



## COMPARACIÓN DE OPCIONES PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTE DE MALTERÍA: AEROBIO VS ANAEROBIO- AEROBIO MEDIANTE UN ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

I. López<sup>(1)</sup>, M. Passeggi<sup>(1)</sup>, L. Borzacconi<sup>(1)</sup>, M. Pittamiglio<sup>(2)</sup>, H. Gómez<sup>(2)</sup>

(1) Facultad de Ingeniería, UdelaR. Instituto de Ingeniería Química.

(2) Estudio Pittamiglio

### Dirección<sup>(1)</sup>: (del autor principal)

Calle: J. Herrera y Reissig 565

Tel: 598 (2) 7114478

Ciudad: Montevideo

Uruguay

CP: 11300

Fax: 598 (2) 7107437

e-mail: ivanl@fing.edu.uy

### RESUMEN

El diseño de las plantas de tratamiento de efluentes también debe encararse bajo la óptica del desarrollo sostenible. A la hora de seleccionar alternativas de tratamiento pueden evaluarse determinados indicadores de sostenibilidad que permitan tomar una decisión basada en consideraciones ambientales, económicas y sociales. En particular se plantea el estudio del tratamiento de efluentes de una maltería, aplicando la metodología propuesta por el IChemE. Los indicadores ambientales, energéticos y económicos son ampliamente favorables a la opción de combinar un tratamiento anaerobio con un postratamiento aerobio frente a la opción puramente aerobia.

*Palabras claves:* Desarrollo sostenible, indicadores, anaerobio, aerobio

### INTRODUCCIÓN

La concepción de desarrollo sostenible implica para los ingenieros proveer los medios para satisfacer las necesidades humanas sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para alcanzar sus propias necesidades. En particular el impacto de la actividad industrial en la sostenibilidad del planeta debe evaluarse teniendo en cuenta la conjunción armónica de los siguientes aspectos: responsabilidad ambiental, creación de riqueza y desarrollo social. Para guiar las acciones de los ingenieros en tal sentido se requieren herramientas concretas que permitan valorar los distintos aspectos.

A la hora de seleccionar un sistema de tratamiento de efluentes se deben tener en cuenta aspectos económicos, energéticos y ambientales entre otros. IChemE (Institution of Chemical Engineerings, 2002) recomienda para la industria de procesos la utilización de las “Sustainable Development Progress Metrics” donde se agrupan a los indicadores en tres categorías: Ambientales, Económicos y Sociales. Este agrupamiento pretende reflejar los distintos aspectos comentados anteriormente. La propuesta general se aplica a plantas de procesos, a grupos de plantas, a partes de un proceso o sistema y por tal razón debe ser necesariamente flexible. Para cada aplicación concreta deben seleccionarse los indicadores que reflejen adecuadamente la situación y eventualmente proponerse nuevos para reflejar las especificidades (Fernández-Polanco *et al.*, 2005). Inclusive en algunos casos ciertos indicadores pueden ser mucho más relevantes que otros, lo cual habilita a realizar una selección de los mismos. En ocasiones los indicadores pueden ser difíciles de valorar. Por ejemplo, en los indicadores económicos sería interesante evaluar el valor añadido por unidad de producción; sin embargo esto puede no ser sencillo de calcular y alternativamente puede recurrirse a considerar otros indicadores como ventas, beneficio, etc. En todo caso deberá



justificarse adecuadamente la elección de indicadores y el método para el cálculo debe ser consistente. Para lograr valor independiente de la escala de producción, la mayoría de las métricas para valorar los indicadores se plantean referidas a una unidad de producción.

Para el tratamiento de efluentes con alto contenido de materia orgánica, entre los que se encuentran la mayoría de los efluentes agroindustriales, los sistemas de tratamiento biológico son los recomendados, al menos como primera etapa. Dentro de los sistemas biológicos se encuentran distintas alternativas tanto anaerobias como aerobias que están ampliamente desarrolladas y han sido extensamente aplicados en los países desarrollados. Las tecnologías aerobias permiten alcanzar concentraciones muy bajas de materia orgánica en el efluente, pero consumen energía y generan un importante volumen de lodo no estabilizado. Las tecnologías anaerobias no permiten alcanzar concentraciones tan bajas de materia orgánica en el efluente, pero entre sus ventajas se encuentran: capacidad de remover gran cantidad de materia orgánica sin consumo energético, generación de biogás que se utiliza como fuente adicional de energía, generación de lodos estabilizados de fácil espesamiento (no es necesario utilizar sedimentador externo). Es por esto que una alternativa muy interesante es colocar un sistema anaerobio para remover la mayor parte de la materia orgánica y completar el tratamiento con un sistema aerobio que logra degradar la materia orgánica remanente.

