almacenamiento del grano de cebada. La cebada es un cereal cuyas espigas se caracterizan por tener granos particularmente largos y se clasifican en dos tipos: cebadas de invierno y cebadas de primavera. Estas presentan diversas variedades, las cuales se clasifican a su vez, de acuerdo al arreglo de los granos en la espiga en cebadas de dos hileras y cebadas de seis hileras. Si bien la variabilidad y diversidad de cebadas es importante, no todas son igualmente útiles para el malteado y la fabricación de cerveza. (Maltear 2009)

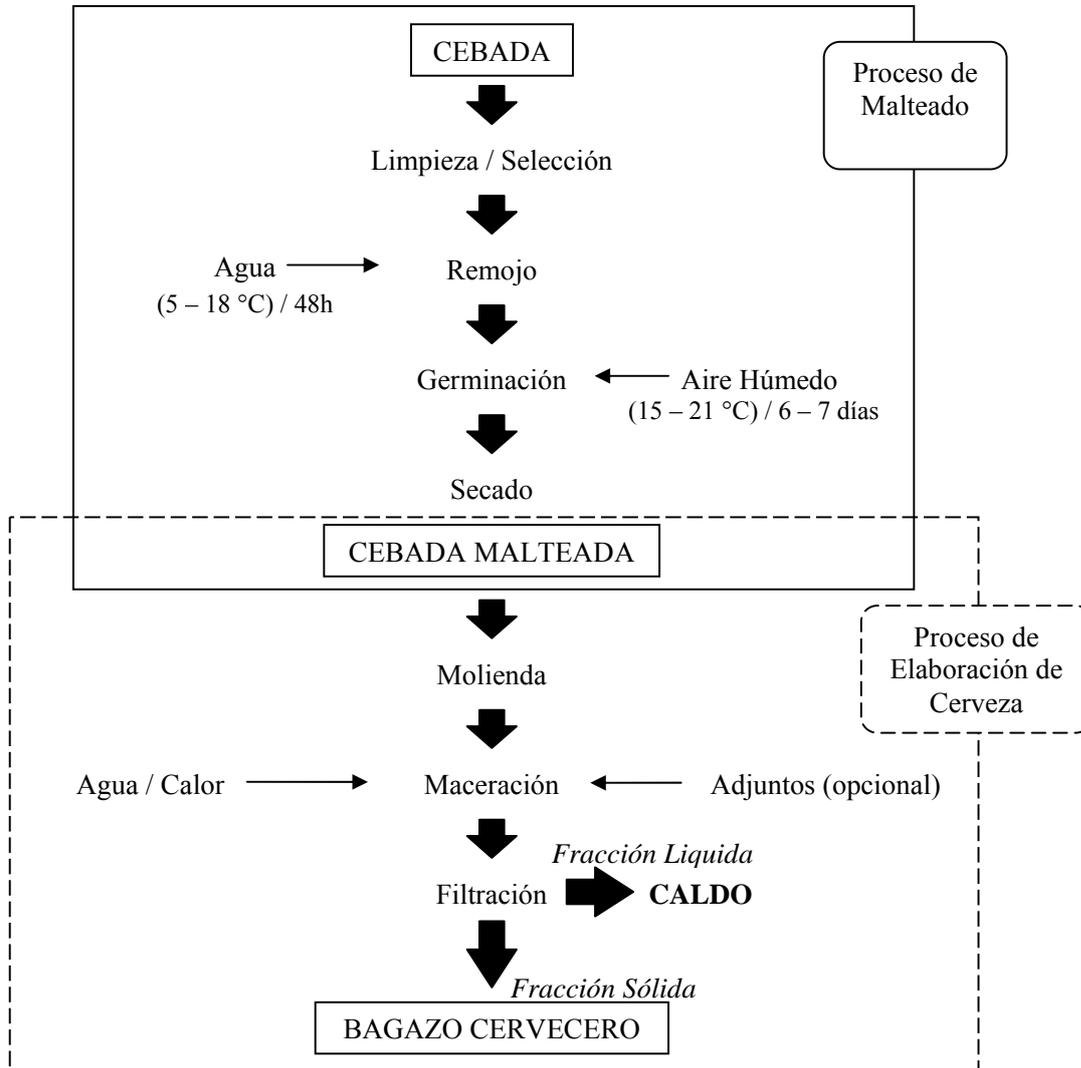


Figura 4: Diagrama del proceso obtención de bagazo de cerveza, adaptado de Mussatto *et al.* (2006).

El Malteado consiste en activar las enzimas presente en el grano para transformar las reservas energéticas en azúcares más simples. Los cambios esenciales que ocurren durante la modificación del grano son: Aumento y activación enzimática hidrolíticas mediante liberación o síntesis; degradación de paredes celulares, proteínas y almidón; y reducción de la fuerza estructural del tejido del grano. (MALTEAR, 2009).

Una vez finalizado este proceso, la malta (cebada malteada) puede ser tostada desarrollando sabor y color en diferentes grados de acuerdo a la intensidad del tostado a la cual fue sometido, luego deber ser molida para poder realizar la maceración. Proceso en el cual se incrementa escaladamente la temperatura de 37 a 78°C para promover la hidrólisis enzimática de los constituyentes de la malta, principalmente almidón, y otros productos como proteínas y β -glucanos y arabinosilanos como polisacáridos complejos. Durante el proceso, el almidón es convertido en azúcares fermentables (principalmente maltosa) y

azúcares no fermentables (dextrinas) y las proteínas son parcialmente degradadas a polipéptidos y aminoácidos. La solución acuosa obtenida de este proceso se conoce como caldo, el cual es utilizado como medio de fermentación para la producción de cerveza (Mussatto *et al.*, 2006).

La fracción sólida del residuo que queda, se conoce como bagazo cervecero. De acuerdo a Townsley (1979), el proceso de elaboración de cerveza es selectivo, removiendo solo aquellos nutrientes de interés para la elaboración de la cerveza. Dejando en el bagazo, proteínas insolubles en agua, como también los residuos de las paredes celulares de la cascara, pericarpio y restos de semillas. Dependiendo del tipo de cerveza a producir pueden variar los residuos, tanto por los tipos de maltas como por la adición de adjuntos como trigo, arroz o maíz.

Caracterización

El bagazo cervecero se compone principalmente de la cáscara, pericarpio y cubiertas de la semilla de la cebada. Dependiendo de la uniformidad del malteado, pueden quedar en mayor o menor cantidad restos de almidón en el endospermo y restos de pared celular. Aun así, el contenido de almidón es insignificante comparado a los compuestos de las paredes celulares de la cascara, pericarpio y cubiertas de la semilla, las cuales son abundantes en polisacáridos de celulosa y no-celulosa, lignina, algunas proteínas y lípidos. La cáscara a su vez presenta altos contenidos de silicio y polifenoles. (Mussatto *et al.*, 2006).

Santos *et al.* (2003), explica que la composición química del bagazo varía de acuerdo a las variedades de cebada utilizada, las condiciones de cosecha, malteado y maceración del procesos, como también, la calidad y cantidad de adjuntos agregados al momento de la elaboración. Dentro de su composición química, diversos autores coinciden en tratar al bagazo como un material lignocelulósico rico en proteínas y fibra (Cuadro 2).

Cuadro 2: Composición química de bagazo cervecero según diversos autores en % peso seco

Componente	Prentice y Refsguard (1978)	Kamunachi <i>et al.</i> (2001)	Fukuda <i>et al.</i> (2002)
Proteínas	31	24	15,2
Pentosas	19	Nd	Nd
Ligninas	16	11,9	27,8
Arabinoxilanos	Nd	21,8	28,4
Almidón y β -glucanos	12	Nd	Nd
Celulosa	9	25,4	16,8
Lípidos	9	10,6	Nd
Cenizas	4	2,4	4,6

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores fases del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol. Y la velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. (FAO, 2011). A su vez, Uzodinma y Ofoefule (2008), complementa con propiedades fisicoquímicas según lo expresado en la Cuadro 3.

