

UTILIZACIÓN DE BIORREACTORES AVANZADOS EN LA DEGRADACIÓN ANAEROBIA DE EFLUENTES VÍNICOS

Montserrat Pérez García¹, Luis I. Romero García² y Diego Sales Márquez³

Resumen:

El presente trabajo evalúa la aplicabilidad de dos tecnologías avanzadas de crecimiento adherido, filtro anaerobio y lecho fluidizado, para el tratamiento en condiciones anaerobias termofílicas (55°C) de efluentes derivados de destilerías vínicas (vinazas de vino). El diseño experimental implica el estudio del efecto de la velocidad de carga orgánica sobre la eficacia de los sistemas de filtro anaerobio y lecho fluidizado utilizando dos soportes de diferentes naturaleza: tubos de plástico corrugado y perlas de vidrio sinterizado (SIRAN).

Los resultados obtenidos indican que el filtro anaerobio con soporte plástico presenta un funcionamiento estable para velocidades de carga orgánica máxima (VCO₀) de 20 kgDQO/m³/d mientras que con perlas de vidrio sinterizado (SIRAN) la velocidad de carga máxima del sistema aumenta hasta 23 kgDQO/m³/d. El reactor de lecho fluidizado con SIRAN presenta una eficacia de depuración aceptable para velocidades de carga orgánica de 32 kgDQO/m³/d.

Palabras clave: digestión anaerobia termofílica, vinazas de vino, filtro anaerobio, lecho fluidizado, modelo cinético.

INTRODUCCIÓN

La sociedad actual tiene planteado un gran reto ante sí: conjugar el progreso material y las altas tasas de productividad con la conservación del medio natural. Así, la opinión pública mundial se ha sensibilizado ante las graves consecuencias derivadas de continuar con la misma dinámica de industrialización y ha matizado su deseo de un mayor grado de "desarrollo económico", como lo demuestra la incorporación a nuestro léxico ordinario de conceptos tales como "desarrollo sostenible". Estas aspiraciones de la sociedad constituyen una demanda a la Comunidad Científica Internacional y, en este sentido, se exige un mayor esfuerzo relativo al desarrollo de procesos que minimicen el impacto ambiental provocado por determinadas actividades industriales. Centrándonos en nuestro país, y especialmente en la Comunidad Autónoma de Andalucía, uno de los motores de la economía es la agricultura y, en consecuencia, las industrias del sector

agroalimentario. Este tipo de industrias, al igual que ocurre en la mayoría de los casos, deben incorporar sistemas específicos de tratamiento de sus residuos previos a su evacuación para evitar problemas de contaminación del cauce receptor. Por todo ello, aproximadamente desde 1976 y dentro del hoy denominado "Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente" de la Universidad de Cádiz, un grupo de investigación comenzó a trabajar en el desarrollo de sistemas adecuados para reducir la carga contaminante de estos vertidos y mitigar los efectos de su evacuación directa. Este grupo, hoy denominado "Tecnología del Medio Ambiente", ha abordado en este campo, a lo largo de su extensa andadura, diversos aspectos: caracterización de vertidos, minimización de corrientes, selección y optimización de tecnologías susceptibles de acometer la depuración, etc., ya que por sus volúmenes de producción a escala nacional y, fundamentalmente, por la proximidad de un importante núcleo

Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente. Facultad de Ciencias del Mar. Universidad de Cádiz. Campus Río San Pedro s/n, 11510-Puerto Real, Cádiz (SPAIN). (1)montserrat.perez@uca.es. tfno: 956 016158. (2)luisisidoro.romero@uca.es. tfno: 956 016379. (3)diego.sales@uca.es. tfno: 956 016162

Artículo recibido el 14 de abril de 1999, recibido en forma revisada el 8 de mayo de 2000 y el 7 de marzo de 2001 y aceptado para su publicación el 7 de mayo de 2001. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

de industrias del sector vitivinícola, constituyen un foco de especial atención medioambiental.

El presente estudio se encuadra dentro de los trabajos abordados en la mencionada línea de investigación y se centra en la caracterización de dos tecnologías avanzadas, filtro anaerobio y lecho fluidizado anaerobio, aplicables al tratamiento anaerobio termofílico de vertidos de alta carga orgánica. La selección de estas tecnologías enlaza con el criterio básico general que ha animado la investigación en el campo de las tecnologías de depuración: la minimización de costes, especialmente en lo relativo a costes de inmovilizado. Dichas tecnologías avanzadas incluyen dispositivos de retención de la biomasa o materiales soporte que reducen el efecto del "lavado de la población microbiana" y posibilitan elevadas densidades de microorganismos en el sistema, obteniendo altos porcentajes de depuración aún trabajando a tiempos hidráulicos de retención muy pequeños (Tyagi, 1990; Hickey, 1991). No obstante, la creación de la biopelícula microbiana conlleva nuevos problemas tecnológicos derivados de la resistencia al transporte de materia (sustrato) desde el seno del fluido hasta los microorganismos, más acentuado si consideramos que el objetivo básico es trabajar con la máxima concentración posible de biomasa activa en el sistema.

