

EVALUACIÓN DEL PROCESO ANAEROBICO MESOFILICO DE UN EFLUENTE VACUNO EN CO DIGESTIÓN CON GLICEROL EN UN PROCESO CONTINUO

M. E. Beily, O. H. Vargas Navas y D. Crespo

Laboratorio de Transformación de los Residuos (LTR) Instituto de Microbiología y Zoología Agrícola (IMyZA). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Buenos Aires, Argentina.
Tel: 4481-2525/4769/9582 e-mail: [e-mail: beily.maria@inta.gob.ar](mailto:beily.maria@inta.gob.ar)

Recibido: 30-10-2019; Aceptado: 12-05-20; Publicado en línea: 30-07-20.

RESUMEN.- La intensificación en los sistemas ganaderos provoca el aumento en la cantidad de residuos generados en áreas reducidas, generando un impacto negativo sobre los recursos naturales. La co-digestión se define como la mezcla de dos tipos de residuos con el objetivo de mejorar la eficiencia de la digestión anaeróbica. El glicerol, es un subproducto generado en la producción de biodiesel con ventajas para ser utilizado como co-sustrato. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el tratamiento de un efluente vacuno, proveniente de un tambo intensificado, a partir de la co-digestión anaerobia con glicerol. Para ello, se realizó un ensayo en reactores anaeróbicos mesofílicos con alimentación diaria. Inicialmente, los reactores fueron inoculados y su velocidad de carga orgánica (VCO) se aumentó, gradualmente, hasta alcanzar la carga deseada. Los tratamientos fueron efluente vacuno sin glicerol (EVSG), con 3 % (EV3G) y 6 % (EV6G) de glicerol. Los resultados mostraron que el agregado de glicerol aumento el rendimiento de metano en un 337% y 661% para EV3G y EV6G, respectivamente. Los ensayos llevados a cabo demostraron que el aumento de la VCO gradual evita la inestabilidad por acumulación de ácidos grasos y que el agregado de glicerol mejora el rendimiento energético en proceso anaeróbicos.

Palabras claves: efluente de tambo, co-sustrato, metano, digestión anaeróbica

EVALUATION OF THE MESOPHILIC ANAEROBIC PROCESS OF A DAIRLY SLURRY CO DIGESTION WITH GLICEROL IN A CONTINUOUS PROCESS

ABSTRACT.- The intensification of livestock systems causes an increase for waste generated in small areas, generating a negative impact on natural resources. Co-digestion is the mixture of two types of wastes in order to improve the efficiency of anaerobic digestion. Glycerol is a sub product generating in the biodiesel industry. Glycerol had advantages to be use as a co-substrate. The objective of this work was to evaluate the anaerobic treatment of a dairy slurry in co-digestion with glycerol. To do this, a trial was carried out in mesophilic anaerobic reactors, with daily feeding. Initially, the reactors were inoculated and their organic loading rate was increasing gradually, until the chosen load was research. The treatments were dairy slurry without glycerol (DSWG), with 3% (DS3G) and 6% (DS6G) of glycerol. The result showed that the added of glycerol increase methane yield by 337% and 661% for DS3G and DS6G, respectively. The tests carried out showed that the gradual increase in VCO prevents instability due to the accumulation of volatile fatty acids and the addition of glycerol improves the energy efficiency in anaerobic processes.

Keywords: dairy slurry, co-substrate, methane, anaerobic digestion.

1. INTRODUCCIÓN

La intensificación es un proceso de crecimiento que avanzó en todas las producciones animales en busca de una mayor producción por unidad de superficie. Esto viene creando serios inconvenientes cuando los desechos orgánicos que se generan diariamente (estiércol, orina, residuos de alimentos, cama para animales, etc.) no son tratados apropiadamente (La Manna, A,1992).

