

Uso de proceso micro aireación para reducir concentración de H₂S en biodigestores tubulares de geomembrana

Artículo largo



Hugo Torres Trujillo; Maxence Affre; Thomas Guerin Calmettes; Alexander Bennet Eaton

Laboratorio y taller de investigación y desarrollo de Sistema.bio

*max@sistema.bio

Resumen

Se investigó el impacto de la micro aireación sobre la concentración de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en biodigestores flexibles alimentados con estiércol de vaca y cerdo. Se realizaron las siguientes tres pruebas:

La primera permitió identificar una relación óptima de inyección de aire para minimizar la concentración de H₂S en biodigestores alimentados con estiércol de vaca y de cerdo en proporción volumétrica de aire inyectado de 5 y 8 %, respectivamente, sobre producción de biogás.

La segunda ayudó a cuantificar el impacto de la micro aireación en la concentración de H₂S durante 30 días de pruebas. La fermentación del estiércol de vaca y de cerdo resultó en una disminución respectiva del 94 y del 88 % en la concentración de H₂S.

La tercera reveló que incluso con inyección constante de aire, el sistema no alcanzó el nivel de explosivo bajo (LEL) en el digestor durante cuatro días de inyección continua.

Palabras clave:

Biogás; Digestión anaerobia; Micro aireación; Sulfuro de hidrógeno.

Use of micro aeration to reduce the H₂S concentration in geomembrane tubular biodigesters

Abstract

This study investigated the impact of micro aeration on the hydrogen sulfide (H₂S) concentration in flexible digesters fed with cow and pig dung. Three different series of tests were ran:

The first test identified an optimal air injection ratio to minimize H₂S concentration within bio digesters fed with cow and pig dung: respectively at 5 and 8 % of air to biogas production volume ratio.

The second test quantified micro aeration impact on H₂S concentration over 30 days. The fermentation of cow and pig dung under micro aeration conditions resulted in a decrease of the H₂S concentration of 94 % and 88 %, respectively.

The third test revealed that even with continuous air injection, the system did not reach the Low Explosive Level (LEL) in the digester during 4 days of continuous injection.

Keywords:

Biogas; Anaerobic digestion; Micro aeration; Hydrogen sulfide.

Forma de citar: Torres Trujillo, H., Affre, M., Guerin Calmettes, T., y Bennet Eaton, A. (2021). Uso de proceso micro aireación para reducir concentración de H₂S en biodigestores tubulares de geomembrana. Red BioLAC, 5, 35-40.

Introducción

La fermentación anaeróbica (FA) es un proceso bioquímico bien conocido por ser efectivo para la conversión de materia orgánica en metano (CH₄), el cual es un subproducto de la FA que puede ser usado como combustible para producir energía térmica, mecánica o eléctrica. La FA es entonces una tecnología ambiental que a corto plazo reduce la contaminación y la emisión de gases de efecto invernadero (Lim & Wang, 2013).

El término micro aireación se define como la adición de pequeñas cantidades de oxígeno dentro de una (FA) para lograr procesos aeróbicos y anaeróbicos dentro de un mismo biodigestor. Se sabe que la presencia de oxígeno puede detener el metabolismo de la metanogénesis, puesto que se trata de bacterias anaeróbicas estrictas. Sin embargo, existe también evidencia del aumento en la concentración del metano obtenido de una FA cuando se trata de cierta materia orgánica en presencia de pequeñas cantidades de oxígeno (Botheju & Bakke, 2011).

La micro aireación impacta en diferentes etapas, a los cuatro pasos de la FA, al producir precursores de los siguientes pasos de fermentación (Batstone *et al.*, 2002), además de permitir que el carbono (C) disuelto se convierta fácilmente en dióxido de carbono (CO₂). También se ha mostrado en la hidrólisis que la velocidad de conversión limita en gran medida la conversión final a CH₄ en el proceso metanogénico (Botheju *et al.*, 2010). La degradación anaeróbica de la materia orgánica¹ que contiene azufre y la presencia de sulfatos en los residuos orgánicos, genera uno de los principales contaminantes del biogás: el sulfuro de hidrógeno (H₂S). El H₂S que se genera dentro del biodigestor comúnmente representa un peligro para la salud, emite malos olores y es precursor de ácidos corrosivos que deterioran equipos e instrumentos féreos y cupríferos al entrar en contacto con este (Noyola *et al.*, 2006).

