

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## CODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE FANGOS DAF Y EFLUENTES DE PREDIOS LECHEROS

FAD SLUDGE AND DAIRY FARM EFFLUENTS  
ANAEROBIC CODIGESTION

\*M. Cecilia Panigatti<sup>1</sup>  
Rosana Boglione<sup>1</sup>  
Griffa Carina<sup>1</sup>  
Fabiana Gentinetta<sup>1</sup>  
Javier Melidoro<sup>1</sup>  
Luis Medina<sup>1</sup>  
M. Celeste Schierano<sup>1</sup>  
M. Gabriela Fabbiani<sup>1</sup>

Recibido el 1 de julio de 2016; Aceptado el 23 de junio de 2017

### Abstract

*Currently, industries incorporate technologies and processes to improve the liquid effluents quality, in order to comply with the environmental legislation. In the case of food industries, such treatments generate a large amount of organic sludge with different characteristics, which must be properly disposed. An alternative to valorize this waste and reduce pollution is to generate biogas and bio-fertilizer. The aim of the study is to evaluate the anaerobic digestion of sludge generated in effluent primary treatment from a dairy industry. A pilot anaerobic reactor (1000 liters) was designed and constructed and after that two experiments studying the co-digestion of the mentioned waste were conducted. It was concluded that the co-digestion of dairy farm effluent and dairy industry FAD waste treatment is feasible, allowing biogas production.*

**Key Words:** biogas, FAD sludge, dairy, anaerobic digestion.

<sup>1</sup> Grupo Estudios Medioambientales (GEM). Facultad Regional Rafaela. Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

\*Autor correspondiente: Grupo Estudios Medioambientales (GEM). Facultad Regional Rafaela. Universidad Tecnológica Nacional. Acuña 49. (2300) Rafaela. Pcia. de Santa Fe. Argentina. Email: [labquimicautn@gmail.com](mailto:labquimicautn@gmail.com)

## Resumen

Actualmente las industrias, incorporan tecnologías y procesos para mejorar la calidad de sus efluentes líquidos, con el objetivo de dar cumplimiento al marco legal ambiental. En el caso de las industrias alimenticias, dichos tratamientos generan una gran cantidad de barros de características orgánicas, los cuales se deben disponer de forma adecuada. Una de las alternativas para valorizar estos residuos y disminuir la contaminación que producen, es generar biogás y biofertilizante a partir de los mismos. El objetivo del trabajo es evaluar la digestión anaeróbica de fangos que se generan en el tratamiento primario de los efluentes de una industria láctea, junto con efluentes de una instalación de ordeño. Se diseña y construye un reactor anaeróbico a escala piloto de 1000 litros de capacidad y se llevan a cabo dos experiencias estudiando la codigestión de los residuos mencionados. Se concluye que es factible la codigestión combinada de un efluente de tambo y un residuo de tratamiento DAF de industria láctea, permitiendo la obtención de biogás.

**Palabras clave:** biogás, fango DAF, industria láctea, digestión anaeróbica.

---

## Introducción

La industria láctea genera una significativa cantidad de efluentes orgánicos que generalmente son tratados a través de distintos métodos, generándose en algunas ocasiones subproductos de carácter sólido y semisólido. Un caso particular de estos subproductos son las grasas producidas en el tratamiento primario denominado Flotación por Aire Disuelto (DAF).

Actualmente, muchas de las industrias lácteas de la región central de la provincia de Santa Fe, Argentina, destinan estos sólidos a un sistema de landfarming. Éste logra la estabilización del sustrato luego de un período de tiempo, mediante la acción de microorganismos presentes en el suelo. Sin embargo, como todo tratamiento, presenta algunas limitaciones y desventajas frente a otros sistemas de biorremediación, ya que no todos los contaminantes son degradados completamente. Además, desde el punto de vista ingenieril, éstos requieren grandes extensiones de terreno, un manejo intensivo del mismo, elevados costos y pueden provocar tanto contaminación atmosférica como de las aguas subterráneas circundantes.

Otro de los efluentes generados en la cadena productiva, proviene de las instalaciones de ordeño, donde se produce un residuo que es un excelente portador de sustratos y microorganismos. Por sus características, éste favorecería la digestión anaeróbica de desechos concentrados, como por ejemplo, un residuo generado en un sistema DAF (Angelidaki y Ellegaard, 2003).

La digestión anaeróbica ha demostrado ser un tratamiento atractivo que provee varios beneficios, los cuales incluyen, además del aprovechamiento de un efluente para la obtención de energía, la reducción de olores y agentes patógenos y la posibilidad de uso del residuo final generado como fertilizante (Albertson, *et al.*, 2006; Morris y Lathwell, 2004; Mantovi *et al.*, 2010, Rodríguez *et al.*, 2015; Tiwary *et al.*, 2015).

El objetivo del trabajo es evaluar la codigestión anaeróbica de fangos que se generan en el tratamiento primario de los efluentes de una industria láctea, con desechos generados en una instalación de ordeño, como alternativa sustentable para el tratamiento de los residuos de ambas actividades productivas. Además, se propone realizar una caracterización del biogás producido en el sistema en estudio.

