

Evaluación de la producción de biogás de biomasa no convencionales

Cerutti, F.^(1,2), Córdoba, V.^{*(1)}, Santalla, E.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratorio de Bioenergía, Centro de Tecnologías Ambientales y Energía. INTELYMEC. Facultad de Ingeniería, UNICEN, Av. Del Valle 5737. B7400JWI Olavarría, Argentina

⁽²⁾ Becario de Entrenamiento CICPBA

*Autor para correspondencia: vcordoba@fio.unicen.edu.ar.

Resumen

Se evaluó la producción de biogás y de metano de tres biomasa lignocelulósicas como son sorgo silero (SS), sorgo biosilero (SB) y el residuo agotado (SA) de aserrín de álamo luego de la producción del hongo *Gymnopilus pampeanus*. La experiencia se realizó en bioreactores de tipo batch a escala laboratorio, en régimen mesofílico (35°C), utilizando como inóculo lodos de depuradora. Con la finalidad de evaluar la influencia de la cantidad de inóculo sobre la producción de metano se estudiaron relaciones sustrato/inóculo S/I (expresadas en unidades de sólidos volátiles) variables entre 0,5/1 y 16/1. La producción promedio de metano alcanzó $210,0 \pm 18,4$, $185,5 \pm 6,4$ y $116,4 \pm 9,9$ mL/g SV para SB, SS y SA respectivamente. La mayor capacidad de producción de metano se observó en SB para la menor relación S/I; en todos los ensayos se pudo observar que una mayor proporción de inóculo promovió mayor concentración de metano en el biogás aunque se detectaron diferencias relacionadas con la naturaleza del sustrato. La baja producción de metano obtenida en SA fue explicada tanto por su baja biodegradabilidad, verificada en una exigua remoción de materia orgánica (9,3% respecto al rango de 19-50% observado para los silajes de sorgo) como por la baja concentración de inóculo utilizada. El modelo de Gompertz ajustó adecuadamente los datos experimentales ($R^2 > 0,98$) y permitió obtener los parámetros cinéticos del proceso. Para los sustratos SS y SA no se detectaron influencias significativas de la relación S/I sobre los valores ajustados de los parámetros cinéticos; en SB la relación S/I influyó sobre el potencial de metano y en el tiempo de retardo obteniendo diferencias significativas entre los valores obtenidos lo que reveló que esta variedad presenta un potencial de metano promisorio para la producción de bioenergía.

Palabras claves: metano, sorgo silero, biomasa, digestión anaeróbica

Introducción

En la continua búsqueda de nuevos recursos energéticos que reduzcan el uso de los combustibles fósiles y los impactos desfavorables sobre el medio ambiente, las múltiples fuentes de residuos y efluentes orgánicos conjuntamente con las biomasa provenientes de cultivos energéticos celulósicos representan una oportunidad sustancial para los futuros sistemas de energía, especialmente en el marco de una política climática global que contribuya a estabilizar la concentración de CO₂ en niveles bajos¹. Argentina, por su característica de país agrícola ganadero, cuenta con una amplia variedad de climas y suelos que le permiten disponer de una superficie agrícola apta para el desarrollo de cultivos no convencionales que aporten biomasa para la producción de energía. La producción de metano a partir de la digestión anaeróbica (DA) de biomasa agrícolas ha sido implementada en varios países desarrollados aunque en Argentina la experiencia es aún incipiente. Ante el acentuado incremento de la población mundial y la demanda de alimentos, es posible imaginar una competencia entre la producción de biomasa para alimentación y para usos

industriales o para la producción de energía, pero el biogás tiene la ventaja de que puede producirse tanto a partir de cultivos no convencionales que pueden cultivarse en áreas marginales como de una gran variedad de residuos y efluentes industriales. Muchos de los cultivos se utilizan directamente en la DA para producir metano aunque existen factores como la cosecha retardada que se asocian a mayor contenido de celulosa lo que provoca biodegradaciones más lentas y menor producción de metano². El silaje, como un método de preservación de cultivos, ha demostrado mejorar la producción de metano en diversos cultivos como remolacha azucarera³, maíz y arroz⁴. El sorgo pertenece a la familia *Poaceae* de fotosíntesis C₄ y constituye a nivel mundial uno de los cinco cultivos más importantes junto con el maíz, arroz, trigo y cebada. En Argentina existe amplia experiencia en el desarrollo de cultivos sileros pero son muy pocos los estudios relacionados al uso de estos materiales como fuentes de biomasa para la producción de bioenergía. Durante los últimos años se ha producido el desarrollo agronómico de nuevas variedades de sorgos sileros con mayor producción de biomasa por hectárea y de rendimiento de forraje digestible. El INTA ha evaluado nuevas variedades de sorgos sileros como el INTA Pemán que además de sus características morfológicas de alto contenido de azúcar en tallo y jugosidad (18° Brix en quinto entrenudo) presenta como características tecnológicas un alto potencial de productividad de biomasa (60 a 180 t/ha de materia volátil) por lo que es recomendado para bioenergía^[1]. Los materiales ligno-celulósicos son reticentes a la conversión en biogás debido fundamentalmente a la cantidad de lignina presente. Si bien algunos pre-tratamientos químicos han demostrado reducir el contenido de lignina acelerando la etapa hidrólisis durante la DA^{5,6} en general se consideran poco atractivos dado los altos costos que implican y los impactos ambientales asociados⁷. Por el contrario, los pre-tratamientos biológicos han mostrado ventajas en relación a menor requerimiento de energía y ser ambientalmente más sustentables⁸ como es el caso de la acción favorable de determinadas enzimas sobre la biodegradabilidad de compuestos lignocelulósicos para mejorar la producción de biogás^{9,10,11}. Ciertos microorganismos tales como la podredumbre blanda de hongos pueden ser utilizados como tratamientos biológicos para atacar materiales a través de la acción de sus enzimas^{12,13}, entre ellos se encuentra el hongo del género *Gymnopilus pampeanus*, como una especie comestible que se lo ha comenzado a cultivar con fines de consumo humano¹⁴. En la producción de este hongo se utiliza con frecuencia aserrín de *Populus* y de *Eucalyptus*^{15,16}, materiales ambos ampliamente utilizados en Argentina en la industria maderera y para envases. Como resultado de la producción de hongos, se genera un residuo conocido como sustrato agotado, material de muy baja densidad que provoca un alto requerimiento de espacio y problemas para su disposición final.