Cuadro 3: propiedades fisicoquímicas del bagazo cervecero

Parámetro	Bagazo
Humedad	14,1 %
pH	5,03 %
Sólidos totales	67,3 %
Sólidos volátiles	14,84 %
Carbono	47 %
Nitrógeno	1,82 %
Relación C/N	25,9

Las características bioquímicas de residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, además, de rango neutro de pH para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente. El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición (FAO, 2011)

El bagazo cervecero utilizado en el presente trabajo, se obtuvo de la Cervecería Capital. Cervecería independiente y pionera en el mercado de la microcervecería en Chile, ubicada en la localidad de Batuco, la cual cuenta con una planta de producción con capacidad productiva para 45.000 L mes⁻¹ y donde se elaboran tres tipos de cerveza principalmente: Pale ale, Amber ale e Indian pale. Dentro de estos tipos de cerveza, se selecciono el bagazo proveniente del tipo Amber ale, definida por cervecería Capital (2011) como, una cerveza de color cobrizo, con buen amargor y un final algo dulce producto de la malta caramelizada que se le agrega en la mezcla de granos. Es una cerveza más larga y de buen volumen. Sus características son: Fermentación de alta temperatura por 4 días; levaduras del tipo ale; gasificación natural en estanque, alcohol de 5° y un amargor de 33 Ibu.

Estiércol de Bovino.

Obtención

El estiércol de bovino se obtuvo de las dependencias de Mundo Granja, proyecto de la Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias. Esta unidad consiste en una granja educativa ubicada en el mismo Campus Sur de la Universidad de Chile. En estas instalaciones se cuenta con una gran diversidad de animales de los cuales se utilizo en estiércol de los bovinos para su utilización en la biodigestión.

Caracterización

Los bovinos son mamíferos herbívoros que poseen un órgano especial (rumen) en cuyo interior se lleva a cabo la digestión de celulosa y otros polisacáridos mediante la actividad microbiana, porque estos animales carecen de las enzimas necesarias para digerirlos. Este órgano se encuentra a una temperatura y acidez constantes (39°C, pH 6,5), donde el fluido ruminal contiene gran cantidad de células, alrededor de 10¹¹ bacterias /mL. Las bacterias y los hongos celulolíticos actúan produciendo el disacárido celobiosa y glucosa. Ésta experimenta una acción bacteriana en la que se forman principalmente los ácidos acético, propiónico y butírico, dióxido de carbono y metano. (Carillo, 2003)

La composición del estiércol es muy variable, ya que depende de muchos factores como la especie, edad y alimentación del ganado, así como el uso de camas, la inclusión o exclusión del excremento líquido y la magnitud de los procesos de descomposición y lavado que haya tenido lugar durante su almacenaje. Salazar *et al.* (2007), realiza una caracterización del residuo, el cual se expresa en la Cuadro 4.

Cuadro 4: Caracterización físico química de dos tipos de estiércol de bovino.

Muestra	pH	CE	MO	N%	P%	K %	%Hum
Estiércol Bovino 1	8,8	5,51	72,6	2,03	1,91	1,97	52,8
Estiércol Bovino 2	7,2	5,91	37,7	1,52	6,83	0,12	57,9

A su vez, Varnero y Arellano (1990), establecen rangos para los niveles de nutriente y la composición química del residuo. (Cuadro 5)

Cuadro 5: Caracterización estiércol de bovino

Estiércol de Bovino	Porcentaje en base seca (%)
Lípidos	3,23
Proteínas	9,05
Celulosa y Hemicelulosa	32,49
Lignina	35,57
Cenizas	19,66
C	17,4 – 40,6
N	0,3 – 2,0
Sólidos Totales	13,4 – 56,2

Metodología

Materias primas.

Caracterización fisicoquímica

Tanto el bagazo cervecero como el estiércol de bovino fueron sometidos a análisis para su caracterización y preparación como materias par una biodigestión anaeróbica para la generación de biogás. Los parámetros a determinar fueron:

Contenido de agua

La medición del contenido de agua se realizó mediante el método gravitatorio a $70\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, según TMECC 03.09 (TMECC, 2004).

pH

El método utilizado para la medición de este parámetro fue TMECC 04.11 (TMECC, 2004).

Conductividad eléctrica

Este parámetro químico se determinó con un conductivímetro previamente calibrado, utilizándose el mismo extracto acuoso empleado en la medición de pH. Fue medido de acuerdo al método TMECC 04.10 planteado por TMECC (2004).

Materia Orgánica

El porcentaje de materia orgánica se calculó mediante la metodología planteada por TMECC 05.07-A (TMECC, 2004).

Este método consiste en medir el contenido de cenizas por pérdida de masa, luego de realizar una calcinación del material a 600°C en una mufla.

El porcentaje de carbono orgánico (CO) se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$CO(\%) = \frac{MO}{1,8}$$

Nitrógeno total

Los análisis de nitrógeno se determinaron mediante el método TMECC 04.02-D (TMECC, 2004).

Ensayo de Fitotoxicidad

Se determinó a través de la metodología de índice de germinación planteada por Varnero (2005). A través de este bioensayo, se logró detectar la presencia de sustancias fitotóxicas, para lo cual se utilizaron dos especies indicadoras sensibles, rabanito (*Raphanus sativus*) y lechuga (*Lactuca sativa*), de rápido crecimiento y fácil manejo. Estas especies permitieron advertir la presencia de sustancias fitotóxicas mediante efectos negativos que provocan sobre la germinación y crecimiento de las semillas.

Se determinó el nivel de fitotoxicidad a través de las siguientes fórmulas:

Porcentaje de Germinación relativo (GR)

$$GR(\%) = \frac{N^{\circ} \text{ DE SEMILLAS GERMINADAS EN EXTRACTO}}{N^{\circ} \text{ DE SEMILLAS GERMINADAS EN TESTIGO}} \times 100$$

Además se determinaron los siguientes parámetros para asegurar la ausencia de metabolitos fitotóxicos.

Largo de radícula relativo (ER):

$$EG(\%) = \frac{LARGO \text{ PROMEDIO DE RADÍCULAS EN EXTRACTO (cm)}}{LARGO \text{ PROMEDIO DE RADÍCULAS EN TESTIGO (cm)}} \times 100$$

Índice de germinación (IG):

$$IG = \frac{GR \times ER}{100}$$

De acuerdo al índice de germinación es posible determinar nivel de fitotoxicidad (Cuadro 6).

Cuadro 6: Nivel de Fitotoxicidad

Índice de Germinación	Nivel de Fitotoxicidad
$IG \leq 50$	Presencia de sustancias fitotóxicas
$50 < IG < 80$	Presencia de sustancias fitotóxicas moderada
$IG \geq 80$	Ausencia de sustancias fitotóxicas

Digestión anaeróbica

Tiempo de retención hidráulico (TRH)

En digestores de régimen estacionario (batch) o discontinuo, el TRH es el tiempo que transcurre entre la carga del sistema y su descarga (FAO, 2011), Mientras que en un sistema de carga diaria (régimen semicontinuo), el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga que será necesario para alimentar al digestor, y se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria.

$$TRH = \frac{\text{Volumen del biodigestor}}{\text{Volumen de carga diaria}} \quad (11)$$

La fracción de materia orgánica degradada aumenta al aumentar el TRH, sin embargo la producción volumétrica de metano disminuye, una vez superado el óptimo (Figura 7). El límite mínimo de los TRH está dado por la tasa de reproducción de las bacterias

metanogénicas debido a que la continua salida de efluente del digestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido. Esta extracción debe ser compensada por la multiplicación de las bacterias que pertenecen dentro del reactor. Es por tanto necesario determinar para cada tipo de residuo y de digestor el tiempo de retención que optimiza el proceso.

Cantidad de biogás

Mediante la utilización de un gasómetro se determinó el volumen en litros, diarios producido por cada biodigestor. Procurando realizar las mediciones al medio día, durante todo el periodo del ensayo.

Calidad de biogás

Mediante el equipo medidor de gases Dräger X-am7000, se caracterizó semanalmente la composición del biogás en relación a: metano (%), dióxido de carbono (%), ácido sulfhídrico (%), oxígeno (%), Nitrógeno (ppm), y monóxido de carbono (ppm).

Residuo

Una vez finalizado el proceso y junto a la obtención de los residuos, se procedió a evaluar en relación a los parámetros ya mencionados para las materias primas.

- Humedad del residuo y sólidos totales (Secado a $70\pm 5^{\circ}\text{C}$)
- Sólidos Volátiles (SV) o materia orgánica (MO) (Pérdida por calcinación a 600°C)
- Carbono Orgánico (CO) (% en base seca a $70\pm 5^{\circ}\text{C}$)
- C/N (Carbono en % en base seca a $70\pm 5^{\circ}\text{C}$ de carbono orgánico y Nitrógeno en % en base seca a $70\pm 5^{\circ}\text{C}$)
- pH (suspensión en agua 1:5)
- Conductividad eléctrica (CE) (en extracto 1:5)
- Ensayo de fitotoxicidad

Tratamientos.