### Metodología

En el estudio se utilizó un biorreactor a escala piloto perteneciente a una empresa láctea de la región. El mismo posee una capacidad de 1000 L y cuenta con un sistema de circulación, ambos construidos en acero inoxidable. Para favorecer el mezclado y la liberación del gas obtenido, el proceso de agitación está compuesto por dos dispositivos: el primero consiste en una bomba centrífuga de 1 HP con cañería de succión, distribución e impulsión. Mientras que el segundo sistema corresponde a la agitación mecánica con un moto-reductor. El equipo dispone de un sistema de calefacción por medio de resistencia eléctrica y control automático de temperatura, y cuenta con una cañería de alimentación.

En la Figura 1, se observa el reactor empleado, indicando la ubicación de las válvulas utilizadas para la toma de las diferentes muestras analizadas. En la parte inferior (1) se encuentra la llave para toma de muestra de barro de fondo (purga), en el sector medio (2) se realiza la extracción de efluentes tratados y en la parte superior del reactor (3) se encuentra la toma de biogás. El digestor cuenta con un manómetro para el control de la presión del mismo y una válvula de seguridad.



**Figura 1.** Fotografías del Biodigestor anaeróbico construido a escala piloto (1000 litros).

Se efectuaron dos experiencias utilizando el biorreactor donde se evaluó la codigestión de dos residuos, uno correspondiente al fango del tratamiento primario por flotación de aire disuelto (DAF) de efluentes de una industria láctea y el otro perteneciente a los efluentes de una instalación de ordeño.

Antes del inicio de cada experiencia, se caracterizaron las dos fracciones de sustratos empleadas en la codigestión, para lo cual se realizaron los siguientes análisis fisicoquímicos: pH, sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV), nitrógeno total Kjeldhal (NTK), proteínas, amonio, nitrógeno orgánico total, fósforo total (PT), demanda química de oxígeno (DQO), sustancias solubles en éter etílico (SSEE), arsénico (As), manganeso (Mn), hierro (Fe), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), cobre (Cu), cromo (Cr), cadmio (Cd), plomo (Pb), cobalto (Co), níquel (Ni). Además se realizaron los siguientes análisis bacteriológicos sobre el efluente de la instalación de ordeño: determinación de bacterias coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF), *Escherichia coli*, *Pseudomona aeruginosa*, bacterias lácticas y clostridios sulfito reductores.

#### Experiencia 1

Se utilizó una carga inicial de 500 L de material semisólido proveniente de una laguna anaeróbica de efluentes de tambo, el cual favorece el comienzo del proceso, asegurando de esta manera la presencia de los distintos tipos de bacterias necesarias para la codigestión anaeróbica. Al cabo de dos días se incorporaron cargas del residuo DAF (25 L cada 4 días), hasta llegar a 900 L. Uno de los principales parámetros de control fue la temperatura, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica; estos controles se realizaron diariamente en el reactor. En esta experiencia, se trabajó con un rango de temperatura mesofílica (rango óptimo entre 25 y 35°C) (Lagrange, 1979; Gavala *et al.*, 2003, Pages-Díaz *et al.*, 2013). La digestión mesofílica es más estable que la termofílica, ya que ésta es proclive a la acumulación de amoníaco y ácidos grasos volátiles, lo cual interrumpiría el proceso anaeróbico (Appels, *et al.*, 2008). A través del sistema de agitación, descrito anteriormente y de un controlador de temperatura, se garantizó que la misma sea homogénea en todo el digestor.

Se efectuaron controles periódicos del proceso realizando mediciones de pH y FOS/TAC. Este último parámetro establece la relación entre ácidos orgánicos volátiles (FOS) y carbonato inorgánico total (TAC) o capacidad de compensación alcalina y es un indicador del riesgo de acidificación de la planta de biogás. Tanto este parámetro como el pH, brindan información sobre el estado general del proceso, permitiendo actuar rápidamente ante un cambio de las condiciones y además, definir la alimentación adecuada.

A lo largo de la experiencia se efectuaron los siguientes análisis (en algunos casos cada 48 horas y otros cada 7 días): sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV), nitrógeno total (NTK), fósforo total (PT), sulfuros ( $S^{-2}$ ), demanda química de oxígeno (DQO), determinación de bacterias

coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF), *Escherichia coli*, bacterias lácticas y clostridios sulfitos reductores. La experiencia tuvo una duración de 48 días y fue interrumpida debido a fallas técnicas de la bomba de recirculación.

### Experiencia 2

En base a los resultados obtenidos se realizó una nueva experiencia donde se determinó la composición del biogás producido. En este caso, se comenzó con una carga inicial de 600 L de efluente proveniente de una laguna anaeróbica de un predio lechero. A partir de los 20 días de iniciado el proceso, con la flora microbiana estabilizada, se agregaron diariamente 20 L de fango DAF, hasta llegar a un volumen total de 900 L. Durante los agregados de residuos a tratar, y luego del llenado del reactor, se realizaron periódicamente mediciones de pH, temperatura y FOS/TAC. A lo largo de la experiencia se efectuaron los siguientes análisis de control: sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sulfuros ( $S^{-2}$ ), nitrógeno total (NTK), amonio ( $NH_4^+$ ), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total (PT), determinación de bacterias coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF), *Escherichia coli*, bacterias lácticas y clostridios sulfitos reductores.