La utilización de los filtros anaerobios en el tratamiento de vertidos de carácter orgánico (en rango mesofílico) data de la década de los ochenta y son numerosos los estudios desarrollados en la Universidad de Cádiz por nuestro grupo (Valcárcel, 1985; Romero, 1990, 1991; Nebot, 1992, 1995, Pérez, 1995, García-Morales, 1997). Muchos autores apuntan problemas operativos derivados de la obstrucción del proceso por una excesiva colonización del soporte (Fannin, 1987; Nebot, 1995). No obstante, y aunque una adecuada selección del soporte permite minimizar dicho fenómeno, se intuye una cierta pérdida de actividad de las capas internas de la biopelícula derivada de una pobre transferencia de sustrato hacia el interior de la misma. Por ello, resulta interesante estudiar el comportamiento de otro sistema avanzado de crecimiento adherido: el lecho fluidizado anaerobio. En esta tecnología (mucho menos estudiada a nivel bibliográfico, y apenas nada en el caso termofílico), se utilizan soportes de elevada porosidad interna que favorecen la adhesión de los microorganismos en toda su extensión. Una de las ventajas de este sistema consiste en que el espesor de la biopelícula externa, en caso de formarse, puede ser controlado aumentando

la velocidad lineal del fluido sin que ello implique la eliminación de la totalidad de biomasa activa (en casos extremos, se reduciría a la adherida en los intersticios internos del soporte). Por otra parte, el movimiento de la fase sólida (soporte colonizado) en el seno del sistema permite eliminar, al menos parcialmente, los problemas derivados de la formación de caminos preferenciales y espacios muertos, mejorando de forma sensible el contacto de las fases (Jewell, 1982; Switzenbaum, 1983; Wang, 1994).

METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

El presente trabajo evalúa la aplicabilidad de dos tecnologías avanzadas de crecimiento adherido en el tratamiento anaerobio termofílico de vertidos de alta carga orgánica, filtro anaerobio y lecho fluidizado, analizando la influencia de las principales variables de operación sobre la eficacia depurativa de ambos procesos. La consecución de dicho objetivo general supone profundizar en muy diversos aspectos relacionados con cada tecnología específica (puesta en marcha y procesos de colonización del material soporte, caracterización hidrodinámica del flujo generado en el reactor, selección y optimización de las condiciones experimentales de operación, etc.). En este sentido, y para abordar de forma secuencial el problema planteado, se diseñan un conjunto de estudios experimentales bien definidos y con objetivos muy concretos, que posibilitan el acceso al problema global desde una perspectiva integradora. Las etapas planteadas son: a) Obtención y mantenimiento de una fuente de inoculación adecuada; b) Puesta a punto de los equipos experimentales utilizados así como de las técnicas de análisis específicas para cuantificar las variables del proceso de degradación anaerobia; esta etapa incluye los ensayos de caracterización hidrodinámica (condiciones de flujo), los estudios de colonización de los soportes materiales así como la selección y optimización de las condiciones de operación; c) Estudio de la influencia de las variables del proceso sobre la eficacia depurativa de cada tecnología; d) Modelización cinética del proceso y validación del modelo seleccionado.

MATERIAL Y MÉTODOS

La experimentación se desarrolla en reactores de laboratorio tipo Filtro Anaerobio (FA) y Lecho Fluidizado (LF), operando en la degradación anaerobia termofílica de vinazas de vino. La temperatu-

ra de operación se mantiene a $55^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, óptima del rango termofílico de temperaturas.

Reactores experimentales

Un esquema de los equipos experimentales se presenta en la Fig. 1. Los reactores utilizados están contruidos en vidrio y revestidos de un encamisado que permite la termostatación del medio por circulación de agua a 55°C . El filtro anaerobio presenta un volumen útil de 2L. En la parte superior del mismo se acopla una cabeza con tres salidas: una para la evacuación del efluente, otra para la recirculación del mismo y la tercera para la recogida del biogas generado en un gasómetro. Asimismo, consta de sistemas de bombeo para la alimentación y recirculación del efluente que se efectúan en sentido ascendente. El lecho fluidizado es un reactor tubular de vidrio de 1,7m de altura y 2,55cm de diámetro interno. El sistema opera con una expansión del 25% (por ajuste de la velocidad ascensional) y un volumen útil de 0,25 litros. La parte superior del mismo incorpora una cabeza con dos salidas, una para la recirculación del efluente que posibilita la fluidización del lecho, y otra para la evacuación conjunta del efluente y biogas. Un dispositivo de separación gas-líquido permite desviar dichas corrientes hacia el gasómetro y el recipiente de recogida de efluente respectivamente. Asimismo, se acopla un sedimentador para recoger las posibles biopartículas evacuadas en la corriente de fluidización y los equipos de bombeo necesarios. En ambas tecnologías, la recogida del biogas se realiza en gasómetros de 5L, que permiten la cuantificación del biogas producido y la toma de muestras para su caracterización.