Diferentes métodos de remoción de H₂S pueden ser utilizados, los más comunes son los filtros de carbón activado o enriquecidos en óxidos de fierro y la adición de compuestos químicos en los lodos en la entrada del reactor, esto aumenta los gastos adicionales a los costos de

operación de un biodigestor (Bordeleau & Droste, 2011; Tartakovsky *et al.*, 2011). Últimamente, varios estudios presentaron evidencias de que la micro aireación puede ayudar a disminuir significativamente la presencia de H₂S; en comparación con otros métodos, además esta requiere de poca inversión y se integra fácilmente con sistemas ya instalados.

Metodología

Material experimental

Biodigestores: Se seleccionaron diferentes tamaños de biodigestores, alimentados con estiércol de ganado bovino o porcino. La producción promedio diaria de biogás de los sistemas seleccionados está presentada en la **Tabla 1**, los valores presentados en esta son parte del catálogo de Sistema.bio¹. Los biodigestores estudiados se instalaron en clima templado con una temperatura promedio diaria entre 14 y 18 °C.

Bomba de aire: Se usó una mini bomba de diafragma plástico modelo R385 de marca genérica, con un voltaje de trabajo de 12VDC, un consumo de 5Wh y un caudal de 2 L min⁻¹. El caudal de aire teórico suministrado por la bomba fue confirmado por medición con un caudalímetro mecánico. La bomba tiene una válvula antirretorno integrada para evitar que el biogás se escape a través de esta y está programada para repetir ciclos ON/OFF e inyectar exactamente el volumen de aire requerido.

Manguera: Para estas pruebas, la bomba se conectó con el biodigestor a través de una manguera de PVC flexible, con un diámetro de ¼ pulgadas y esta se conectó en la brida de salida de biogás del reactor.

Medidor de H₂S: Se utilizó un analizador de composición de biogás “GAS DATA LTD” modelo GFM 416 (GFM SERIES). Este equipo permitió medir la composición del biogás con los siguientes parámetros: CH₄, el porcentaje de LEL, el O₂ (rango de medición de 0 hasta 100 % con precisión de ±1 %) y H₂S en ppm (rango de medición de 0 hasta 5000 ppm con precisión de ±5ppm).

Tabla 1 | Modelos Experimentales de trabajo.

Biodigestor	Volumen total del biodigestor (m ³)	Tipo de desecho	Producción diaria de biogás (m ³)
a.	16	Bovino	3,6 m ³
b.	30	Porcino	7,9 m ³
c.	20	Bovino	4,8 m ³
d.	40	Bovino	9,6 m ³

¹ Liga del catálogo: recursos descargables – Catálogo México: https://sistema.bio/wp-content/uploads/2021.02_MEXICO_CATALOGO_LQ.pdf

Disposición experimental

Para este estudio se llevaron a cabo tres pruebas diferentes.

i. Prueba i: Búsqueda de la cantidad óptima de aire a inyectar

Esta prueba de corto plazo (6 días) tuvo como propósito identificar la cantidad óptima de aire para disminuir la concentración de H_2S con desechos bovinos y desechos porcinos. Por esta razón, se inyectaron diferentes cantidades de aire en dos biodigestores:

- **biodigestor a:** biodigestor tipo *tubular* de 16 m³ con desechos bovinos.
- **biodigestor b:** biodigestor tipo *tubular* de 30 m³ con desechos porcinos.

Durante 6 días consecutivos a cada biodigestor se inyectó la misma cantidad diaria de aire. Se midió la concentración de H_2S (ppm) el día 0 (estado inicial sin micro aireación) y una vez al final de cada uno de los siguientes 6 días. Entre cada serie de prueba y antes de un cambio de inyección de aire, los sistemas se dejaron descansar durante aproximadamente 10 días para que el H_2S del biogás se recuperara. La **Tabla 2** presenta las cantidades de aire inyectadas en cada serie de 6 días para cada uno de los dos digestores seleccionados.

Estas cantidades se presentan en litros por día y el porcentaje de volumen de aire inyectado en el cielo gaseoso sobre el volumen de biogás teórico producido diario (V. aire inyectado / V. biogás producido).

Tabla 2 | Prueba i - cantidades de aire inyectadas durante tres pruebas distintas con los biodigestores a y b.

