



ANÁLISIS CINÉTICO DE LA GENERACIÓN DE METANO EN BASE A DESECHOS ORGÁNICOS GENERADOS POR LA INDUSTRIA CERVECERA ARTESANAL

(KINETIC ANALYSIS OF METHANE PRODUCTION FROM CRAFT
BEER INDUSTRY)

J. E. Gontupil*, C. A. Ulloa* y G. G. Merino *

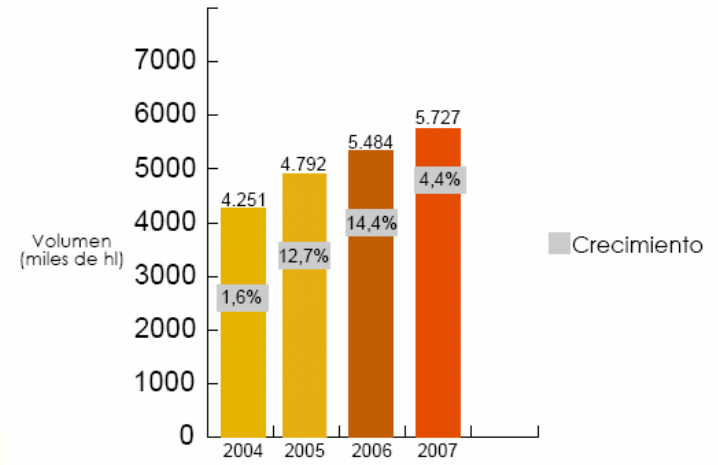
*Facultad de Ingeniería Agrícola, *Centro de Ciencias Ambientales EULA- Chile

Universidad de Concepción, Chile

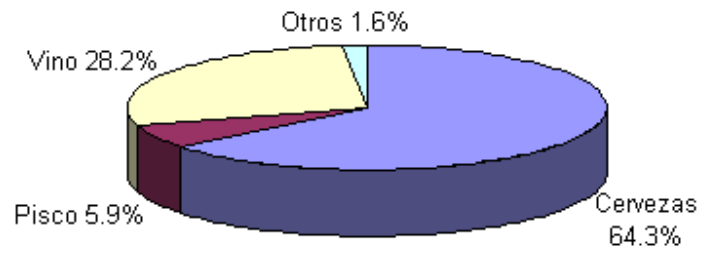


Introducción

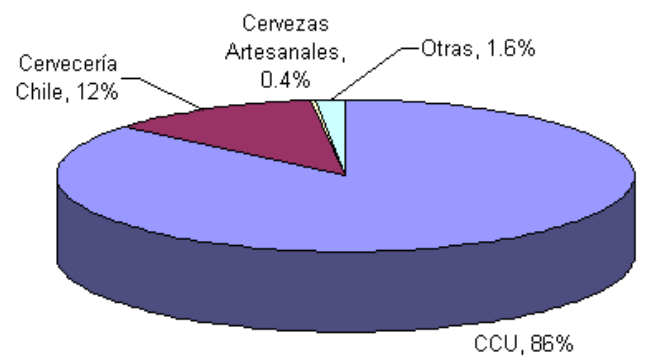
CHILE : ventas anuales y crecimiento



Mercado bebidas Alcohólicas Chile



Mercado Cervezas 2006





Introducción

Existen tres etapas en el proceso de elaboración en que se requiere energía térmica:

Secado de la cebada germinada



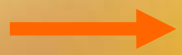
Maceración



Hervido



Gas (GLP)
Propano+Butano





Introducción

Requerimiento energético del proceso

PROCESO	EQUIPO	POTENCIA (kW)	ENERGÍA (Mcal)
LIMPIEZA	Ventilador centrífugo	0,18	0,20
REMOJO	Bomba centrífuga	1,48	0,15
GERMINACIÓN	Ventilador axial	0,12	3,73
SECADO	Ventilador centrífugo	0,18	3,73
	Calefactor (leña)		682,01
TRITURACION	Molino	0,37	1,07
CALENTAMIENTO	Quemadores		17,35
MACERACIÓN	Bomba centrífuga	1,48	0,32
	Quemadores		10,44
COCCIÓN	Quemadores		16,04
ENFRIADO	Bomba centrífuga	1,48	0,68
MADURACIÓN EN FRIO	Equipo de frío	1,49	46,41
TRANSPORTE	Bomba centrífuga	0,37	0,35
TOTAL			782 (44/100)



Introducción

Posterior al proceso de maceración y hervido se genera un residuo orgánico (mezcla de cebada triturada y agua), utilizado actualmente como fertilizante.