En la Argentina el SENASA (2018) declaró la existencia de 11.273 tambos y un total de 3.400.522 de bovinos de leche. La cantidad de tambos declarados para el año 2018, ha sido la menor en los últimos diez años, sin embargo, se puede verificar un aumento en la tasa anual de producción diaria de

leche. Esta situación puede explicarse debido a la concentración de los bovinos de leche por unidad productiva, pasando de 2439 a 2690 litros de leche/tambo/día, mostrando un crecimiento del 8% con respecto al año 2016 (Galletto, 2018). El 80% de la producción lechera nacional está concentrada en las provincias de Santa Fe, Buenos Aires y Córdoba, siendo el manejo semi-intensivo. La mayor cantidad de residuos sólidos y efluentes se concentran en la sala de ordeño y corrales, como producto de la limpieza diaria. Cada vaca genera entre 3,3 y 6 m³/día de efluente (Nennchi et al., 2010). Por ello, sin una adecuada planificación y gestión de estos efluentes se genera, inexorablemente, una contaminación puntual de los recursos naturales.

La digestión anaeróbica surge como un tratamiento para la estabilización de la materia orgánica contenida en los residuos orgánicos, teniendo además la ventaja de aprovechar la generación de metano como fuente alternativa de energía. La co-digestión se define como la mezcla de dos tipos de residuos con el objetivo de mejorar la eficiencia de la digestión anaeróbica, aprovechando la complementariedad de la composición de los residuos involucrados para mejorar la eficiencia global del proceso (Santibáñez et al., 2011). Dentro de las principales ventajas se encuentra la mejorara en la relación Carbono Orgánico/Nitrógeno/Fósforo y el aumento en la producción de biogás y metano.

Dentro de los posibles co-sustratos, el glicerol resulta ser de gran interés. Este compuesto es producido durante la producción de biodiesel, en donde es separado en una corriente líquida, la cual constituye aproximadamente del 16 a 18% del peso de la entrada del aceite/grasa. Este subproducto se produce cuando el proceso se realiza químicamente, pero también en procesos enzimáticos. (Santibáñez et al., 2011). Se estima que, por cada 100 Kg de biodiesel, es producido 10 Kg de glicerol.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el tratamiento de un efluente vacuno, proveniente de un tambo intensificado, a partir de la co-digestión anaerobia con glicerol.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Efluente Vacuno.

El efluente de vacuno utilizado fue extraído de un tambo con 170 vacas en ordeño, ubicado en la localidad de Las Heras, provincia de Buenos Aires. La muestra fue tomada de la fosa de almacenamiento. La misma recibe el estiércol lavado del corral de espera y de la sala de ordeño. Las muestras fueron tomadas en bidones de 10 L de capacidad y refrigeradas a 4°C hasta su análisis en el laboratorio.

Se realizó un muestro inicial del efluente para determinar variables físico químicas, microbiológicas y parasitológicas de interés en el ensayo. Se utilizó el método propuesto por la APHA (1992) para la determinación del pH y demanda química de oxígeno (DQO). La alcalinidad total (AT) y parcial (AP) y los ácidos grasos volátiles (AGV) según Jenkins et al., (1991) y Di Lallo & Albertson (1961).

2.2. Descripción del reactor, inoculación, puesta en marcha y monitoreo del proceso.

El experimento fue realizado en reactores anaeróbicos de 5 L, de tipo mezcla completa, construidos en acrílico, con agitación mecánica y calefaccionados a 33°C ± 1°C. La alimentación fue diaria. Los reactores fueron inoculados con un lodo de tipo granular, proveniente de un reactor UASB de una empresa que trata residuos de la industria del maíz. El mismo presentó una actividad metanogénica específica (AME) de 0,17 g DQO/g SSV*día. La temperatura se incrementó en forma gradual para lograr la adaptación de las bacterias, hasta alcanzar el rango de temperatura seleccionado (33°C). Una vez alcanzada dicha temperatura, los reactores se alimentaron diariamente con efluente vacuno (EVSG), iniciando con una velocidad de carga orgánica (VCO) de 0,34 g DQO/m³, la cual fue incrementándose gradualmente, hasta alcanzar la carga seleccionada para el proceso de co-digestión, de 1,5 gDQO/m³ (periodo de puesta en marcha). Luego de obtener la VCO establecida, se comenzó con la evaluación del agregado de un co-sustrato. En una primera instancia la co-digestión se realizó con un 3% de agregado de glicerol (EV3G) al efluente vacuno y, en una segunda instancia, con un 6% de glicerol (EV6G).