Soportes materiales

Los soportes utilizados han sido tubos de plástico corrugado (tipo FLOCOR-R) y perlas de vidrio sinterizado (SIRAN). Los tubos de plástico corrugado presentan baja densidad real, altísima porosidad y elevada superficie específica ($450 \text{ m}^2/\text{m}^3$), características adecuadas para su utilización como material soporte no poroso en reactores de lecho fijo. Por su parte, el SIRAN presenta una estructura superficial rugosa y porosa formada por macro y microporos que proporcionan una elevada área superficial y favorecen el desarrollo bacteriano en toda la extensión del mismo. Su utilización es muy adecuada en sistemas de lecho fijo y, especialmente, en tecnologías fluidizadas. Un resumen de las principales características de estos rellenos se presenta en la Tabla 1.

| PROPIEDADES FÍSICAS | PLÁSTICO CORRUGADO | SIRAN |
|--|--------------------|--------|
| Densidad real ($\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) | 1161,4 | 1832,0 |
| Densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) | 73,0 | 499,3 |
| Porosidad (%) | 93 | 55+60 |
| Área superficial ($\text{m}^2\cdot\text{m}^3$) | 450 | 87000 |
| Altura (cm) | 1,6 | - |
| Diámetro (cm) | 1,6 | 0,15 |

Tabla 1. Resumen de las propiedades físicas de los rellenos utilizados

Características del influente

Se han utilizado vertidos procedentes de destilerías vínicas, genéricamente conocidos como vinazas de vino, procedentes de las alcoholeras sitas en Tomelloso (Ciudad Real). Las vinazas fueron transportadas y mantenidas a 4°C antes de su uso. El vertido fue diluido desde su concentración inicial de 30 gDQO/L hasta los valores requeridos en los ensayos realizados (15 gDQO/L). Las vinazas de vino utilizadas presentaron un marcado carácter ácido (pH: 3,7) y bajo contenido en polifenoles. Ensayos previos de biodegradabilidad de la vinaza indicaron la existencia de dos fracciones de diferente naturaleza: S1 (80% del total), sustrato fácilmente biodegradable, y S2, sustrato recalcitrante.

En la última etapa experimental del trabajo de optimización del funcionamiento de los reactores, los caudales de vinaza se incrementaron progresivamente hasta fijar los tiempos hidráulicos de retención deseados (3,1-0,8 días para el filtro anaerobio y 2,5-0,46 días en el caso del lecho fluidizado). No obstante, en el presente estudio experimental se utiliza la velocidad de carga orgánica como parámetro operativo de comparación del funcionamiento de ambas tecnologías.

Técnicas analíticas

El seguimiento del proceso de biodegradación requirió la cuantificación diaria de los siguientes parámetros: Demanda Química de Oxígeno (DQO), pH, Sólidos Totales y Volátiles en Suspensión (SST y SSV), volumen de biogas generado y composición del mismo (CH_4 y CO_2). Las determinaciones de DQO, SST y SSV se realizan de acuerdo con los "Métodos Estandarizados" (APHA; AWWA; WPCF, 1989). La biomasa adherida (SV_{adh}) se determinó según el protocolo propuesto por Shieh (1981). La composición del biogas se analiza mediante cromatografía de gases (KONIK 2000 C).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente se abordaron los estudios previos de inoculación y caracterización hidrodinámica de los sistemas (Pérez, 1995), adecuados para el posterior desarrollo experimental. Asimismo, se iniciaron estudios de colonización de los soportes: plástico corrugado (tipo Flocor-R) y perlas de vidrio sinterizado (SIRAN), obteniéndose, en ambos casos, una descripción morfológica cualitativa y datos cuantitativos del proceso de inmovilización. El período de tiempo requerido para colonizar las partículas de plástico corrugado virgen fue del orden de 40 días, operando en semicontinuo (una única dosis de alimentación diaria) en reactores de lecho fijo. Para promover los estadíos iniciales de la colonización se procedió a inocular el reactor con efluente procedente de sistemas en operación estable (reactor de inoculación), mantener un régimen de alimentación discontinuo durante 1 semana y recircular gran parte del efluente. Los resultados obtenidos indicaron que, tras 40 días, la velocidad de adhesión de microorganismos se ralentiza y, en estas condiciones, las unidades de soporte son aptas para su utilización en reactores de filtro anaerobio. Las perlas de SIRAN requirieron períodos de colonización similares operando de forma análoga en sistemas tipo lecho fijo en los cuales el caudal de recirculación impuesto es próximo, aunque inferior, a la velocidad mínima de fluidización del sistema (fluidización incipiente). El SIRAN así colonizado está especialmente indicado para su uso como soporte de tecnologías fluidizadas (Breitenbücher, 1990). En esta aplicación se produce una pérdida inicial del exceso de biomasa colonizada en la superficie externa del soporte como consecuencia del importante aumento de la fricción entre el fluido y las capas superficiales de la biopelícula. No obstante, la alta capacidad de retención interna del soporte posibilita que dichas unidades sean adecuadas para la mencionada tecnología. El seguimiento del proceso de colonización se realizó a través de la determinación de los sólidos volátiles adheridos a las unidades de soporte en diferentes períodos de incubación. El incremento de peso de las unidades, así como el estudio morfológico del proceso de adhesión bacteriana mediante microscopía óptica justifican las apreciaciones realizadas.