Composición elemental del sustrato

Parámetro	Porcentaje
Carbono (C)	47,57
Nitrógeno (N)	3,08
Fósforo (P)	0,28

Composición global del sustrato

Parámetro	Porcentaje
Agua	73,53
Sólidos Totales (ST)	26,47
Sólidos Volátiles (SV)	19,24
Ceniza	7,23





- Surge la alternativa lógica de llevar a cabo un proceso de aprovechamiento energético de los residuos que solucione simultáneamente dos problemas:
 - Requerimiento de energía del proceso
 - Disposición de residuos
- Esto puede ser llevado a cabo mediante digestión anaeróbica de los residuos orgánicos, obteniendo biogás como producto
- Esto en sí no es una novedad, los procesos de digestión anaeróbica a pequeña escala están bastante difundidos en el mundo (no así en Chile)
- Sin embargo, el diseño de los procesos de digestión anaeróbica a pequeña escala se basa normalmente en criterios empíricos sin considerar rigurosamente aspectos fundamentales del proceso:
 - dinámica de la población presente en el reactor, la cual se manifiesta a través de la cinética del proceso anaerobio.



Objetivos

Generación de biogas mediante digestión anaeróbica a partir de residuos orgánicos, disminuyendo la carga de contaminantes al medio ambiente e incrementando la eficiencia y autarquía energética del proceso de fabricación de cerveza artesanal

- **Desarrollar un modelo cinético que describa el proceso de generación de metano a partir de dichos residuos.**
 - **Determinar efecto de temperatura.**
 - **Determinar efecto de concentración de sólidos totales.**
- **Cuantificar la energía térmica que puede ser generada a partir de una digestión anaeróbica.**
 - **Cuantificar ahorro de fuentes de energía convencionales (gas licuado)**



Metodología experimental

Equipos

Se utilizaron dos digestores anaeróbicos tipo Batch (W8, Armfield Ltd., UK) de 5 litros. Cada reactor tiene tomas de muestreo y recolección de gas y control de temperatura mediante mantas calefactores de 200W.





Condiciones experimentales

- Ensayos isotérmicos @ 20, 30 y 40°C
 - ST: 3, 6, 10%
- Sustrato: Desechos orgánicos de cervecería artesanal
- Inóculo: líquido ruminal filtrado
- pH: 7 (solución tampón CaCO_3 y control mediante adición de NaOH 6N)





Seguimiento de variables

Generación de Biogás

El volumen de biogás generado fue medido usando un recipiente colector con calibración volumétrica que funciona por desplazamiento de agua. Este dispositivo de sellado líquido y carga constante asegura que la presión del gas en el reactor se mantenga constante durante todo el ensayo.





Separación de CH_4

Para remover el dióxido de carbono (CO_2) generado se utilizó una botella para lavado de gases con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) de 6N la que fue conectada entre el reactor y el colector de metano.





Variables medidas

Procedimiento experimental:

- **Se agregó NaOH a la mezcla mientras se agitaba manualmente y medía el pH, hasta lograr un pH igual a 7.**
- **Una vez alcanzado el pH 7 se agregó una solución tampón con 100 g de carbonato de calcio (CaCO_3) para fijar pH.**
- **Se extrajo una muestra de 20 ml desde cada reactor para determinar los sólidos volátiles al inicio y una muestra de 100 ml para determinar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) del sustrato.**