El presente estudio, consistió en la elaboración de dos tratamientos. Bagazo Acondicionado (BA), siendo una mezcla del residuo del bagazo cervecero bajo condiciones adecuadas para la producción de biogás. Y el tratamiento Estiércol de Bovino (EB) como tratamiento testigo debido a su amplia utilización en la producción de biogás. Cada tratamiento constó de tres repeticiones, siendo para BA: A1, A2 y A3; y para EB: T1, T2 y T3

Análisis Estadístico

Las variables CE, pH, sólidos volátiles, C/N y producción de biogás se analizarán en forma descriptiva indicando promedio, desviación estándar e intervalos de confianza. Se desarrollarán curvas por cada repetición mediante métodos de regresión en función del tiempo para ver el comportamiento de las variables durante el proceso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Materias primas

Caracterización fisicoquímica

Se analizaron muestras de cada materia prima, caracterizándolas fisico-químicamente, los resultados de estos análisis se expresan en la Cuadro 7.

Cuadro7: Caracterización fisico-química para bagazo cervecero y estiércol de bovino.

	Bagazo Cervecerero	Estiércol de Bovino
Humedad	75%	65%
Sólidos Totales	25%	35%
Carbono Orgánico	54%	46,8%
Nitrógeno Total	2,01%	1,61%
C/N	26,8 : 1	29 : 1
pH	5,2	7,8
CE	8 dS m ⁻¹	5,8 dS m ⁻¹
Sólidos Volátiles	97%	80%

Tanto el bagazo cervecero como el estiércol de bovino, son residuos que se presentan con una alta humedad, 75% y 65% respectivamente. Aun así, estos valores deben ser corregidos para establecer las condiciones ideales para el proceso de biodigestión anaeróbica, las cuales según Varnero (1992) son de un rango de humedad entre 85 y 92%, para poder llegar a manejar un rango de sólidos totales entre un 8 y 15%. Tanto las muestra de bagazo y de estiércol, son muestras frescas, donde no transcurrió mas de 24hrs desde su recolección hasta su medición.

El valor de carbono orgánico para el estiércol de bovino es un poco mayor a los rangos determinados por FAO (2011), quienes proponen un rango entre 17,4 a 40,6 %, mientras que el valor obtenido fue de un 46,8%. Esta diferencia se puede deber a diversas causas, desde las razas animales, la alimentación hasta los efectos del entorno. Para el bagazo cervecero su valor también fue alto, donde Uzodinma y Ofoefule (2008) establece un valor de un 47%, mientras que los resultados de los análisis realizados, entregan un valor de un 54%.

El contenido de nitrógeno para el estiércol de bovino fue de un 1,61%, entregando una relación de 29:1, valor adecuado para el proceso fermentativo, y a su vez esperado según lo propuesto por diversos autores. Para el bagazo cervecero, el valor fue de un 2,01% con una relación C/N de 26,8 : 1. Debido a la poca información sobre el residuo en comparación al estiércol de bovino el cual ha sido utilizado ampliamente para la producción de biogás, se determinó las diferentes formas de nitrógeno presentes en el bagazo, las cuales se presentan a continuación en la Cuadro 8.

Cuadro 8: Contenidos de nitrógeno en el Bagazo Cervecero

Tipo de Nitrógeno	Valor
N-Total	2,01 %
N-Orgánico	1,98%
N-Amoniacal	124 ppm
N-Nítrico	98 ppm

El nitrógeno total se compone de nitrógeno orgánico (%) y nitrógeno mineral (ppm). La fracción mineral a su vez se compone de nitrógeno amoniacal y nitrógeno nítrico. Debido a la baja concentración de las formas minerales de nitrógeno en el residuo, se tiende a utilizar el valor de nitrógeno total como si fuera el valor de nitrógeno orgánico para la realización de los cálculos para la determinación de los factores para el proceso de biodigestión.

La relación de C/N para el bagazo cervecero fue de un 26,8 : 1 valor adecuado para el proceso fermentativo.

El valor de pH, para el bagazo cervecero fue de 5,2 (Fuertemente ácido) y para el estiércol de bovino de 7,8 (ligeramente alcalino). Según Varnero (1992), para el normal desarrollo de la biometanización se requiere un valor de pH neutro (6,6 – 7,3).

Los valores de conductividad eléctrica para el bagazo y el estiércol de bovino, son bajos y no representan la necesidad de un control para su utilización en el proceso de fermentación anaeróbica.

En cuanto al contenido de sólidos volátiles, el bagazo cervecero presenta un valor de 97%, valor mayor al que presenta el estiércol de bovino con un 80%, lo cual preestablece para el bagazo cervecero un mayor potencial para la producción de biogás de acuerdo a la cantidad de gas producido.

Fitotoxicidad

Se analizó la fitotoxicidad que presenta el bagazo cervecero y el estiércol de bovino, con el fin de considerar su utilización como residuos frescos en la agricultura. Los resultados para el bagazo cervecero fueron tajantes, demostrando una toxicidad severa, al no haber germinación de ninguna semilla. Como se muestra en la Cuadro 9.

Cuadro 9: Análisis de Fitotoxicidad para Bagazo Cervecero.

Muestra	PGR (%)	ER(%)	IG	Observaciones
1	0,0	0,0	0,0	Toxicidad severa
2	0,0	0,0	0,0	Toxicidad severa
3	0,0	0,0	0,0	Toxicidad severa

Para el estiércol de bovino (Figura 5), se determinó un rango de toxicidad de moderada a severa, donde si bien, se obtuvo un alto porcentaje de germinación entre las muestras, éstas se vieron afectadas en el crecimiento radicular. Lo cual condiciona el establecimiento y crecimiento para los cultivos.



Figura 5: Análisis de fitotoxicidad para estiércol de bovino.

El estiércol de bovino es ampliamente utilizado en la agricultura convencional como fertilizante para los cultivos sin realizarle un tratamiento previo para su estabilización, pues son fuentes de entrega de nutrientes especialmente compuestos nitrogenados que ayudan al crecimiento y desarrollo de los cultivos, aun así, son fitotóxicos y la recomendación es a estabilizarlos mediante un proceso como el compostaje, antes de su utilización.

El estiércol de bovino permite su utilización directa en el caso de que se asuman sus consecuencias para los cultivos, pero el bagazo cervecero no permite su utilización de manera directa para los cultivos.

Bagazo Acondicionado

Debido a la condición fuertemente ácida del bagazo, se determinó su corrección mediante la aplicación de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Elaborando, una curva de calibración (figura 6), la cual se realizó en base a una solución de cal y agua en relación 1:100, incorporando dosis crecientes al bagazo cervecero. Las dosis fueron de: 3, 5, 8 y 10 ml de la solución de cal y se incorporaron en 100 ml de solución de Bagazo. Una vez incorporado y homogenizada la muestra se procedió a la determinación de pH.

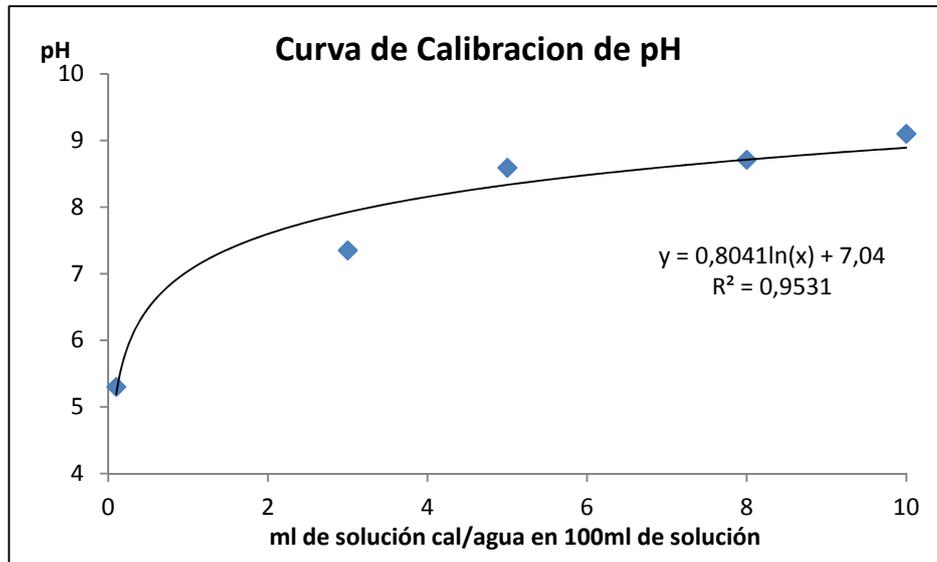


Figura 6: Curva de Calibración de pH para Bagazo

Considerando un valor de pH neutro para el proceso fermentativo y la producción de biogás, se concluyó para la elaboración de BA un aumento de pH de 5,2 a un valor superior a 7,0. Determinando una dosis de aplicación de la solución de cal y agua en relación 1:100, de 300 ml por litro de la solución con bagazo. A esta mezcla se le incorporó un 10% de estiércol de bovino, como material inoculante de bacterias y se completó con agua para alcanzar un valor de humedad y de concentración de sólidos totales adecuados y que permitieran el desarrollo para una fermentación metanogénicas.

