

TECNOLOGÍA ANAEROBIA PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Iván López Moreda

Instituto de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería – Universidad de la República

RESUMEN

Se presenta un panorama general de la evolución de la tecnología anaerobia para el tratamiento de residuos. A partir de una breve presentación del proceso se pasa revista a las distintas configuraciones de reactores anaerobios para tratamiento de efluentes líquidos (reactores de manta de lodos, de film fijo, de lecho expandido y fluidizado). Asimismo se da cuenta de la variedad de efluentes tratados tanto de origen industrial como doméstico, de la evolución del número de reactores, y de su aplicación para el tratamiento de lodos y residuos sólidos. Finalmente se discute la ubicación de la tecnología anaerobia dentro de una concepción integral de los sistemas de tratamiento y de desarrollo sostenible.

ABSTRACT

The anaerobic technology for wastes treatment evolution is presented. A brief process description is followed to presentation of different reactors configurations (up flow sludge bed reactors, fixed film reactors, expanded and fluidised bed reactors). On the other hand, there is a wide diversity of treated wastewater (industrial wastes and sewage) and also the application for sludge and solid wastes digestion. The increase in the number of reactors in the world is presented. Finally, new perspectives in anaerobic digestion are discussed throughout a sustainable management point of view.

Palabras claves: Tecnología Anaerobia, Efluentes, Residuos.

INTRODUCCIÓN

La anaerobiosis es tan vieja como el mundo. De hecho, antes de tener la actual atmósfera oxigenada la vida era anaerobia. El advenimiento de esta nueva atmósfera retrotrajo a los organismos anaerobios a “nichos” donde pudiesen evitar la presencia de oxígeno. No obstante, desde hace más de cien años el hombre comenzó a percatarse de la utilidad de estos microorganismos para el tratamiento de residuos orgánicos (McCarty, 2001). Los primeros sistemas de tratamiento anaerobio a gran escala comienzan con configuraciones similares al tanque séptico hacia finales del siglo XIX, continuando a comienzos del siglo XX con reactores híbridos que agregaban un filtro

anaerobio. De esta época (1905) es también el diseño introducido por Karl Imhoff en donde el tanque actúa como digestor y sedimentador, diseño que se popularizara mundialmente.

Lógicamente el tanque Imhoff no era la solución completa para los sistemas de tratamiento de aguas residuales y el énfasis del desarrollo tecnológico en la materia en la mitad del siglo XX se da en la tecnología *aerobia*, especialmente los sistemas de lodos activados, relegando a la tecnología anaerobia a los procesos de digestión de lodos. Recién hacia fines de los '60 comienzan a aparecer en EEUU estudios importantes sobre tratamiento de efluentes utilizando filtros anaerobios (Young y McCarty, 1969). Poco más de una década después en Holanda el grupo del Prof. Lettinga revolucionaría la tecnología de tratamiento con su concepto de reactor de alta tasa (reactor de manta de lodos de flujo ascendente, UASB) (Lettinga *et al.*, 1980), y a partir de allí la tecnología se expandiría rápidamente en el mundo.

Lettinga describía en los años 90 las siguientes razones para la resistencia al uso de la tecnología anaerobia: i) falta de información adecuada sobre la performance de los sistemas instalados, ii) falta de conocimiento de los principios básicos del proceso en el campo de la ingeniería sanitaria, iii) intereses comerciales, iv) falta de estatus académico, en particular los aspectos de ingeniería, v) falta de infraestructura, redes de investigación, centros educativos, vi) el hecho de ser más una biotecnología que ingeniería sanitaria, y vii) la necesidad de aceptar una tecnología que ha sido desarrollada por otros (Lettinga y Hulshoff Pol, 1992). Más tarde señalaría como elementos que posibilitaron el rápido pasaje del laboratorio a la escala real en Holanda los siguientes elementos: i) la cooperación con una agroindustria azucarera, ii) el soporte financiero del gobierno holandés, iii) el hecho de que las industrias fueran forzadas a partir de los '70 a tratar sus efluentes y iv) la cooperación entre ingenieros y microbiólogos (Lettinga, 2001). Agregamos nosotros que este desarrollo se dio durante la primera crisis del petróleo en los años '70 donde floreció la búsqueda de soluciones energéticas alternativas.