Prueba, serie n° (6 días de inyección)	Biodigestor	Porcentaje de aire inyectado (v aire inyectado / v biogás producido)	Aire inyectado diario (L/d)	Tiempo de funcionamiento diario de la bomba (minutos)
i. Serie 1	a	2 %	72	36
	b	4 %	316	158
i. Serie 2	a	4 %	144	72
	b	6 %	632	316
i. Serie 3	a	5 %	216	108
	b	8 %	948	574

ii. Prueba ii - Monitoreo de impacto de la inyección de aire en la concentración en CH_4 y H_2S durante 30 días seguidos.

En esta prueba se inyectó una cantidad continua de aire en los reactores a, b, c y d durante 30 días consecutivos (referirse a la **Tabla 1** para revisar las características de los biodigestores). Se inyectó diariamente el porcentaje (V. aire inyectado / V. biogás producido) de aire óptimo encontrado en la prueba (i), es decir, 5 % para los digestores con desechos bovinos (a, c, y d) y 8 % para los digestores con desechos porcinos (b). Cada 5 días se midió la concentración de CH_4 y H_2S en el biogás producido por cada uno de los cuatro reactores.

iii. Prueba iii - de seguridad con caso extremo de inyección continua de aire

El propósito de esta prueba fue cuantificar el riesgo de explosión debido a la inyección de aire, en el caso extremo, que la bomba funcionara 24/7, por una falla de la programación de los ciclos intermitentes (ON/OFF). En efecto, la mezcla de aire con CH_4 puede representar un riesgo de explosión en ciertas proporciones. Durante un periodo de 96 horas, continuamente, se inyectó aire con una bomba de caudal 2L min⁻¹ en el reactor c de 20 m³ y se monitoreó la concentración en oxígeno (O_2) y el porcentaje del LEL.

Análisis de composición de biogás

En cada una de las tres pruebas se analizó la composición del biogás con un enfoque en el CH_4 , el H_2S y el O_2 . Por tal motivo, siempre se usó el mismo equipo: el analizador de composición de biogás “GAS DATA LTD” modelo GFM 416 (GFM SERIES).

Resultados y discusión

Prueba i - Búsqueda de la cantidad óptima de aire a inyectar para minimizar H_2S

En esta prueba se midió diariamente la concentración de H_2S en una serie de 6 días de inyección. En las pruebas, el día 0 representa la concentración en H_2S sin micro aireación como línea base, lo cuales fueron en promedio:

- 1110 ppm H_2S en el biodigestor (a) con desechos bovinos;
- 2210 ppm H_2S en el biodigestor (b) con desechos porcinos.

Para calcular el % de disminución de la concentración de H_2S se midió la diferencia de concentración de H_2S entre el día 0 y el día correspondiente, además se buscó la cantidad de aire óptima a inyectar, es decir, la cantidad de aire que permite lograr la disminución mayor en H_2S en menor tiempo.

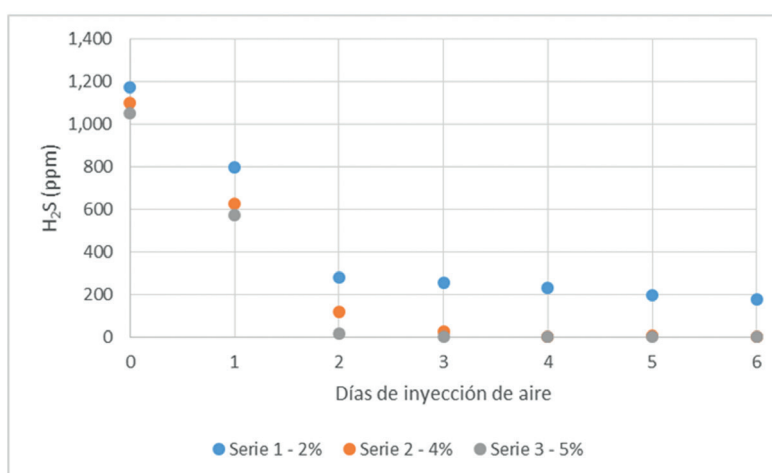


Figura 1 | Impacto de micro aireación sobre concentración de H_2S con diferentes volúmenes de aire en biodigestor (a).