La energía neta que se produce en un proceso anaeróbico es una tarea compleja que depende de una gran variedad de factores que afectan directamente la producción de metano¹⁷. Uno de los parámetros claves en la DA de sustratos sólidos es la relación entre la cantidades de sustrato (S) y de inóculo (I) aplicadas, expresadas en términos de la cantidad de sólidos volátiles (SV) agregados al reactor, siendo este parámetro uno de los más importantes del proceso ya que representa la fuente de materia orgánica disponible para la producción de metano¹⁸. La cantidad de inóculo añadido al proceso representa una fuente variada de organismos promotores de la acción metanogénica que influye no solamente

[1] Fuente: INTA. Evaluación de sorgos para silajes - Grupo Producción Ganadera - Área de Producción Animal. Ing. Agr. Marcelo De León / Ing. Agr. Rubén Giménez. <http://www.peman.com.ar/silero.html>

durante la puesta en marcha del proceso sino también sobre la velocidad de producción de metano y en el rendimiento final del proceso^{19,20,21}. El efecto del tipo y cantidad de inóculo sobre la producción de metano de diversos sustratos ha sido estudiado por varios autores. Se ha reportado que relaciones S/I entre 1:1 y 1:3 son favorables para la producción de metano aunque el valor óptimo depende fuertemente del tipo de sustrato²². Para el caso de sustratos recalcitrantes se han sugerido relaciones S/I entre 1:1 y 1:2^{23,24}. También se ha reportado la importancia de determinar la relación óptima para sustratos desconocidos con el objetivo de minimizar el requerimiento de inóculo activo durante la etapa de puesta en marcha de un digestor²¹.

El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento de dos biomásas lignocelulósicas como son el silaje de sorgo y el residuo agotado de la producción de hongos bajo digestión anaeróbica con la finalidad de evaluar su potencial de producción de metano, la influencia de la relación sustrato/inóculo y la cinética del proceso a partir de la determinación y el análisis de los parámetros cinéticos obtenidos al aplicar el modelo de Gompertz.

Materiales y métodos

Sustratos utilizados. Se utilizaron dos variedades de sorgo INTA-Pemán y el sustrato agotado de la producción de *Gymnopilus pampeanus* (SA). Los sorgos de tipo silero (SS) y biosilero (SB) fueron sembrados ambos ad-hoc con control de malezas, de insectos y fertilización. Para el ensilado de ambos cultivos se procedió a realizar el picado de planta entera con un tamaño de 20 mm aproximadamente seguido por inoculación con bacterias lácticas específicas. Los rendimientos en materia verde resultaron 50 y 70 t/ha con 28,19 y 25,37% de materia seca (MS) y una DIVMS (digestibilidad in vitro de materia seca) de 55,73 y 58,12% para silero y biosilero respectivamente. Estos sustratos se conservaron refrigerados a 5°C hasta el comienzo del ensayo. Como blanco se utilizaron muestras de ambos sorgos sin inocular. El SA corresponde a aserrín de *Populus sp* con ajuste previo de humedad (70%), esterilizado (autoclave, 2 h, 120 °C, 120 psi), inoculado al 5% p/p en flujo laminar con *G. pampeanus*, fermentado durante 75 días en condiciones controladas (25 °C, 60% humedad y oscuridad), acondicionado del sustrato colonizado para la producción (18-20 °C, 80-90% humedad y fotoperíodo de 9/15 luz/oscuridad). Una vez realizada la cosecha se obtuvo el sustrato agotado el cual fue almacenado a -20 °C antes de su uso¹⁴. Como blanco se utilizó sustrato sin fermentar ni colonizar (SSF).