Hoy podemos decir que la tecnología anaerobia está relativamente consolidada, aunque todavía existe un inmenso campo de investigación y desarrollo (van Lier *et al.*, 2001). Se ha superado en buena medida la falsa dicotomía aerobio *vs.* anaerobio y se estudian los problemas con un enfoque global, buscando las mejores tecnologías disponibles para cada problema y para cada realidad, haciendo hincapié en conceptos de desarrollo sostenible.

ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La conversión de sustancias orgánicas a metano es un proceso complejo que implica distintas poblaciones de microorganismos, responsables de las distintas reacciones involucradas. La Figura 1 muestra un esquema de las distintas etapas bioquímicas (Batstone *et al.*, 2002).

Las reacciones bioquímicas están normalmente catalizadas por enzimas intra o extracelulares. La desintegración de sustancias complejas a sus constituyentes particulados y la subsecuente hidrólisis enzimática a sus monómeros solubles es

normalmente extracelular. La degradación de los materiales solubles es realizada por los microorganismos intracelularmente y produce el consiguiente crecimiento de biomasa.

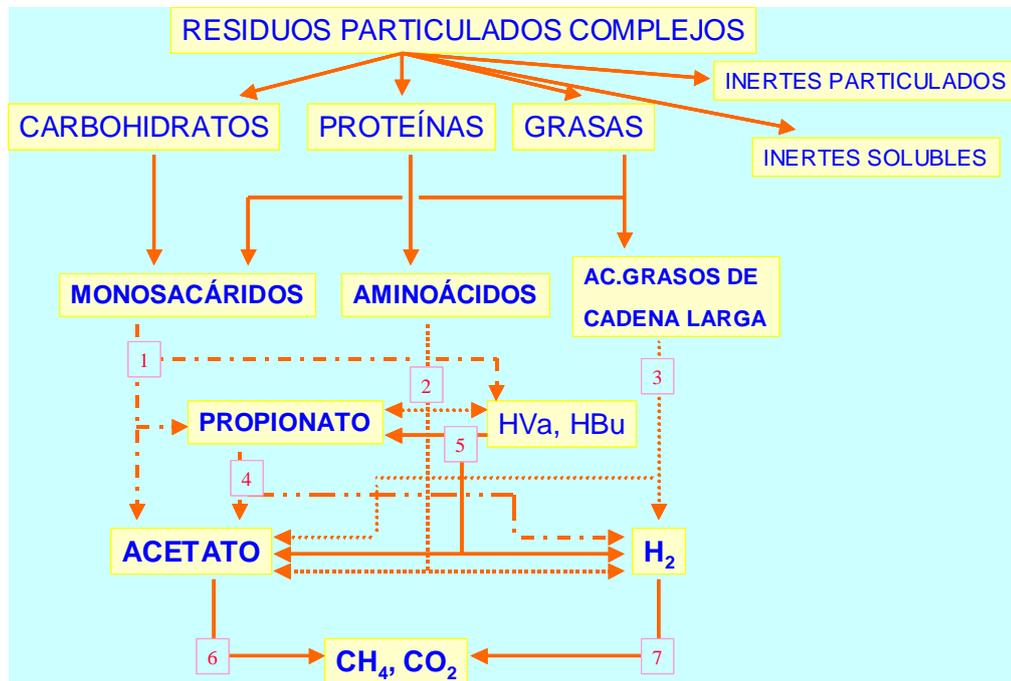


Figura 1 Procesos bioquímicos involucrados en la digestión anaeróbica; (1) acidogénesis a partir de azúcares, (2) acidogénesis a partir de aminoácidos, (3) acetogénesis a partir de AGCL, (4) acetogénesis a partir de propionato, (5) acetogénesis a partir de butirato y valerato, (6) metanogénesis acetoclástica, (7) metanogénesis hidrogenotrófica.

Además de las reacciones bioquímicas se dan procesos fisicoquímicos tales como asociación y disociación de sustancias iónicas, transferencia gas-líquido, precipitación y solubilización.

Del delicado equilibrio entre todos estos procesos y el funcionamiento simbiótico de las distintas poblaciones de microorganismos junto con la eventual competencia con otros procesos depende el resultado final.