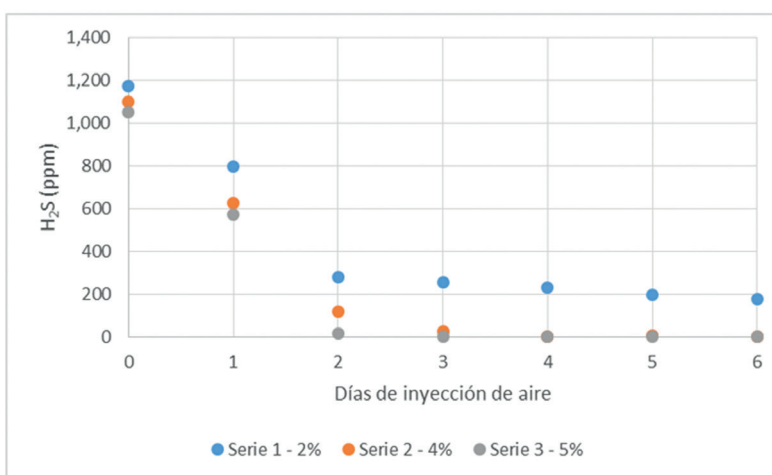


Figura 2 | Impacto de micro aireación sobre concentración de H_2S con diferentes volúmenes de aire en biodigestor (b).

En el caso bovino, la serie 1 se inició con una concentración en H_2S de 1175 ppm, la serie 2 con una concentración en H_2S de 1100 ppm y la serie 3 con una concentración en H_2S de 1050 ppm. Como se puede observar en el **Figura 1**, la micro aireación disminuyó la concentración de H_2S para las tres series de pruebas. Además, la concentración de H_2S alcanzó un valor estable dos días después de empezar la micro aireación y es más eficiente cuando se aumenta el volumen de aire inyectado. Se logró una reducción de H_2S cercana al 100 % (H_2S no detectado) después de cuatro días de inyección seguida, con un volumen inyectado de 4 % de aire: producción de biogás, y dos días con 5 %. Entre estas dos tasas, se eligió la tasa de 5 % como tasa óptima por su rápido impacto sobre la disminución de la concentración en H_2S .

En el caso porcino la serie 1 inició con una concentración en H_2S de 1950 ppm, la serie 2 con una concentración en H_2S de 2450 ppm y la 3 con una concentración en H_2S

de 2235 ppm. Como se observa en el **Figura 2**, la micro aireación disminuyó la concentración de H_2S presente en el biodigestor en los tres casos. También se observó que la cantidad de H_2S disminuyó entre 18 y 28 % a partir del día uno y la reducción en H_2S fue mayor cuando el volumen de aire inyectado aumentó. Se logró una disminución de H_2S de 91 % a partir del día tres de inyección, con un volumen inyectado según la tasa de 8 %. Teóricamente, se podría lograr una disminución superior a 91 % con tasas de inyección mayores (las que se considera que se deben probar en futuros proyectos de investigación), pero en estas pruebas, arbitrariamente, se consideró 8 % como valor para limitar el efecto de dilución del valor calorífico del biogás con el N_2 aportado en el aire inyectado.

Se podría mejorar la remoción del H_2S en el proceso de micro aireación inyectando el aire en el lado opuesto de la salida de biogás. Esto permitiría optimizar el tiempo de contacto del aire dentro del volumen gaseoso de biogás.

Prueba ii - Monitoreo de impacto de la inyección de aire en la concentración en H_2S y CH_4 durante 30 días seguidos

A – H_2S

En la prueba ii, el objetivo fue confirmar el rendimiento de las tasas de inyección elegidas en la prueba i con inyección de aire durante 30 días para reproducir condiciones de operación continua. En los tres biodigestores con desechos bovinos se inyectó aire con una proporción de 5 %, se logró eliminar hasta el 100 % de H_2S (este no fue detectable) y con un promedio de 94 % de remoción para los tres reactores durante los 30 días de inyección. Mientras que en el biodigestor con

desechos porcinos se inyectó aire con una proporción de 8 %, se logró eliminar 88 % de H_2S en promedio, durante los 30 días de prueba. Para ambos casos, bovino y porcino, se confirma que en un tiempo de operación más largo (30 en lugar de 6 días), las dos tasas elegidas en la prueba i permiten lograr una disminución de H_2S , similar a lo que se obtuvo en la prueba i con diferentes tamaños de reactores.

B – CH_4

Respecto al impacto sobre la producción de CH_4 se encontró que, para ambos casos, bovinos y porcinos, la inyección de aire sí tiene un impacto en la concentración de CH_4 en el biogás, lo cual se puede observar en la **Figura 3**.