## OBJETIVOS Y METAS

En este trabajo se han aplicado indicadores de sostenibilidad para evaluar dos alternativas de tratamiento para el efluente de una maltería: 1) Tratamiento anaerobio + tratamiento aerobio (pulimento) y 2) Tratamiento exclusivamente aerobio. Se han utilizado valores para los indicadores tomados de una planta en funcionamiento para el tratamiento del efluente de una maltería a escala real. Para esta planta se habían manejado las dos alternativas en cuestión y finalmente se seleccionó y construyó la alternativa anaerobia-aerobia, actualmente en funcionamiento.

## METODOLOGIA

### *Sistema a evaluar*

La planta de tratamiento de la maltería está compuesta de un reactor anaerobio de 250 m<sup>3</sup>. Dicho reactor fue construido a partir de la estructura de un tanque Imhoff que se refaccionó y se adaptó para que funcionara como reactor UASB (Up flow Anaerobic Sludge Bed), construyendo un sistema de captación de biogás y separación de fases en su extremo superior. El diseño de este reactor está detallado en el trabajo de López *et al.* (2004).

El caudal de entrada al reactor UASB es de 350 m<sup>3</sup>/d; durante más de dos años la eficiencia de remoción en DQO fue superior al 70% y la producción de biogás 300 m<sup>3</sup>/d. (Borzacconi *et al.*, 2006). Los caudales son monitoreados automáticamente y registrados en el sistema SCADA de la fábrica. El estudio del funcionamiento a largo plazo, incluyendo el seguimiento de las poblaciones microbianas, permite extraer importantes conclusiones sobre la operativa (Borzacconi *et al.*, 2007). En particular, de no regular adecuadamente las purgas de lodo puede trabajarse con una carga específica (por masa de Sólidos Suspendidos Volátiles) demasiado baja, que hace vulnerable a largo plazo al sistema frente a eventos accidentales que pudieran ocurrir por falta de control en la planta industrial.

El líquido que sale del reactor UASB entra a un reactor aerobio de lodos activados en aireación extendida del tipo zanja de oxidación con cuatro aireadores rápidos tipo aire inserto o sumergibles tipo Floget de 10 HP cada uno y dos mezcladores sumergibles de 5HP para asegurar una velocidad mínima de 0,3 m/s. El volumen total útil del reactor es de 665 m<sup>3</sup>, generando un tiempo de retención de 1.59 días. En el período de puesta en operación, desde mayo de 2007, la eficiencia del reactor aerobio varió entre 38 y 95% con un promedio del 68% en términos de DBO<sub>5</sub> y entre 13 y 85% con un promedio del 43% en términos de DQO. Se entiende que el sistema no está aún en régimen por la aparición de bacterias filamentosas.



El sedimentador secundario fue reformado a partir del existente, resultando de 6 m de diámetro con un área 28,3 m<sup>2</sup> siendo la carga hidráulica de 0.92 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/hora. No se han utilizado coagulantes y tampoco está previsto su uso en esta etapa.

### ***Indicadores de sostenibilidad***

Se siguió la metodología de IChemE desarrollada en “Sustainable Development Progress Metrics” para agrupar a los indicadores en categorías. Se seleccionaron para este caso: indicadores ambientales, indicadores energéticos e indicadores económicos. Dentro de los indicadores ambientales las “Metrics” listan los siguientes factores: uso de recursos (energía, materiales, agua y superficie ocupada), emisiones (atmosféricas, al agua y a la tierra) e ítems adicionales (salud, impactos de construcción, cumplimiento de normativas, impactos en áreas protegidas, aspectos que tienen que ver con suministro de recursos no renovables, otros).

Por su importancia en este caso concreto se han separado los indicadores que tienen que ver con los recursos energéticos del resto. Del uso de recursos entonces, el más importante es la superficie de tierra ocupada en la planta de tratamiento, pues no son significativos el uso de materiales y agua para el tratamiento (como recurso a gastar).