REACTORES ANAEROBIOS

El desarrollo más importante de la tecnología anaerobia para el tratamiento de efluentes líquidos se dio a partir del concepto de reactores de alta tasa, en los que el tiempo de retención celular de los microorganismos se desvincula del tiempo de retención hidráulica en el reactor. Con ello se consiguen varios objetivos entre los que se destacan: el poder obtener una mayor carga aplicada por unidad de volumen, la especialización lograda por los microorganismos y el integrar en un solo reactor el

tratamiento y la separación de fases. El tipo de reactor más aplicado es el UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) cuyo esquema se muestra en la Figura 2. En la parte inferior del reactor, por donde se coloca la alimentación del efluente, se conforma un manto de lodos anaerobios donde se produce la degradación de la materia orgánica. En la parte superior existe un sistema que separa la fase gaseosa de la líquida y que actúa además como sedimentador de los sólidos que hubieran ascendido hasta allí. Adicionalmente en muchísimas aplicaciones se logra un lodo granular donde los microorganismos se consorciaban en un gránulo sin necesidad de soporte y producen entonces un lodo con muy bajo IVL y propiedades de sedimentación óptimas. Con los reactores UASB se alcanzan cargas por encima de los 10 kgDQO/m³.d.

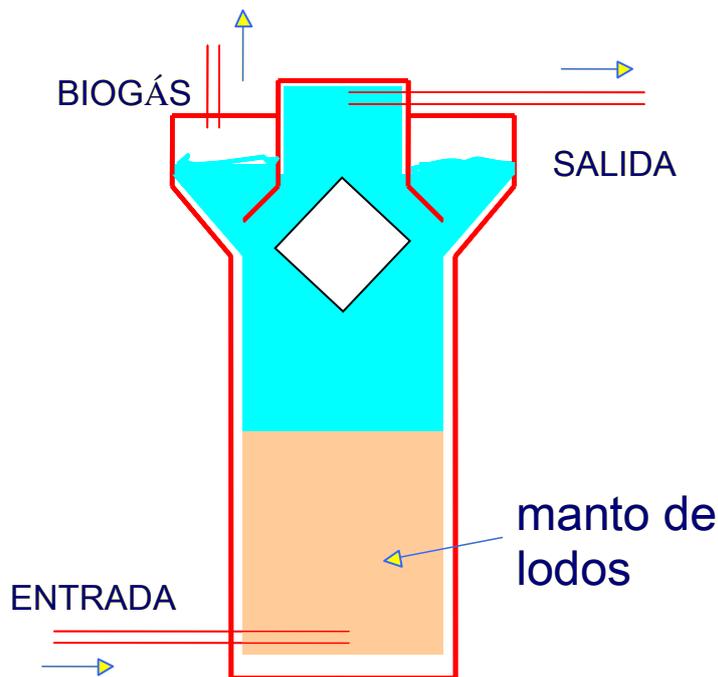


Figura 2 Esquema de reactor UASB.

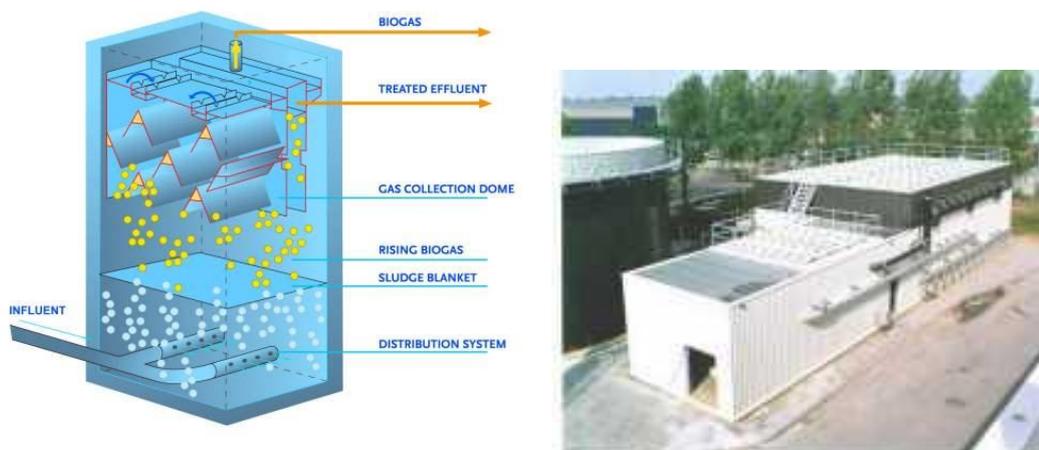


Figura 3 Reactor tipo UASB BIOPAC® de Paques.