El seguimiento del ensayo consistió en la cuantificación diaria de la producción de biogás mediante método manométrico, con transductor de presión. El análisis de su calidad, se midió por cromatografía gaseosa con un equipo Hewlett Packard 6890 GC System. Los valores fueron expresados en CNPT (T°= 273°K, P= 1 atm). Por otro lado, para evaluar la estabilidad del proceso, se monitorearon periódicamente parámetros de control en el efluente de salida del reactor (DQO, AT, AP, AGV).

El análisis estadístico fue realizado fueron analizados estadísticamente mediante el programa INFOSAT, utilizando el test no paramétrico de Kruskal wallis.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Puesta en marcha.

En la figura 1 se muestra el aumento de la velocidad de carga orgánica, conjuntamente con la producción de biogás y metano acumulada semanalmente, durante la puesta en marcha del proceso anaeróbico.

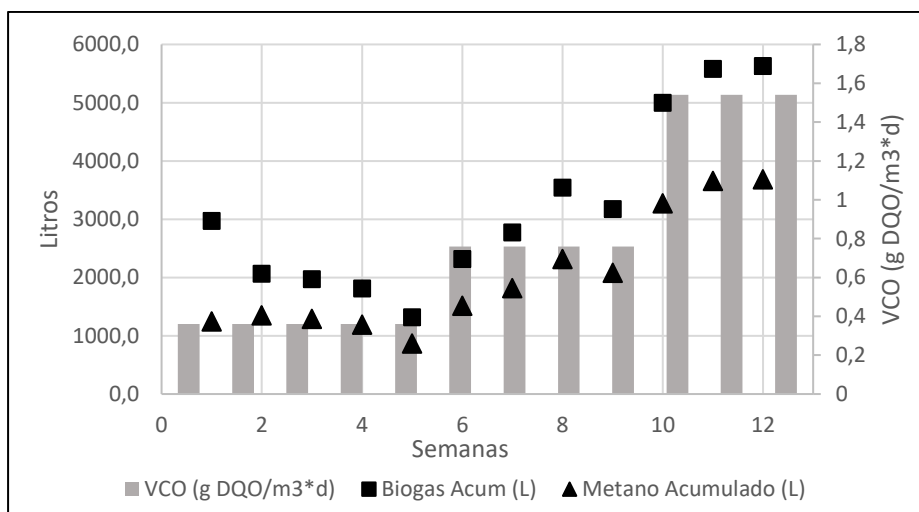


Fig. 1: Velocidad de carga orgánica (VCO), producción de biogás y metano semanal durante la fase de puesta en marcha. (± SD) (n = 2). DQO: demanda química de oxígeno

Los resultados mostraron un incremento en la producción acumulada de biogás y metano al incrementarse la VCO. El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre los distintos periodos ($p < 0,05$). Sin embargo, pudo observarse que el efluente vacuno presenta un bajo rendimiento de biogás y metano ($178 \text{ LCH}_4/\text{gSV}_{\text{agregado}}$). Similares resultados fueron observados por Amon et al. (2006), quien encontró valores de rendimiento en un rango de 125 a $166 \text{ LCH}_4/\text{Kg SV}$. En ese trabajo los autores relacionaron la disminución en el

rendimiento específico de metano con el aumento de contenido de lignina en el estiércol.

La Tabla 1, muestra los valores promedios de pH, la alcalinidad total, parcial, ácidos grasos volátiles, DQO total y soluble, evaluados sobre el efluente vacuno (EVSG) y en el digerido vacuno a la salida del reactor (DV), durante la puesta en marcha.