Por otra parte, y tras las conclusiones obtenidas de la caracterización hidrodinámica de ambas tecnologías en ausencia de actividad microbiana, la operación con sistemas reales puso de manifiesto el alto grado de mezclado provocado por la generación de biogas. Además, la principal ventaja de la

recirculación es que limita el grosor de la biopelícula reduciendo los problemas de transferencia de materia y favoreciendo el contacto entre las fases sustrato-microorganismos.

Paralelamente al estudio anterior se comenzaron los estudios de puesta a punto de los reactores, así como de la selección y optimización de las condiciones de operación para el desarrollo experimental. Los estudios desarrollados con filtros anaerobios muestran, como resultados relevantes, la capacidad de re-arranque de este tipo de sistemas tras largos períodos de inactividad y sin necesidad de una inoculación previa. Los tiempos de re-arranque hallados son similares a los propuestos para la colonización a partir de soporte virgen, por lo que la utilización de este tipo de reactores puede ser muy adecuada en industrias de carácter estacional, como es el caso de las del sector agroalimentario. Otra importante conclusión extraída es que el rango de cargas orgánicas aplicables a los filtros anaerobios viene condicionado por el pH de la alimentación. Así, la operación con vinaza ligeramente alcalina (pH: 7,5) permite aumentar de forma sensible la carga orgánica alimentada manteniendo altos índices de depuración. Sin embargo, la neutralización directa del medio, una vez se ha producido la acidificación del reactor (aún operando con vinaza ligeramente alcalina), no consigue la estabilización del sistema.

El último capítulo experimental incluye el estudio de la operación y funcionamiento de las tecnologías de lecho fijo y lecho fluidizado utilizando los soportes seleccionados: tubos de plástico corrugado y SIRAN. Los sistemas se mantienen en operación estacionaria para diferentes velocidades de carga orgánica, que van aumentando progresiva y gradualmente hasta producir la desestabilización del proceso por acidificación del reactor. Las configuraciones de los reactores utilizados son: lecho fijo con soporte plástico, lecho fijo con SIRAN y lecho fluidizado con SIRAN. La Fig. 2a representa la velocidad de carga orgánica consumida en período de operación estable de los reactores (la línea recta representa la evolución teórica que correspondería a un 100% de eficacia del proceso). La máxima velocidad de carga orgánica aplicable al lecho fluidizado es de 32 kgDQO/m³/d, 23 kgDQO/m³/d para el lecho fijo con SIRAN y 20 kgDQO/m³/d para el sistema de lecho fijo con soporte plástico. En esta situación, la eficacia de los procesos es del 81,5%, 75% y 50% para la operación con el lecho fluidizado, SIRAN en condiciones de lecho fijo y filtro anaerobio con plástico respectivamente (Fig. 2b).