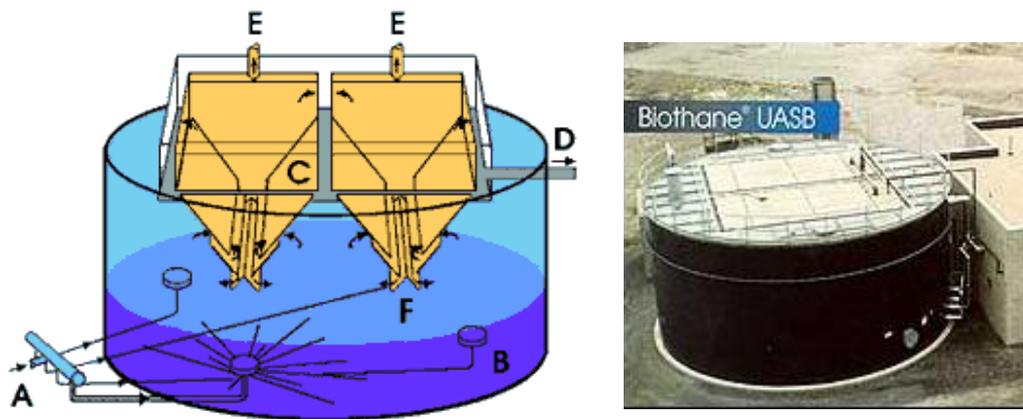


Figura 4 Reactor tipo UASB de BIOTHANE®

Otro tipo de reactores son los filtros anaerobios, que involucran un material de soporte sobre el que crecen adheridos los microorganismos en forma de biofilm, aunque también se desarrolla una importante cantidad de biomasa dispersa en los intersticios del relleno. Unos de los aspectos críticos desde el punto de vista técnico-económico es entonces la selección del relleno. Los primitivos rellenos con piedras tipo canto rodado eran baratos pero dejaban un volumen útil muy. Rellenos plásticos permiten un aprovechamiento mayor del volumen del reactor (espacio hueco del orden del 90%) pero tienen el inconveniente de su costo. Los filtros anaerobios no necesitan un sistema de separación de fases pues el propio filtro actúa reteniendo los sólidos. Por otro lado la posibilidad de oclusión por crecimiento excesivo de la biomasa o simplemente por retención de sólidos está presente, por lo que deben preverse sistemas de retrolavado para limpieza y desobstrucción.

También se han ensayado reactores híbridos, que combinan la existencia en su parte inferior de un manto de lodos con un filtro anaerobio en su parte superior. De esta forma se intenta preservar los aspectos positivos del concepto de UASB combinado con un filtro, que además de eliminar el sistema de separación de fases retiene los sólidos previniendo eventuales lavados de la biomasa del reactor.

Los reactores de lecho fluidizado también se han utilizado con éxito para el tratamiento anaerobio. La biomasa normalmente crece adherida a un soporte inerte tal como arena o carbón activado lo que permite aumentar la densidad de las partículas y prevenir el lavado como consecuencia de las relativamente altas velocidades de flujo. Estas últimas promueven una gran turbulencia, disminuyendo drásticamente las resistencias a la transferencia de masa entre el líquido que contiene la sustancia a degradar y el biofilm donde se encuentran los microorganismos. Las altas velocidades de flujo llevan a diseñar reactores con relación altura/diámetro grandes y consecuentemente con necesidades de espacio pequeñas.