Inóculo. Se utilizó lodo de depuradora de la planta de tratamiento de aguas residuales de Olavarría. Con el objetivo de asegurar la degradación de la materia orgánica fácilmente degradable que pudiera estar presente en el inóculo (I), se mantuvo el mismo en reactores batch en condiciones mesofílicas (35°C ±1) hasta su uso²⁸.

Diseño experimental. Se desarrolló un diseño experimental utilizando diferentes relaciones sustrato/inóculo (S/I). Se realizaron ensayos por duplicado incluyendo como blancos cada uno de los sustratos y el inóculo. Se utilizaron bioreactores batch de 1 L de capacidad en régimen mesofílico (35°C)²⁵. Con el fin de tener en cada bioreactor un contenido de sólidos totales inferior al 10%, tal que asegure la degradación de la materia orgánica bajo DA de tipo húmeda²⁶ se agregó a cada bioreactor la cantidad necesaria de agua destilada. El experimento fue monitoreado diariamente y se detuvo cuando la diferencia diaria de la producción acumulada de metano resultó inferior a 0,2%. La Tabla 1 describe las condiciones de cada ensayo.

Tabla 1. Diseño experimental

Biomasa	SS			SB				SA		SSF	I
S/I (g SV S/g SV I)	0,5/1	1/1	blanco	0,5/1	1/1	2/1	blanco	3/1	16/1	blanco	
Sustrato (g)	53,8	53,8	53,8	66,1	66,1	66,1	66,1	200	200	200	-
Inóculo (g)	801	400		801	400	200		300	50		300
Volumen de agua (mL)	22	71	120	9	58	83	107	300	300	300	-

Caracterización física y química de los sustratos y del inóculo. Los parámetros analizados fueron porcentaje de sólidos totales (ST), de sólidos volátiles (SV) y cenizas. Para el inóculo se determinó además la demanda química de oxígeno (DQO, mg/L), el contenido de nitrógeno total (NT, mg/L), pH y alcalinidad total (AT, mg/L), todos de acuerdo a los métodos APHA²⁷. Además se determinó %SV al inicio y al final de cada ensayo.

Análisis de biogás. El volumen de biogás se determinó por desplazamiento de agua²⁵. La calidad del biogás se evaluó según la concentración de metano a través de mediciones periódicas (al menos diariamente) utilizando un medidor portátil (Landgem GA2000) provisto de celdas infrarrojas para la medición de metano y dióxido de carbono (máximo error $\pm 0.5\%$) y celdas electroquímicas para la medición de oxígeno (máximo error $\pm 1.0\%$). La calibración de las celdas se realizó con una mezcla de gases certificados patrón (CH₄-CO₂, AGA Certificado N° 165342). La producción de metano de cada ensayo se refirió como producción neta del sustrato utilizado, para lo cual se restó la producción de metano producida por el inóculo²⁸.

Cinética de la producción de metano. Los modelos que representan la cinética de la producción de metano bajo DA proveen información útil para el diseño y operación del proceso^{29,30}. Los de cinética de primer orden resultan los más simples para estudiar la DA de sustratos complejos, ya que permiten comparar el desempeño del proceso estacionario en condiciones prácticas. La producción acumulada de metano durante una DA batch de sustratos con alto contenido de sólidos se puede describir a través de la ecuación de Gompertz^{31,32} (Ec. 1) la cual representa una regresión no lineal que ha sido utilizada en la simulación de la producción de metano e hidrógeno de lodos granulares^{29,33}, en la co-digestión de purín de cerdo y residuos alimenticios³⁴ y en la co-digestión de residuos orgánicos con cenizas³⁵, entre otros.

$$M(t) = P \exp[-\exp(R/P)(\lambda - t)e + 1]$$

Ec. 1

donde M es la producción acumulada de metano (mL/g SV) en el tiempo t (días); λ es el tiempo de retardo (días); P es la producción potencial máxima de metano (mL/g SV); R es la velocidad máxima de producción de metano (mL/g SV/d) y e es la constante matemática. Los datos experimentales de la producción acumulada de metano se ajustaron a la ecuación de Gompertz utilizando Statgraphics Centurion XVI (v.16.2.04).

Análisis estadístico. Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó t-Student a un nivel de confianza de 95.0 %. Los datos experimentales se expresaron como valores medios \pm el desvío estándar de los duplicados. Se aplicó el test ANOVA para determinar la diferencia significativa mínima de Fisher (LSD) para una tasa de error individual $\alpha=0.05$. Para la determinación de los parámetros estadísticos se utilizó Statgraphics Centurion XVI (v.16.2.04).

Resultados y discusión

Caracterización física y química de los sustratos y del inóculo. La Tabla 2 muestra los resultados de la caracterización de los sustratos y del inóculo. El menor porcentaje de ST observado en I indica una composición con mayor contenido en agua. La cantidad de SV es un parámetro importante para el análisis del proceso anaeróbico ya que representa la fuente de materia orgánica a partir de la cual el biogás es producido¹⁸; el sustrato SS supera en 4,8 y 12,6% el contenido de este parámetro respecto a SB y SA respectivamente.