No obstante, la máxima eficacia alcanzada se consigue para la operación con velocidades de carga bajas, siendo del 97% para el lecho, 84% y 75% para la operación en lecho fijo con los soportes SIRAN y plástico corrugado (Fig. 2c). Por tanto, el SIRAN, utilizado como soporte de reactores de lecho fijo (en condiciones de fluidización incipiente) permite operar con cargas orgánicas alimentadas ligeramente superiores a las alcanzadas en filtros con soporte plástico corrugado. La diferencia operacional deriva de que el plástico corrugado (soporte no poroso) sólo permite una colonización superficial, mientras que el SIRAN posee una estructura interna porosa (macro y microporosa) que le dota de una mayor capacidad de adhesión de biomasa. El óptimo contacto entre las fases que se establece en el reactor de lecho fluidizado es el responsable de las diferencias tan significativas obtenidas en la operación de un mismo soporte, SIRAN, operando como lecho fijo o como lecho fluidizado. Así, el elevado flujo de fluido necesario para mantener la fluidización favorece las condiciones idóneas de contacto y mantiene un bajo nivel de colonización externa, evitando limitaciones de transferencia de materia desde el seno de la alimentación hasta la superficie de la "biopartícula", existiendo, de este modo, una mayor densidad de microorganismos accesibles al sustrato. Esto se traduce en una importante mejora de la capacidad degradativa del sistema. En consecuencia, el lecho fluidizado permite operar con elevadas cargas orgánicas manteniendo altos niveles de depuración, debido, por un lado, a que el SIRAN es capaz de retener elevadísimas densidades de biomasa activa en el seno del soporte, pero, fundamentalmente, a que el sistema fluidizado se acompaña de un modelo de contacto que favorece la transferencia de materia en toda la extensión activa del reactor, lo que se traduce en el comportamiento observado. Esto conduce a importantes conclusiones prácticas: la tecnología fluidizada opera con tiempos hidráulicos de retención muy inferiores a los requeridos en sistemas de lecho fijo para iguales porcentajes de eliminación, lo que supone importantes disminuciones de los costes de inmovilizado (si bien supone un mayor coste de operación); no obstante, esta tecnología está especialmente indicada en la eliminación de materia difícilmente biodegradable. La evolución de los Sólidos Volátiles en Suspensión (Fig. 2d) presenta, en todos los casos, una tendencia creciente al aumentar la velocidad de carga orgánica aplicada, mostrando mayor densidad de biomasa en suspensión los sistemas de lecho fijo, independientemente del soporte utilizado, frente al sistema fluidizado. Por tanto, la tecnología utilizada determina la magnitud de los fenómenos

de desprendimiento de la biopelícula. Así, en los sistemas de lecho fijo, el crecimiento bacteriano se desarrolla fundamentalmente sobre la superficie del soporte, por lo que está más expuesto a las fuerzas de fricción por el paso del fluido. Por su parte, el lecho fluidizado, debido al favorable contacto entre fases permite alcanzar altas cantidades de biomasa activa en el seno de las partículas del soporte, minimizando los fenómenos de desprendimiento. Por otro lado, los procesos anaerobios están fuertemente influenciados por el pH del medio de ensayo. La Fig. 2e indica que la estructura del soporte y las características hidrodinámicas del reactor condicionan, en gran medida, la estabilidad del tratamiento (los procesos con SIRAN mantienen valores de pH > 7,7). El caudal de metano generado en las distintas etapas (Fig. 2f), medido en condiciones normales, crece con la carga orgánica suministrada al sistema, mayor para el sistema lecho fluidizado, que alcanza 9m³/m³/d, frente a los sistemas de lecho fijo anaerobio con 4,3 y 3,5 m³/m³/d para el SIRAN y el plástico corrugado respectivamente. Así, la tecnología fluidizada genera mayores caudales de metano en todas las etapas de operación que el filtro anaerobio. No obstante, el rendimiento de metano es similar en ambas tecnologías (0,33 LCH₄/gDQO_c).

La modelización cinética de los procesos se ha abordado asumiendo un modelo cinético general propuesto por miembros de la línea de investigación (Romero, 1991). El modelo parte del supuesto de considerar el proceso de degradación de la materia orgánica como una reacción autocatalítica en la que se produce un crecimiento neto de la población bacteriana. El desarrollo matemático del mismo conduce a una expresión general útil para cualquier proceso fermentativo; no obstante, las elevadas concentraciones de microorganismos presentes en sistemas con retención de microorganismos ($X_{v0}/Y_{X/S} \gg S_0$), implican que algunos de sus parámetros se mantienen constantes, conduciendo a la simplificación del modelo:

Ecuación general:

$$(-r_s) = \left(-\frac{dS}{dt} \right) = \mu_{\max} \left(\frac{(S_T - S_{NB})(h - S_T)}{S_{T0} - S_{NB}} \right) \quad (1)$$

