

## Estudio y seguimiento del proceso de digestión anaeróbica en régimen batch de *Arundo donax L.*, incluyendo la evaluación del cambio de escala

Mussi, Jorgelina<sup>1,2</sup>, Manzur, Alejandra<sup>1</sup>, Grosso, Javier<sup>4</sup>, Lázaro, Laura<sup>4</sup> y Córdoba, Verónica<sup>1,2</sup>

1 Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, grupo de Investigación Tecnológica en Electricidad y Mecatrónica. Olavarría, CIFICEN (UNCIBA-CONICET-CICPBA), Buenos Aires, Argentina

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Olavarría, Buenos Aires, Argentina.

3 Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Agronomía. Azul, Buenos Aires, Argentina

4 Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Agronomía. Centro de Investigaciones Integradas sobre Sistemas Agronómicos Sustentables, Facultad de Agronomía. Azul, Buenos Aires, Argentina.

@ jmussi@fio.unicen.edu.ar

Recibido: 14/05/2025

Aceptado: 28/07/2025

**Resumen.** El aprovechamiento de cultivos energéticos perennes como *Arundo donax L.*, de alta productividad y bajo requerimiento de insumos, ha despertado interés como alternativa sostenible para la generación de bioenergía. En este marco, el tratamiento de biomasa a través de la digestión anaeróbica ha experimentado un incremento, impulsado por la evaluación de los principales beneficios asociados a esta tecnología como una estrategia eficaz de conversión de materia orgánica en energía, en forma de biogás. Este trabajo evaluó la digestión anaeróbica de *Arundo donax L.* en un reactor batch de 7 L de capacidad termocontrolado en condiciones mesofílicas utilizando lodo de planta depuradora como inóculo. El proceso se evaluó mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos del reactor y la producción de biometano. Simultáneamente, se llevó a cabo un ensayo estandarizado para determinar el Potencial de Biometano (PBM) de la biomasa. Los resultados indicaron un PBM de  $220.07 \pm 2.7$  mL CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup> (SV: sólidos volátiles), mientras que la producción específica de biometano en el reactor fue de 131,60 mL CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>, evidenciando una reducción del 40 % atribuible al cambio de escala. Esta discrepancia podría estar relacionada con factores como la eficiencia de mezcla, la transferencia de masa o la degradabilidad real de la biomasa en condiciones operativas. Los parámetros fisicoquímicos monitoreados mostraron la estabilidad del proceso, lo que indica que el sistema funcionó bajo condiciones controladas y sin signos de inestabilidad.

**Palabras clave:** potencial de Biometano; reactor escala banco; caña de Castilla.

**Abstract. Study and monitoring of the anaerobic digestion process in batch regime of *Arundo donax L.*, including scale-up evaluation.** The utilization of perennial energy crops such as *Arundo donax L.*, with high productivity and low input requirements, has attracted interest as a sustainable alternative for bioenergy generation. In this context, the treatment of biomass through anaerobic digestion has increased, driven by the assessment of the main benefits associated with this technology as an effective strategy for converting organic matter into energy in the form of biogas. This study evaluated the anaerobic digestion of *Arundo donax L.* in a temperature-controlled batch reactor with a working volume of 7 L, operated under mesophilic conditions and using sludge from a wastewater treatment plant as inoculum. The process was assessed by monitoring physicochemical parameters in the reactor and quantifying biomethane production. In parallel, a standardized assay was performed to determine the Biomethane Potential (BMP) of the biomass. The results showed a BMP of  $220.07 \pm 2.7$  mL CH<sub>4</sub> g VS<sup>-1</sup>, while the specific biomethane production in the batch reactor reached 131.60 mL CH<sub>4</sub> g VS<sup>-1</sup>, representing a 40% reduction attributable to process scaling. This discrepancy may be associated with factors such as mixing efficiency, mass transfer limitations, or the actual biodegradability of the biomass under operational conditions. The monitored physicochemical parameters confirmed the stability of the process, indicating that the system operated under controlled conditions without signs of inhibition.

**Key words:** biomethane Potential; lab-scale Reactor; giant Reed.

### INTRODUCCIÓN

La energía es un pilar fundamental para el desarrollo económico de cualquier país, siendo esencial para la industrialización, el transporte y las prácticas agrícolas. Sin embargo, el crecimiento acelerado del consumo energético, impulsado en gran medida por fuentes fósiles, ha provocado un marcado deterioro ambiental a nivel mundial (Ramírez Ramírez et al., 2025). Esta situación contribuye no solo a un

#### Cómo citar este trabajo:

Mussi, J., Manzur, A., Grosso, J., Lázaro, L. y Córdoba, V. (2025). Estudio y seguimiento del proceso de digestión anaeróbica en régimen batch de *Arundo donax L.*, incluyendo la evaluación del cambio de escala. *Semiárida*, 35(Supl.), 51-63.

incremento en la liberación de CO<sub>2</sub> (Belmonte et al., 2023), sino que también intensifica diversas problemáticas ambientales, como el cambio climático y la degradación del medio ambiente, derivada de sistemas productivos no sostenibles (Enrique y Monroy, 2024).

Ante este panorama, las energías renovables emergen como una alternativa más sostenible y limpia. En particular, los biocombustibles ofrecen una vía eficaz para mitigar los efectos adversos del modelo energético actual, favoreciendo la transición hacia modelos de desarrollo más sostenibles. La bioenergía adquiere un rol clave en la mitigación del calentamiento global y la diversificación de la matriz energética (Craggs y Gilbert, 2017). La digestión anaeróbica (DA) se ha consolidado como una tecnología clave, capaz de transformar residuos orgánicos y biomassas específicas en biogás.

Este gas, rico en metano, puede ser usado para generar energía térmica y/o eléctrica. La DA contribuye al desarrollo sostenible al permitir la valorización de residuos mediante la obtención simultánea de un biocombustible (biogás) y un biofertilizante (Velásquez-Piñas et al., 2023). Esto reduce la dependencia de los combustibles fósiles, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero y mejora la seguridad energética (Labatut et al., 2018).

En Argentina, la producción de electricidad a partir de bioenergía ha estado vinculada a sistemas agropecuarios intensivos que gestionan parte de sus desechos mediante DA (feedlot, tambos, criaderos de cerdos o pollos). Estas plantas suelen incorporar sustratos adicionales tales como silajes de maíz o sorgo, para asegurar una producción continua de metano que permita cumplir con la potencia eléctrica contratada (Jankowski et al., 2020). Dicha biomasa presenta una elevada productividad por hectárea, facilidad de ensilado, y elevado potencial de producción de biogás. Sin embargo, su utilización implica diversos desafíos, entre los que se encuentran los altos costos asociados, el deterioro de la calidad del suelo por el uso de monocultivos, modificando su estructura física y la competencia por el uso de la tierra destinada a la producción de alimentos para uso humano y/o animal (Uhaldegaray et al., 2024).