Tabla 2. Caracterización física y química de los sustratos y del inóculo.

Parámetro	SS	SB	SA	I
ST (%)	28,43 ± 2,64 ^a	23,07 ± 1,04 ^b	15,06 ± 0,53 ^c	5,01 ± 0,07 ^d
SV (%)	26,02 ± 2,70 ^a	21,19 ± 1,37 ^b	13,40 ± 0,57 ^c	3,32 ± 0,11 ^d
Cenizas (%)	2,40 ± 0,46 ^a	1,88 ± 0,35 ^b	1,66 ± 0,10 ^b	1,69 ± 0,04 ^b
pH	7,87	7,13	-	7,92
AT (mg/L)	1044±22 ^a	843±33 ^b	-	6109 ± 90 ^c
NT (mg/L)	-	-	-	1825 ± 120
DQO (mg/L)	-	-	-	44750 ± 2616
Lignina (%)		5,78 ^a	11,28 ^b	

Los valores obtenidos son el promedio de duplicados ± desvío estándar. Valores con la misma letra, en una misma fila, indican que no tienen diferencias significativas ($p > 0.05$). Los porcentajes expresados son en base húmeda. ^a <http://www.peman.com.ar/silero.html> ^b Ref¹⁴

La mayoría de las bacterias anaeróbicas, incluyendo las metanogénicas, se desempeñan satisfactoriamente en un rango de pH de 6,8 a 7,2; valores de pH por debajo de 6 o superiores a 8 pueden resultar tóxicos para la formación de estas bacterias⁴⁰. Como puede observarse, el pH del SB está dentro de este rango óptimo, mientras que el del inóculo y el del SS son levemente superiores, aunque por debajo del valor restrictivo, por lo que no se consideró necesario realizó ningún acondicionamiento de la biomasa del reactor tendiente a regular este parámetro. Para mantener el pH estable durante el proceso, se requiere un alto grado de alcalinidad³⁶, valores mayores a 3000 mg/L aseguran la estabilidad del proceso^{23,37}. El valor de AT en el inóculo es indicador de una adecuada capacidad amortiguadora del sistema mientras que su contenido en NT revela una baja relación DQO/NT (123/5) comparada con el rango recomendado (entre 350/5 y 1000/5) para asegurar un crecimiento adecuado de los microorganismos³⁷.

Efecto de la relación S/I sobre el potencial metanogénico. La Figura 1 muestra la producción de metano y de biogás obtenida para cada uno de los sustratos estudiados con diferentes proporciones de inóculo. En SS la producción acumulada promedio de biogás disminuyó 13% al duplicar la cantidad de inóculo aunque la generación de metano no presentó diferencias significativas obteniendo 185±6 mL/g SV y 182±15 mL/g SV para S/I 1/1 y 0,5/1 respectivamente.

La producción de biogás para SB no mostró diferencias significativas entre las distintas relaciones S/I analizadas alcanzando un promedio de 345±21 mL/g SV. La mayor producción acumulada de metano para este sustrato se obtuvo para la relación S/I de 0,5/1 y resultó 210±18 mL/g SV, disminuyendo 9% y 25% la capacidad metanogénica al aumentar la relación S/I a 1 y a 2 respectivamente (diferencias estadísticamente no significativas). Un comportamiento similar fue observado en SA, donde la mayor producción de metano (116±10 mL/g SV) se observó para la relación S/I 3/1 disminuyendo 38% al aumentar la relación a 16

(diferencias significativas); para el mismo sustrato, la producción de biogás resultó 201 ± 2 mL/g SV para la relación 3/1 y disminuyó 27% al incrementar la relación S/I a 16/1 (diferencia significativa).

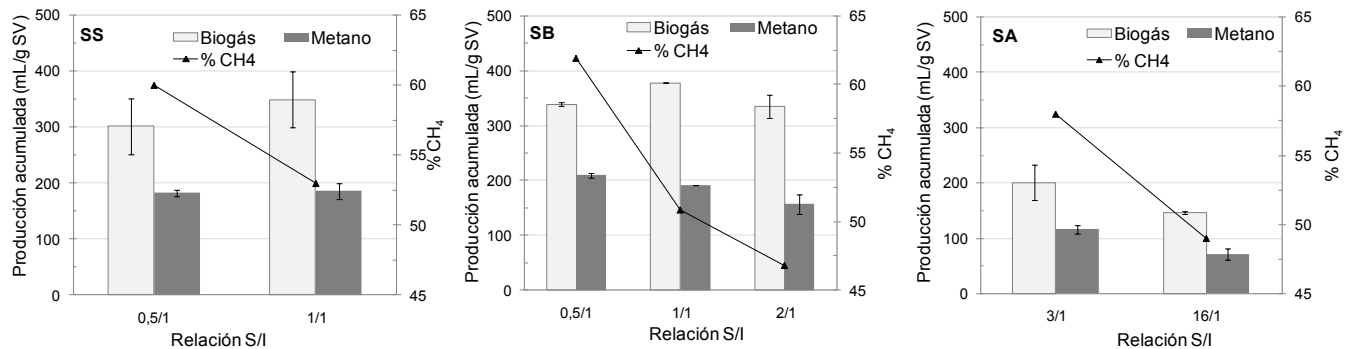


Figura 1. Variación de la producción acumulada de biogás y metano con la relación S/I