Ecuación simplificada:

$$(-r_s) = \left(-\frac{dS}{dt} \right) = \mu_{\max} \left(\frac{(h - S_{NB})(S_T - S_{NB})}{S_{T0} - S_{NB}} \right) \quad (2)$$

siendo:

$$h = \left(\frac{X_{v0}}{Y_{x/s}} \right) + S_{T0} \quad (3)$$

La velocidad de consumo de sustrato ($-r_s$) depende de 4 parámetros: $\mu_{m\acute{a}x}$, S_0 , S_{nb} y h . $\mu_{m\acute{a}x}$ representa la velocidad específica máxima de crecimiento de los microorganismos; S_0 corresponde a la concentración inicial de sustrato (DQO) adicionada a cada ensayo. El parámetro h representa la máxima cantidad de sustrato disponible en el medio para formar biomasa. (expresado en unidades de concentración de DQO mediante el coeficiente de rendimiento $Y_{x/s}$). S_{nb} corresponde a la concentración de sustrato no biodegradable en el ensayo. El mencionado modelo tiene como ventaja especial que sus parámetros tienen una clara significación física y microbiológica, por lo que puede predecirse la forma en la que evolucionarán cuando se modifiquen las condiciones aplicadas. El modelo presenta dos parámetros fundamentales: uno relacionado con la velocidad máxima de crecimiento específica de los microorganismos ($\mu_{m\acute{a}x}$), y otro relacionado directamente con la concentración de microorganismos activos inmovilizados en el sistema (X_{v0}). Este parámetro es una variable de difícil cuantificación experimental, ya que la determinación de la cantidad de biomasa “activa” en la biopelícula depende de aspectos complejos como las limitaciones por transferencia de materia, y requeriría la puesta a punto de técnicas selectivas de medición de microorganismos viables. Por tanto, la determinación de este parámetro, X_{v0} permite establecer una importante comparación operativa entre las dos tecnologías utilizadas: filtro anaerobio con plástico corrugado y lecho fluidizado con SIRAN.

Los valores de biomasa “activa” determinados a partir del parámetro X_{v0} del modelo de Romero (1991), fueron de 2 gSV_{adh}/L y 33,6 gSV_{adh}/L para los filtros y el lecho respectivamente, frente a los datos de biomasa total (activa y no activa) de 19gSV_{adh}/L y 53gSV_{adh}/L calculados experimentalmente según el protocolo de Shieh (1981). Por tanto, los filtros mantienen un menor grado de microorganismos activos, indicando la posibilidad de limitaciones difusionales en el interior de la biopelícula. Estos resultados tienen importantes consecuencias prácticas: la tecnología de lecho fluidizado aumenta considerablemente el contacto microorganismos/sustrato ya que disminuye las limitaciones por etapas físicas de transporte de materia en el seno de la fase fluida. Así, aunque en este tipo de sistemas el soporte utilizado presenta una colonización fundamentalmente interna (en los macro o mi-

croporos del soporte), los microorganismos acceden fácilmente al sustrato debido a las elevadas velocidades de flujo superficial establecidas y a la elevada superficie específica colonizada; sin embargo, en reactores de filtro anaerobio con plástico corrugado, en los que la colonización tiene lugar en forma de capas en la superficie externa, se producen importantes limitaciones de transporte del sustrato a los estratos más internos de la biopelícula, por lo que la biomasa activa disponible es considerablemente inferior. Esto justifica, además, el hecho experimental de que el sistema fluidizado sea capaz de alcanzar eliminaciones de la materia orgánica mucho más elevadas que los sistemas tipo filtro y que, además, permita eliminar la materia difícilmente biodegradable en condiciones de lecho fluidizado.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en las distintas etapas del trabajo desarrollado con los sistemas de filtro anaerobio y lecho fluidizado permiten extraer las siguientes conclusiones principales:

1. Las tecnologías de crecimiento adherido, filtro anaerobio y lecho fluidizado, son adecuadas para la depuración de vertidos de destilerías vínicas (vinazas) en condiciones anaerobias termofílicas (55°C).
2. Se comprueba que los soportes “tubos de plástico corrugado” y “perlas de vidrio sinterizado (SIRAN)” son adecuados para llevar a cabo la degradación anaerobia termofílica de vinazas de vino en reactores de filtro anaerobio y de lecho expandido/fluidizado, respectivamente. Sus características físico-químicas evitan los principales problemas operativos asociados con estas tecnologías: obstrucción del soporte (en el caso de filtros anaerobios) y desprendimiento de la biomasa adherida como consecuencia de las elevadas velocidades de flujo (en el caso de lechos fluidizados).
3. Se deduce que la tecnología de lecho fluidizado, independientemente del soporte, es más eficaz que la de lecho fijo ya que favorece el contacto entre las fases y disminuye notablemente las limitaciones por transferencia de materia en el seno de la fase fluida, favoreciendo el acceso a la superficie interna del relleno.
4. Se comprueba que el modelo autocatalítico propuesto por Romero (1991) es útil para modeli-

zar el comportamiento cinético de las distintas tecnologías utilizadas. Un aspecto importante a destacar es que el mencionado modelo permite deducir los valores de la concentración de microorganismos activos adheridos al soporte. La comparación de dicho parámetro con los resultados experimentales obtenidos permite determinar la existencia de etapas físicas de transporte controlantes. En los estudios desarrollados, tal comparación conduce a estimar que, para los reactores de filtro anaerobio, existen limitaciones por transferencia de sustrato en la biopelícula (que puede alcanzar un grosor relativamente importante), mientras que en el lecho fluidizado, prácticamente toda la biopelícula, dado su escaso espesor, es activa.