Análisis experimental

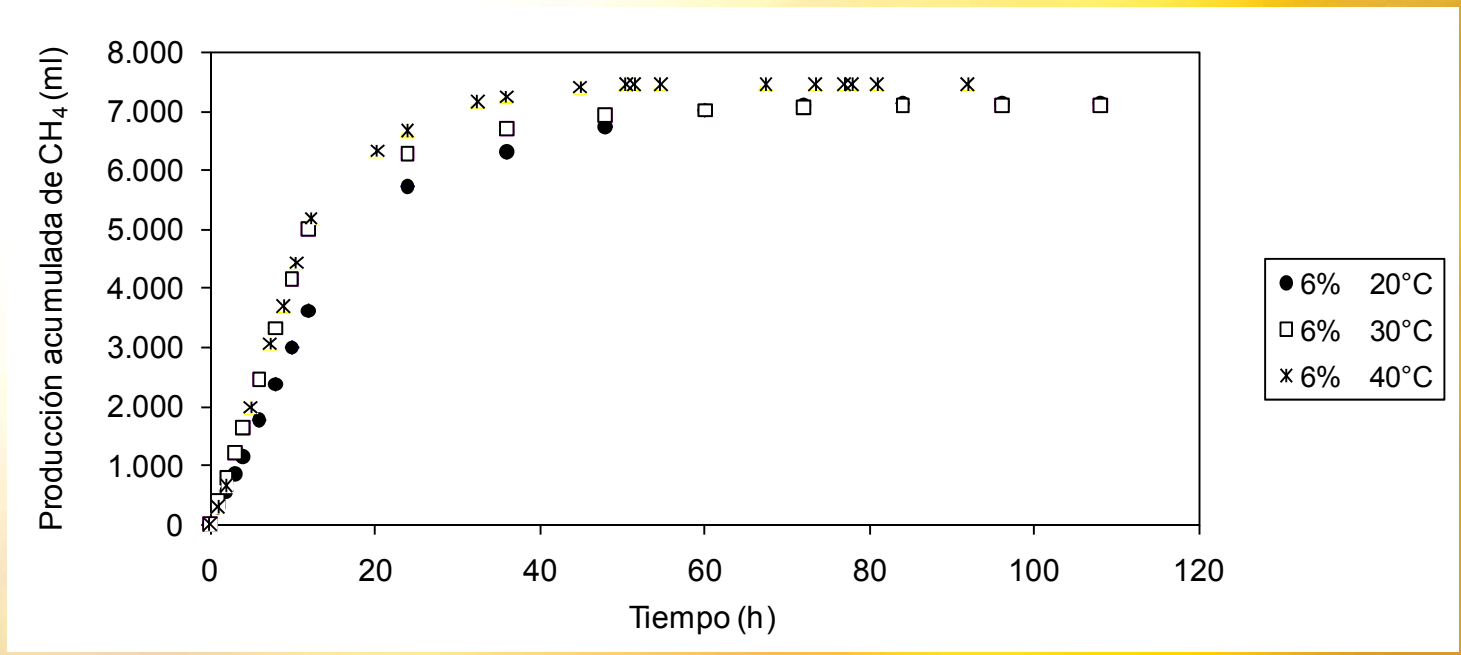
Procedimiento experimental:

- Cada día y a la misma hora se midió el pH y se extrajo una muestra de 20 ml desde cada reactor para determinar los sólidos volátiles.
- El volumen de metano (CH_4) generado fue registrado cada una hora durante las primeras ocho horas, luego se realizaron mediciones más espaciadas en el tiempo, entre dos y cuatro mediciones por día .
- Se midió la acumulación de metano como función del tiempo para una carga de 3, 6 y 10% de sólidos totales y temperaturas de digestión de 20, 30 y 40°C