A partir del agregado de los fangos DAF, se determinó diariamente la producción de biogás en forma cualitativa (por ignición) y se determinó su composición utilizando un medidor modelo Eagle 2 de la marca RKI Instruments, el cual permite analizar simultáneamente los porcentajes de metano ( $CH_4$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) presentes en el mismo. La experiencia tuvo una duración de 50 días.

La metodología utilizada para todos los análisis de efluentes mencionados anteriormente corresponde a la propuesta por APHA (2012).

## **Resultados y discusión**

### Caracterización de sustratos

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la caracterización del residuo proveniente del tratamiento DAF y del efluente de tambo utilizados en las experiencias. El fango DAF posee un pH levemente ácido, un elevado contenido de humedad, con un 83.6 y 89.1 % de sólidos volátiles respecto de la muestra seca en las experiencias 1 y 2, respectivamente. Estos elevados valores se pueden correlacionar con el contenido de materia orgánica presente en el mencionado sustrato. Analizando los resultados de los residuos de predio lechero se observa que el pH es cercano a la neutralidad. El contenido de humedad es superior al del fango DAF, mientras que los sólidos volátiles corresponden al 39.7 y 36.6 % de la materia seca, respectivamente. El contenido de PT, NTK, proteínas y sustancias solubles en éter etílico es superior en el fango DAF respecto al efluente de tambo debido a que el tratamiento de flotación concentra sólidos con gran contenido de grasas, contribuyendo además en la remoción de fósforo y nitrógeno.

**Tabla 1.** Resultados de análisis de Fangos DAF y Efluente de tambo utilizados en las experiencias.

PARÁMETRO	Experiencia 1		Experiencia 2	
	Fango DAF	Efluente de tambo	Fango DAF	Efluente de tambo
pH	6.29	7.18	6.32	7.11
Humedad	88.3 (g/100 g)	94.2 (g/100 mL)	90.6 (g/100 g)	94.7 (g/100 mL)
Sólidos totales	11.7 (g/100 g)	5.8 (g/100 mL)	9.4 (g/100 g)	5.3 (g/100 mL)
Sólidos totales volátiles	83.6 (g/100 g muestra seca)	2.3 (g/100 mL)	89.1 (g/100 g muestra seca)	1.9 (g/100 mL)
Nitrógeno total (mg N/L)	4202.8	931.0	4193	1267
Proteínas (%)	2.7	0.6	2.7	0.8
Amonio (mg N/L)	-	-	744.8	705.6
Nitrógeno orgánico total (mg N/L)	-	-	3448.2	561.4
Fósforo total (mg/L)	599.6	94.6	333.3	112.1
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	59522	22688	64574	24753
Sustancias solubles éter etílico (g/L)	10.9	0.17	15.8	0.26
Arsénico	2.30 µg/Kg	0.34 mg/L	1.60 µg/Kg	0.30 mg/L
Manganeso	1.6 mg/Kg	12 mg/L	ND (3) mg/Kg	2.0 mg/L
Hierro	58 mg/Kg	385 mg/L	98 mg/Kg	158 mg/L
Calcio	3627 mg/Kg	293 mg/L	4579 mg/Kg	130 mg/L
Magnesio	690 mg/Kg	132 mg/L	231 mg/Kg	68 mg/L
Potasio	603 mg/Kg	724 mg/L	340 mg/Kg	617 mg/L
Sodio	1158 mg/Kg	594 mg/L	816 mg/Kg	948 mg/L
Cobre	ND (1) mg/Kg	8.6 mg/L	ND (2) mg/Kg	ND (0.1) mg/L

En cuanto a los metales, se observa una importante variación en la concentración de los mismos comparando los resultados de ambos sustratos. Los contenidos promedio de calcio y magnesio son superiores en el fango DAF, lo cual se podría deber fundamentalmente a la presencia de los mismos en los procesos productivos de la industria láctea. En cambio en el efluente de tambo las concentraciones de potasio, manganeso e hierro son superiores a las del fango DAF. La presencia de potasio se debe a la gran concentración del mismo en estiércol y orina de los animales. En lo que respecta a las concentraciones de cromo, plomo, cadmio, cobalto y níquel, las mismas se encuentran por debajo del límite de detección del método empleado, por lo tanto no se han incluido en la Tabla 1. En el caso del cobre, no se detecta su presencia en la muestra DAF, encontrándose una concentración de 8.6 mg Cu/Kg en el efluente de tambo en la Experiencia 1,

esto podría deberse a la ingesta por parte de los bovinos de forrajes y suplementos dietarios conteniendo este elemento.

Con respecto al análisis bacteriológico, el efluente inicial de tambo posee  $4.1 \times 10^{11}$  UFC/mL y  $1 \times 10^9$  UFC/mL de bacterias lácticas en las experiencias 1 y 2, respectivamente. En ambos casos, tanto para las bacterias coliformes totales como las fecales, se presenta un valor de  $4.6 \times 10^{12}$  NMP/100 ml, como así también presencia de *Escherichia coli* y *Pseudomona aeruginosa*. En la segunda experiencia, se encuentra un contenido de  $7 \times 10^7$  mo/mL de clostridios sulfito reductores.