En todos los casos la utilización de mayor proporción de inóculo propició una mejor calidad de biogás en términos de contenido de metano, tal como se observa en la Figura 1. Varios autores^{38,39} afirman que existe una relación S/I óptima, de manera tal que no produzca la sobrecarga del proceso, pero que sea lo suficientemente alta como para inducir las enzimas necesarias para la biodegradación del sustrato y que favorezcan la producción de metano. De los resultados obtenidos se observa que el mismo inóculo puede tener un efecto específico diferente según las características del sustrato y que el potencial de metano no siempre está directamente ligado a la cantidad de inóculo utilizado.

La remoción de materia orgánica en términos de SV para las diferentes relaciones S/I ensayadas, se mantuvo en el rango de 19 a 38% para SS, entre 25 y 50% para SB, y sólo 5,5 (S/I 16) y 9,3% (S/I 3) para SA. La baja de remoción de materia orgánica mostrada por SA durante la DA reveló que la degradación biológica sufrida por el aserrín durante la producción del hongo no resultó suficiente para destruir su estructura lignocelulósica y facilitar el acceso a las bacterias metanogénicas, como demostraron Colavolpe y Albertó¹⁴ al reportar un remanente final de lignina luego de la acción fúngica de 11,28%.

Los resultados observados de producción de metano en función de la relación S/I para los sustratos estudiados mostraron similar tendencia a los reportados por otras biomásas diversas como tallos de algodón²¹, el residuo de la producción de vinagre⁴⁰, la vinaza⁴¹, residuos del desmote de algodón o del orujo de aceitunas⁴², tal como muestra la Figura 2. Como tendencia general se observa que a medida que la concentración de inóculo disminuye también lo hace la producción de metano; esta tendencia resulta más acentuada para relaciones S/I bajas, en donde al aumentar la relación S/I de 0,5 a 2, la producción de metano se reduce en un 25,2% para el SB comparable a las reducciones alcanzadas por los residuos de desmote de algodón (31,3%) y por el orujo de aceituna (41,6%). Cuando la relación supera el valor de 2, la incidencia de la cantidad de inóculo utilizada es menos significativa, tal como se ve en la producción de metano a partir de tallos de algodón y de residuos de la producción de vinagre donde al aumentar la relación de 2 a 6 la reducción fue del orden de 39,6% y 10,1% respectivamente, similar a la observada en el presente trabajo para SA, donde el incremento de la relación de 3 a 16 redujo la producción de metano 38%.

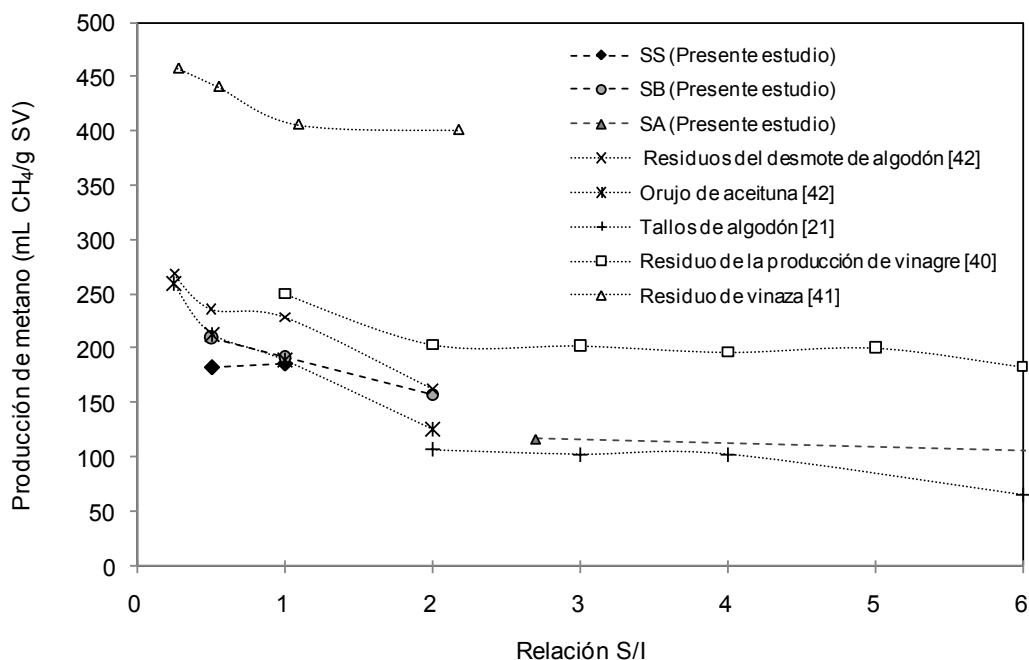


Figura 2. Variación de la producción de metano con la relación S/I para diversas biomosas.