De las emisiones, las más importantes son las atmosféricas y los sólidos extraídos del sistema, pues se asume que ambas opciones producen un efluente depurado como para ser vertido a un curso de agua o a terreno. No se generan gases tóxicos (al menos no en cantidades relevantes) pero sí gases de efecto invernadero. En el tratamiento anaerobio se genera biogás, compuesto mayoritariamente por metano y anhídrido carbónico. Sin embargo el biogás es captado y quemado, por lo que el metano se transforma íntegramente en anhídrido carbónico. En definitiva toda la materia orgánica (que se origina en la captación del CO<sub>2</sub> por las plantas) vuelve a transformarse en CO<sub>2</sub> al final del ciclo y por lo tanto no hay emisión neta de gases de efecto invernadero. Por el contrario los sistemas aerobios requieren energía para la aireación y esta energía puede asumirse como resultado de la combustión de combustibles fósiles no renovables, por lo que asociado a este consumo de energía debe contabilizarse la emisión correspondiente de CO<sub>2</sub>. Adicionalmente la estabilización anaerobia (que naturalmente se produce en el relleno sanitario) de los lodos provenientes del sistema aerobio genera CH<sub>4</sub> cuyo potencial de calentamiento global es 21 veces el del CO<sub>2</sub>.

La generación de lodo de purga de ambos sistemas es el otro componente importante de las emisiones, pues debe gestionarse adecuadamente y dársele un destino final de disposición. El indicador considera solo la cantidad de lodo generado y no sus características. En el caso del lodo anaerobio, se trata de un lodo estabilizado, que deshidrata rápidamente en un lecho de secado con una consistencia paleable luego de un par de días. Se ha considerado un costo global de US\$ 50 por tonelada de SST que resultan de considerar el transporte y la disposición final con un 20% de sólidos.

En los indicadores energéticos se ha discriminado la energía consumida, básicamente asociada a la aireación, y la energía producida, asociada a la generación de metano.

Para los indicadores económicos las “Metrics” listan los siguientes factores: beneficios, valor agregado y tasas a pagar, inversiones directas e indirectas y otros ítems eventuales. En este caso, por tratarse de un sistema de tratamiento de efluentes no están presentes los beneficios y valor agregado en el sentido tradicional empleado en la producción de bienes y servicios comerciables. Eventualmente el beneficio y el valor agregado estarían dados por la habilitación o no para el funcionamiento industrial y quizá por evitar restricciones no arancelarias ligadas a la exportación, por ejemplo. Pero en cualquier caso serían similares para cualquiera de las dos opciones. Por el contrario, pueden sí estimarse los costos de inversión y de operación. Los costos de inversión están relacionados con la obra civil y la construcción de estructuras auxiliares más el costo de equipos. En particular en la opción anaerobia, además de la obra civil se ha construido una campana metálica para la captación del biogás y la separación de fases. En los sistemas aerobios deben incluirse los costos de aireadores y mixers. Los equipos de bombeo serían similares para ambas opciones por lo que no son considerados en este análisis. Dentro de los costos de operación los más significativos son los relativos al gasto de energía para los aireadores y los relacionados al



manejo y disposición final de lodos de purga. Se asume que dada la escala de la planta los requerimientos de mano de obra son similares para ambas opciones, por lo que este aspecto no es incluido en la valoración. Para el cálculo del costo total se ha supuesto un préstamo en la inversión a un plazo de 10 años con una tasa de interés de 5%.

Dentro de los indicadores sociales se listan: generación de trabajo, salud y seguridad laboral, relación con la sociedad y otros ítems que puedan ser relevantes. No se considera que existan diferencias importantes en estos aspectos al comparar ambas opciones, por lo que este tipo de indicadores no son considerados en la comparación.

## RESULTADOS

El sistema anaerobio es mucho más compacto que el aerobio equivalente para remover la misma carga orgánica. En el caso considerado el reactor UASB ocupa 25 m<sup>2</sup> frente a los 530 m<sup>2</sup> de lo que sería la opción equivalente de lodos activados necesaria para remover la misma carga orgánica, o sea es apenas un 5% de esta última. Incluyendo el pulimento final, la superficie ocupada por ambas opciones es 158 y 667 m<sup>2</sup> respectivamente.