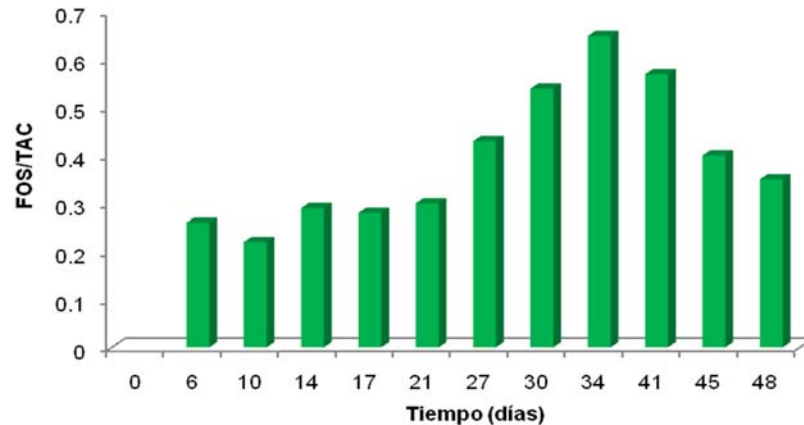
### Experiencia 1

En esta experiencia, se trabajó con un rango de temperatura mesofílica, iniciándose el proceso a 25 °C, y llegando en forma gradual a una temperatura máxima de 34 °C. Para garantizar una temperatura homogénea se ha contado con un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura. Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. En general, las especies mesófilas superan en número a las termofílicas, siendo además más tolerantes a los cambios en las condiciones ambientales (Nghiem, *et al.*, 2017). A medida que aumenta la temperatura, también lo hace la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás (Lagrange, 1979, Gavala *et al.*, 2003, Pages-Díaz *et al.*, 2013).

Los valores de pH medidos en el líquido sobrenadante a lo largo de la experiencia oscilaron entre 7.02 y 7.50, con un promedio de 7.23. Manteniendo el pH cercano a la neutralidad no sólo se favorece el desarrollo de las microorganismos metanogénicos y acidogénicos sino que se evita la intoxicación por amonio (Chen *et al.*, 2008).

Si bien el pH es un indicador del desarrollo del proceso, la relación FOS/TAC constituye una determinación más efectiva ya que es una medida del riesgo de acidificación de la planta de biogás. Esta relación brinda información temprana de la evolución de la digestión y permite tomar medidas preventivas. Por lo tanto, controlando periódicamente este parámetro se obtiene información de cómo se desarrolla el proceso, y además, permite remediar el problema antes de que ocurra una situación irreversible (Voß E, *et al.* 2009). Valores comprendidos entre 0.3 y 0.4 indican que la producción de biogás es máxima y se debe mantener constante la entrada de biomasa (Fango DAF). Valores menores indican que se debe aumentar la cantidad de biomasa y valores elevados indican que hay excesiva cantidad de la misma por lo que se debería incorporar microorganismos a través del agregado de efluente de tambo. Si bien los valores obtenidos fueron variables a lo largo del ensayo, en una primera etapa estuvieron por debajo del rango ideal (menor a 0.3) (Figura 2). Luego de sucesivos agregados de fango DAF, la relación FOS/TAC

comienza a aumentar, llegando a un valor de 0.65, que puede relacionarse con caída de la carga bacteriana, ya que se encontraron valores de coliformes totales y fecales al inicio de  $4.6 \times 10^{12}$  NMP/100 mL, mientras que a los 34 días fue de  $1.3 \times 10^6$  NMP/100 mL. La estabilización del sistema se logra a los 45 días de iniciada la experiencia con agregado de efluente de tambo.