En los últimos años se ha intensificado la búsqueda de nuevas fuentes de biomasa capaces de reemplazar a las actualmente utilizadas. Los cultivos lignocelulósicos presentan un gran potencial para la producción de bioenergía, por su elevada disponibilidad, su baja competitividad con los alimentos y su diversidad (Mussatto & Dragone, 2016; Saini et al., 2015).

En este escenario, *Arundo donax* L. (*A. donax*) también conocido como “caña de Castilla”, surge como una alternativa atractiva frente a los cultivos convencionales. Su alta productividad, rusticidad y adaptabilidad a diferentes condiciones edafoclimáticas, junto con su bajo requerimiento de insumos, la posicionan como una opción sostenible para diversificar el abastecimiento de biomasa destinada a la producción de biogás (Schievano et al., 2012; Testa et al., 2016). Los estudios agronómicos iniciales desarrollados en el sudeste de la región Pampeana (Argentina) demostraron un desempeño favorable en la producción de biomasa, alcanzando rendimientos de 17,39 t de materia seca por hectárea en el segundo año de corte, sin irrigación o fertilización (Rodríguez et al., 2024). A nivel energético, además se ha demostrado que presenta un balance positivo (Pereyra Müller et al., 2022; Santalla et al., 2024). Si bien estudios previos de DA a escala laboratorio han aportado información valiosa sobre su composición y potencial metanogénico (Córdoba et al., 2023; Špelić et al., 2024), existe aún escasa evidencia sobre su desempeño en condiciones más cercanas a la operación real. En este contexto, el objetivo general de este trabajo es analizar la evolución del proceso de DA de *A. donax* a escala banco en condiciones mesofílicas, monitoreando su evolución y su productividad de metano en un reactor de 7 l de capacidad. Para ello se evaluará sus parámetros fisicoquímicos a lo largo del tiempo y se determinará el potencial de biometano en un ensayo estandarizado, a fin de comparar ambos procesos y determinar posibles limitaciones relacionadas con el cambio de escala.

## METODOLOGÍA

### Biomasa e inóculo

Se estudió el aprovechamiento de *A. donax* (Figura 1), una gramínea perenne cultivada en ensayos agronómicos realizados en la Chacra Experimental de la Facultad de Agronomía de Azul (UNICEN), ubicada en la provincia de Buenos Aires ( $36^{\circ}49'41,4''$  S;  $59^{\circ}53'11,6''$  O; 147 msnm). El cultivo fue implantado en octubre de 2019, en cuatro bloques experimentales, según se describe en Rodríguez et al. (2024). Las muestras utilizadas corresponden al primer corte del tercer ciclo anual del cultivo, realizado el 15 de diciembre de 2021, 80 días después de la brotación y una vez alcanzada la madurez fisiológica del mismo. El corte de las cañas fue realizado al ras del suelo y se acondicionaron mediante el picado y ensilado. El ensilado se realizó utilizando material fresco de *A. donax*, empacado en microsilos de aproximadamente 2 kg (Figura 1). Cada microsilo fue compactado hasta alcanzar una densidad de  $617 \text{ kg m}^{-3}$  dentro de bolsas plásticas de  $240 \mu\text{m}$  de espesor y cerrados herméticamente para evitar el ingreso de oxígeno y reproducir condiciones de silaje a campo. No se utilizó ningún tipo de inóculo para el proceso de ensilado. Los silos se caracterizaron y analizaron transcurridos 83 días desde el inicio del proceso, las muestras fueron secadas a  $60^{\circ}\text{C}$  y se picaron y homogeneizaron, obteniéndose un tamaño de partícula entre los tamices normalizados ASTM N° 14 (1410 micrones) y N° 20 (840 micrones).

Como inóculo se utilizaron lodos provenientes de la planta depuradora de líquidos cloacales ubicada en la ciudad de Olavarría - Provincia de Buenos Aires. Los lodos fueron desgasificados y adaptados al sustrato, aplicando la metodología propuesta por Steinmetz et al. (2016).

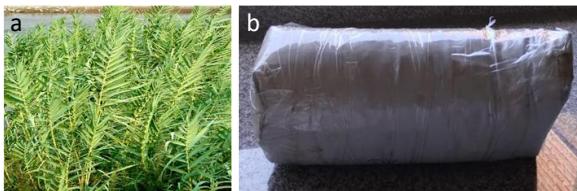


Figura 1. (a) Plantas de *A. donax* previo a su picado y confección de silos (b) Microsilo de *A. donax*.

Figure 1. (a) *A. donax* plants prior to chopping and silo preparation. (b) *A. donax* microsilo.

### Caracterización fisicoquímica de las muestras

Las muestras de *A. donax* y del inóculo acondicionado, se caracterizaron fisicoquímicamente. Se determinaron el contenido de humedad y sólidos totales (ST) mediante el método ASTM D-4442-16 (ASTM, 1999); los sólidos volátiles (SV) y contenido de cenizas según el método ASTM D 1102-84; y alcalinidad según el método sugerido por Jenkins et al. (1983). En este último método, la muestra líquida se centrifugó (3500 rpm) y se tituló en dos etapas, primero hasta alcanzar un pH de 5,75 y luego hasta 4,3. A partir de estos puntos de titulación, se definieron tres parámetros: alcalinidad total (AT) correspondiente al punto de pH 4,3; alcalinidad parcial (AP), asociada a la alcalinidad al bicarbonato y medida al punto de pH 5,75; y alcalinidad intermedia (AI), asociada a la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) y determinada como diferencia entre AT y AP. El contenido de nitrógeno amoniacoal (NA) se determinó mediante los métodos 4500  $\text{NH}_4^+$  B y C (APHA, 1999). La composición estructural de las muestras de *A. donax* se determinó en términos de  $\alpha$ -celulosa y hemicelulosa conforme a la norma TAPPI T 203 (TAPPI, 1999), y en contenido de lignina según la norma ASTM 1106 (ASTM, 1999), tras la extracción previa de compuestos solubles orgánicos y en agua caliente.

### Determinación del Potencial de producción de biometano

Para evaluar el PBM de las muestras de *A. donax*, se aplicó la metodología propuesta por Holliger et al., (2016), utilizando kitazatos de 500 ml de capacidad como biorreactores batch, por triplicado. La relación Inóculo/Sustrato (I/S) en términos de SV fue 1/1 y la concentración de inóculo en el reactor fue de 20 g SV  $1^{-1}$ , dejando un espacio libre en el reactor del 20 %. Para alcanzar un volumen total de muestra de 400 ml en el reactor, se adicionó solución de nutrientes

según Aquino et al. (2007). Los reactores se colocaron en un baño termostático para mantener condiciones de operación mesofláticas ( $35^{\circ}\text{C} \pm 1$ ).