La formulación de la mezcla se estableció en un volumen total de 160L para ser distribuido en 3 biodigestores con capacidad de 45L de mezcla para cada uno. Las cantidades de la mezcla de BA quedan expresadas en la Cuadro 10.

Cuadro 10: Componentes de mezcla para bagazo acondicionado

Cantidad	Mezclas
80Kg.	Bagazo cervecero fresco
4,8 L.	Solución cal y agua En relación 1:100
8 Kg	Estiércol de bovino fresco
140 L	Agua

La composición final del BA, de acuerdo a sus tres tratamientos queda expresada en la Cuadro 11.

Cuadro 11: Caracterización del tratamiento de bagazo acondicionado (BA)

	A1	A2	A3	Promedio
Humedad (%)	89,1	89,2	89,7	89,33±0,32
Carbono Orgánico (%)	51,3	51,5	51,2	51,33±0,15
Sólidos Volátiles (%)	78	78	78	78,00±0,00
C/N	26	26	26	26,00±0,00
Sólidos Totales (%)	10,9	10,8	10,3	10,67±0,32
pH	7,5	7,8	7,9	7,73±0,21
CE(dS m ⁻¹)	16	12,8	11,1	13,30±2,49

Estiércol de bovino

Dada las condiciones ideales del residuo para su fermentación y producción de biogás, así como su amplia utilización. Se elaboró un tratamiento testigo para el BA, donde su composición de la mezcla queda expresada en la Cuadro 12, en la cual solo fue necesaria su corrección de sólidos totales mediante la incorporación de agua.

Cuadro 12: Componentes de estiércol de bovino

Cantidad	Mezclas
8 Kg	Estiércol de bovino fresco
140 L	Agua

La composición final del tratamiento EB, se expresa en la Cuadro 13.

Cuadro 13: Caracterización del tratamiento de estiércol de bovino (EB)

	T1	T2	T3	Promedio
Humedad (%)	87,6	87,4	87,3	87,43±0,15
Carbono Orgánico (%)	48,6	46,4	48,3	47,77±1,19
Sólidos Volátiles (%)	75	76	75	75,33±0,58
C/N	30:1	28:1	30:1	29,33±1,15:1
Sólidos Totales (%)	12,4	12,6	12,7	12,57±0,15
pH	7,6	7,6	7,5	7,57±0,06
CE(dS m ⁻¹)	6,8	5,4	7,6	6,60±1,11

Digestión anaeróbica

Determinación del tiempo de retención hidráulico (TRH)

Se estableció como criterio para finalizar el proceso fermentativo, que la medición del flujo fuera escaso o nulo por un período constante de tiempo, siendo éste en la práctica, un flujo menor a 2 l s^{-1} . por el período de una semana. El figura 7, compara los tiempos de retención hidráulica para los tratamientos.

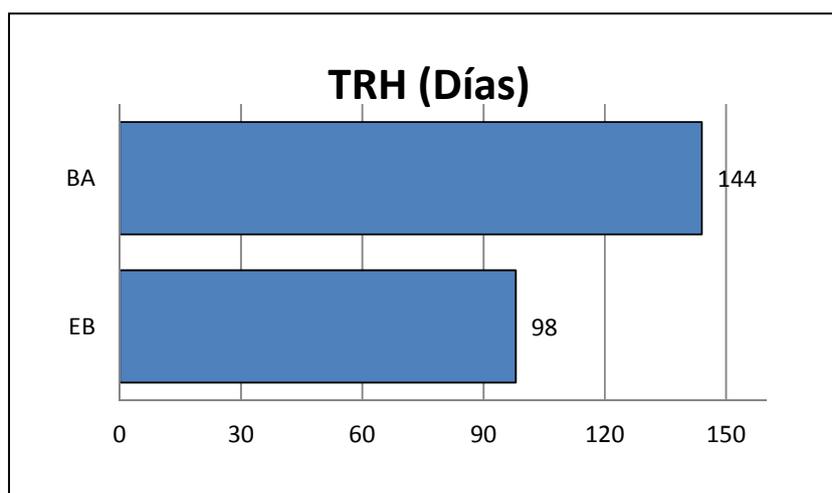


Figura 7: Tiempo de retención

El TRH para BA fue de 144 días siendo superior en 46 días al de EB, estableciendo una mayor demora para la disminución de la actividad microbiológica y por ende una disminución en la producción de biogás. El TRH fue superior a los parámetros propuestos por Varnero (1992), donde estableció el criterio para climas templados con inviernos fríos como el de Santiago, en un TRH de 60 a 90 días. EB, se mantuvo dentro de los parámetros establecidos previamente con un TRH de 98 días.

El tratamiento BA, demostró una tendencia a estar mas tiempo, debido a que el proceso fermentativo que ocurrió, no fue el esperado para la producción de biogás, este tipo de fermentación, se desarrolla por periodos más prolongados pues no obedece a un equilibrio de sus componentes entre materias primas, condiciones químicas y carga microbiana, por lo que la degradación del material se realizo hasta que las condiciones lo permitiesen. En cuanto a EB, este desarrollo el ciclo completo de Biometanización y se mantuvo bajo los rangos esperados.

Cantidad biogás

La cantidad de biogás producido depende, no solo de el material a utilizar, los microorganismos presentes y de los balances químicos y nutricionales, sino que además depende de factores externos que regulan el proceso como son: la temperatura, el biodigestor (sistema cerrado sin filtración de gases e incorporación de oxígeno) y una adecuada homogenización de la mezcla. La suma de factores y sus interacciones condicionan la producción y el proceso fermentativo, los resultados obtenidos en cuanto al volumen de producción para las mezclas BA y EB, quedan expresados en la figura 8.