Como principal aportación del trabajo experimental realizado destaca la aplicación práctica de los resultados alcanzados: la tecnología de filtro anaerobio con un relleno de tubos de plástico corrugado es adecuada para la depuración de residuos fácilmente biodegradables o cuando no se requieren elevados porcentajes de depuración. La tecnología de lecho fluidizado, de mayor coste operativo, está especialmente indicada para depurar vertidos difícilmente biodegradables o en aquellos casos en los que se requieren elevadas tasas de depuración de los mismos.

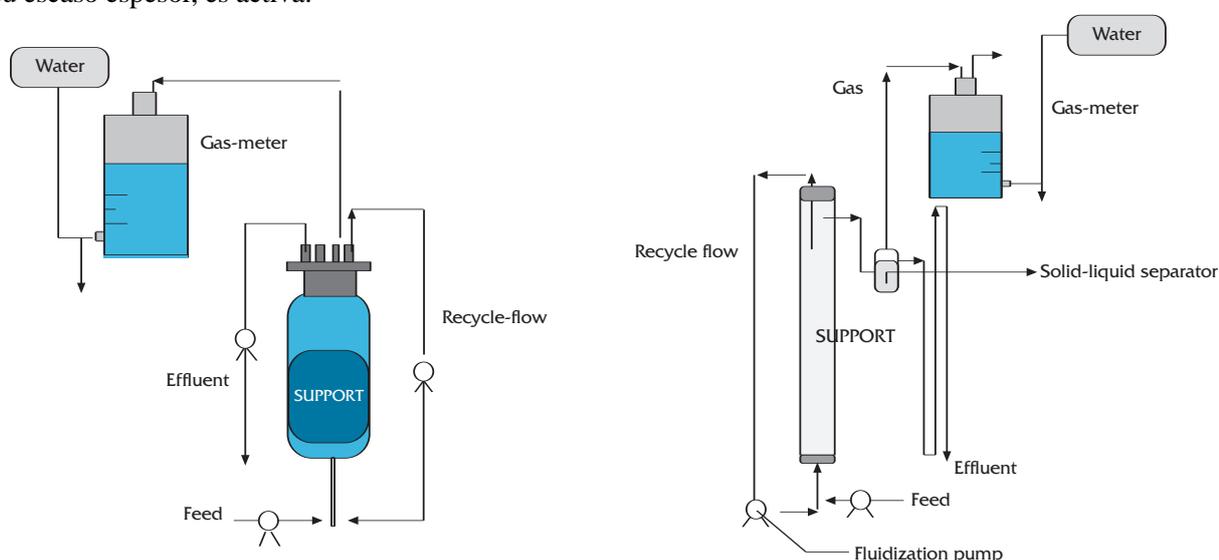


Figura 1. Esquema de los equipos experimentales utilizados: a) filtro anaerobio, b) lecho fluidizado