Resultados

Efecto de la temperatura de digestión en la generación de metano

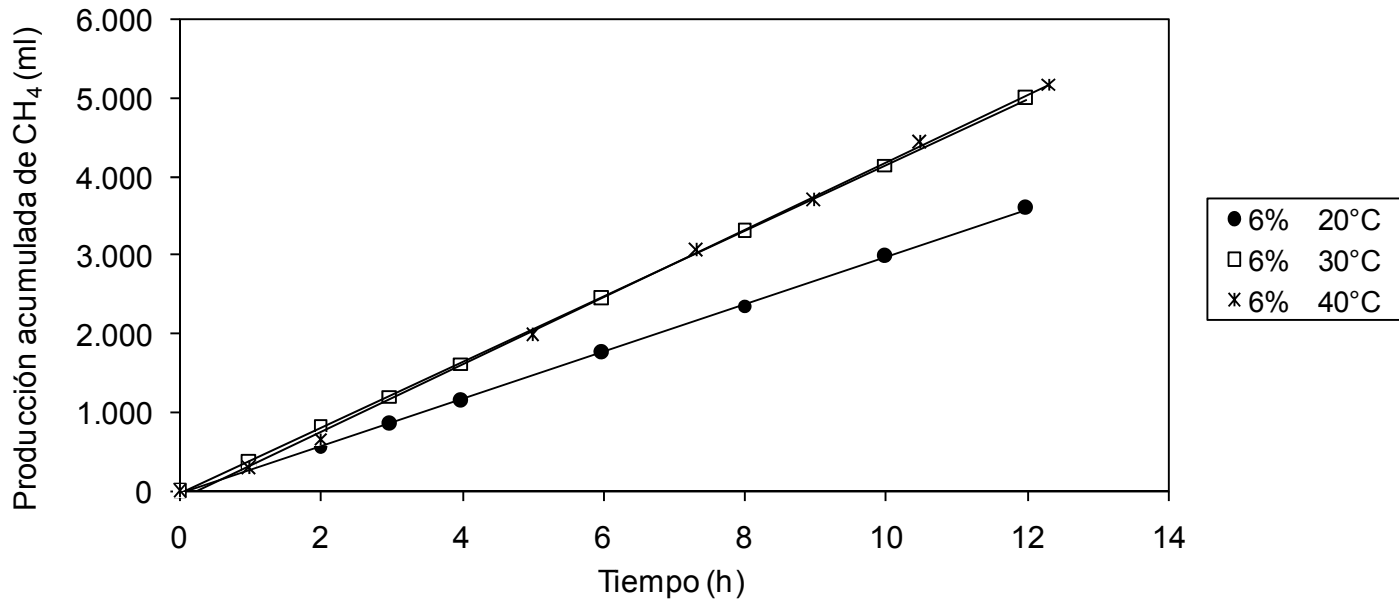


Volumen de gas acumulado generado por cada reactor en función del tiempo para una carga de 6% de sólidos totales y temperaturas de digestión de 20, 30y 40°C.