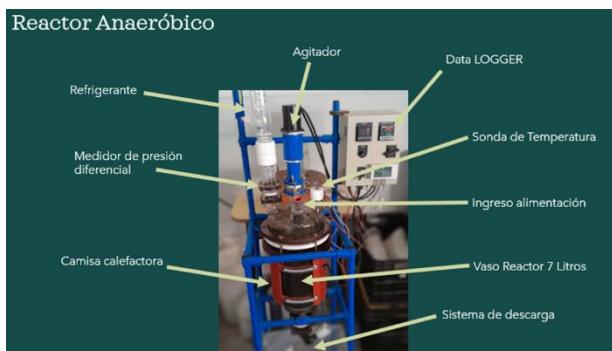
Para medir la producción de  $\text{CH}_4$  en los reactores batch se utilizó un sistema de desplazamiento de agua, acoplado a un sistema de absorción de  $\text{CO}_2$  por burbujeo de biogás en una solución de NaOH 6 N (Córdoba et al., 2022). El volumen de agua desplazada correspondiente al metano producido se registró diariamente mediante lectura directa utilizando probetas graduadas. El volumen de  $\text{CH}_4$  producido por cada reactor se corrigió a condiciones normales de presión y temperatura de acuerdo con Holliger et al. (2016). Para validar la actividad y calidad del inóculo, se condujo en paralelo un ensayo blanco de inóculo y un control positivo (CP), que utilizó celulosa microcristalina (CAS 9004-34-6) como sustrato. El ensayo concluyó cuando la producción diaria de  $\text{CH}_4$  resultó inferior al 1 % de la producción acumulada durante tres días consecutivos.

La técnica establece los siguientes criterios de aceptación del ensayo, una desviación estándar relativa inferior al 5 % para el blanco y el CP, e inferior al 10 % para cada sustrato. Asimismo, el PBM del CP debe situarse entre 352 y 414 Nml  $\text{CH}_4$  g SV<sup>-1</sup> celulosa.

El inóculo presentó un contenido en SV (b.s.) de  $0,4285 \pm 0,049$  g/g, pH 8,28, AT de  $5422,21 \pm 266,53$  mg  $\text{CaCO}_3$  l<sup>-1</sup> y NA de  $410 \pm 4,9$  mg l<sup>-1</sup>, cumpliendo con los rangos establecidos por Holliger et al. (2016) para asegurar una calidad adecuada del inóculo.

#### **Ensayo anaeróbico a escala banco**

El ensayo anaeróbico a escala banco se realizó en un reactor anaeróbico de 7 l de capacidad, construido en vidrio borosilicato y equipado con un sistema de agitación mecánica de paletas a 200 rpm y control de temperatura mediante camisa calefactora ( $35 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) (Figura 2). Este reactor fue conectado a un sistema de medición de  $\text{CH}_4$  por desplazamiento de agua de 1000ml de capacidad, cuyas características se describen en la sección: Determinación del Potencial de producción de biometano. El inóculo utilizado y las condiciones del ensayo son las mismas que las utilizadas en la determinación del PBM, esto es, un volumen de espacio libre del 20 %, una concentración de inóculo en el reactor de 20 g SV l<sup>-1</sup> y una relación I/S de 1/1, relación que permite observar la evolución del proceso anaeróbico identificando posibles causas de inhibición en caso de existir.



**Figura 2.** Reactor utilizado en el ensayo a escala banco.

**Figure 2.** Reactor used in the bench-scale experiment.

La evolución del proceso anaeróbico fue monitoreada mediante la extracción de muestras de digestato dos veces por semana. Estas muestras fueron analizadas para determinar su composición fisicoquímica, considerando los siguientes parámetros pH, ST, SV, AT, AI, AP y NA. El reactor utilizado en esta prueba contiene un volumen significativamente mayor que el utilizado en la prueba del PBM, lo que permite llevar a cabo el muestreo para medir los indicadores del proceso a lo largo del tiempo, con un impacto mínimo en el desempeño del proceso de DA.

### Cinética del Proceso de Digestión Anaeróbica

A partir del monitoreo diario de la producción de CH<sub>4</sub> del ensayo a escala banco y del ensayo de PBM, se estudió la cinética del proceso anaeróbico de *A. donax*. Se utilizó el modelo cinético de Primer Orden, el cual estima una constante de velocidad de producción de metano o tasa de desintegración de primer orden, k (d<sup>-1</sup>) y el rendimiento máximo teórico de metano (L<sub>0</sub>, Nml CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>), según (Ec 1).

$$L(t) = L_0 (1 - e^{-kt}) \quad \text{Ec 1}$$

Donde L(t) es la producción acumulada de metano (Nml CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>) al tiempo t (h).

Este modelo se basó en considerar que la disponibilidad de sustrato es el factor limitante y supone que la hidrólisis gobierna el proceso general (Li et al., 2015). El ajuste de datos cinéticos se realizó utilizando el software Statgraphics Centurion XVI (v.18.1.12) del cual se obtuvieron los valores de k y L<sub>0</sub> y el coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>), además de la raíz del error cuadrático medio (RMSE), según Ec 2 que mide la diferencia promedio entre los valores reales y los calculados con el modelo estadístico, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{N-P}} \quad \text{Ec 2}$$

Donde: y<sub>i</sub> es el valor real para la i-ésima observación;  $\hat{y}_i$  es el valor previsto para la i-ésima observación; N es el número de observaciones y P es el número de estimaciones de parámetros, incluida la constante.

## RESULTADOS

### Características fisicoquímicas de *A. donax*

Las características fisicoquímicas de las muestras de *A. donax* ensilado utilizadas para los ensayos de DA se describen en la Tabla 1. La biomasa ensilada mostró un contenido promedio de SV del 93,7 % ( $\pm 0,40$ , b.s.) y una composición estructura con 9,7 % ( $\pm 1,4$ ) de lignina 36,7 % ( $\pm 3,6$ ) de celulosa y 18,7 % ( $\pm 0,7$ ) de hemicelulosa. El pH de la muestra de *A. donax* ensilada fue de 5,31  $\pm 0,02$ , mientras que la concentración de NA alcanzó  $0,447 \pm 0,547$  mg g<sup>-1</sup> (Tabla 1).

Parámetro	Promedio $\pm$ desvió
ST (% b.h.*)	16,23 $\pm$ 0,51
SV (% b.s.*)	93,9 $\pm$ 0,40
pH	5,31 $\pm$ 0,02
AT (mg CaCO <sub>3</sub> /l)	199,7 $\pm$ 21,2
NA (mg NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /g)	0,447 $\pm$ 0,547
$\alpha$ - celulosa (% b.s.*)	36,7 $\pm$ 3,6
Hemicelulosa (% b.s.*)	18,7 $\pm$ 0,7
Lignina (% b.s.*)	9,7 $\pm$ 1,4

\* b.s.: base seca; b.h.: base húmeda.

Tabla 1. Tabla 1: Características fisicoquímicas de *A. donax* ensilado.

Tabla 1 Physicochemical characteristics of ensiled *A. donax*.