Análisis cinético de producción de metano. Los datos experimentales de producción de metano fueron ajustados al modelo de Gompertz (Ec. 1). La Tabla 3 detalla los parámetros cinéticos obtenidos y sus estadísticos. Los datos experimentales ajustaron adecuadamente al modelo mostrando un coeficiente de determinación superior a 98%. La Figura 3 muestra los datos experimentales de producción acumulada de metano (rótulos) y los resultados del ajuste (líneas) del modelo de Gompertz para cada uno de los sustratos analizados.

Tabla 3. Parámetros cinéticos de la producción de metano de las tres biomosas estudiadas con diferente relación S/I y su ajuste a la ecuación de Gompertz.

Ensayo	Potencial de CH ₄ P		Dif. %	R mL CH ₄ /g SVd	λ d	R ²
	Experimental mL CH ₄ /g SV	Ajustado mL CH ₄ /g SV				
SS 0,5/1	182,5 ± 14,8 ^a	185,4 ± 23,3 ^a	1,6	7,4 ± 0,2 ^a	1,4 ± 1,9 ^a	99,46
SS 1/1	185,5 ± 6,4 ^a	188,3 ± 4,5 ^a	1,5	7,7 ± 0,3 ^a	1,1 ± 0,1 ^a	99,59
SB 0,5/1	210,0 ± 18,4 ^a	219,1 ± 8,2 ^c	4,3	7,7 ± 0,3 ^a	-0,3 ± 0,3 ^a	99,06
SB 1/1	192,0 ± 0,0 ^a	194,1 ± 0 ^b	1,1	7,7 ± 0,4 ^a	1,5 ± 0,3 ^b	99,57
SB 2/1	157,0 ± 4,2 ^a	157,8 ± 2,8 ^a	0,5	7,4 ± 0,2 ^a	3,5 ± 0,5 ^c	99,70
SA 3/1	116,4 ± 9,9 ^b	149,3 ± 12,3 ^a	28,3	1,7 ± 0,1 ^a	32,2 ± 2,6 ^a	98,36
SA 16/1	71,7 ± 7,3 ^a	98,3 ± 3,1 ^a	37,1	1,7 ± 0,0 ^a	58,0 ± 0,4 ^b	99,96

Los valores obtenidos son el promedio de duplicados ± desvío estándar. Para el mismo sustrato, valores con las mismas letras indican diferencias no significativas (p>0.05).

El potencial de metano experimental resultó en todos los casos inferior al valor predicho por el modelo aunque las diferencias fueron inferiores al 5% para ambos sorgos sileros. Para el caso del SA la mayor diferencia observada entre los valores medidos y los reportados por el modelo se explica en el hecho de que el tiempo total del ensayo se determinó con el criterio

de que cuando la diferencia diaria de la producción acumulada de metano fuera inferior a 0,2% se consideraba concluido, lo que pudo generar una subestimación del valor total acumulado. El sustrato SA presentó en ambos ensayos una velocidad máxima de producción de metano (R) significativamente inferior (entre 76 y 77%) a las obtenidas para SS y SB mientras que la fase de letargo (λ) resultó sensiblemente superior a los ensilados de sorgo, acentuada a mayor concentración de sustrato (Fig. 3).

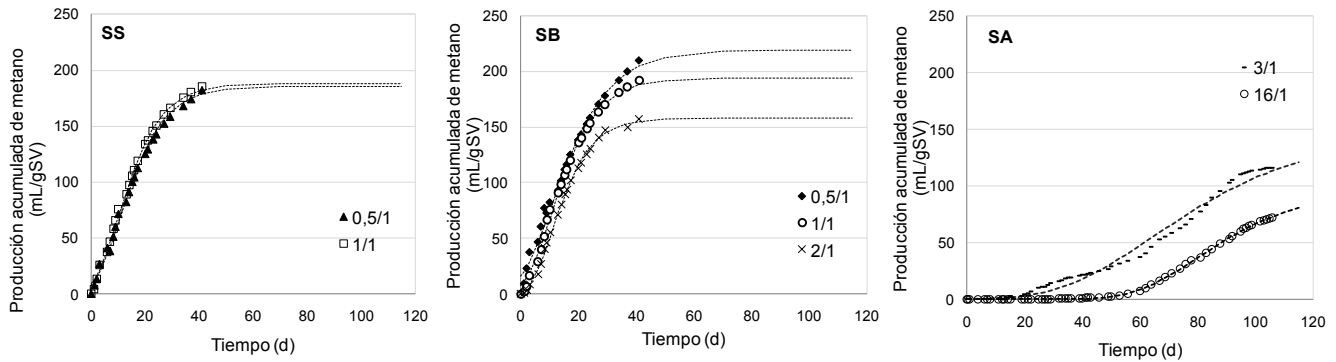


Figura 3. Ajuste del modelo de Gompertz a los datos experimentales de producción acumulada de metano de los tres sustratos estudiados.