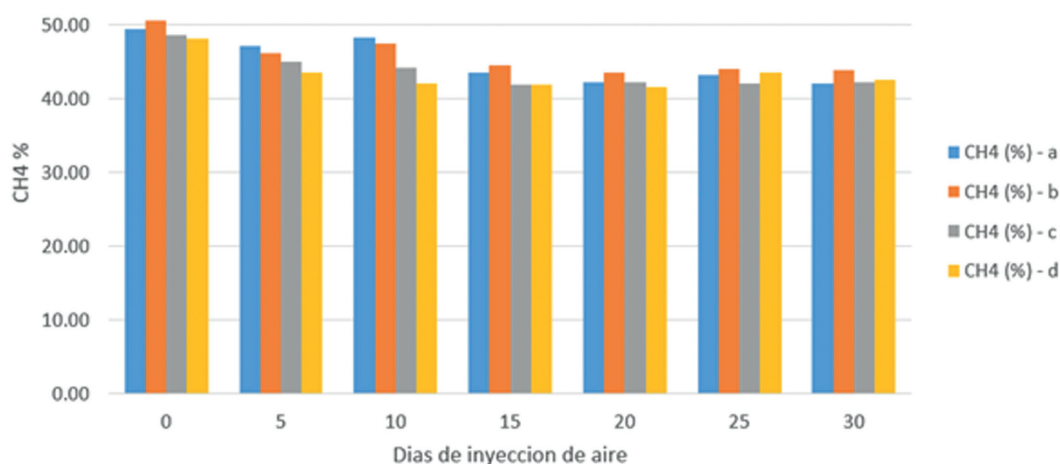


Figura 3 | Impacto de micro aireación sobre concentración de CH_4 con diferentes volúmenes de aire en biodigestores a, b, c y d.

Esto ocurre por la dilución del biogás con el nitrógeno contenido en el aire inyectado. El nitrógeno es un gas neutro que se acumularía en el biogás: se puede validar este fenómeno de dilución al hacer una prueba con oxígeno puro y confirmar el impacto sobre el contenido en metano – esta prueba no está cubierta en este proyecto. En el **Figura 3**, se observa que la concentración de CH_4 baja 10 % en el biodigestor (a), 11 % en el biodigestor (b) y de 12 % en los biodigestores (c y d). También se observa en esta Figura que la concentración de CH_4 se estabiliza en promedio después del día 10.

Dos fenómenos adicionales a la dilución de N_2 pueden explicar la reducción de la concentración de metano:

La dilución con oxígeno residual: las mediciones con el analizador de composición de biogás siempre indicaron una concentración en dióxigeno igual a 0%, lo que confirma que la disminución de la tasa en CH_4 no concuerda a la dilución por el oxígeno residual.

El aumento de la producción de CO_2 debido a la activación de procesos aeróbicos de hidrólisis y de acidificación en la inhibición parcial de bacterias metanogénicas: la inhibición parcial de bacterias metanogénicas y el aumento

de la producción en CO_2 explicarían una parte ínfima de la disminución de la concentración en CH_4 . En otras palabras, el oxígeno inyectado modifica teóricamente las actividades biológicas en la interfaz líquida/gaseosa, lo que representa una fracción mínima de la cantidad total de bacterias. Estos impactos no se pudieron cuantificar en este estudio.

Teniendo en cuenta el fenómeno de reducción de la concentración en CH_4 , se quiere minimizar la cantidad de aire inyectado para lograr una reducción mayor en H_2S . Sin embargo, es importante precisar que la concentración en CH_4 siguió siendo suficiente para encender y alimentar aplicaciones térmicas y mecánicas.

Prueba iii - Prueba de seguridad con caso extremo de inyección continua de aire

Esta prueba permitió anticipar lo que sucedería en el peor escenario, es decir, en una situación en donde ocurriera una inyección continua en el tamaño del digestor más pequeño mediante el uso de una bomba en funcionamiento continuo durante 4 días seguidos. En el supuesto caso, este tiempo correspondería a un periodo de reacción larga para detectar el problema de funcionamiento de la bomba y pararla. Los riesgos asociados a este escenario podrían ser la generación de una mezcla explosiva dentro del reactor que puede

provocar un “backfire” o explosión del reactor. En esta situación, se inyectó en el digestor un total de 2,9 m³ de aire al día, lo que representa 60 % del volumen de biogás producido diario, detallado en la **Tabla 3**.