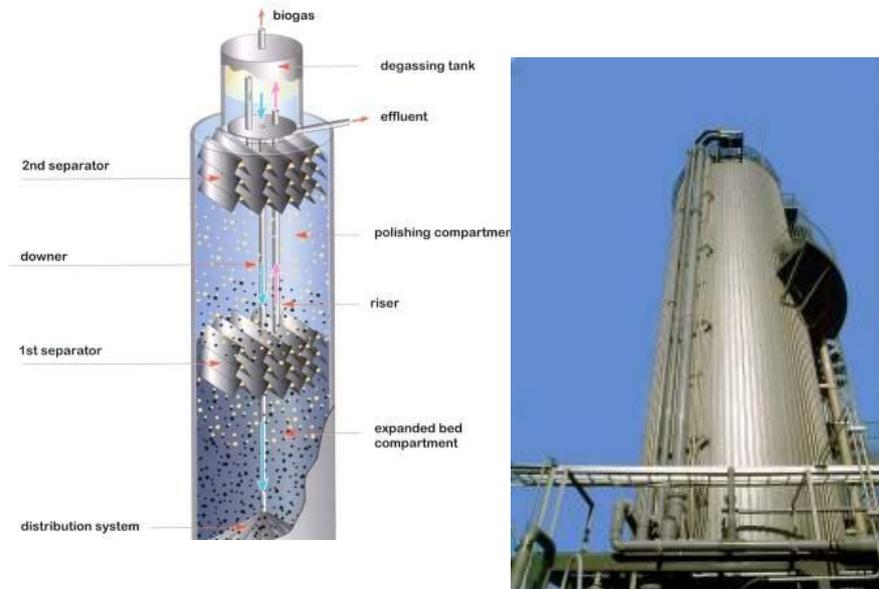


Figura 5 Reactores tipo IC, BIOPAC®

Las dificultades para el control de los reactores de lecho fluidizado así como sus requerimientos energéticos han llevado a desarrollar los conceptos de reactores de lecho expandido (EGSB, expanded granular sludge bed) y de circulación interna (IC), en los cuales se prescinde del soporte inerte para el biofilm.

Los EGSB aprovechan al máximo la alta sedimentabilidad de los gránulos anaeróbicos y operan con velocidades ascensionales de más de 8 m/h (hasta 30 m/h), mediante un aumento en la relación altura/diámetro respecto a los UASB tradicionales (altura entre 12 y 20 m) y una recirculación externa. El sistema de separación de fases es algo más sofisticado que en los UASB. Se alcanzan cargas orgánicas por encima de los 20 kgDQO/m³.d y la recirculación permite por contrario trabajar con un amplio rango de concentraciones sin inconvenientes. La eliminación de la resistencia a la transferencia de masa hacia el biofilm producida por la turbulencia permite trabajar en condiciones psicrófilas con buen éxito, así como con efluentes de bajas concentraciones de materia orgánica (menos de 1gDQO/L). También se ha indicado su uso para efluentes que tienden a generar problemas de espuma en los sistemas UASB.

Los reactores de recirculación interna aprovechan el principio del air lift. Estos reactores están equipados con dos sistemas de separación sólido-gas, uno de ellos a mitad de altura y otro en el extremo superior. La mezcla gas-líquido colectada en el medio se transporta hacia el extremo superior donde se desgasifica. Entonces el líquido retorna al extremo inferior donde se mezcla con la corriente de entrada.

EFLUENTES INDUSTRIALES

Existe una amplia variedad de efluentes industriales que han sido tratados con éxito en sistemas anaerobios. Pueden citarse entre otros: maltería, cervecera, bebidas,

destilerías, pulpa y papel, industria alimenticia, industria farmacéutica, levaduras, lixiviado, etc. (Lettinga y Hulshof Pol, 1992; Borzacconi y López, 1994; Frankin, 2001). Frankin (2001) señala que la tecnología anaerobia para tratamiento de efluentes industriales está funcionando hoy en 65 países del mundo estimando en unas 2000 la totalidad de las plantas. Analizando una base de datos que incluye exclusivamente a las principales empresas proveedoras de esta tecnología y que incluye 1215 plantas proporciona la distribución de efluentes tratados que se observa en la Figura 6.

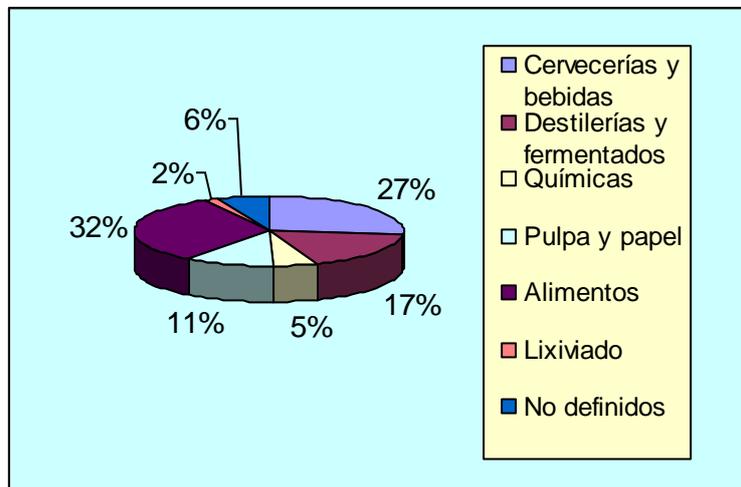


Figura 6 Distribución en número de reactores según efluente

Asimismo la distribución según tipo de reactor se observa en la Figura 7.