Para los sustratos SS y SA no se detectaron influencias significativas de la relación S/I sobre los valores ajustados de los parámetros cinéticos obtenidos. En SB la relación S/I influyó sobre el potencial de metano y en el tiempo de retardo obteniendo diferencias significativas entre los valores obtenidos para cada S/I. Del análisis de estos parámetros se evidencia que la naturaleza del sustrato tiene un efecto significativo sobre la cinética de la producción de metano; mientras SA es una biomasa de baja biodegradabilidad con un contenido de lignina comparativamente alto para la cual el proceso de fermentación provocado por el metabolismo del hongo no resultó suficiente para degradar la estructura lignocelulósica, los sorgos ensilados mostraron aptitud para la producción de metano.

Conclusiones

Se estudió el comportamiento bajo digestión anaeróbica de tres sustratos de tipo lignocelulosicos (sorgo silero, sorgo biosilero y aserrín de álamo degradado biológicamente) evaluando la producción y calidad del biogás generado al utilizar diferentes concentraciones de inóculo. Los resultados mostraron que mayor concentración de inóculo mejora la calidad del biogás en términos de concentración de metano aunque se observaron diferencias relacionadas con la naturaleza del sustrato. Entre los sorgos ensilados, la variedad biosilero mostró mayor capacidad de producción de metano. El metabolismo del hongo no resultó suficiente como proceso de fermentación para degradar la estructura lignocelulósica de un sustrato de alto contenido de lignina como es el aserrín de álamo y habilitarlo para la acción posterior de las bacterias metanogénicas, lo cual se verificó en términos de una baja remoción de materia orgánica, baja productividad de metano y mayor fase de letargo. El modelo de Gompertz ajustó adecuadamente los datos experimentales de producción de metano y permitió obtener los parámetros cinéticos para las biomásas estudiadas con un ajuste superior a 98%.



Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires por la beca de entrenamiento otorgada a la alumna Florencia Cerutti como así también a la Cooperativa Eléctrica de Olavarría (Coopelctric), al Ing. Elbio Woeffray y al Dr. Edgardo Albertó (IIB-INTECH) por el suministro respectivo de lodos, sorgos y sustrato agotado de la producción de hongos, utilizados para el desarrollo del trabajo.

Referencias

1. Popp A., J. P., Dietrich, H., Lotze-Campen, D., Klein, N., Bauer, M., Krause, T., Beringer, D., Gerten, and O. E. The economic potential of bioenergy for climate change mitigation with special attention given to implications for the land system. *Environ. Res. Lett.* **6**, 34–44 (2011).
2. Braun, R., Weiland, P. & Wellinger, A. Biogas from energy crop digestion. *IEA Bioenergy Task* (2008).
3. Weissbach, F. Gas production potential of fresh and ensiled sugar beets in biogas production. *Landtechnik* **6**, 394–397 (2009).
4. Herrmann, C., Heiermann, M. & Idler, C. Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. *Bioresour. Technol.* **102**, 5153–5161 (2011).
5. Sambusiti, C., Ficara, E., Malpei, F., Steyer, J. P. & Carrère, H. Effect of sodium hydroxide pretreatment on physical, chemical characteristics and methane production of five varieties of sorghum. *Energy* **55**, 449–456 (2013).
6. Sambusiti, C., Ficara, E., Malpei, F., Steyer, J. P. & Carrère, H. Influence of alkaline pre-treatment conditions on structural features and methane production from ensiled sorghum forage. *Chem. Eng. J.* **211-212**, 488–492 (2012).
7. Costa, J. C., Barbosa, S. G., Alves, M. M. & Sousa, D. Z. Thermochemical pre- and biological co-treatments to improve hydrolysis and methane production from poultry litter. *Bioresour. Technol.* **111**, 141–147 (2012).
8. Sun, Y. & Cheng, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production : a review q. *Bioresour. Technol.* **83**, 1–11 (2002).
9. Bruni, E., Jensen, A. P. & Angelidaki, I. Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production. *Bioresour. Technol.* **101**, 8713–8717 (2010).
10. Fernandes, T. V., Klaasse Bos, G. J., Zeeman, G., Sanders, J. P. M. & van Lier, J. B. Effects of thermochemical pre-treatment on anaerobic biodegradability and hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.* **100**, 2575–2579 (2009).
11. Pakarinen, A. *et al.* Evaluation of preservation methods for improving biogas production and enzymatic conversion yields of annual crops. *Biotechnol. Biofuels* **4**, 20 (2011).
12. Zhong, W. *et al.* Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production. *Bioresour. Technol.* **102**, 11177–11182 (2011).
13. Colavolpe, B. *et al.* comestibles como co-digestor para obtener biogás. *AVERMA* **16**, 01–01 – 01–06 (2012).
14. Colavolpe, M. B. & Alberto, E. Cultivation requirements and substrate degradation of the edible mushroom *Gymnopilus pampeanus*-A novel species for mushroom cultivation. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. **180**, 161–166 (2014).
15. D.G. Pire, J.E. Wright, E. A. Cultivation of shiitake using sawdust from Widely available local woods in Argentina. *Micol. Apl. Int.* **13**, (2001).
16. Omarini, A., Lechner, B. E. & Albertó, E. *Polyporus tenuiculus*: A new naturally occurring mushroom that can be industrially cultivated on agricultural waste. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* **36**, 635–642 (2009).
17. Mateescu, C. & Constantinescu, I. Comparative analysis of inoculum biomass for biogas potential in the anaerobic digestion. *UPB Sci. Bull. Ser. B Chem. Mater. Sci.* **73**, 99–104 (2011).
18. Drosog, B. *Process monitoring in biogas plants*. (IEA Bioenergy, 2013).
19. Neves, L., Oliveira, R. & Alves, M. M. Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios. *Process Biochem.* **39**, 2019–2024 (2004).
20. M.F. Demirbas, M. B. Progress and Recent Trends in Biogas Processing. *Int. J. Green Energy* 117–142 (2009).
21. Cheng, X. & Zhong, C. Effects of Feed to Inoculum Ratio, Co-digestion, and Pretreatment on Biogas