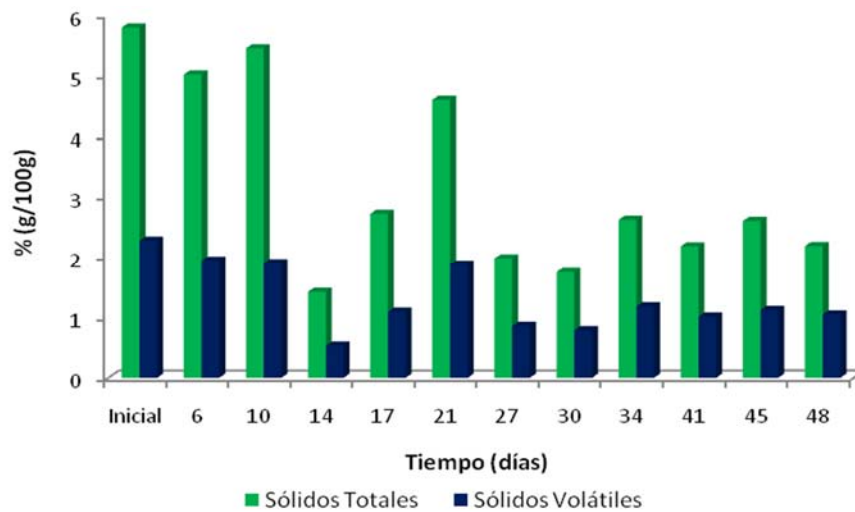


**Figura 2.** Resultados de relación FOS/TAC obtenidos en el líquido tratado a lo largo de la experiencia.

El porcentaje de sólidos totales contenidos en la carga del digestor es un factor importante para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas (Lagrange, 1979). Es aconsejable mantener la concentración de sólidos totales dentro del biodigestor entre 6-10 %. En la experiencia, se buscó que el contenido de ST y SV se encuentre en este rango, por lo que a partir de la caracterización inicial se realiza la alimentación del fango con una cantidad suficiente de agua para lograr la cantidad de sólidos requerida.

En la Figura 3 se muestran las concentraciones halladas de sólidos totales y sólidos volátiles a lo largo de la experiencia. Como se observa, las concentraciones iniciales fueron elevadas y en general, disminuyeron con el transcurso del tiempo. El día 14 se produce un descenso brusco de las mismas, debido a la necesidad de realizar un filtrado por la presencia de sólidos gruesos que obstruían la línea de recirculación. El día 21 y debido al bajo valor de FOS/TAC obtenido se realiza un nuevo agregado de fango DAF, lo que provoca un aumento en el volumen de sólidos presentes. La relación entre SV y ST se mantuvo constante en un valor promedio de 41.7 %, dato que relaciona la cantidad de materia orgánica con respecto al contenido total de sólidos. La correlación de Pearson encontrada entre SV y ST es positiva ( $r = 0,985$ ).

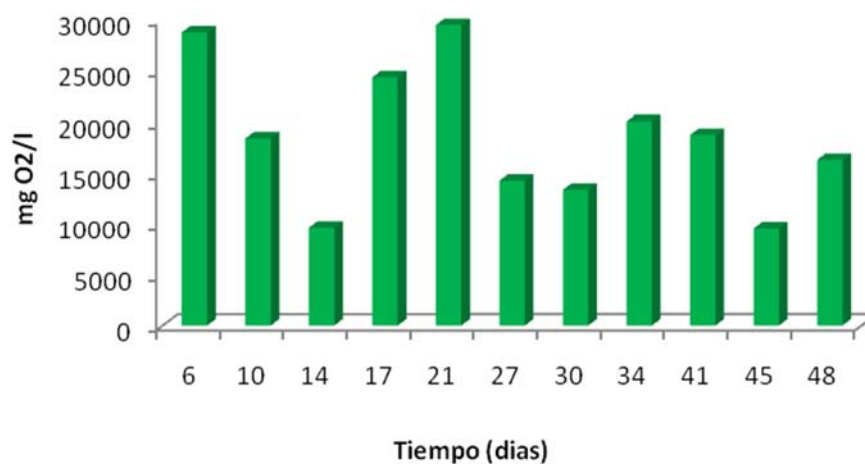




**Figura 3.** Resultados de ST y SV obtenidos en el líquido tratado a lo largo de la experiencia.

Las concentraciones de nitrógeno total oscilaron entre 800 y 1000 mg N/L a lo largo de la experiencia, lo cual estuvo correlacionado con los agregados de los sustratos y el proceso de descomposición sucedido.

Los valores de DQO obtenidos en el líquido muestreado durante la experiencia fueron muy variables, encontrándose entre 29523 y 9585 mg O<sub>2</sub>/L (Figura 4). Las fluctuaciones están relacionadas con la incorporación del sustrato y el uso de la materia orgánica biodegradable para el crecimiento de las bacterias.



**Figura 4.** Resultados de DQO obtenidos en el líquido tratado a lo largo de la experiencia.

En los reactores anaeróbicos, el sulfato, componente común de muchas aguas residuales industriales, se reduce a sulfuro por las bacterias reductoras de sulfato (Koster *et al.*, 1986, Hilton y Oleszkiewicz, 1988, Chen, *et al.* 2008). Al analizar los datos de sulfuros obtenidos durante la experiencia se obtuvo una importante variabilidad, encontrándose concentraciones entre 40 y 150 mg S<sup>-2</sup>/L. La presencia de dicho ion se debe a las condiciones de anaerobiosis existentes en el líquido digerido y a la presencia de bacterias sulfito reductoras. Los resultados de bacterias clostridios sulfitos reductoras también fueron variables, las mismas oscilaron entre 1.1 x 10<sup>5</sup> y 1.5 x 10<sup>7</sup> mo/mL. El descenso producido a los 14 días se debe al filtrado explicado anteriormente, mientras que la disminución de los valores al final de la experiencia, son consecuencia de la disminución de la actividad microbiana.

En cuanto a la obtención de biogás, se observó abundante producción hasta el día 14, donde se filtró el líquido, según lo explicado anteriormente. Este hecho produjo la incorporación de oxígeno, lo que perjudicó el crecimiento de las bacterias y en consecuencia, la eficiencia del tratamiento. A partir de ese momento, la producción de biogás comenzó a verse limitada y a disminuir su capacidad combustible.