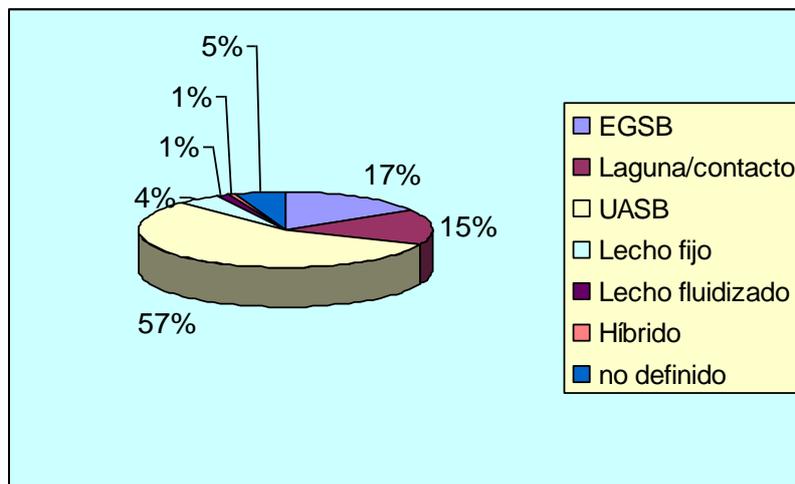


Figura 7 Distribución de número de reactores por tipo de reactor.

A su vez los mismos datos muestran la tendencia creciente que ha experimentado la tecnología en las últimas décadas (Figura 8, tomada de Van Lier, 2008).

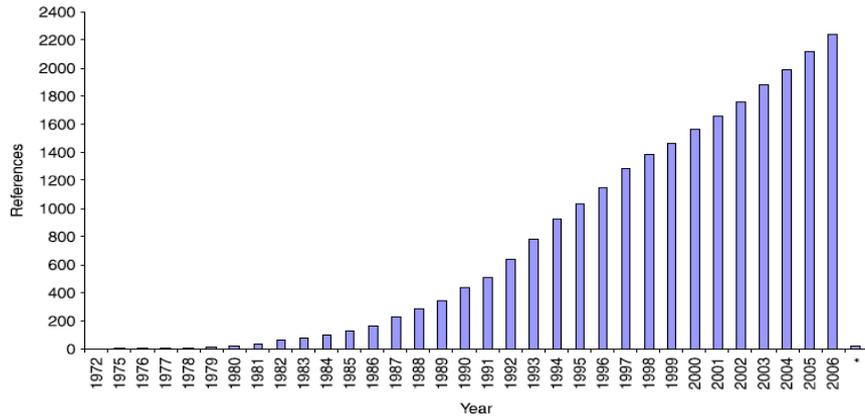


Figura 8 Evolución del número de reactores anaerobios construidos por las principales empresas comerciales.

Los datos presentados por Van Lier (2008) muestran también el creciente protagonismo que han tomado los reactores EGSB construidos por empresas comerciales en la última década (Fig.9).

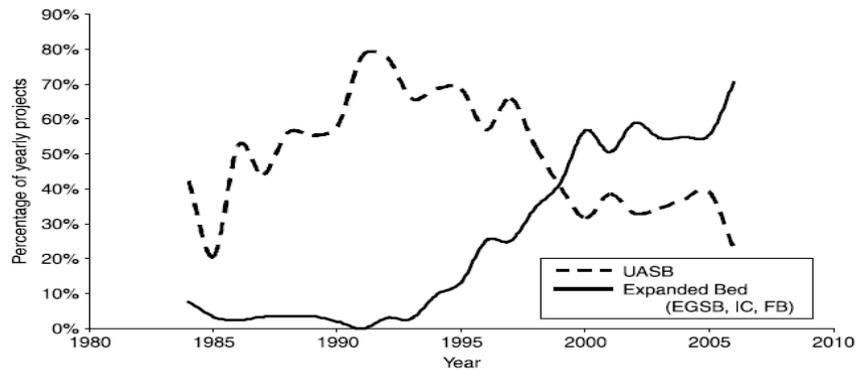


Figura 9 Evolución del porcentaje en la construcción de reactores anaerobios agrupados por tipo de reactor por parte de las principales empresas comerciales.