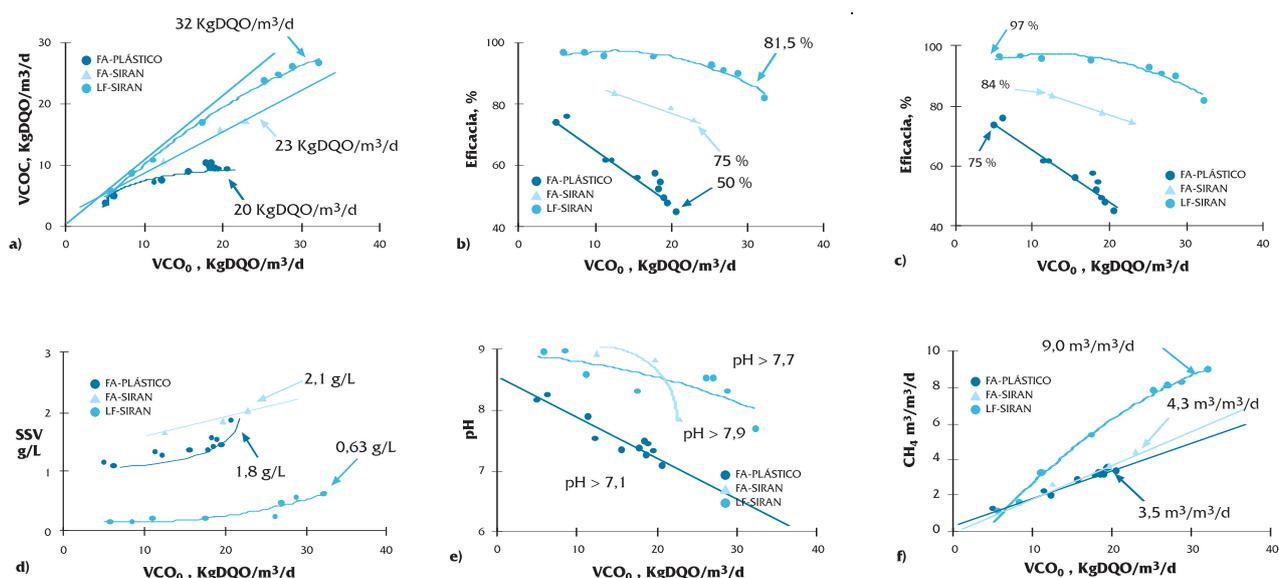


Figura 2. a) Valor máximo de la "Velocidad de Carga Orgánica" eliminada (VCO_{max}); b) Valor de la "Eficacia depurativa" para la máxima Velocidad de Carga Orgánica aplicada (VCO_{max}); c) Eficacia depurativa máxima; d) SSV; e) Evolución del pH; f) Velocidad de generación de metano.

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------|---|
| μ_{\max} | velocidad máxima específica de crecimiento de los microorganismos |
| DQO | demanda química de oxígeno |
| FA | filtro anaerobio |
| LF | lecho fluidizado |
| S_0 | sustrato alimentado |
| S_{nb} | sustrato no biodegradable |
| SST | solidos en suspensión totales |
| SSV | solidos en suspensión volátiles |
| SV_{adh} | sólidos volátiles adheridos al soporte |
| VCO_0 | velocidad de carga orgánica alimentada |

REFERENCIAS

1. BREITENBUCHER, K., SIEGEL M., KNUPFER A., RADKE M. 1990. Open-pore sintered glass as a high-efficiency support medium in bioreactors: new results and long term experiences achieved in high-rate anaerobic digestion. *Wat. Sci. Technol.* 22, 25-32.
2. CLESCERI L.S., GREENBERG A.E. (Ed). "Standard methods for the examination of water and wastewater, 1989, Rhodes Trussell, Eds. (A.P.H.A., A.W.W.A., W.P.C.F.). 17th Edition, Washington.
3. FANNIN K.F., BILJETINA R. (1987). Reactor designs. En: *Anaerobic digestion of biomass*, Elsevier applied science, New York.
4. GARCÍA-MORALES, J.L. (1997) Dinámica de colonización de la biopelícula bacteriana en reactores anaerobios termofílicos. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz.
5. HICKEY R.F., WU W.M., VEIGA M.C., JONES R. (1991) Start-up, operation, monitoring and control of high-rate anaerobic treatment systems. *Wat. Sci. Technol.*, 24, 207-255.
6. JEWELL W.J. (1982) Anaerobic attached film expanded bed fundamentals. *Proc. First Int. Conf. on Fixed Film Biological Process*, 17-42. University of Pittsburg.
7. NEBOT SANZ, E.; ROMERO GARCÍA, L.; QUIROGA, J.M.; SALES MÁRQUEZ, D. (1995) Effect of the feed frequency on the performance of anaerobic filters. *Anaerobe, Environmental Microbiology* 1, 113-123.
8. NEBOT, E. (1992) Caracterización de los principales parámetros de operación de sistemas tipo filtro anaerobio: Aplicación al diseño. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz.
9. PÉREZ, M. (1995) Utilización de biorreactores avanzados en la degradación anaerobia de aguas residuales de alta carga orgánica. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz. ISBN: 84-7786-293-1.
10. ROMERO L.I. (1991) Desarrollo de un Modelo Matemático General para los Procesos Fermentativos: Cinética de la Degradación Anaerobia. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz.
11. ROMERO L.I., NEBOT E., MARTINEZ DE LA OSSA E., SALES D. (1990) Microbial purification kinetics of wine-distillery wastewaters. *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 58, 141-149
12. SHIEH W.K., SUTTON P.M., KOS P. (1981) Predicting reactor biomass concentration in a fluidized-bed system. *J. Wat. Poll. Cont. Fed.*, 53, 1574-1584.
13. SWITZENBAUM M.S. (1983) A comparison of anaerobic filter and the anaerobic expanded/fluidized bed processes. *Wat. Sci. Technol.*, 15, 345.
14. TYAGI R.D. (1990) Wastewater treatment by immobilized cells. Eds. Tyagi R.D. y Vembu K., CRC Press, Boca Raton, Florida, 33431.
15. WANG S.H., ZHOU P. (1994) Organic matter degradation kinetics in a fluidized bed bioreactor. *Wat Res.*, 28 (9), 2021-2028.