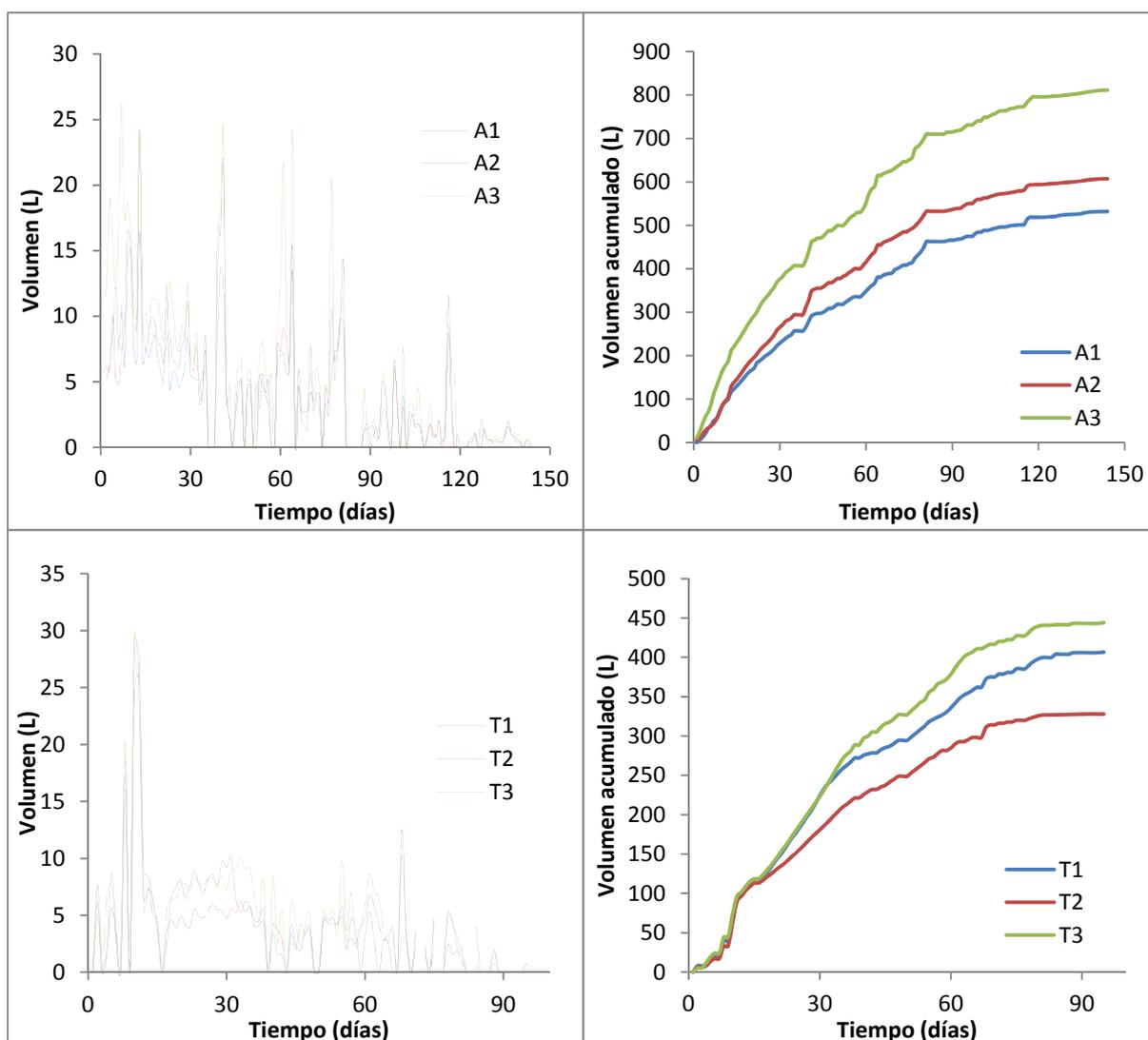


Figura 8: Volúmenes de producción de biogás: (a) Volumen de producción diaria de tratamiento BA. (b) Volumen acumulado de producción del tratamiento BA. (c) Volumen de producción diaria de tratamiento EB. (d) Volumen acumulado de producción del tratamiento EB.

Independiente del tipo de tratamiento, las producciones en la cantidad de gas generado, mostraron una fluctuación de acuerdo al comportamiento de la dinámica de poblaciones de microorganismos, en donde, las producciones promedio por tratamiento, quedan expresados en la Cuadro 14.

Cuadro 14: producciones totales promedios por tratamiento

	BA (L)	EB (L)
Producción promedio diaria	$4,5 \pm 4,64$	$4,1 \pm 4,55$
Producción mínima diaria	0,0	0,0
Producción máxima diaria.	21,5	27,7
Volumen acumulado promedio	650,14	392,87

Durante la biodigestión, la actividad microbiana se vio afectada por alteraciones en el sistema de medición, en donde, aumentos y disminuciones de temperatura distintas a los 30°C, produjeron una mayor o menor liberaciones de gases, alcanzado valores máximos de 27,7 L. para BA y de 21,5 L para EB, mientras que para ambos tratamientos los valores mínimos obtenidos fueron de 0 L.

El volumen total promedio de producción fue de 650,14 litros para Bagazo acondicionado y de 392 Litros para estiércol de bovino, los cuales representan un volumen de producción de $0,0144 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ para BA y $0,0087 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ para EB.

La actividad y la consecuente liberación de gases fue mayor al inicio del proceso (primeros 30 días), luego de eso, la producción de biogás fue mermando hasta detenerse o ser casi nula. La figura 9, entrega los valores promedio de producción para los distintos tratamientos.

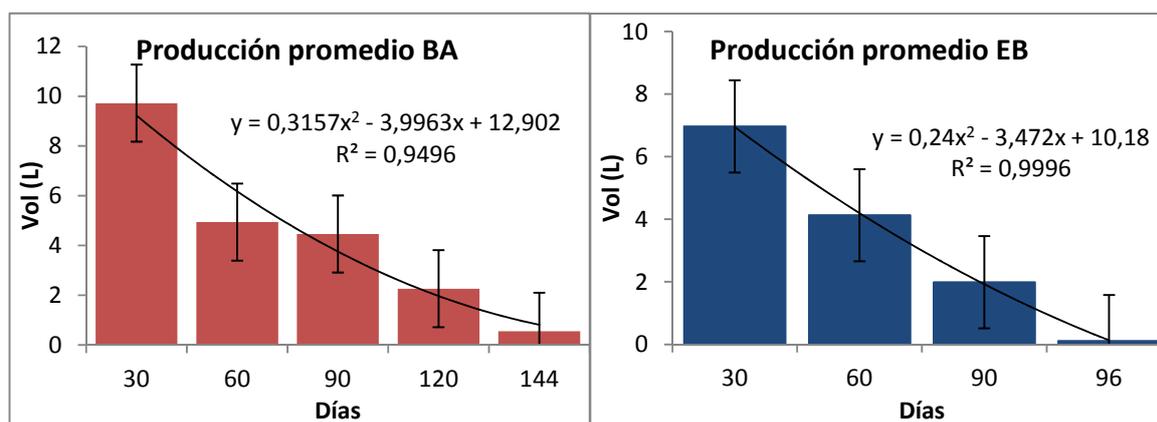


Figura 9: Producción promedio de biogás: (a) Tratamiento bagazo acondicionado. (b) Tratamiento estiércol de bovino

Calidad biogás

La calidad de los gases se evaluó cada 14 días, en donde las mediciones para BA se realizaron a partir del día 50 y para EB se realizaron desde el tercer día. Los resultados obtenidos de las mediciones se muestran en la figura 10.

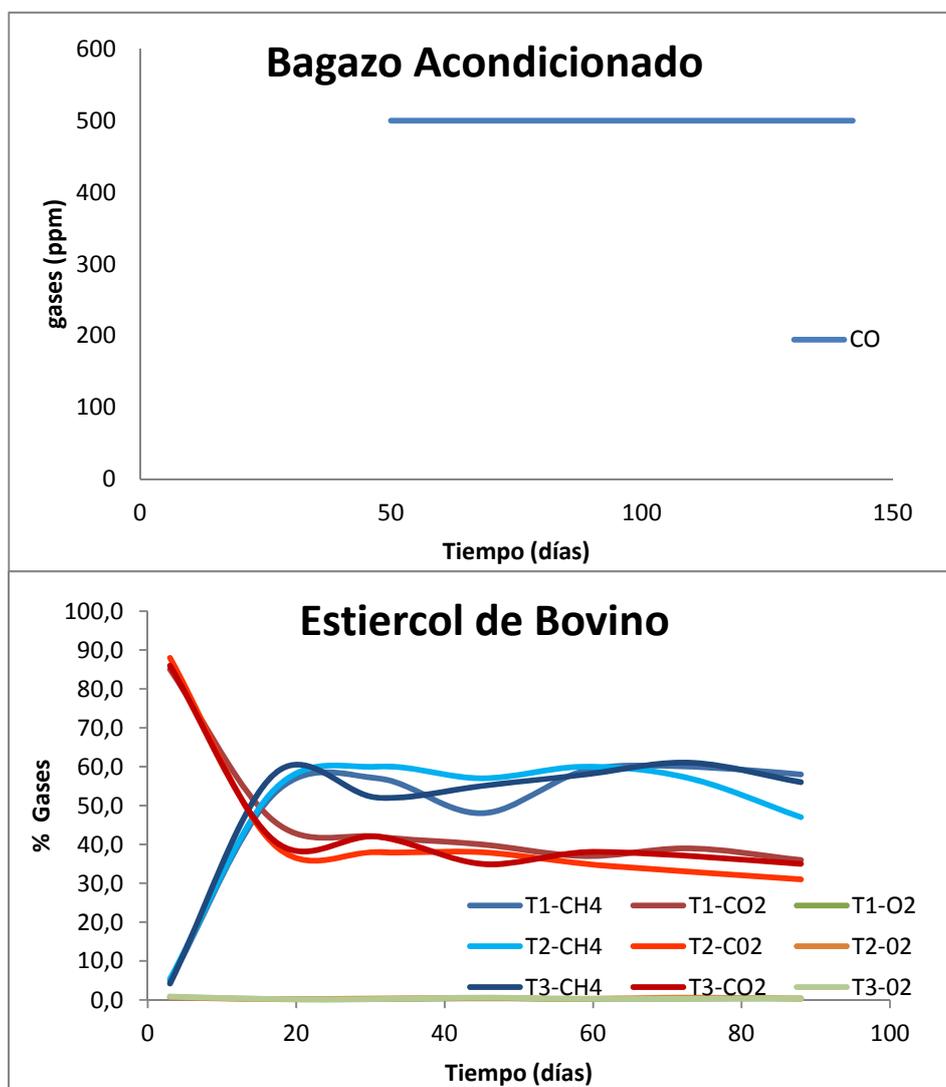


Figura 10: Calidad del biogás (a) BA. (b) EB.