Con respecto a la generación de lodo se reporta la cantidad de lodo total producido en ambas opciones. La purga del reactor UASB representa unos 18 ton SST anuales, aproximadamente unos 2 m<sup>3</sup> de lodo espesado por semana. El pulimento final aerobio agrega otros 26 ton de SST anuales. De haber instalado un sistema exclusivamente aerobio en su lugar se hubieran generado unos 110 ton de SST al año. O sea que la opción anaerobia-aerobia genera el 40% de los sólidos de la opción tradicional. Sin embargo debe tomarse en cuenta que en la opción aerobia todo el lodo generado debe estabilizarse mientras que en la opción anaerobia-aerobia el lodo proveniente del reactor UASB está estabilizado y espesa con gran facilidad en un simple lecho de secado. En total la opción anaerobia-aerobia tendría un costo de disposición final de unos U\$S 11000, y la puramente aerobia un costo de unos U\$S 27000.

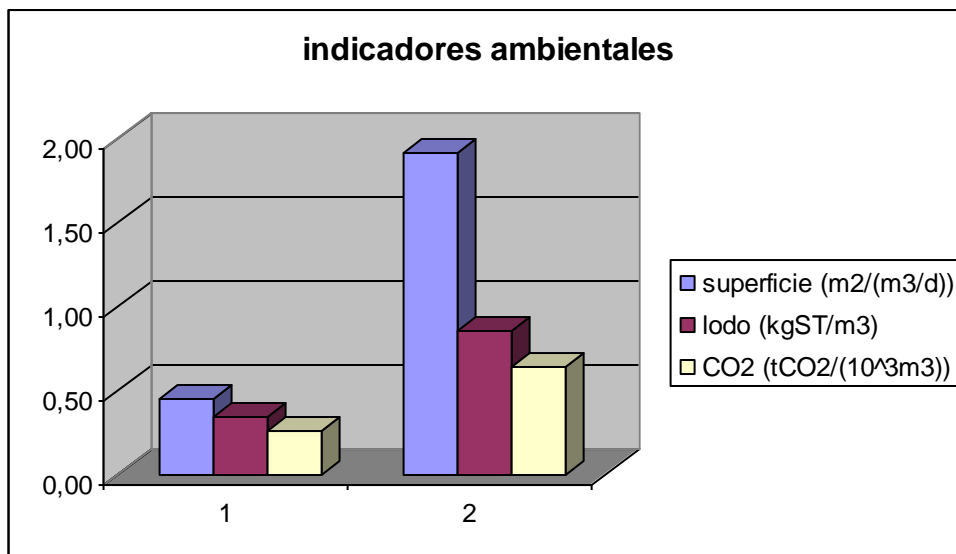


Figura 1. Indicadores ambientales: superficie ocupada (expresada en m<sup>2</sup> de terreno por m<sup>3</sup>/d de efluente tratado), cantidad de lodo generado (en kg de ST por metro cúbico de efluente tratado) y CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera (en toneladas de CO<sub>2</sub> por cada 1000 m<sup>3</sup> de efluente tratado); 1) sistema anaerobio/aerobio, 2) Sistema aerobio.

Respecto a la emisión de gases de efecto invernadero, el metano generado en el reactor UASB es quemado y pasa a CO<sub>2</sub>, no siendo liberado directamente a la atmósfera. La emisión está relacionada entonces en forma exclusiva a la energía gastada para la aireación. Se generan 33 toneladas anuales de CO<sub>2</sub> en la energía gastada en el pulimento final del efluente aerobio y se generarían 82 toneladas anuales de CO<sub>2</sub> si se hubiera elegido un tratamiento puramente aerobio.



Cabe señalar que no se están considerando en este análisis las emisiones de un sistema de tratamiento de lodos. Los lodos anaerobios salen estabilizados en tanto que los aerobios, aún saliendo de un sistema de aireación extendida en general son susceptibles de degradación en las condiciones de disposición final (anaerobia), por ejemplo las que podrían darse en un relleno sanitario. Considerando que el lodo aerobio tiene 70% SSV en la purga y asumiendo en forma conservadora que ese valor se reduce al 60% luego de estabilizado anaerobicamente, se estarían metanizando 250 kg de SSV por tonelada de SST purgada, emitiendo 1864kg de CO<sub>2</sub> equivalente. Por lo tanto las emisiones por estabilización de lodos, en el caso en que no hubiera captación de los gases, serían de 205 tonCO<sub>2</sub>eq/año para la opción anaerobia (por sus 110 tonSST/año) y 48 tonCO<sub>2</sub>eq/año para la opción anaerobia-aerobia (por sus 26 tonSST/año). Esto representa 2.5 veces y 1.5 veces respectivamente de las emisiones correspondientes al gasto de energía.