Resultados

Efecto de la temperatura de digestión en la generación de metano

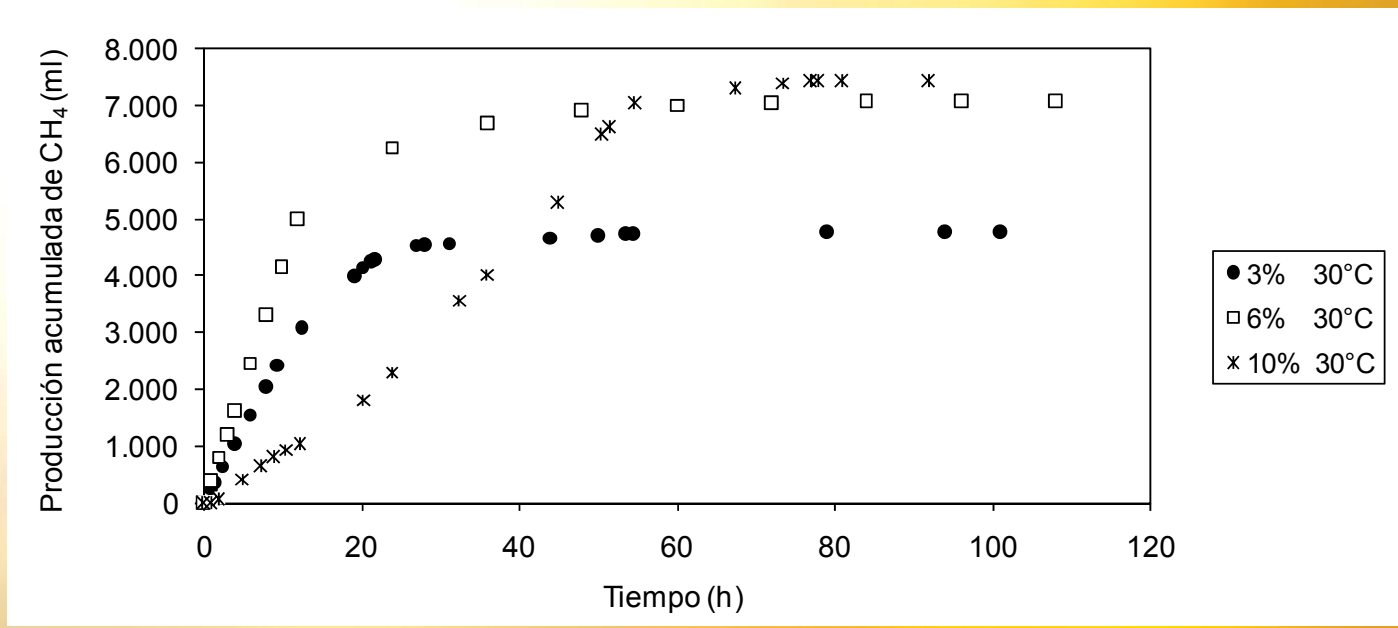


Volumen de gas acumulado generado por cada reactor en función del tiempo para una carga de 6% de sólidos totales y temperaturas de digestión de 20, 30y 40°C durante las primeras 12 horas.



Resultados

Efecto de la concentración de sólidos totales en la generación de metano.