### Potencial de Biometano

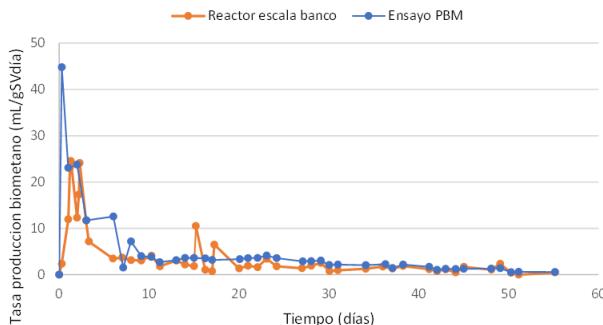
La producción de CH<sub>4</sub> en el proceso de DA está estrechamente vinculada tanto a la cantidad de materia orgánica alimentada al reactor como a la composición y estructura de la biomasa (Sawatdeeanurat et al., 2015). El ensayo de fermentación anaeróbico utilizado para determinar el PBM de *A. donax*, tuvo una duración de 55 días. A través de este ensayo se obtuvo un PBM promedio de  $220,07 \pm 6,00$  Nml CH<sub>4</sub>/g SV. Paralelamente, se determinaron los valores de metano producido por el ensayo blanco ( $27,37 \pm 3,77$  Nml CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>) y el CP ( $358,96 \pm 11,48$  Nml CH<sub>4</sub> g

SV<sup>-1</sup>). Los coeficientes de variación del blanco (0,14 %) y del control positivo (3,2 %) se mantuvieron por debajo del 5 %, condiciones establecidas por Holliger et al., (2016), para validar el ensayo, lo cual confirma la fiabilidad de los resultados.

### **Ensayo a escala banco**

El ensayo a escala banco se llevó a cabo en un reactor batch con una capacidad total de 7 l y un volumen útil de 5,6 l en condiciones mesofílicas utilizando una relación I/S de 1/1 en términos de SV. La producción de biometano de este ensayo alcanzó un valor de 131,60 Nml CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup> al cabo de 55 días, resultado 40 % inferior al PBM de *A. donax* (220,07 Nml CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>) obtenido experimentalmente bajo condiciones estandarizadas.

Tanto en el ensayo de PBM como en el ensayo a escala banco, la producción de biometano comenzó de forma inmediata desde el primer día de digestión. No obstante, las tasas de producción de biometano (expresadas en Nml CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>.día) muestraron comportamientos marcadamente distintos (Fig. 3). En el ensayo de PBM la velocidad de producción alcanzó su máximo el primer día (45 Nml CH<sub>4</sub> g SV<sup>-1</sup>.día), seguido de una disminución rápida y sostenida durante los días sucesivos. En cambio, en el ensayo a escala banco, la velocidad aumentó de manera más gradual y se mantuvo elevada durante los primeros 2 a 3 días, con varios picos, antes de iniciar un descenso progresivo. Este comportamiento pudo estar relacionado con las diferencias en las condiciones operativas de cada ensayo incluyendo agitación, homogeneidad en la temperatura, eficiencia de transferencia, variables que influyen directamente en la cinética del proceso (van der Berg et al 2024).



**Figura 3.** Tasa de producción de biometano para la determinación del PBM y el ensayo escala banco.

**Figure 3.** Biomethane production rate for BMP determination and bench-scale assay.

### **Evolución de los parámetros fisicoquímicos del reactor escala banco**

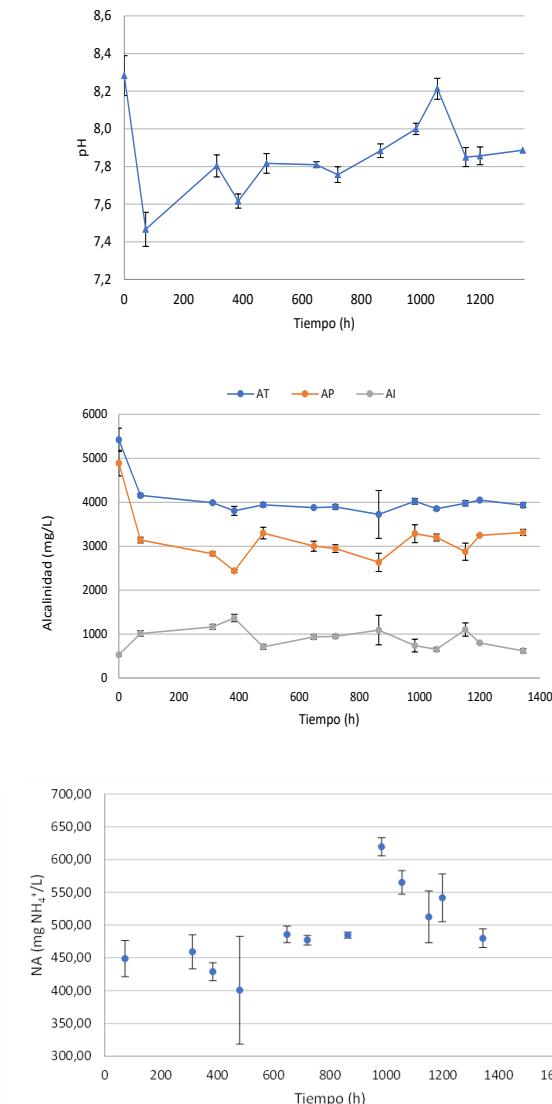
La evolución del pH y la AT, AI y AP del reactor se presentan en la Figura 4a y 4b, respectivamente. Se observó una disminución del pH durante las primeras 72 horas de proceso, posteriormente se recuperó gradualmente y se estabilizó en torno a 7,90 al final de la digestión. De esta manera se mantuvo en un rango de oscilación óptimo (entre 7,467 - 8,283) para asegurar un proceso estable en el digestor (Holliger et al., 2016).

En la Figura 4b se muestra la evolución de la AI, AP y AT. Durante las primeras 72 horas se observó una primera etapa de disminución del 23,3 % de la AT, probablemente asociada a la rápida formación de AGV a partir de compuestos fácilmente degradables presentes en el sustrato, lo cual se reflejó en el aumento del 91,5 % en AI durante dicho período. Este comportamiento continuó hasta las 384 h de proceso, momento a partir del cual, los valores de AT y AP comenzaron a estabilizarse. Esta dinámica se evidenció también en la disminución de la concentración de la AI, que se estabilizó posteriormente en torno a los 1000 mg l<sup>-1</sup> a partir de las 600 hs. Por su parte, la AT se estabilizó alrededor de los 4000 mg l<sup>-1</sup> durante el resto del proceso, nivel suficiente para asegurar una digestión estable y evitar problemas de inhibición. Las bajas concentraciones de los

AGV durante todo el ciclo digestivo pudo ser el resultado de un comportamiento refractario de los componentes lignocelulósicos.

La evolución del contenido de NA ( $449,01 \text{ mg NH}_4^+ \text{ l}^{-1}$  -  $479,94 \text{ mg NH}_4^+ \text{ l}^{-1}$ ) evidenció una tendencia creciente, cuyo máximo de  $619,64 \text{ mg NH}_4^+ \text{ l}^{-1}$ , no superó los valores límites de  $1500 \text{ mg l}^{-1}$  que suelen ser considerados como tóxicos en el proceso digestivo (Figura 5).