Los indicadores ambientales se representan en la Figura 1 para ambas opciones.

Respecto a la energía, los sistemas aerobios gastan en la aireación y agitación del reactor mientras que el UASB no. Por el contrario el reactor anaerobio genera un recurso energético que es el biogás. De ahí que en la opción anaerobia-aerobia el indicador energético neto es positivo mientras que en el puramente aerobio es negativo, tal como se muestra en la Figura 2. La generación de energía bajo forma de metano equivale a unos 480 MWh al año. La implementación del sistema de postratamiento aerobio requiere un gasto de energía de 160 MWh al año equivalente a unos U\$S 9000 de gasto. Si la carga removida en el UASB se removiera en un sistema de lodos activados se gastarían 390 MWh al año, equivalentes a unos U\$S 21500.

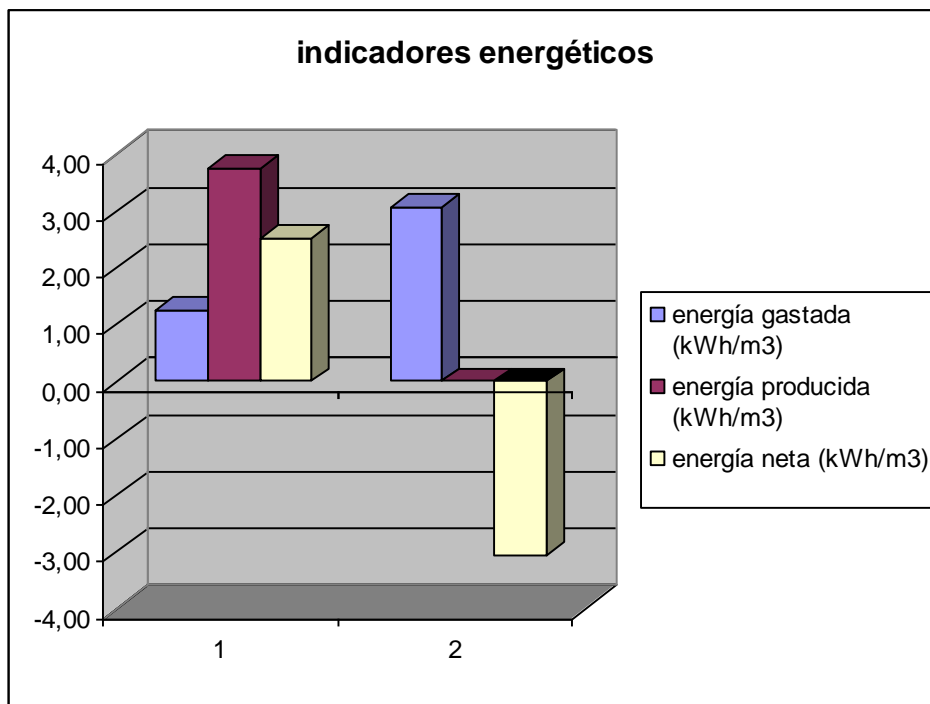


Figura 2. Indicadores energéticos: energía gastada por la planta de tratamiento, energía producida por la planta y energía neta aportada por el sistema (todos expresados en kWh por m<sup>3</sup> de efluente tratado); 1) sistema anaerobio/aerobio, 2) Sistema aerobio.

Por último los indicadores económicos toman en cuenta los costos de inversión y de operación. El reactor anaerobio es más pequeño por lo que la obra civil tiene un costo menor. Adicionalmente no se requieren equipos tales como aireadores o mixers. Por el contrario si requiere un sistema especial de captación de biogás y separación de fases que se ha estimado globalmente en U\$S 50000. Se ha estimado el valor de la obra civil en función del



tamaño de las instalaciones con un costo global de U\$S 500 el metro cúbico de hormigón. El costo de operación se debe fundamentalmente al gasto de energía para los aireadores y al de espesamiento, transporte y disposición final de los lodos producidos. No se ha tenido en cuenta el costo de mano de obra porque se asume que es similar para ambos sistemas. En la Figura 3 se expresan dichos costos por metro cúbico de efluente tratado.