Para EB, la concentración de gases fue de un 55% de CH₄ y 45% de CO₂, siendo para los otros gases: O₂, H₂S y CO de valores no significativos. Estos resultados se condicen con los propuestos por Deublein y Steinhauser (2008) citado por FAO, 2011, (Cuadro 1), donde se establecen dentro de los valores promedios como tratatamiento testigo.

.Para BA, no se logró obtener valores de medición de las calidades de gases en cuanto a CH_4 , CO_2 , O_2 , y H_2S , debido a que a concentración de CO en la medición superaba las 500 ppm, valor crítico para el medidor de gases Dräger X-am7000, impidiendo la evaluación de los otros gases. De igual manera, no se logró combustionar el gas obtenido al someterlo a una llama, razón por la cual se infiere que la concentración de metano se encuentra por debajo de un 50%, valor crítico que permite la combustión del biogás. Tanto por las concentraciones de monóxido de carbono y la no combustión del gas, hacen presumir que el proceso de fermentación en su etapa metanogénica no se realizó, desarrollándose otro tipo de fermentación a la esperada.

WILEY-VCH (2008), explica el fenómeno de la fermentación metanogénica, como un proceso complejo, el cual puede ser dividido en cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Cada fase es impulsada por diferentes grupos de microorganismos, los cuales se encuentran en una interrelación microbiana y poseen diversos requerimientos del medio, por lo tanto, para desarrollar una digestión metanogénica adecuada, se debe establecer una relación de degradación similar entre las primeras y últimas etapas donde los índices de degradación sean de igual tamaño, esto quiere decir, que debido a los requerimientos se pueden agrupar las dos primeras fases, Hidrólisis y Acidogénica en un primer grupo o etapa 1. Y las fases Acetogénica y Metanogénica en un segundo grupo o etapa 2 (figura 11).

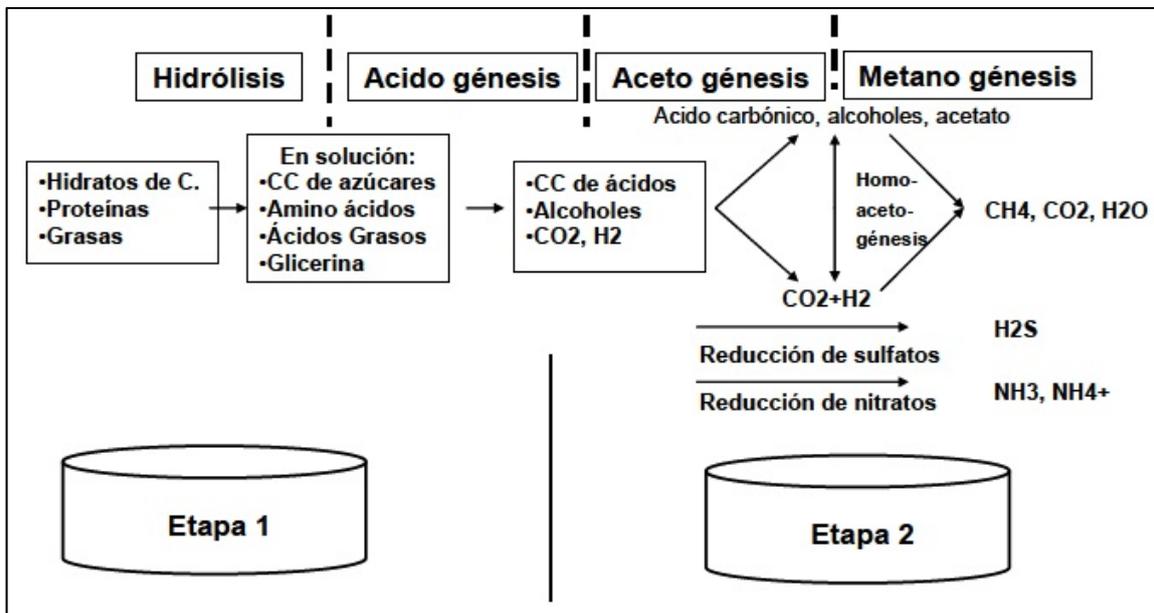


Figura 11: bioquímica de la formación de gas metano, adaptado de WILEY-VCH (2008),

Los diferentes microorganismos de las distintas etapas, deben desarrollarse de manera equilibrada y similar, en donde la cantidad de microorganismos de las etapas 1 y 2, deben ser similares en cantidad con los microorganismos de las etapas 3 y 4. Un desequilibrio de esta relación, conlleva a una alteración del medio, a las poblaciones microbianas, la fermentación metanogénica y por consiguiente la disminución de metano en la producción de biogás.

En la primera etapa la hidrólisis, presenta un amplio grupo de microorganismos indisolubles hidrolíticos como celulosa, proteínas y grasas, las cuales son fragmentados en monómeros por enzimas (hidrolasa), estas enzimas provienen exclusivamente de bacterias de metabolismo anaeróbico y actúan sobre los polímeros orgánicos u otros materiales complejos despolimerizándolos enzimáticamente en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos. Posteriormente estos compuestos experimentan un proceso de fermentación que origina diferentes ácidos orgánicos, lo cual es indispensable para lograr la ruptura de los biopolímeros complejos en polímeros solubles o monómeros, puesto que los microorganismos que realizan la depuración solamente son capaces de actuar sobre materia orgánica disuelta.

Esta etapa de degradación (etapa 1) puede ser limitante de la velocidad del proceso global, sobre todo tratando residuos con alto contenido en sólidos, el grado de hidrólisis y la velocidad del proceso dependen de muchos factores, entre otros del pH, de la temperatura, de la concentración de biomasa hidrolítica, del tipo de materia orgánica particulada y del tamaño de partícula. La hidrólisis de los carbohidratos toma lugar en algunas horas, para las proteínas el proceso toma algunos días y en el caso de la lignocelulosa el proceso es muy lento e incompleto.

El bagazo cevecero es un producto de difícil degradación biológica, es un material que proviene de una sacarificación en donde su carga microbiológica es prácticamente nula, posee un alto contenido de compuestos lignocelulósicos y tiende por esto la formación de monóxido de carbono debido a una degradación incompleta, generando un incremento en la concentración de ácidos, una disminución en el valor de pH y el continuo desarrollo de un sistema bajo una fermentación ácida, afectando la actividad microbiológica, produciendo un aumento en la población de bacterias acidogénicas en el medio condicionando el establecimiento de otras bacterias como las metanogénicas.

Los microorganismos presentes en las etapas de hidrólisis y de acidogénesis son bacterias anaeróbicas facultativas como las enterobacterias, bacterias aerotolerantes como las bacterias del ácido láctico y bacterias anaeróbicas estrictas como: *Clostridium*, *Propionibacterium*, *Selenomona*, estas bacterias consumen el oxígeno disuelto en el agua y por ende bajan el potencial redox, lo que es la base para la proliferación de más microorganismos anaeróbicos.

Los productos de la fase acidogénica sirven de sustrato para la formación de otras bacterias, las cuales se desarrollan en una segunda etapa, en donde las reacciones son endergónicas (se necesita energía para la degradación de los productos de la acidogénesis), las bacterias de esta etapa producen necesariamente H_2 y están en simbiosis constante con los organismos que producen metano. Los organismos metagénicos pueden sobrevivir solo

a altos niveles de presión parcial de hidrógeno, si este nivel baja, el H_2 , CO_2 y acetato son producidos por bacterias acetogénicas en el caso contrario predomina la formación de ácido propiónico, butírico, valérico y etanol (entre otros).