La primera experiencia de codigestión utilizando el reactor a escala piloto permitió realizar ajustes tanto en el equipo como en la manipulación de muestras a digerir. Se logró una evolución favorable de los parámetros estudiados durante el funcionamiento del biorreactor, y de esta forma se optimizó el proceso de codigestión. Se pudo comprobar cualitativamente la producción de biogás.

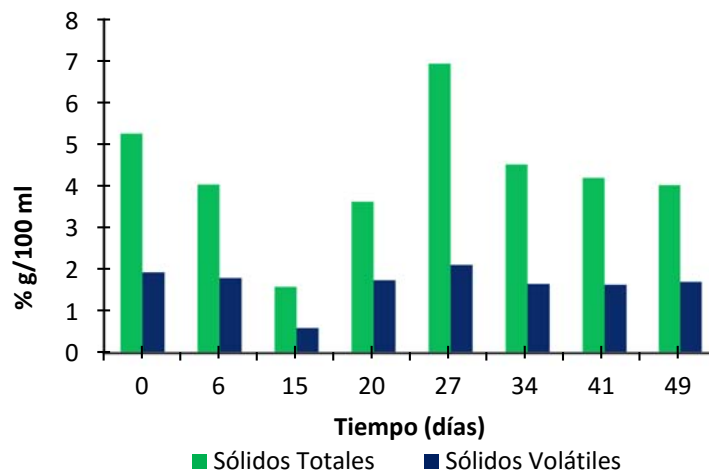
### Experiencia 2

La temperatura al inicio fue de 22 °C y se realizó un incremento gradual de la misma hasta alcanzar 30 °C, con el objetivo de lograr la adaptación de la microflora bacteriana. Luego, se mantuvo la temperatura mesofílica constante ya que las variaciones bruscas de la misma podrían producir la desestabilización del proceso.

Las mediciones de pH en el sobrenadante oscilaron en valores cercanos a la neutralidad, con un promedio de 7.2. La relación FOS/TAC, como se definió anteriormente, es una medida del riesgo de acidificación de la planta de biogás. En una primera etapa los valores estuvieron por debajo del rango ideal, pero luego de sucesivos agregados de fango DAF, ascendieron llegando a una relación de 0.42. El valor de FOS/TAC se estabilizó en el rango deseado, hasta el final de la experiencia.

En la Figura 5, se presentan las concentraciones halladas de sólidos totales y sólidos volátiles a lo largo de la experiencia. Como se observa, las concentraciones iniciales fueron elevadas, esto se debe a la carga inicial de 600 litros de efluente de tambo, como fuente de bacterias anaeróbicas y disminuyeron con el transcurso del tiempo ya que el biodigestor no fue alimentado por un

periodo de 20 días. El día 23, se realizó una nueva carga con el mencionado efluente de tambo y el día 25 se suministró efluente DAF. Esto explica que a los 27 días de iniciada la experiencia se produzca un ascenso en ambos parámetros. El promedio de ST obtenidos a lo largo de la experiencia fue de 4.3 %, mientras que el de SV fue de 1.7 %. La relación entre SV y ST se mantuvo constante con un valor promedio de 39.5%, similar a lo encontrado en la experiencia 1. En esta oportunidad, la correlación de Pearson entre ambos parámetros es positiva ( $r = 0.883$ ).



**Figura 5.** Resultados de sólidos totales y volátiles obtenidos en el líquido tratado a lo largo de la experiencia

Las concentraciones de nitrógeno total y amonio oscilaron a lo largo del trabajo, inicialmente se incorporó únicamente efluente de tambo con una concentración de NTK de 1267 mg N/L. Este valor sufrió un gran incremento luego del agregado del fango DAF (40 L) a los 25 días de iniciada la experiencia, llegando a valores de 4386 mg N/L a los 27 días. Luego se observaron concentraciones variables dependiendo de los correspondientes agregados de sustratos. Con respecto a las concentraciones de amonio, las mismas oscilaron entre 50 y 80 %, respecto al NTK, con un promedio de 65 % (Figura 6). Existe una correlación positiva entre las concentraciones de ambos parámetros con un coeficiente de Pearson,  $r = 0.989$ . En cuanto al nitrógeno orgánico (expresado como diferencia entre NTK y amonio) los porcentajes siempre fueron menores al contenido de amonio, con un promedio del 35 % respecto al total.

Al analizar los datos de sulfuros obtenidos durante la experiencia se obtuvo una importante variabilidad, encontrándose concentraciones entre 58 y 105 mg  $S^{-2}$ /L. Tal como se expresó anteriormente, la presencia de dicho ion se debe a las condiciones de anaerobiosis y a la presencia de bacterias sulfitos reductoras. La concentración inicial de dichas bacterias fue de  $7 \times 10^7$  mo/mL, disminuyendo a  $2,4 \times 10^6$  mo/mL al finalizar la experiencia.