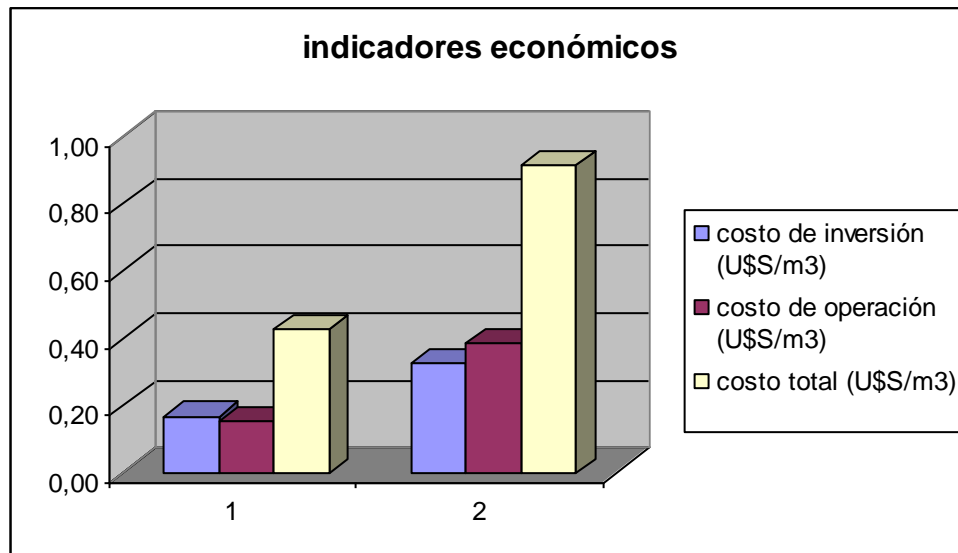


Figura 3. Indicadores económicos: costo de inversión, costo de operación y costo total (incluye repago de la inversión en 10 años con una tasa de interés del 5%), en dólares USA por m<sup>3</sup> tratado; 1) sistema anaerobio/aerobio, 2) Sistema aerobio.

## CONCLUSIONES

El estudio de sostenibilidad es una guía interesante a la hora de seleccionar opciones de tratamiento. De acuerdo a la herramienta utilizada (Ichem Sustainability Metrics) y a los indicadores seleccionados en este trabajo (ambientales, energéticos y económicos), el sistema anaerobio/aerobio resulta más sostenible que el sistema puramente aerobio, resultado todos los valores claramente favorables al primero.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. BORZACCONI, L., LÓPEZ, I., PASSEGGI, M., Start up and steady state results of a full scale UASB reactor treating malting wastewater, *Wat. Sci. & Tech.*, **54** (2), pp. 261-268, 2006.
2. BORZACCONI, L., LÓPEZ, I., PASSEGGI, M., ETCHEBEHERE, C., BARCIA, R., Sludge deterioration in a full scale UASB reactor after a pH drop working under low loading conditions, *Wat. Sci. & Tech.*, **57** (5), 2008.
3. FERNÁNDEZ-POLANCO, F., MARTÍN, M.A., PÉREZ, S.I., RINCÓN, D., FERNÁNDEZ-POLANCO, M., Sustainability study for aerobic and anaerobic alternatives in municipal and industrial wastewater treatment, *Proceedins del VIII Taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anerobia*, Punta del Este, Uruguay, 493-498, 2005.
4. IChemE (Institution of Chemical Engineers), The sustainability metrics, <http://www.icheme.org/sustainability/>, 2002 (visitada el 16/3/08)
5. LÓPEZ, I., PASSEGGI, M., BORZACCONI, L., FUENTES, I., LIEBERMAN, L., Transformación de un tanque Imhoff en reactor anaerobio para tratamiento de efluente de maltería sobre la base de una experiencia piloto, en *Proceedings del IV Congreso Internacional de AIDIS*, Puerto Rico, 2004, edición en CD.