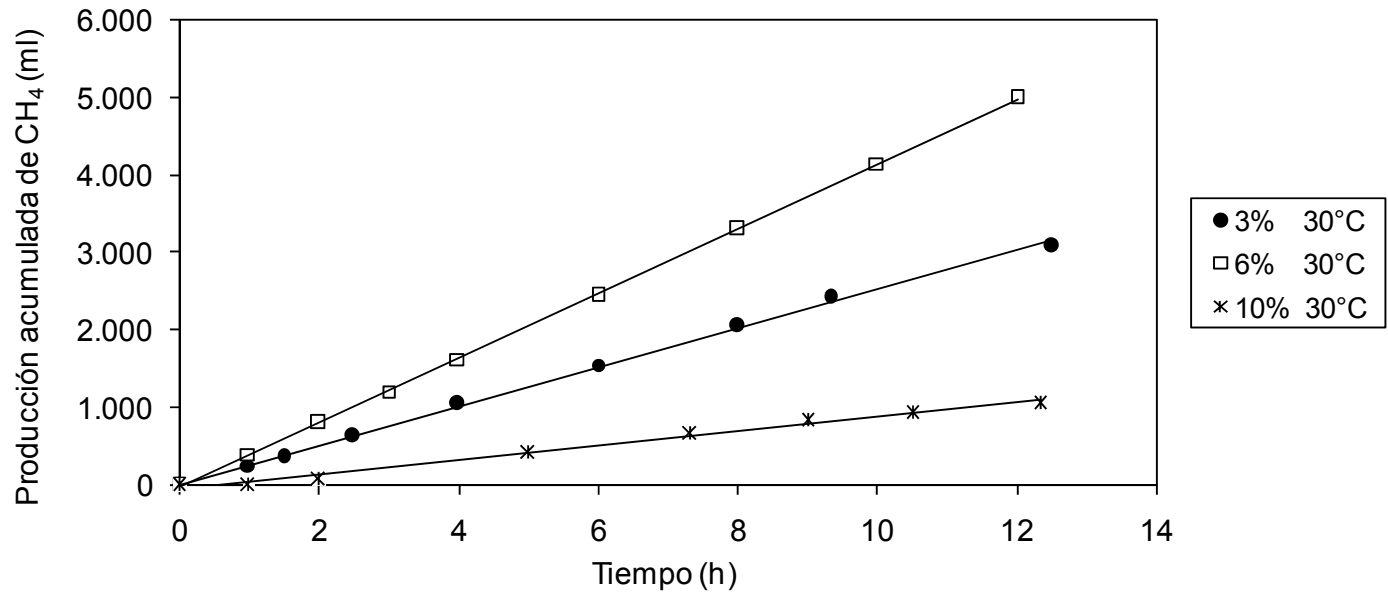


Volumen de gas acumulado generado por cada reactor en función del tiempo para una temperatura de 30°C y contenidos de 3, 6 y 10% de sólidos totales



Resultados

Efecto de la concentración de sólidos totales en la generación de metano.



Volumen de gas acumulado generado por cada reactor en función del tiempo para una temperatura de 30°C y contenidos de 3, 6 y 10% de sólidos totales durante las primeras doce horas.



Resultados

Modelo cinético de generación de metano

Dado que el modo de operación es batch, el análisis se basó en modelos que consideran que el factor limitante para la producción de biogás es la disponibilidad de sustrato (modelo de Monod).

La relación entre la producción de CH_4 y la concentración de sólidos volátiles biodegradables (S) en el proceso anaerobio viene dada por:

$$\frac{B_0 - B}{B_0} = \frac{S}{S_0}$$

Donde:

- S_0 es la concentración inicial de sustrato
- B_0 es el rendimiento total a metano (para θ infinito)
- B es el rendimiento de CH_4 para un valor de θ particular ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg}$ de SV añadido).



Resultados

Modelo cinético de generación de metano

Durante el proceso de **biometanización** una vez que se ha alcanzado la máxima producción de metano se cumple que:

$$-\frac{dS}{dt} = r_s \cdot S$$

Donde r_s es la constante cinética (s^{-1})

Combinando las ecuaciones anteriores, se obtiene que:

$$\ln\left(\frac{B_0 - B}{B_0}\right) = -r_s \cdot t$$



Resultados

Determinación gráfica de la constante cinética

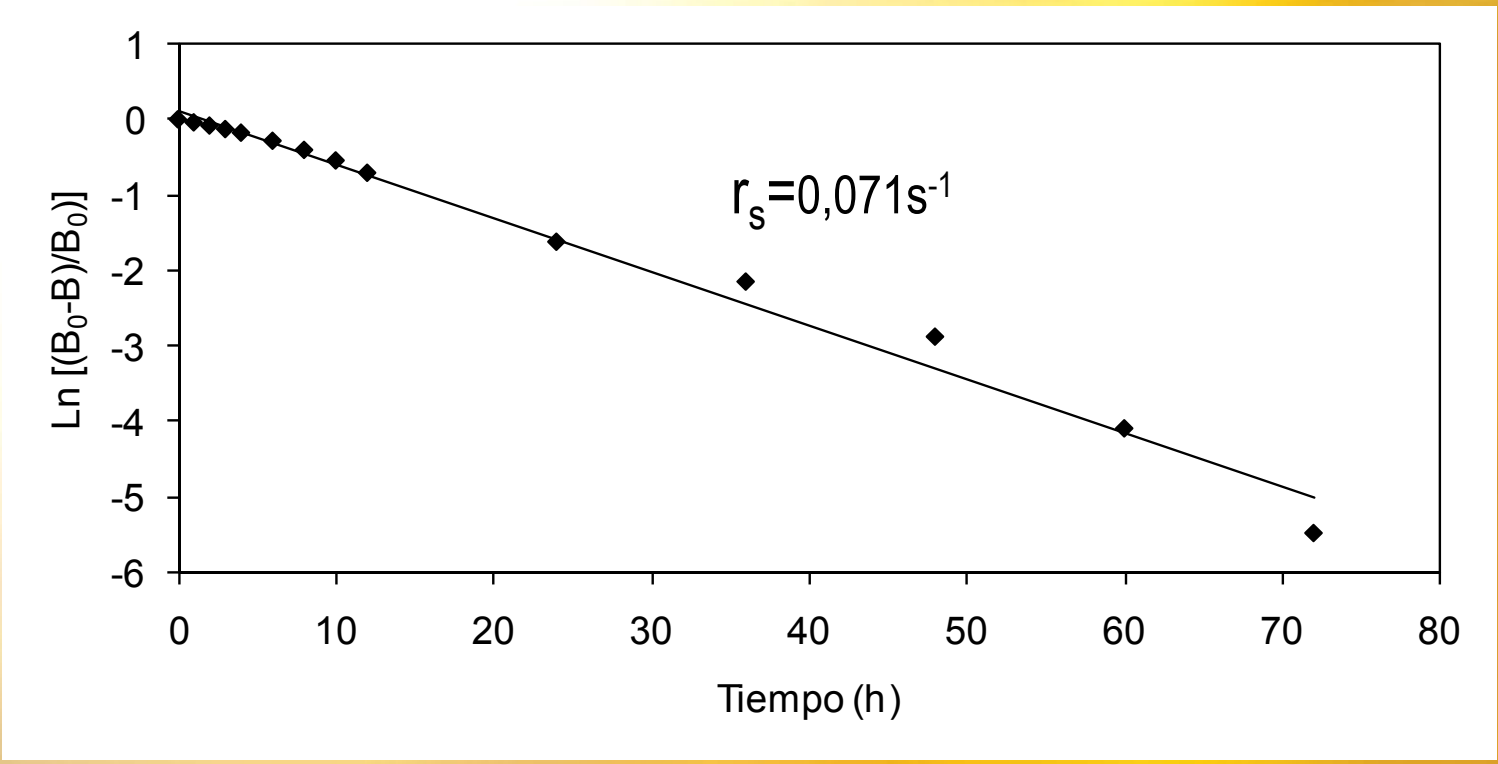


Gráfico de $\ln[(B_0-B)/B_0]$ en función del tiempo a una concentración de sólidos totales de 6% y una temperatura de digestión de 20°C



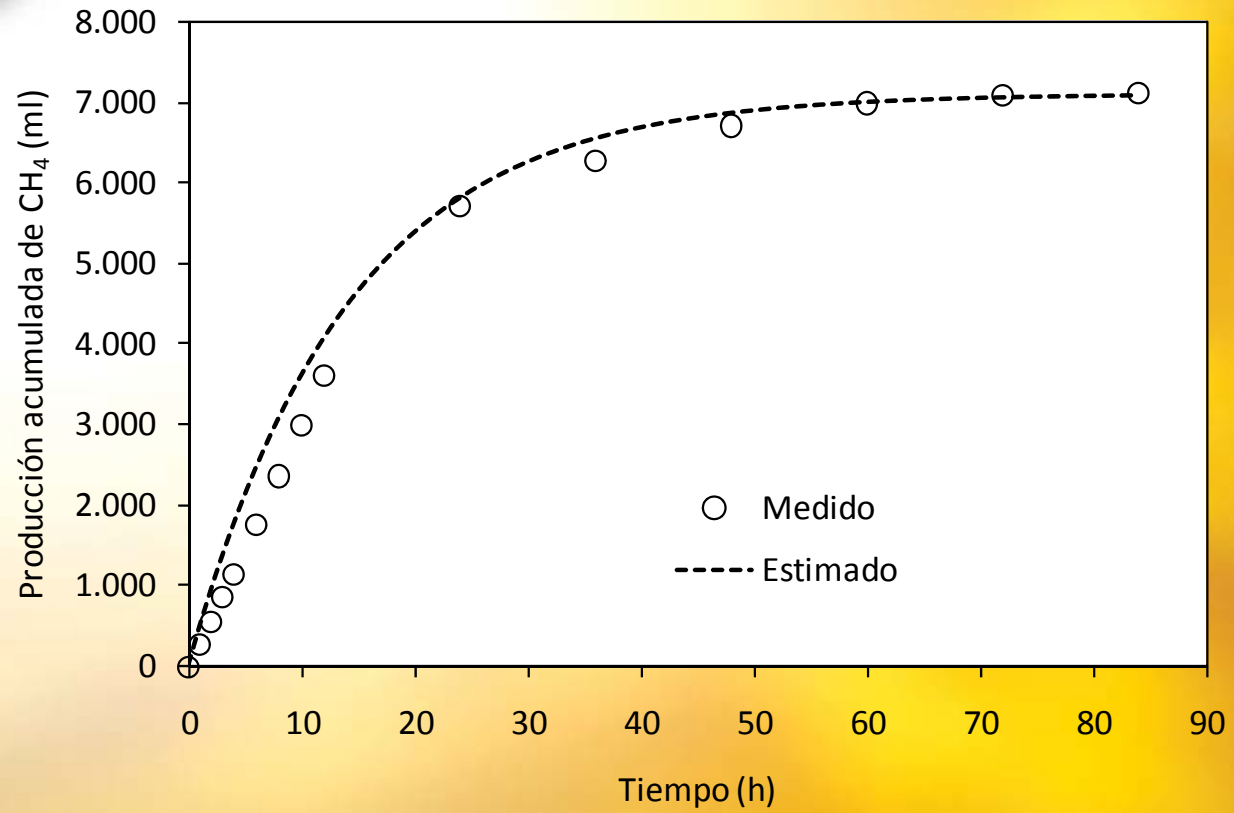
T (°C)	ST (%)	B ₀ (ml)	r _s (s ⁻¹)
20	6	7.109	0,071
30	6	7.080	0,072
40	6	7.464	0,105
30	3	4.789	0,081
30	10	7.449	0,137