En el reactor a escala banco, el valor inicial de SV fue  $0,43 \text{ gSV g}^{-1}$  (b.s) y al finalizar el ensayo fue de  $0,41 \text{ gSV g}^{-1}$  (b.s), lo que representó una disminución de un 4,6 % en el contenido de materia orgánica.



**Figura 4.** a. Cambios en el pH durante el ensayo en el reactor. b. Variación de la alcalinidad intermedia (AI), parcial (PA) y total (AT) durante el ensayo en biorreactor a escala banco (7l).

**Figure 4.** a. Changes in pH during the reactor assay. b. Variation of intermediate (IA), partial (PA), and total alkalinity (TA) during the bench-scale bioreactor (7l) assay.

**Figura 5.** Variación de nitrógeno amoniacal en el reactor escala banco.

**Figure 5.** Variation of ammoniacal nitrogen in the bench-scale reactor.

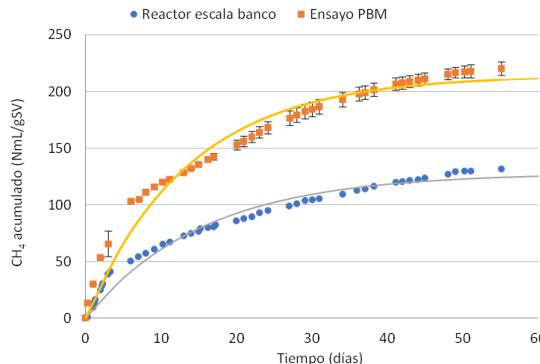
### Cinética de la Digestión Anaeróbica de *A. donax*

En la Tabla 2 se muestran los parámetros cinéticos obtenidos al modelar los datos experimentales del ensayo escala banco y el ensayo del PBM según la Ec. (1). El modelo aplicado se basó en considerar que la disponibilidad de sustrato es el factor limitante y supone que la hidrólisis gobierna el proceso general. En la Figura 6 se muestra la producción de metano acumulado para ambos ensayos.

	Ensayo PBM	Ensayo Escala banco
$L_0$ (NmL CH <sub>4</sub> /g SV)	214,2±16,4	128,0±11,1
% dif exp-L <sub>0</sub>	2,67	2,73
k (d <sup>-1</sup> )	0,073±0,017	0,064±0,015
R <sup>2</sup>	96,7	97,3
R <sup>2</sup> adj	97,6	97,2
RMSE	10,8	6,4

**Tabla 2.** Parámetros cinéticos del modelo de primer orden aplicado para la producción de metano en el ensayo de PBM y el de Escala banco.

**Table 2.** Kinetic parameters of the first-order model applied to methane production in the BMP and bench-scale assays.



**Figura 6.** Producción de metano acumulado en función del tiempo para ensayo PBM y reactor escala banco.

**Figure 6.** Cumulative methane production as a function of time for the BMP and bench-scale reactor assays.

El coeficiente de correlación ( $R^2$  y  $R^2\text{adj}$ ) observado para todas las muestras resultó superior al 95 % lo que indica que el modelo propuesto resultó adecuado para representar el comportamiento de la producción de metano de *A. donax*, y permitió obtener los parámetros cinéticos del proceso. Esto se corroboró a través del RMSE (raíz del error cuadrático medio), que cuantifica la precisión del modelo comparando los valores predichos con los valores obtenidos experimentalmente. Cuanto más cercano a cero es el RMSE, mejor es el ajuste del modelo. Al analizar la diferencia entre los valores experimentales y los obtenidos a través del modelo, la variación fue del 2,7 %, lo que refuerza la utilización del modelo de primer orden para ajustar los datos experimentales. Comparando las constantes de velocidad de producción de metano entre el ensayo PBM y el reactor escala banco, se obtuvo una diferencia del 12,8 % entre las mismas, evidenciando una disminución de la velocidad cuando se aumenta la escala del proceso.

## DISCUSIÓN

### Análisis parámetros fisicoquímicos

El valor de SV obtenido para las muestras de *A. donax* ensiladas fue significativamente superior al reportado por Belmonte et al. (2023), quienes informaron un 79,47 % para muestras de *A. donax* cosechadas y picadas a campo. No obstante, el valor obtenido experimentalmente se encuentra en

concordancia con los observado por Baldini et al. (2017) para muestras de *A. donax* ensiladas, cuyo contenido de SV osciló entre 94,4 y 95,8 % (b.s.) según la fecha de corte de la biomasa.

La composición polimérica de *A. donax* obtenidos en este trabajo se encuentran dentro del rango reportado por diversos autores para muestras similares a pesar de que su composición puede variar significativamente en función de diversos factores como el ecotipo, la disponibilidad de nutrientes en el suelo, la fecha de corte, entre otros. Vasmara et al. (2023) reportaron para esta especie contenidos de lignina entre 9,6 a 25 %, celulosa entre 27,7 y 46,5 % y de hemicelulosa entre 13,9 y 30,1 %. En el caso de muestras frescas de *A. donax*, Belmonte et al. (2023) reportaron un contenido de lignina del orden del 28 %. Por su parte, Baldini et al. (2017), al comparar biomasa ensilada y sin ensilar, concluyeron que el proceso de ensilado no genera cambios significativos en la composición estructural de *A. donax*, informando valores promedios de 7,5 % para lignina, 42 % para celulosa y entre 27-28 % para hemicelulosa,

El pH registrado en las muestras de *A. donax* ensilado no fue lo suficientemente bajo como para garantizar una conservación óptima, de acuerdo con los criterios establecidos por Weiland (2010). No obstante, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado por Baldini et al. (2017), quienes señalaron que los ensilados de *A. donax* y *Miscanthus* presentan pH relativamente elevados (5,5 y 4,9, respectivamente) en comparación con el ensilado de maíz (3,8). Esta diferencia se atribuye a la baja concentración de productos de fermentación presentes en la biomasa fresca.

El contenido de NA obtenido se encuentra en el orden de lo reportado por Córdoba et al. (2023) para muestras de *A. donax* ensiladas, quienes informaron concentraciones de NA del orden del  $0,56 \pm 0,02$  a  $0,83 \pm 0,01$  mg g<sup>-1</sup> para diferentes procesos de ensilado, observando incrementos de más del 800 % en este parámetro con respecto a las muestras sin ensilar, resultado de una fermentación restrictiva, como resultado de la ruptura de las proteínas de la biomasa.