- Production from Anaerobic Digestion of Cotton Stalk. *Energy & Fuels* **28**, 3157–3166 (2014).
22. Lesteur, M. *et al.* Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. *Process Biochem.* **45**, 431–440 (2010).
 23. Chynoweth, D. P., Turick, C. E., Owens, J. M., Jerger, D. E. & Peck, M. W. Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy* **5**, 95–111 (1993).
 24. Owens, J. M., Legrand, R. & Chynoweth, D. P. Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renew. Energy* 1–8 (2001).
 25. Córdoba, V., Fernández, M. & Santalla, E. The effect of different inoculums on anaerobic digestion of swine wastewater. *J. Environ. Chem. Eng.* **4**, 115–122 (2016).
 26. Pakarinen, A. *et al.* Evaluation of preservation methods for improving biogas production and enzymatic conversion yields of annual crops. *Biotechnol. Biofuels* **4**, 20 (2011).
 27. APHA. *APHA: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed.* Washington, DC. (American Public Health Association, 1999).
 28. Hansen, T. L. *et al.* Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Manag.* **24**, 393–400 (2004).
 29. Mu, Y., Wang, G. & Yu, H.-Q. Kinetic modeling of batch hydrogen production process by mixed anaerobic cultures. *Bioresour. Technol.* **97**, 1302–7 (2006).
 30. Angelidaki, I., Ellegaard, L. & Ahring, B. K. A Mathematical Model for Dynamic Simulation of Anaerobic Digestion of Complex Substrates: Focusing on Ammonia Inhibition. *Biotechnol. Bioeng.* **42**, 159–166 (1993).
 31. Lay, J., Li, Y., Noike, T., Endo, J. & Ishimoto, S. Analysis of environmental factors affecting methane production from high-solids organic waste. *Water Sci. Technol.* **36**, 493–500 (1997).
 32. Lay, J., Li, Y. & Noike, T. Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water Res.* **31**, 1518–1524 (1997).
 33. Lin, C. & Shei, S. Heavy metal effects on fermentative hydrogen production using natural mixed microflora. *Int. J. Hydrogen Energy* **33**, 587–593 (2008).
 34. Shin, J. *et al.* Predicting Methane Production Potential of Anaerobic Co-digestion of Swine Manure and Food Waste. *Environ. Eng. Resour.* **13**, 93–97 (2008).
 35. Lo, H. M. *et al.* Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors. *Bioresour. Technol.* **101**, 6329–6335 (2010).
 36. Gerardi, M. H. *The microbiology of anaerobic digesters.* (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003).
 37. Ghasimi, S. M. D., Idris, a, Chuah, T. G. & Tey, B. T. The Effect of C:N:P ratio, volatile fatty acids and Na⁺ levels on the performance of an anaerobic treatment of fresh leachate from municipal solid waste transfer station. *African J. Biotechnol.* **8**, 4572–4581 (2009).
 38. Elbeshbishy E1, Nakhla G, H. H. Biochemical methane potential (BMP) of food waste and primary sludge: influence of inoculum pre-incubation and inoculum source. No Title. *Bioresour Technol.* (2012). doi:10.1016/j.biortech.2012.01.025.
 39. Zhou, Y. *et al.* Influence of substrate-to-inoculum ratio on the batch anaerobic digestion of bean curd refuse-okara under mesophilic conditions. *Biomass and Bioenergy* **35**, 3251–3256 (2011).
 40. Feng, L. *et al.* Biochemical methane potential (BMP) of vinegar residue and the influence of feed to inoculum ratios on biogas production. *BioResources* **8**, 2487–2498 (2013).
 41. Eskicioglu, C. & Ghorbani, M. Effect of inoculum/substrate ratio on mesophilic anaerobic digestion of bioethanol plant whole stillage in batch mode. *Process Biochem.* **46**, 1682–1687 (2011).
 42. Pellerá, F. & Gidarakos, E. Effect of substrate to inoculum ratio and inoculum type on the biochemical methane potential of solid agroindustrial waste. *J. Environ. Chem. Eng.* (2016). doi:10.1016/j.jece.2016.05.026