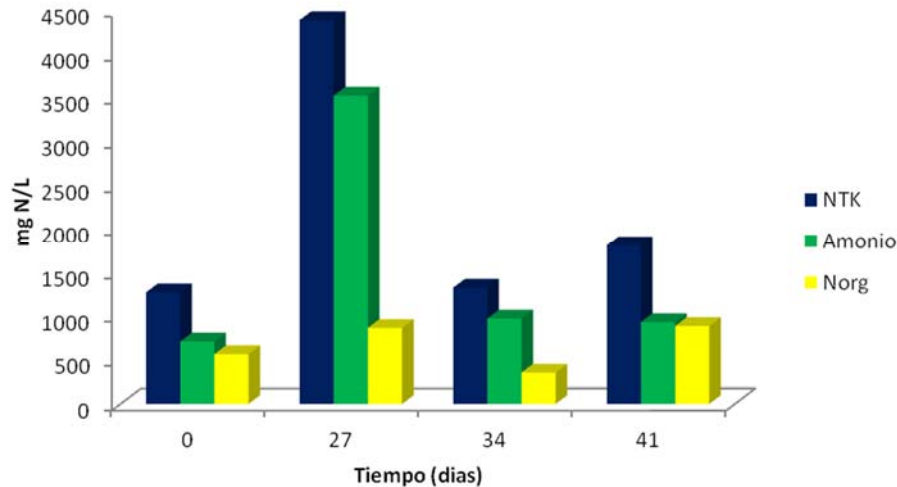
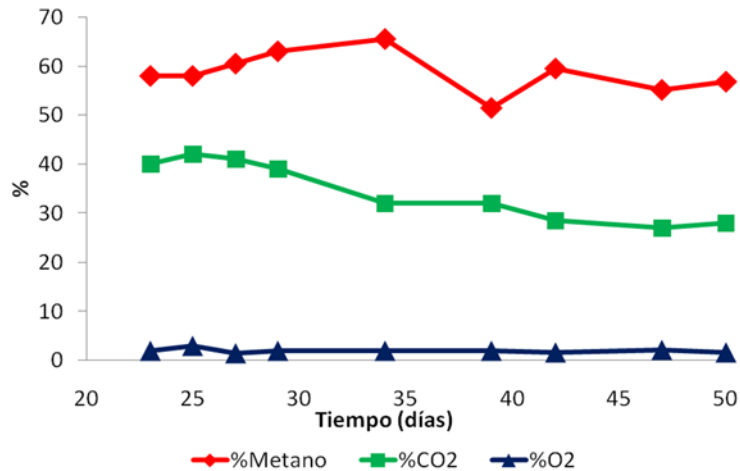


Figura 6. Resultados de NTK, Amonio y Norg obtenidos en el líquido tratado

En cuanto al análisis bacteriológico se encontraron valores de coliformes totales y fecales al inicio del orden de  $10^{12}$  NMP/100 mL, los cuales oscilaron entre este valor y  $10^9$  NMP/100 mL a lo largo de la experiencia. En todos los análisis realizados se detectó presencia de *E. coli* y ausencia de *P. aeuroginosa*.

Los valores de DQO obtenidos en el líquido muestreado durante la experiencia fueron muy variables, encontrándose entre 11429 y 28517 mg O<sub>2</sub>/L. Como en la primera experiencia, estas fluctuaciones están relacionadas tanto con la incorporación del sustrato como con el uso de la materia orgánica biodegradable para el crecimiento de las bacterias.

Diversos autores han propuesto composiciones de biogás de: 50-70 % el metano (CH<sub>4</sub>), 25-45% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 2-7 % de agua (H<sub>2</sub>O), 2-5 % de nitrógeno (N<sub>2</sub>), 0-2 % de oxígeno (O<sub>2</sub>), menos de 1 % hidrógeno (H<sub>2</sub>), 0-1 % de amoníaco (NH<sub>3</sub>), y 0-6000 ppm de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) (Edelmann, 2001, Deublein y Steinhauser, 2008). Se observó abundante producción de gas combustible a lo largo de toda la experiencia, compuesto por metano (promedio 58.7 %) dióxido de carbono (promedio 34.4 %) y oxígeno (promedio 2.0 %) tal como se observa en la Figura 7. Por lo tanto, se pudo corroborar que parte de la composición del biogás obtenido se encuentra en el rango citado en bibliografía. El equipo empleado no efectúa la medición de gases tales como amoníaco, hidrógeno y sulfhídrico, los cuales estarían incluidos en el porcentaje faltante en cada caso (promedio 4.9 %).



**Figura 7.** Composición del biogás generado a lo largo de la experiencia a escala piloto

### Conclusiones

A través de las experiencias desarrolladas, se pudo comprobar la factibilidad de aplicar un tratamiento anaeróbico de codigestión para el tratamiento de efluentes de proceso DAF de industria láctea, utilizando como sustrato principal un efluente de tambo.

Además, se pudo verificar, la producción de biogás con buenos porcentajes de gas metano, el cual podría ser aprovechado como fuente de energía en la misma empresa láctea o en los predios lecheros.

La primera experiencia de codigestión, utilizando el reactor a escala piloto, permitió realizar ajustes tanto en el equipo como en la manipulación de muestras a digerir, resultando de gran importancia para el diseño y la diagramación de la segunda experiencia.