•* Válido para tiempos de digestión menores a 45 horas



Resultados

Validación del modelo cinético



Variación de los valores experimentales (O) y teóricos (línea punteada) de volumen de gas acumulado generado por el reactor en función del tiempo para una concentración de sólidos totales de 6% y una temperatura de digestión de 20°C



Resultados

Aporte energético a partir de CH₄

- ✓ Volumen de cerveza elaborados por batch: 200L
- ✓ Residuos saturados de agua (26% de ST) generados por batch: 120kg
- ✓ Sustrato biodegradable = residuo+agua+inóculo ruminal
- ✓ 5L de sustrato al 6% de ST generan 7L de CH₄ a 1 atm
- ✓ 120kg de residuos generan 0,7m³ de CH₄ =5,88 Mcal
- ✓ El hervido de un batch de cerveza requiere 16 Mcal

→ **Puede contribuir con un 36,7% de la energía requerida para en hervido del mosto y en un 1% de todo el proceso.**



Conclusiones

- ✓ La temperatura de digestión no influye en la cantidad total de metano generado pero sí afecta la velocidad inicial de generación de metano la cual es mayor a medida que aumenta la temperatura de digestión.
- ✓ La concentración de sólidos totales afecta al volumen total de metano generado al final de cada experimento el que es mayor a medida que aumenta la concentración de sólidos totales en el reactor debido a la mayor disponibilidad de sustrato.
- ✓ La velocidad inicial de generación de metano presenta su valor más alto para una concentración del 6% y el más bajo para una carga del 10% de sólidos totales lo que indica un proceso de inhibición a altas concentraciones de sólidos totales



Conclusiones

- ✓ El tiempo requerido para lograr la generación máxima de metano a partir del material biodegradable está entre las 48 y 72 horas para todas las condiciones estudiadas.
- ✓ Se formuló un modelo cinético para describir la generación de metano en un sistema batch que considera la disponibilidad de sustrato como factor limitante para la generación de biogás.
- ✓ El modelo fue validado obteniéndose una desviación menor al 20% en un 73% de los casos lo que demuestra la validez del modelo matemático y sugiere que el modelo propuesto puede ser usado para predecir la generación de metano para los desechos de cervecería bajo las condiciones estudiadas.



Conclusiones

- ✓ En el proceso de elaboración de cerveza, el secado y la maduración en frío representan la mayor demanda energética, 87 y 6% respectivamente.
- ✓ El metano podría aportar con aproximadamente con un 37% de la energía utilizada para hervido del mosto.