Tabla 1: Valores promedios encontrados en el EVSG y DV. EVSG: efluente vacuno sin glicerol; DV: digerido vacuno. AT: Alcalinidad total; AP: alcalinidad parcial; AI: alcalinidad intermedia; AGV: ácidos grasos volátiles; DQO: demanda química de oxígeno.

	pH	AT (g/L)	AP (g/L)	AI (g/L)	AGV (mg/L)	DQO Total (g/L)	DQO Soluble (g/L)
EVSG	6,98±0,0	2,22 ± 0,20	1,84± 0,17	0,37 ± 0,12	540,0 ±64,85	49,73 ± 2,84	10,46 ± 0,63
DV	7,1±0,2	3,39 ± 0,49	3,10 ± 0,51	0,32 ± 0,09	153,97 ± 40,22	25,15± 6,55	2,34 ± 0,60

Como puede observarse el pH fue neutro, mostrando condiciones estables durante todo el proceso de puesta en marcha del reactor, encontrándose dentro del rango óptimo para el desarrollo de las archeas metanogénicas, comprendido entre 6.5 y 8 (Don Jun et al., 2009). Por otro lado, los ácidos grasos presentaron una remoción del 71%. Este comportamiento es típico del proceso anaeróbico estable, en donde estos ácidos se encuentran presentes, debido a que en la fase acidificación y acetogénesis, la materia orgánica se transforma en estos ácidos. Posteriormente, estos ácidos serán gradualmente descompuestos al ser consumidos por las bacterias metanogénicas que los utilizan como sustrato, para la posterior formación de metano (Cendales Ladino, 2011). En lo que respecta a la alcalinidad total y la parcial, ambas mostraron un incremento, evidenciando una buena capacidad buffer durante todo el transcurso del ensayo. Asimismo, se calcularon los indicadores alfa (AT/AP) y AGV/AT. Los resultados mostraron que ambos indicadores de encontraron dentro de los límites establecidos para procesos estables. Un

valor alfa dentro del rango 0.6-0.9 (Jenkins et al.,1991; López et al.,2000) y una relación AGV/AT <0,3-0,4 indican condiciones estables dentro del reactor (Cecchi et al., 2005; Beily et al., 2010; Bres et al., 2010).

Con respecto a la eficiencia de remoción de la materia orgánica, la misma se monitoreó mediante la evaluación de la DQO total y soluble (Tabla 1). La remoción de la DQO total fue del 49,7%, mientras que la soluble fue de 77,67%. La diferencia en la eficiencia de remoción pudo estar dada debido a la presencia de fibra sin degradar, presente en el estiércol vacuno, la cual al momento de filtrar la muestra para realizar la determinación soluble es usualmente removida.

3.2. Co digestión del efluente Vacuno con el glicerol.

3.2.1. Producción de Biogás y Metano.

En la Tabla 2 se muestra el aumento de la VCO, la producción diaria y acumulada de biogás y metano, según el porcentaje de glicerol agregado (3 y 6%).

Tabla 2. Aumento de la VCO, producción diaria y acumulada de biogás y metano, según dosis de glicerol agregada. Media de cada tratamiento. VCO: Velocidad de carga orgánica ($\text{g DQO}/\text{m}^3\cdot\text{d}$), EVSG: Efluente vacuno sin glicerol; EV3G: efluente vacuno con 3% de glicerol; EV6G: efluente vacuno con 6% de glicerol.

	EVSG	EV3G	EV6G
VCO ($\text{g DQO}/\text{m}^3\cdot\text{d}$)	1,5	2,8	4,0
Biogás diario (L)	823,4	2430,1	4757,2
Biogás acumulado (L)	33170,5	95849,6	186602,3
CH₄ diario (L)	480,7	1621,2	3173,3
CH₄ acumulado (L)	18265,2	61604,7	120596,6

Como puede observarse el agregado de glicerol a los tratamientos produjo un efecto de aumento de la VCO y, consecuentemente, un aumento en la producción de biogás y metano generados. El aumento de la VCO con respecto al EVSG fue de 200% y 288% para EV3G y EV6G, respectivamente.

La producción de biogás diario se vio aumentada en un 295% para EV3G y 578% para EV6G, mientras que el aumento de metano diario se incrementó en un 337% y 661% para EV3G y EV6G, respectivamente. Tanto EV3G como EV6G, mostraron diferencias significativas con el tratamiento sin glicerol, tanto para la producción de biogás como del gas

metano ($p < 0,05$). La Figura 2 muestra la producción de metano acumulada en el tiempo para los 3 tratamientos. El alto contenido de carbono orgánico fácilmente degradable que posee el glicerol, es aprovechado por las bacterias para la formación de metano, incrementando su producción en

procesos anaeróbicos. Varios estudios han demostrado que el agregado de glicerol a efluentes con bajo rendimiento mejora sustancialmente su producción (Amon et al., 2006; Álvarez et al., 2010).