En un digestor anaeróbico, la estabilidad del proceso depende en gran medida del equilibrio entre los AGV, el pH y la alcalinidad. Los AGV son considerados productos intermedios del proceso, que se generan principalmente durante la fase acidogénica, y son consumidos por los microorganismos metanogénicos, dando como resultado la producción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Por su parte, la alcalinidad es el sistema buffer de un digestor anaeróbico, permitiendo prevenir cambio rápido de pH. Una alcalinidad adecuada permite mantener el pH dentro del rango óptimo (usualmente entre 6,8 y 7,2) para el crecimiento de los microorganismos metanogénicos. Un decrecimiento en la alcalinidad puede ser el resultado de la producción de grandes cantidades de AGV, generando una disminución del pH y desestabilizando el sistema. En este sentido un factor determinante es el inóculo, tanto en calidad como en cantidad, ya que para evitar desestabilización es necesario disponer de una cantidad adecuada de microorganismos (Gerardi, 2003; Holliger et al., 2016).

La acumulación de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> puede atribuirse a la degradación anaeróbica de compuestos como proteínas y aminoácidos presentes en el sustrato lignocelulósico de *A. donax* (Gerardi 2003; Martínez 2014), cuyo catabolismo en condiciones anaerobias conduce a la liberación de amonio como producto intermedio. Este proceso contribuye a la alcalinidad del medio mediante la formación de carbonato de amonio, lo cual favorece la estabilidad del pH del sistema (Gerardi, 2003). En este sentido, se observó una tendencia similar en la evolución del NA y del pH, lo que refleja la interacción entre ambos parámetros.

La degradación de los SV del reactor es un factor crucial que permite determinar la evolución del proceso. La baja degradación observada puede ser el resultado de la cristalinidad y composición de la biomasa (Chen et al., 2019), pero además, puede estar relacionado con un proceso que no alcance valores de pH suficientemente ácido al inicio del proceso como para asegurar un trabajo efectivo de las bacterias hidrolíticas y acidogénicas tal como reportaron Chen et al. (2019), cuando analizaron la digestión anaeróbica de barros sintéticos y diferentes biomassas lignocelulósicas. En este sentido, Obregón et al. (2018) quienes estudiaron la biodegradabilidad anaerobia de la cachaza sometida a pretratamiento termo-alcalino (T=90 °C y NaOH (2-10)) reportando un incremento del 11,1 % en la producción de metano respecto al sustrato sin pretratar; resultados atribuibles a la

desestructuración de la matriz lignocelulósica bajo condiciones que favorecieron la solubilización de compuestos orgánicos y una mayor velocidad de conversión hacia metano. De esta manera, al momento de analizar la utilización de una nueva biomasa en el proceso anaeróbico, es necesario evaluar la necesidad de aplicación de pretratamiento que mejore la degradabilidad de la misma y permita incrementar la producción de biometano.

### **Análisis PBM y cambio escala**

El PBM obtenido ( $220.07 \text{ Nml CH}_4 \text{ g SV}^{-1}$ ) es un 16 % menor al reportado por Córdoba et al., (2023) quienes informaron  $265.8 \text{ Nml CH}_4 \text{ gr SV}^{-1}$  para *A. donax* con una relación I/S de 3/1, y también inferior al de Corno et. al (2016) de  $302 \text{ Nm}^3 \text{ kg SV}^{-1}$ . Sin embargo, fue un 48 % superior al obtenido por Baldini et al. (2016) de  $148\text{-}169 \text{ Nml CH}_4 \text{ gr SV}^{-1}$  para *A. donax* ensilado con una relación I/S de 2/1.

Las diferencias observadas pueden atribuirse a variaciones en la composición de la biomasa, influenciada por la genética de la planta, el estado de madurez al momento del corte, la época de cosecha y las condiciones climáticas. Además, las particularidades del proceso de ensilado y la relación I/S empleada en los ensayos inciden significativamente en los resultados. Holliger et al. (2016), señalan que este es un parámetro clave en la determinación del PBM y sugieren relaciones I/S entre 2 y 4 para sustratos fácilmente degradables, a fin de evitar la acumulación de AGV; mientras que, para biomassas lignocelulósicas, indican que una relación de 1/1 es suficiente. En cambio, Meng et al. (2018), al analizar la co-digestión anaeróbica de purines de cerdo y paja de arroz, observaron que una relación I/S de 2/1 produjo un 15 % más de biometano que una de 1/3, lo cual atribuyeron a una mayor secreción de enzimas por parte del inóculo, que favoreció las etapas hidrolítica y acidogénica. En conjunto, estos resultados evidencian que el PBM es un parámetro altamente sensible, influenciado por múltiples factores interrelacionados, tanto del sustrato como de las condiciones operativas. Esta variabilidad también se refleja al comparar el PBM de *A. donax* con otras biomassas convencionalmente utilizadas en digestores anaeróbicos, como el ensilado de maíz, donde los valores reportados resultan superiores. Córdoba et al., (2023), reportan un PBM de silaje de maíz de  $337.2 \pm 10.1 \text{ Nml CH}_4/\text{g SV}$ , mientras Baldini et. al (2017) reportan PBM de  $284.2 \text{ Nml CH}_4/\text{g SV}$  y Ragaglini et al. (2014) de  $345 \text{ Nml CH}_4/\text{g SV}$  para una relación 2/1 de I/S.

Al considerar los resultados del PBM de *A. donax* presentados en la Sección 3.2 y expresarlos en términos de productividad de metano por hectárea, esta especie adquiere una mayor relevancia como cultivo bioenergético. En Italia, Ragaglini et al. (2014) informaron  $9.580 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  para *A. donax* de primer corte anual, superando al observado para maíz ( $6.750 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) con rendimientos de  $20 \text{ t MS ha}^{-1}$ ; mientras que Schievano et al. (2012) encontraron valores entre  $7.170$  y  $11.280 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  para *A. donax* de primer corte. De manera consistente, los resultados obtenidos por Córdoba et al. (2023) en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina, a partir de los primeros estudios agronómicos en la región pampeana, mostraron una productividad de metano de  $5.850 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  una vez alcanzado el establecimiento del cultivo (a partir del tercer año de implantación), valor superior al obtenido para maíz ( $4.423 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ), considerando una producción de biomasa anual de  $15.33 \text{ t MS ha}^{-1}$  en la misma región.

Estos resultados refuerzan que, a pesar de presentar un PBM específico algo inferior al del maíz, *A. donax* demuestra una destacada eficiencia en términos de rendimiento de metano por hectárea, gracias a su elevada productividad de biomasa, que se ve incrementada de manera anual hasta alcanzar la madurez del cultivo (Baldini et al., 2017; Kreuger et al., 2011; Ragaglini et al., 2014; Rodríguez, et al. 2024).

La determinación del PBM antes analizado, se realiza en condiciones controladas a fin de maximizar la degradabilidad del sustrato y su posterior conversión en biometano. Sin embargo, diversos autores han señalado que el volumen del reactor puede influir significativamente en la determinación del PBM. Holliger et al., (2016) indica que este parámetro debe ser establecido en reactores con volúmenes no superiores a los 2000 ml, lo que fue posteriormente reafirmado por Ohemeng-Ntiamoah y Datta, (2019) y Meng et al. (2018), al comparar digestores de 500 ml y 20 l.