Tabla 3 | Composición del biogás con inyección continua de aire.

Horas	CH ₄ (%)	H ₂ S (%)	O ₂ (%)	% LEL
0	44,6	0	0,00	0
24	29,90	0	1,90	0
48	26,20	0	2,60	0
72	23,30	0	6,50	0
96	22,20	0	8,90	0

El porcentaje de LEL que se midió corresponde al nivel para alcanzar una mezcla explosiva: con un LEL de 100 %, el gas analizado tiene riesgo de explosión; debajo de 100 %, le falta oxígeno para explotar. Durante los cuatro días de pruebas el % de LEL se mantuvo en 0 %. La literatura reporta que una mezcla de 5 % de CH₄, con aire alcanza el LEL; el aire contiene 21 % de O₂. Bajo estas condiciones, una mezcla explosiva se alcanza cuando la relación O₂ / CH₄ es de 4. En las pruebas que se corrieron, la relación O₂ / CH₄ resultó en 0,4 al día cuatro, 10 veces inferior a una mezcla explosiva. Por lo anterior, se puede concluir que dentro de las condiciones de prueba y en caso de que la bomba de aire no se detenga durante un periodo de 4 días seguidos, no existe riesgo de mezcla explosiva para el usuario.

Conclusiones

La micro aireación es una solución efectiva para reducir la concentración del H₂S presente naturalmente en el biogás. La tasa óptima de aire para el caso bovino fue del 5 % vol., se obtuvieron resultados con hasta el 100 % de remoción del H₂S. Mientras que para el estiércol porcino, con una inyección de 8 % vol. de aire, se obtuvo una reducción de 88 % de H₂S en promedio. Según la literatura, además de estos beneficios, el sulfuro mineral formado se depositará progresivamente en los lodos y aumentará la capacidad nutritiva de los lodos digeridos para su uso en cultivos agrícolas.

El uso adecuado de una bomba de aire con controlador para adaptar el flujo de aire a las condiciones operacionales del reactor permite una remoción eficiente del H₂S, mientras se mantienen limitados los riesgos de explosión. Los resultados de eficiencia se presentaron en todas las pruebas, es decir, en escenarios en donde se usaron diferentes tamaños de biodigestores, con distintos volúmenes y tipo de materia orgánica.

Los biodigestores tubulares de bajo costo tienen un enfoque de apoyo y desarrollo sustentable para todos los pequeños

y medianos productores y la reducción eficiente de H₂S disminuye una barrera de adopción importante. Este estudio permitió el desarrollo de un sistema de micro aireación en búsqueda de un producto accesible en costos que baja los riesgos de salud, abre opciones del uso de biogás más sensibles al H₂S y baja los costos operativos.

Referencias

- Lim, J. W., & Wang, J. Y. (2013). Enhanced hydrolysis and methane yield by applying microaeration pretreatment to the anaerobic co-digestion of brown water and food waste. *Waste management (New York, N.Y.)*, 33(4), 813-819.
- Botheju, D., & Rune, B. (2011). Oxygen Effects in Anaerobic Digestion – A Review. *The Open Waste Management Journal*, 411(1), 1-19. <https://doi.org/10.2174/1876400201104010001>
- Batstone, D. J., Keller, J. K., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). The IWA Anaerobic digestion model No 1 (ADM1). *Water Science & Technology*, 45(10), 65-73. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>
- Botheju, D., Lie, B., & Bakke, R. (2010). Oxygen effects in anaerobic digestion - II. Modeling, Identification and Control, 31(2), 55-65. <https://doi.org/10.4173/mic.2010.2.2>.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & López-Hernández, J. E. (2006). Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: Odor control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 5, 93-114. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-2754-6>
- Bordeleau, E. L., & Droste, R. L. (2011). Comprehensive review and compilation of pretreatments for mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. *Water Science Technology*, 63(2), 291-296. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.052>.
- Tartakovsky, B., Mehta, P., Bourque, J.S., & Guiot, S. (2011). Electrolysis-enhanced anaerobic digestion of wastewater. *Bioresource Technology*, 102, 5685-5691. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.097>
- Fdz-Polanco, M., Díaz, I., Pérez, S., Lopes, A., & Fdz-Polanco, F. (2009). Hydrogen sulphide removal in the anaerobic digestion of sludge by micro-aerobic processes: Pilot plant experience. *Water science and Technology*, 60(12), 3045-3050. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.738>