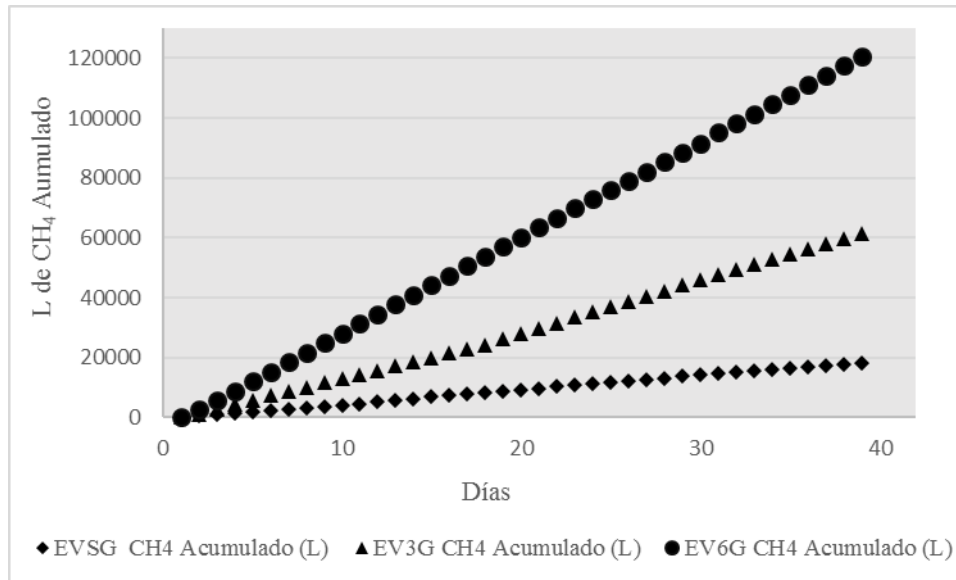


Fig. 2: Producción de metano acumulada para EVSG, EV3G y EV6G. CH4: metano EVSG: Efluente vacuno sin glicerol; EV3G: efluente vacuno con 3% de glicerol; EV6G: efluente vacuno con 6% de glicerol.

Mladenovska et al. (2003), estudiaron la digestión anaeróbica de efluente de tambo y efluente de tambo en co-digestión con 2% v/v de glicerol, en dos reactores mesofílicos de mezcla continua a escala laboratorio. En esa investigación, los autores hallaron un aumento en la producción específica de metano en el tratamiento con co-digestión (224 ± 33 a 382 ± 35 ml $\text{CH}_4/\text{gVS} \cdot \text{d}$, para efluente de tambo solo y para efluente de tambo con agregado de glicerol, respectivamente.

para un correcto desarrollo, aunque se permite cierta oscilación (Clark, 1989). Esto se debe a que el pH afecta la actividad enzimática e influencia en el grado de disociación de ciertos inhibidores, presentándose problemas graves, si el mismo se encuentra por debajo de 6 o es mayor que 8,3 (Lay & Noike, 1997). Durante todo el experimento el pH se mantuvo dentro de los valores estables ($7,5 \pm 0,2$), para todos los tratamientos evaluados.

3.3. Variables físico químicas.

El pH de los tratamientos EVSG, EV3G y EV6G fueron evaluados de forma continua debido a que los microorganismos anaeróbicos necesitan cierta neutralidad

La Tabla 3, muestra los valores promedios con sus desvíos estándares obtenidos durante el monitoreo de los reactores.