El aumento de escala introduce complejidades fluidodinámicas que modifican la eficiencia del proceso (Muñoz Rebolledo y Maldonado Aguirre, 2023; Ohemeng-Ntiamoah y Datta, 2019). Holliger et al. (2017) reportaron que el rendimiento de metano en plantas a escala real alcanza entre el 87 % al 94 % respecto al PBM determinado con la misma materia prima. Por lo tanto, el cambio de escala, incluso hacia volúmenes intermedios como el ensayo a escala banco, puede impactar significativamente en el rendimiento del proceso, lo que se observa en el presente trabajo con reducciones del 40 % de la producción de biometano respecto al potencial determinado experimentalmente. Esto se puede deber tanto a condiciones menos controladas del proceso, como a fenómenos tales como, acumulación de AGV o problemas de mezclado, que pueden alterar el equilibrio entre las etapas de hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis (Krause et al., 2016).

El análisis de la cinética de primer orden permite comparar la velocidad de conversión del sustrato en metano entre diferentes biomasa. En este sentido, la constante de producción de metano ( $k$ ) obtenida en el ensayo de PBM para *A. donax* ( $0,073 \text{ d}^{-1}$ ) fue similar con la reportada para bagazo de caña de azúcar ( $0,079 \text{ d}^{-1}$ ), un residuo agroindustrial estudiado por González et al. (2019), observando una diferencia mínima del 7,6 %, lo que indica un comportamiento similar en términos de biodegradabilidad. En contraste, los residuos alimentarios presentan una constante mucho mayor ( $k: 0,57 \text{ d}^{-1}$ , Muñoz Rebolledo et al., 2023), lo que refleja una biomasa de alta degradabilidad. La diferencia entre ambos tipos de biomasa supera el 680 %, evidenciando que los sustratos lignocelulósicos tienden a presentar cinéticas de digestión más lentas respecto a materiales fácilmente degradables como los alimenticios.

## CONCLUSIONES

*Arundo donax* L. demostró ser un sustrato adecuado para ser degradado mediante digestión anaeróbica con fines de producción de biometano. La producción acumulada de este gas varió ligeramente entre ambas escalas, reflejando la sensibilidad del proceso ante cambios en el diseño y manejo del sistema. El ensayo a escala banco arrojó resultados ligeramente inferiores a los obtenidos en la escala batch, lo que permitió identificar posibles variables operativas que afectan el rendimiento del sistema, como problemas asociados al cambio de escala, tales como la distribución heterogénea del sustrato o la eficiencia en la mezcla.

Un cambio de escala de este sistema utilizando *A. donax* como biomasa de podría aplicarse para la producción a escala industrial de biometano, promoviendo la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y mitigando el impacto ambiental generado por los residuos agroindustriales, generando así un modelo energético más sostenible y eficiente. A futuro, será necesario profundizar en la aplicación de pretratamientos, la optimización de las condiciones operativas (agitación, carga orgánica, relación I/S) y la validación en digestores de mayor capacidad, de modo de avanzar hacia su implementación a escala piloto e industrial. Estas acciones contribuirían a consolidar a *A. donax* como un recurso estratégico dentro de esquemas de bioenergía sostenible.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo del Programa de Fortalecimiento de la Ciencia y la Tecnología en las Universidades Nacionales (VII) de la SECAT (UNCPBA) —Proyecto 03-PEDYT-25E— y el Proyecto IDi2023 de la Facultad de Ingeniería (UNCPBA). Los autores desean expresar su agradecimiento a estas instituciones. Asimismo, extienden su agradecimiento a los integrantes del PEIDyT —Torres A., Caldentey F., Portela G., Ressia J. y Bongiorno C.— por sus aportes en el trabajo de campo y la construcción de los microsilos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Public Health Association (APHA). (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (20th ed.).  
American Society for Testing and Materials (ASTM). (1999). Annual book of ASTM standards. ASTM Bulletin.

- Aquino, S., Chernicharo, C., Foresti, E., Dos Santos, M., y Monteggia, L. (2007). Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 12, 192–201.
- Baldini, M., da Borsig, F., Ferfui, C., Zuliani, F., y Danuso, F. (2017). Ensilage suitability and bio-methane yield of Arundo donax and Miscanthus × giganteus. *Industrial Crops and Products*, 95, 264–275. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.031>
- Belmonte, L., Mariotta, A., Binotto, N., Quicchi, A., y Bernard, M. (2023). Comparative analysis of lignocellulosic energy crops with high energetic potential: *Arundo donax* L. and *Sorghum saccharatum*. <https://doi.org/10.33414/ajea.1301.2023>
- Chen, Y., Zhao, Z., Zou, H., Yang, H., Sun, T., Li, M., ... y Gu, L. (2019). Digestive performance of sludge with different crop straws in mesophilic anaerobic digestion. *Bioresource technology*, 289, 121595.
- Cardoso, R., Manzur, A., Santalla, E., Lázaro, L. y Córdoba, V. (2023). Producción de bioenergía a partir de *Arundo donax* L., un cultivo perenne de alto potencial energético en Argentina. *ENERLAC. Revista De energía De Latinoamérica Y El Caribe*, 7(1).
- Córdoba, V., Fernández, M. y Santalla, E. (2014). Influencia del inóculo en la digestión anaeróbica de purín de cerdo. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 34, 29-37.
- Córdoba, V., Ibarlucía, D., y Santalla, E. (2022). Desarrollo y validación de un mecanismo para remover CO<sub>2</sub> y cuantificar la producción de CH<sub>4</sub> en sistemas de digestión anaeróbica. *RedBiolAC*, 6(1), 40-45.
- Corno, L., Pilu, R., Cantaluppi, E., & Adani, F. (2016b). Giant cane (*Arundo donax* L.) for biogas production: The effect of two ensilage methods on biomass characteristics and biogas potential. *Biomass and Bioenergy*, 93, 131-136. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.07.017>
- Craggs, L. y Gilbert, P. (2018). Reducción sostenible de gases de efecto invernadero en sistemas bioenergéticos: cambio climático: un factor impulsor y limitante para la bioenergía. En *Balances de gases de efecto invernadero en sistemas bioenergéticos* (pp. 1-10). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101036-5.00001-X>
- Enrique, C., y Monroy, C. (2024). Crecimiento económico ¿amenaza de la supervivencia? <https://www.eesi.org/topics/fossil-fuels/description>
- Gerardi, M. H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. John Wiley & Sons.
- González Suárez, A., Hernández Alfonso, G. y Pereda Reyes, I. (2019). Pretratamiento alcalino de bagazo de caña para mejorar la producción de biometano. *Centro Azúcar*, 46(4), 79–88.
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., ... y Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515-2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Holliger C., Fruteau de Laciós H., & Hack G. (2017). Methane production of full-scale anaerobic digestion plants calculated from substrate's biomethane potentials compares well with the one measured on-site. *Frontiers in Energy Research*, 5(2017), 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2017.00012>
- Jankowski, K. J., Dubis, B., Sokolski, M. M., Zaluski, D., BórAWSKI, P., & Szempliński, W. (2020). Productivity and energy balance of maize and sorghum grown for biogas in a large-area farm in Poland: An 11-year field experiment. *Industrial Crops and Products*, 148, 112326. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112326>
- Jenkins, SR, Morgan, JM y Sawyer, CL (1983). Medición de la digestión y el crecimiento de lodos anaeróbicos mediante una titulación alcalimétrica simple. *Revista (Federación de Control de la Contaminación del Agua)*, 448-453.
- Krause, M. J., Chickering, G. W., Townsend, T. G., y Reinhart, D. R. (2016). Critical review of the methane generation potential of municipal solid waste. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(13), 1117–1182. <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1204812>
- Kreuger, E., Prade, T., Escobar, F., Svensson, S., Englund, J., y Björnsson, L. (2011). Anaerobic digestion of industrial hemp—effect of harvest time on methane energy yield per hectare. *Biomass Bioenergy*, 35, 893-900. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.005>
- Labatut, RA y Pronto, J.L. (2018). Tecnologías sostenibles de valorización energética de residuos: Digestión anaeróbica. En *Sistemas sostenibles de valorización energética de residuos alimentarios*, (pp. 47-67). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811157-4.00004-8>
- Martínez Campesino, L. (2014). Uso de membranas selectivas para la recuperación de nitrógeno amoniacoal durante el proceso de digestión anaerobia [Tesis de grado], Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Muñoz Rebolledo, J y Maldonado Aguirre, J. (2023). Evaluación de la influencia del volumen de reactor en la digestión anaerobia de residuos de alimentos mediante ensayos de potencial bioquímico de metano empleando el método manométrico. Universidad del Valle, Colombia.
- Mussatto, S.I. y Dragone, G.M. (2016). Pretratamiento de biomasa, biorrefinerías y productos potenciales para el desarrollo de la bioeconomía. En *Tecnologías de fraccionamiento de biomasa para una biorrefinería basada en materia prima lignocelulósica* (pp. 1-22). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802323-5.00001-3>
- Obregón, J. M. R., Gutiérrez, R. B., González, L. L., Hernández, J. J. y Pérez, L. M. (2018). Análisis cinético de la biodegradabilidad anaerobia de la cachaza con pretratamiento termoalcalino en la producción de metano. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 7(1), 12-18.