Un esquema que muestra la degradación acetogénica y la simbiosis con los organismos metanogénicos se muestra en la figura 12

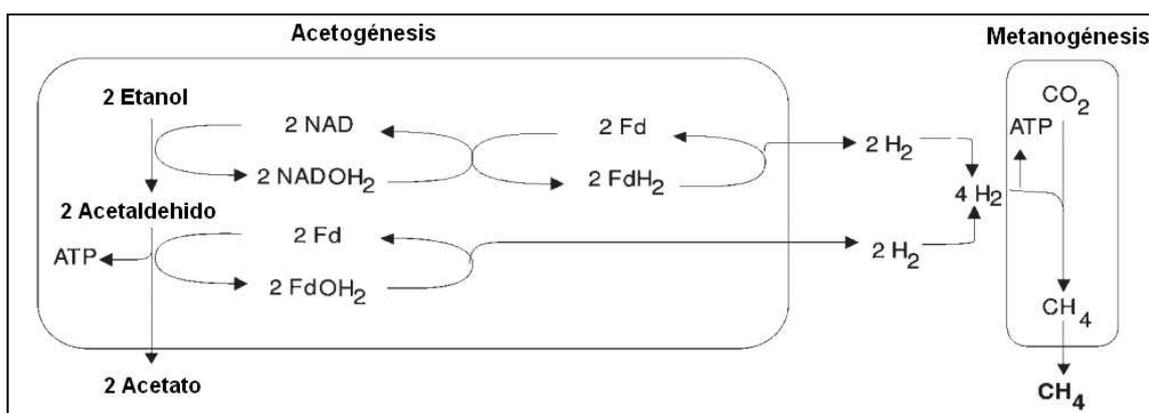


Figura 12: Degradación Acetogénica, adaptado de WILEY-VCH (2008),

Cuando la metanogénesis funciona, la etapa acetogénica también funciona sin problemas, en el caso contrario comienza una sobre-acidificación. Las bacterias metanogénicas pertenecen al reino de las arqueobacterias. De acuerdo a los sustratos que pueden degradar se dividen en: Hidrogenotróficos, capaces de producir, metano a partir de hidrógeno y anhídrido carbónico, Acetoclásticos, producen metano y anhídrido carbónico a partir de acetato, Metilótrofos, metabolizan compuestos como metilaminas y metilsulfuros, los géneros de metanobacterias hidrogenofílicas más frecuentes en reactores anaerobios son: Methanobacterium, Methanospirillum y Methanobrevibacter.

La fermentación metanogénica es un proceso complejo, el establecer un sistema de biometanización en equilibrio bajo un biodigestor requiere que el material a utilizar así lo permita, si bien conceptual y teóricamente toda biomasa es biodegradable y permite la producción de biogás. La complejidad del material debido a su composición determina como en este caso, la metodología adecuada para una biometanización completa.

Para el bagazo cervecero, la compatibilidad de mantener un sistema de biometanización en un solo contenedor o biodigestor se vuelve difícil de concebir y se requiere desarrollar un sistema de codigestión que permita una degradación de los material lignocelulósicos y más resistente en una primera etapa, ocurriendo de esta manera, la hidrólisis y acidogénesis en un contenedor o biodigestor, para luego dar paso a una segunda etapa en donde ocurran las etapas acetogénica y metanogénicas, para que estos procesos ocurran es fundamental la reinoculización con bacterias metanogénicas, corrección de pH y C/N.

Residuos

Caracterización fisicoquímica

Producto de la biometanización llevada a cabo, se determino, la composición fisicoquímica de los residuos de los distintos tratamientos, siendo expuestos los resultados de estos en la Cuadro 15.

Cuadro 15: Caracterización fisico-química para BA y EB

	BA	EB
Humedad	89,67 ± 0,58 %	90 ± 0,00 %
Sólidos Totales	10,33 %	10,00 %
Carbono Orgánico	42,67 ± 0,40 %	36,33 ± 0,12 %
Nitrógeno Total	0,4%	1,5%
C/N	106,33 ± 1,15 : 1	24 ± 0,00 : 1
pH	5,19 ± 0,04	7,83 ± 0,06
CE	15,9 ± 1,87 dS m ⁻¹	8,9 ± 0,50 dS m ⁻¹
Sólidos Volátiles	76,33 ± 0,58 %	58,67 ± 1,15 %

Tanto la humedad como la concentración de sólidos totales para BA, se mantuvo estadísticamente igual. Mientras que para EB demostró un aumento para su contenido de humedad y una disminución de sus sólidos totales. Respecto al valor de pH, para BA sufrió una disminución de ligeramente alcalino (7,73±0,21) a fuertemente ácido (5,19±0,04), lo cual manifiesta una acidificación del medio, lo cual se pudo deber a la biodigestión incompleta que sufrió el material, lo cual se apoya con la gran liberación de CO y la poca o nula producción de CH₄. Un valor de pH de estas características evidencia además lo complejo y sensible del proceso de biodigestión, en donde la realización adecuada de las etapas es fundamental para la producción de gas metano. En cuanto al tratamiento EB, este se mantuvo dentro del rango ligeramente alcalino, corroborando los resultados y como también la producción de gases obtenidos.

La conductividad eléctrica para ambos tratamientos demostró una leve variación no siendo relevante para el estudio.

Ulloa *et al.* (2011), estudió la cinética de generación de metano a partir de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos de una microcervecería. Analizó el efecto de las concentraciones de sólidos totales en contenidos iniciales de 3%, 6% y 10%. En donde determino que las concentraciones de sólidos totales inciden en el volumen total de metano generado, el que aumenta a mayores sólidos totales dada la mayor disponibilidad de sustrato y que a su vez disminuye la velocidad inicial de generación, obteniendo valores inferiores para altas concentraciones de sólidos totales, indicando inhibición de la reacción a altas concentraciones. Lo cual se condice con las concentraciones utilizadas en este estudio y con los resultados del proceso obtenido.

El contenido de Carbono para BA, disminuyo cerca de un 8,66%, mientras que para EB, su decaimiento fue mayor alcanzado un valor cercano de un 11,44%. Lo cual evidencia la mayor actividad microbiana presente en el tratamiento EB. Se determinó a su vez el contenido de nitrógeno y la relación C:N para cada tratamiento. En EB, estos valores se encontraron dentro de lo esperado, disminuyendo su relación C:N concentrando el nitrógeno en el residuo.

Para BA, la respuesta fue distinta, se determino una baja en la concentración de nitrógeno en el residuo por lo cual se procedió a analizar su composición tanto en nitrógeno total, amoniacal y nítrico, en donde los resultados se expresan en la Cuadro 16.

Cuadro 16: Contenidos de nitrógeno de BA

Tipo de Nitrógeno	Valor
N-Total	0,4 %
N-Amoniacal	815 ppm
N-Nítrico	56 ppm

Se observa una disminución del contenido de nitrógeno total en el residuo lo cual apoya la tesis de pérdida de este elemento en su forma de gas en la mezcla de biogás, además, el valor elevado de nitrógeno amoniacal puede generar una inhibición del proceso de biometanización, alterando el desarrollo de los distintos microorganismos presentes en el proceso de digestión anaeróbica, el aumento en la relación C/N, ratifica lo ya mencionado, en donde no existe una concentración de este elemento en el residuo

Fitotoxicidad

Al igual que con la materia prima, se analizó la fitotoxicidad que presentan los residuos de los tratamientos BA y EB, con el fin de considerar su utilización como residuos frescos en la agricultura. Los resultados se muestran en la Cuadro 17.

Cuadro 17: Análisis de Fitotoxicidad para BA

Trat.	PGR (%)	ER(%)	IG	Observaciones
A1	0,0	0,0	0,0	Toxicidad severa
A2	0,0	0,0	0,0	Toxicidad severa
A3	0,0	0,0	0,0	Toxicidad severa

Los valores obtenidos para BA, fueron los mismos que en su inicio, siendo de una toxicidad severa para su utilización directa en la agricultura. En donde si bien, el bagazo cervicero presentaba una dificultad en su utilización, no se logro una estabilización del residuo lo cual sería lo esperado después de un procesos de biometanización, debido a la fermentación incompleta que se desarrollo, la acidificación del medio y una posible liberación se sustancias inhibidoras, determinados por las altas concentraciones de nitrógeno amoniacal liberados al medio.

El tratamiento EB, (figura 13), demostró valores más bajos que el estiércol fresco, presentando una fitotoxicidad severa, aunque a diferencia del tratamiento BA, este si presento una baja germinación de las semillas y desarrollo radicular. Esta condición se puede deber a un proceso no del todo completo de fermentación anaeróbica y por ende un residuo no del todo estabilizado o terminado, permaneciendo en el medio sustancias inhibidoras como ácidos orgánicos.

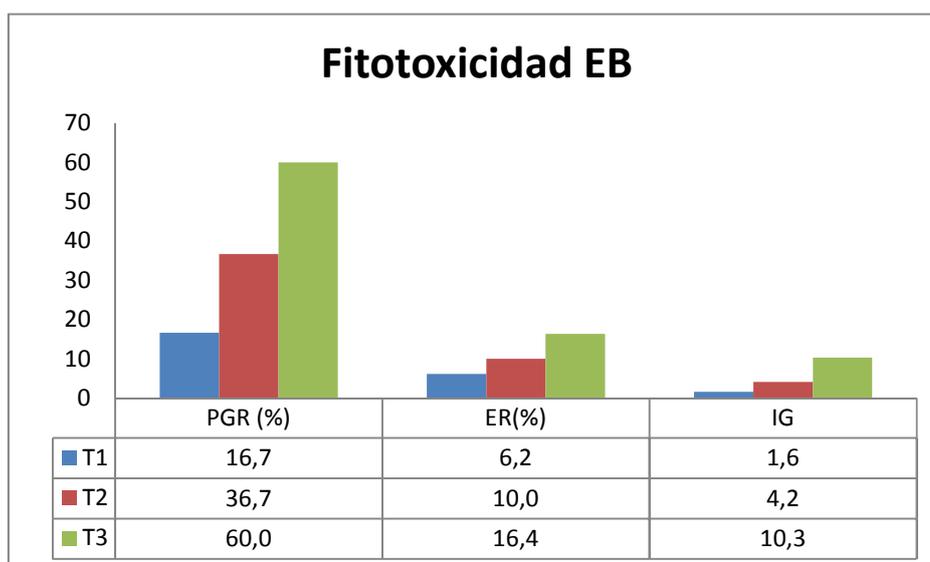


Figura 13: Fitotoxicidad para EB.