Tabla 3: Monitoreo de parámetros físico químicos en los digeridos obtenidos de los tratamientos EVSG, EV3G y EV6G. Alc. P: alcalinidad parcial; Alc. T: alcalinidad total; AGV: ácidos grasos volátiles DQO T: demanda química de oxígeno total; DQO S: demanda química de oxígeno soluble. EVSG: Efluente vacuno sin glicerol; EV3G: Efluente vacuno con 3% de glicerol; EV6G: Efluente vacuno con 6% de glicerol

	EVSG	EV3G	EV6G
Alc P (mg/L)	3990,86 ± 550,1	3691,4 ± 382,4	3418,3 ± 336,0
Alc T (mg/L)	4359,54 ± 618,7	4021,3 ± 397,2	3818,2 ± 378,7
AI	369,32 ± 32,0	329,32 ± 25,3	399,52 ± 42,0
AGV (mg/L)	230,9 ± 42,1	263,2 ± 71,4	278,3 ± 108,3
DQO T (mg/L)	16246,2 ± 2346	25623 ± 864,75	28682 ± 3900
DQO S (mg/L)	1764,4 ± 323,5	3125 ± 129,4	2296,5 ± 481,3

La alta alcalinidad (total y parcial) presente en todos los tratamientos evaluados permitió tener una gran capacidad buffer. Los ácidos grasos volátiles (AGV) juegan un papel importante en el monitoreo y control de reactores

anaeróbicos, mostrando una rápida respuesta a las variaciones en el sistema, por ejemplo, en el caso de sobrecargas orgánicas (Ahring, et al., 1995), o en el caso de la introducción de tóxicos. Tanto el contenido de AGV, como

los parámetros de estabilidad Alfa y AGV/AT estuvieron dentro del rango establecido por la bibliografía.

La alcalinidad Intermedia (AI), calculada como la diferencia entre las alcalinidades total (AT) y Alcalinidad Parcial (AP), representa en forma aproximada el aporte de alcalinidad debida a la concentración de AGV (Ripley et al., 1986). La relación AI/AT y la AI/AP se basan en el mismo concepto: es decir, si la concentración del ácido excede la capacidad tampón proporcionada por la especie HCO_3 , determinada por la AP, el digestor inhibirá la actividad de los microorganismos y, especialmente, afectará a las metanogénicas. Por lo tanto, para considerar al proceso estable, la relación AI/AP debe mantenerse por debajo de 0,4 (Astals, et al., 2012). Durante todo el proceso la AI/AP se mantuvieron por debajo de dicha relación. Por otro lado, es importante observar que al haberse realizado un proceso de puesta en marcha y aumento de la VCO prolongado, permitiendo la adaptación de las bacterias a altas cargas, en ningún momento se observó un proceso de inestabilidad por acumulación de AGV, aun cuando el aumento de la carga orgánica fue el mayor (glicerol 6%).

Con respecto a la remoción de materia orgánica, pudo observarse que en todos tratamientos hubo una eficiente remoción, siendo para DQO total del 60,09% EVSG; 72,01% EV3G y 74,9% para EV6G. Por otro lado, la DQO soluble fue de 80,54%; 93,83% y 97,22% para EVSG, EV3G y EV6G, respectivamente. Por lo tanto, los tratamientos que mejor *performance* presentaron en la remoción de DQO fueron el EV6G, seguido por el EV3G. Esta situación podría deberse a que ambos tratamientos presentaban en su inicio (efluente de entrada al reactor) mayor contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable, la cual fue rápidamente transformada por las bacterias metanogénicas. Mladenovska et al. (2003), también hallaron mejor eficiencia en la remoción de materia orgánica en proceso con co-digestión de glicerol (remoción de % SV del 37% ± 2 para efluente de tambo solo y del 51% ± 3 para efluente de tambo en co-digestión con glicerol).

4. CONCLUSIONES

Los resultados evidenciaron que el agregado de glicerol como co-sustrato en porcentajes del 3 y el 6% aumentaron la producción de metano en un 337% y 661%, evidenciando una mejora sustancial en el rendimiento del proceso.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Laboratorio Alaralab por los análisis cromatográficos realizados, durante el transcurso de esta investigación. Al Proyecto INTA PNNAT 1128042 y al Laboratorio de Transformación de los Residuos por el financiamiento recibido.

REFERENCIAS

Ahring, B., Sandberg, M., & Angelidaki, I. (1995). Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digesters. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **43**(3), 559-565.