- Ohemeng-Ntiamoah, J., y Datta, T. (2019). Perspectives on variabilities in biomethane potential test parameters and outcomes: A review of studies published between 2007 and 2018. *Science of the Total Environment*, 664, 1052–1062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.088>
- Pereyra Müller, N., Manzur, A. M., Santalla, E. M., Córdoba, V. E. (2022). Evaluación de *Arundo Donax* L. como biocombustible para la producción de energía térmica; Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 48(2), 11-17.
- Ragaglini, G., Dragoni, F., Simone, M., y Bonari, E. (2014). Suitability of giant reed (*Arundo donax* L.) for anaerobic digestion: Effect of harvest time and frequency on the biomethane yield potential. *Bioresource Technology*, 152, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.004>
- Ramírez Ramírez, M. A., Carrillo Parra, A., Ruiz Aquino, F., Luján Álvarez, C., Hernández Solís, J. J., Carrillo Ávila, N., Pintor Ibarra, L. F., y Rutiaga Quiñones, J. G. (2025). Valorización de pellets combustibles usando aserrín de 23 especies de maderas mexicanas. *TECNOCIENCIA Chihuahua*, 19(1), e1829. <https://doi.org/10.54167/tch.v19i1.1829>
- Rodríguez, L. D., Confalone, A. E., Lázaro, L., Pimentel, R. M., Lyra, G. B., Oliveira, J. F. D. J., Singh, S. K., Pereira, C. R. (2024). Growth of the energy crop giant reed (*Arundo donax* L.) and optimization of the ARMIDA model in the south-central region of Buenos Aires, Argentina. *Industrial Crops and Products*, 211, 118190.
- Saini, J. K., Saini, R., & Tewari, L. (2015). Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: Concepts and recent developments. *3 Biotech*, 5(4), 337-353. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0246-5>
- Santalla, E., Ressia, J., Córdoba, V. y Lázaro, L. (2024). Costos energéticos y emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de carrizo gigante (*Arundo donax* L.) para su uso como vector de bioenergía. *Revista global de economías de mercados emergentes*, 16 (3), 431-451. <https://doi.org/10.1177/09749101231223796>
- Sawatdeenarunat, C., Surendra, K.C., Takara, D., Oechsner, H., Khanal, S. K., & Kumar, S. (2015). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 178, 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.103>
- Schievano, A., Corno, L., Adani, F., & Pilù, S. R. (2012). Più biogas a costi inferiori con *Arundo* o *Doppia coltura*. Settore AGR/13- Chimica Agraria
- Špelić, K., Panjićko, M., Zupančić, G. D., Lončar, A., Brandić, I., Tomić, I., ... & Jurišić, V. (2024). Towards a sustainable energy future: Evaluating *Arundo donax* L. in continuous anaerobic digestion for biogas production. *GCB Bioenergy*, 16(5), e13135. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13135>
- Steinmetz, R. L. R., Mezzari, M. P., da Silva, M. L. B., Kunz, A., do Amaral, A. C., Tápparo, D. C., & Soares, H. M. (2016). Enrichment and acclimation of an anaerobic mesophilic microorganism's inoculum for standardization of BMP assays. *Bioresource Technology*, 219, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.031>
- Testa, R., Foderà, M., Di Trapani, A.M., Tudisco, S., & Sgroi, F. (2016). Giant reed as energy crop for Southern Italy: An economic feasibility study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 558–564. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.123>
- Uhaldegaray, M. G., Fernández, R., Kloster, N. y Quiroga, A. R. (2024). Cultivos de cobertura en sistemas ganaderos: Producción de biomasa y efectos sobre el suelo. *Semiárida*, 35(1), 77-86. [https://doi.org/10.19137/semiarida.2025\(1\).77-86](https://doi.org/10.19137/semiarida.2025(1).77-86)
- Van der Berg, D. J., Teke, G. M., Görgens, J. F., & van Rensburg, E. (2024). Predicting commercial-scale anaerobic digestion using biomethane potential. *Renewable Energy*, 235, 121304. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121304>
- Vasmara, C., Galletti, S., Cianchetta, S., & Ceotto, E. (2023). Advancements in giant reed (*Arundo donax* L.) biomass pre-treatments for biogas production: a review. *Energies*, 16(2), 949.
- Velásquez-Piñas, J. A., Calle-Roalcaba, O. D., Miramontes-Martínez, L. R., & Alonso-Gómez, L. A. (2023). Evaluación económica y ambiental de las tecnologías de utilización del biogás y perspectivas del análisis multicriterio. *Revista ION*, 36(1), 29-47. <https://doi.org/10.18273/revion.v36n1-2023003>
- Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 849-860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>