CONCLUSIONES

El bagazo cervecero, principal residuo de la industria cervecera, presenta un gran potencial para su utilización como materia prima en el desarrollo de energías alternativas, como la generación de biogás mediante un proceso de fermentación metanogénica. Si bien los resultados obtenidos en la biometanización no concluyen sobre el producto final, en cuanto a sus atributos en calidad y cantidad de los gases obtenidos, sí se logran determinar factores de corrección para el proceso que permitirían una fermentación completa para la producción de biogás.

Se concluye que el proceso se debe realizar mediante un proceso de codigestion, en biodigestores que dispongan sistemas separados para una primera etapa o inicial que considere el desarrollo de las fases hidrolítica y acidogénica, que permita la degradación del material lignocelulósico y la formación de ácidos orgánicos. Y luego una segunda etapa que desarrolle las fases acetogénica y metanogénica, para lo cual, es fundamental la inoculación de bacterias metanogénicas, la corrección de sólidos totales, pH y C/N

Estableciendo una fermentación anaeróbica con desarrollo de bacterias metanogénicas, será posible la medición y cuantificación del biogás producido, de igual manera, se espera la producción de un residuo de mejor calidad y con potenciales usos para la agricultura, producto de una fermentación anaeróbica completa.

BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, E. (ed). 2006. Agroenergía. Un Desafío para Chile. Universidad de Chile. Ciencias Agronómicas N°11. 176p.

Afshar M., Aghsaghali, Naser Maheri-Si. 2008. Nutritive value of some agro-industrial by-products for ruminants - A Review World Journal of Zoology 3 (2): 40-46.

Asociación de Productores de Cerveza de Chile A.G. (ACECHI). 2009. Índice estadístico 2008: El mercado Chileno.
Disponible en: http://www.acechi.cl/imagenes/nuestra_industria/indice_chile_2008.pdf
Consultado el 27 de Agosto de 2010.

Asociación Chilena de Energías Renovables A.G. (ACERA). 2011. Biomasa. Energías renovables para todos. 19p.

Asociación de Ingenieros Agrónomos del Noreste de Entre Ríos (AIANER).2010. Subproductos en la alimentación de rumiantes.
Disponible en: <http://www.aianer.com.ar/ganaderia/nota5.htm>
Consultado el 09 de Octubre de 2011

Biodisol. 2010. ¿Qué es el Biogás?, digestión anaerobia, características y usos del biogás. Disponible en: <http://www.biodisol.com/biocombustibles/biogas-que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas-energias-renovables-biocombustibles/>
Consultado el 10 de noviembre de 2010.

Carrillo L. 2003. Microbiología agrícola, Rumen y biogás. Disponible en: <http://www.unsa.edu.ar/matbib/micragri/micagricap5.pdf>
Consultado el 26 de Agosto de 2010

Cerveza Capital, 2011. Amber ale. Cebada. Disponible en: <http://www.cervezacapital.cl/>
Consultado el 05 de Diciembre de 2011.

Comisión Nacional de Energía (CNE). 2007b. Potencial de biogás, identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás. Santiago de Chile, 80p.

Comisión Nacional de Energía (CNE). 2007a. Guía para evaluación ambiental energías renovables no convencionales proyectos de biomasa. Santiago de Chile. 100p.

Compañía Cervecerías Unidas S.A. (CCU). 2011. Memoria Annual CCU 2010. 350p.

Food and Agriculture Organization (FAO). 2011. Manual de Biogás, Santiago, Chile, 118p.

Fukuda, M., Kanauchi, O., Araki, Y., Andoh, A., Mitsuyama, K., Takagi, K., Toyonaga, A., Sata, M., Fujiyama, Y., Fukuoka, M., Matsumoto, Y., Bamba, T., 2002. Prebiotic treatment of experimental colitis with germinated barley foodstuff: a comparison with probiotic or antibiotic treatment. *International Journal of Molecular Medicine* 9, 65–70 p.

Fundación española para el desarrollo de la nutrición animal (FEDNA). 2004. Cuadros FEDNA de composición y valor nutritivo de forrajes y subproductos fibrosos húmedos. Disponible en: http://www1.etsia.upm.es/fedna/Subp_humedos/bagazocerveya.htm Consultado el 26 de Agosto de 2010

Gestión. 2008. Cerveza Artesanal: La Batalla de David Contra Goliat. Disponible en: <http://www.gestion.cl/395/negEmer.php> Consultado el 05 de Diciembre de 2011.

Hilbert, J. 2000. Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural, INTA. Castellar, Argentina. 57 p.

INN, CHILE. 2004. Norma Chilena de compost 2880-2004 (NCh 2880-2004), - Clasificación y requisitos-.23 p.

Ishiwaki, N., Murayama, H., Awayama, H., Kanauchi, O., Sato, T., 2000. Development of high value uses of spent grain by fractionation technology. *MBAA Technical Quarterly* 37: 261–265 p.

Kanauchi, O., Mitsuyama, K., Araki, Y., 2001. Development of a functional germinated barley foodstuff from brewers' spent grain for the treatment of ulcerative colitis. *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 59, 59–62 p.

Malteria Argentina (MALTEAR). 2009. Cebada. Disponible en: <http://www.gestion.cl/395/negEmer.php>

Consultado el 05 de Diciembre de 2011.

Montes. 2008. Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás, Departamento de Ingeniería Civil: Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente E.T.S. I. De Caminos, Canales y Puertos, Chile. 294 p.

Mussatto S.I., Dragone G., I.C. Roberto, 2004. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications, *Journal of Cereal Science* 43 (2006) 1–14 p.

Mussatto S.I., Dragone G., Fernandes M., Rocha G., Roberto I. 2006. Efectos de los tratamientos de hidrólisis ácida e hidrólisis alcalina en la estructura del bagazo de malta para liberación de fibras de celulosa. *XXII IACChE (CIIQ)*. 10 p.

Prentice N., Refsguard J. (1978). Enzymatic hydrolysis of brewers' spent grain. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 36, 196–200 p.

Salazar, Trejo E., Vázquez C., López J. 2007. Producción de maíz bajo riego por cintilla, con aplicación de estiércol bovino. *Phyton. B. Aires*. v.76. 169-185 p.

Santos M., Jimenez J. Bartolome B. Gómez-Cordovés C., Nozal M. 2003. Variability of brewer's spent grain within a brewery. *Food Chemistry* 80. 17–21 p.

TMECC. 2004. Test methods for the Examination of Composting and Compost. U.S. Composting Council Research and education Foundation. Disponible en: <http://www.tmecc.org>.

Consultado el 05 de Mayo de 2012.

Townsley P. 1979. Preparation of commercial products from brewer's waste grain and trub. *MBAA Technical Quarterly* 16, 130–134 p.

Traub, A. 2008. El Biogás: alternativa energética emergente. *Inter Campo*, 108: 26-30 p.

Traub A. 2011. La agronergía en la encrucijada energética de la Agricultura. *Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA)*. 13p.

Ulloa C., Merino G., De Bruijn J., Gontupil J., 2011. Cinética de generación de biogás a partir de residuos orgánicos de una microcervecería. *Agro-Ciencia, Chilean J. Agric. & Anim. Sci.* 28(1) 5-20p.

Uzodinma E., Ofoefule A. 2008. Effect of abattoir cow liquor waste on biogas yield of some agro-industrial wastes. *Scientific Research and Essay Vol.3 (10)*, 473-476 p.

Varnero, M. y Arellano, J. 1990. Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico. Santiago, Chile, 98p.

Varnero M. 1992. Manual de reciclaje orgánico y biogás. Ministerio de Agricultura, Fondo de Investigación Agropecuaria. Santiago, Chile. 52p.

Varnero, M. 2005. V Taller de producción de compost. Aspectos técnico legales y desafíos. Santiago. Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 25p.

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. 2008. *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Germany. 450 p.