- APHA; AWWA; WPCF. (1992). Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. 17th Ed. Diaz de Santos. Madrid, España. 1816 p.
- Álvarez, J.A., L. Otero, and J.M. Lema (2010). A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agroindustrial wastes. *Bioresource Technology* **101**:1153-1158.
- Amon, T., B. Amon, V. Kryvoruchko, V. Bodiroza, E. Pötsch, and W. Zollitsch. 2006. Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: effects of dairy systems and of glycerine supplementation. *International Congress Series* 1293:217-220
- Astals, S., Nolla-ardèvol, V., & Mata-alvarez, J. (2012). Bioresource Technology Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: *Biogas and digestate*. *Bioresource Technology*, **110**, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.080>.
- Beily, M.; Bres, P.; Rizzo, P.; Giampaoli, O. Crespo, D. (2010). Monitoreo de un reactor anaeróbico semi-continuo para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Parte II. *Avances en Energías renovables y medio ambiente*, **14**: 37-42.
- Bres P., Beily M.E., Rizzo P., Giampaoli O., Crespo D. (2010). Monitoreo de reactor anaeróbico semi-continuo para el tratamiento de residuos de cereales. Parte II. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **14**, 29-34.
- Cendales Ladino, E. (2011). Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Tesis de Máster. Universidad Nacional de Colombia.
- Cecchi, F.; Battistoni, P.; Paolo Pavan, P.; Bolzonella, D.; Innocenti, L. (2005). Digestione anaeróbica della frazione organica dei rifiuti solidi. Aspetti fondamentali, progettuali, gestionali, di impatto ambientale ed integrazione con la depurazione delle acque reflue. Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici (APAT). 178 p.
- Clark, R. H. (1989). The pH tolerance of anaerobic digestion. *Advanced water pollution research*. En *Int. Conf.* 5th (p. 27/1-27/14).
- DiLallo, R., & Albertson. (1961). Volatile acids by direct titration. *Journal WPCF*, **33**(4), 356-365.
- Don, J., Zhao, Y., Hong, M., Zhang, W. (2009). Influence of alkalinity on the stabilization of municipal solid waste in anaerobic simulated bioreactor. *Journal of hazardous materials*, **163**(2-3): 717-722.
- Galetto, A. (2018). Diagnóstico competitivo del sector lácteo argentino. Observatorio de La Cadena Láctea Argentina, 68. Retrieved from <http://www.ocla.org.ar/contents/news/details/12305295-diagnostico-competitivo-del-sector-lacteo-argentino>.
- Jenkins, S., Morgan, J., & Zhang, X. (1991). Measuring the usable carbonate alkalinity of operating anaerobic digesters. *Research journal of the water pollution control federation*, **63**(1), 28-34.
- Lay, J., & Noike, T. (1997). Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water Research*, **31**(10), 1518-1524.
- La Manna, A. 1992. Manejo de Residuos Orgánicos en Tambos. INIA. Uruguay-estanzuela. Boletín de Divulgación N°23. Ed.Agro. Hemisferio Sur S.R.L. Montevideo – Uruguay Depósito Legal 256.272/92).
- Lopez J., Morgan J. y Noyola A. (2000). Arranque dereactores anaerobios industriales: dos casos de estudio. En *Memorias de XII Congreso de la Federación*

- Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (FEMISCA).
- Mladenovska, Z., S. Dabrowski, and B.K. Ahring.(2003). Anaerobic digestion of manure and mixture of manure with lipids: biogas reactor performance and microbial community analysis. *Water Science and Technology* **48**:271-278.
- Nennich, T. D., Harrison, J. H., VanWieringen, L. M., Meyer, D., Heinrichs, A. J., Weiss, W. P.,Block, E. (2010). Prediction of Manure and Nutrient Excretion from Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, 88(10), 3721–3733. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(05\)73058-7](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(05)73058-7)
- Ripley, L., Boyle, W., & Converse, J. (1986). Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength waste. *Journal WPCF*, **58**(5), 406-411.
- Santibáñez, C., Varnero, M., Bustamante, M. (2011). Residual Glycerol from Biodiesel Manufacturing, Waste or Potential Source of Bioenergy: A Review. *Chilean Journal of Agricultural Research*, **71**(3), 469–475.