La temperatura mesofílica y la agitación constante son factores relevantes para lograr una digestión adecuada y como consecuencia obtener una apropiada producción de biogás.

También se concluye, la importancia de realizar un control periódico de pH, temperatura, FOS/TAC y recuento bacteriano, ya que permiten detectar en forma temprana cualquier variación que se produzca durante la digestión y realizar los ajustes que sean necesarios.

El valor de pH en las experiencias, se encuentra dentro del rango óptimo, por lo tanto, se concluye que no se ha producido acidificación resultando adecuado para el desarrollo de las bacterias metanogénicas.

**Agradecimientos.** *Los autores agradecen a la Secretaría de Estado de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Provincia de Santa Fe, a la Universidad Tecnológica Nacional y a la Empresa Sucesores de A. Williner por el apoyo económico para la ejecución del Proyecto.*

### Referencias bibliográficas

- Albertson, M.L, Pruden, A., Oliver, R.T. (2006). Enhanced anaerobic digestion of biomass waste for optimized production of renewable energy and solids for compost. *Int. Congress Series*, **1293**, 221-229.
- Angelidaki, I., Ellegaard, L. (2003). Codigestions of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. **109**, 95-105.
- APHA (2012). "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater". 20th Edition. American Public Health Assoc., N. York.
- Appels, L., Baeyens, J., Degre`ve, J., Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, *Progress in Energy and Combustion Science*, **34** (6) 755-781.
- Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S. (2008) Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, **99**, 4044-4064.
- Deublein D., Steinhauser A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim. 443 pp.
- Di Maria, F., Sordi, A., Cirulli, G., Gigliotti, G., Massaccesi, L., Cucina, M. (2014). Cotreatment of fruit and vegetable waste in sludge digesters. An analysis of the relationship among bio-methane generation, process stability and digestate phytotoxicity. *Waste Manage.*, **34**, 1603-1608.
- Edelmann W. Biogas production and usage. (2001) In: Kaltschmitt M, Hartmann H, editors. Energy from biomass: basic principles, technologies and process. Leipzig, Germany: Springer.
- Gavala, H.N., Yenal, U., Skiadas, I.V., Westermann, P., Ahring, B.K. (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge: effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Research*, **37** (19), 4561-4572.
- Hilton, B.L., Oleszkiewicz, J.A. (1988). Sulphide-induced inhibition of anaerobic digestion. *J. Environ. Eng.*, **114**, 1377-1391.
- Koster, I.W., Rinzema, A., De Vegt, A.L., Lettinga, G. (1986). Sulfide inhibition of the methanogenic activity of granular sludge at various pH levels. *Water Res.*, **20**, 1561-1567.
- Lagrange, B. (1979). Biomethane. Principles, Techniques, Utilisation. Vol.2. Edisual / Energies Alternatives. 249pp.
- Mantovi, P., Fabbri, C., Soldano, M., Piccinini, S. (2010). Effect of solid/liquid separations on raw and digested slurries. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Ramiran Conference*.
- Morris, D.R., Lathwell, D.J. (2004). Anaerobically digested dairy manure as fertilizer for maize in acid and alkaline soils. *Commun. Soil Sci. Plan.*, **35**, 1757-1771.
- Nghiem, L.D., Hai, F.I., Price, W.E., Wickham, R., Ngo, H.H., Guo, W. (2017). Chapter 18: By-products of Anaerobic Treatment: Methane and Digestate From Manures and Cosubstrates. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering Biological Treatment of Industrial Effluents*. Edited by: Duu-Jong Lee, Veeriah Jegatheesan, Hao Huu Ngo, Patrick C. Hallenbeck and Ashok Pandey. 469-484.
- Nosetti, L., Herrero, M.A., Pol, M., Maldonado May, V., Korol, S., Rossi, S., Gemini, V., Flores, M. (2002) Cuantificación y caracterización de agua y efluentes en establecimientos lecheros II. Calidad de efluentes y eficiencia de los procesos de tratamiento, *In Vet.*, **4**(1): 45-54 ISSN: 1514-6634.
- Pages-Diaz, J., Sarvari, J., Perez, J., Pereda, I. (2013) Co-digestion of bovine slaughterhouse wastes, cow manure, various crops and municipal solid waste at thermophilic conditions: a comparison with specific case running at mesophilic conditions. *Water Sci Technol*, **67**, 989-995.

- Rodríguez, A., Quiroz, G., Femat, R., Méndez-Acosta H.O., León, J. (2015). An adaptive observer for operation monitoring of anaerobic digestion wastewater treatment. *Chem. Eng. J.*, **269**, 186-193.
- Tiwary, A., Williams, I.D., Pant, D.C., Kishore, V.V.N. (2015). Emerging perspectives on environmental burden minimisation initiatives from anaerobic digestion technologies for community scale biomass valorization. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **42**, 883-901.
- Voß, E., Weichgrebe, D., Rosenwinkel, K.H. (2009), FOS/TAC-Deduction, Methods, Application and Significance, Internationale Wissenschaftskonferenz. *Biogas Science– science meets practice*, LfL-Bayern, 2-4. 12.09, Erding.