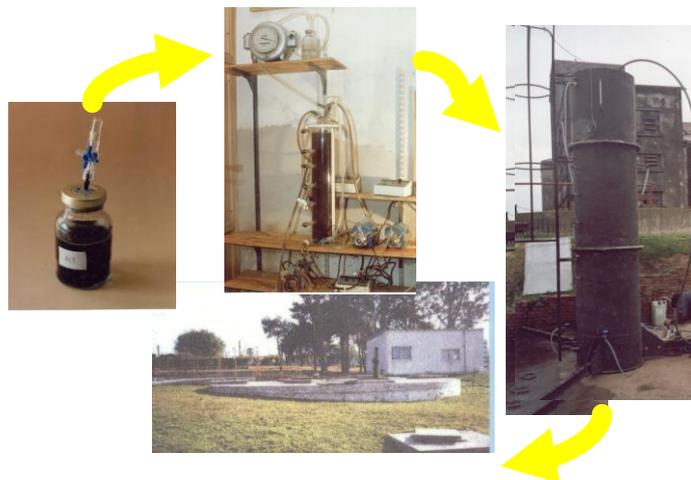


Figura 10 Etapas en el escalado de reactores: a) pruebas batch de degradación; b) ensayos de banco en continuo; c) reactor piloto; d) reactor a escala real.

EFLUENTES DOMÉSTICOS

Existen ciertas características que distinguen a los efluentes cloacales o domésticos: bajas concentraciones de materia orgánica, relativamente alta concentración de sólidos suspendidos, fluctuaciones diarias en el caudal, fluctuaciones diarias en la concentración. Estas peculiaridades no parecen ser impedimento para un buen suceso de la tecnología anaerobia, especialmente en regiones de clima tropical. De hecho en países como Brasil, Colombia e India existen grandes reactores anaerobios que han funcionado durante muchos años (Lettinga, 1992; van Haandel y Lettinga, 1994; Foresti, 2002).

El problema de la temperatura es importante debido a la importante cantidad de sólidos particulados que necesitan ser hidrolizados. La etapa de hidrólisis está fuertemente influenciada por la temperatura. Por lo tanto en este caso es esencial disponer de un buen tratamiento primario que retire la mayor cantidad posible de sólidos en suspensión antes de que el líquido entre al reactor anaerobio. En este caso el líquido que ha pasado por el tratamiento primario es tratado sin problemas en el reactor anaerobio (Seghezzi *et al.*, 2000). Asimismo, por tratarse de un efluente diluido, la producción de biogás no es suficiente como para aprovecharla en un calentamiento del propio reactor (de hecho la producción es tal que cerca de la mitad del metano formado sale disuelto con el efluente). Aún sin un buen tratamiento primario puede diseñarse una estrategia de arranque durante la época estival; una vez arrancado, la propia inercia térmica del mismo sigue propiciando un funcionamiento aceptable del reactor (López *et al.*, 2000).

Normalmente la salida del reactor anaerobio debe pasar por un postratamiento para alcanzar las condiciones de vertido y en tal sentido se abren múltiples alternativas; muchas de ellas se adaptan a la realidad económica de la región (Foresti, 2002).

LODOS Y RESIDUOS SÓLIDOS

Todas las plantas de tratamiento biológico de líquidos generan lodos. Estos lodos normalmente deben ser tratados para lograr su transformación en un lodo inocuo. En el proceso de tratamiento anaerobio parte de los sólidos son convertidos finalmente a metano y dióxido de carbono, con la consiguiente reducción neta de sólidos; adicionalmente se produce una importante destrucción de patógenos. El producto final normalmente es estable, inocuo y puede utilizarse como acondicionador de suelos, por ejemplo (Malina, 1992).

La digestión de lodos produce metano en cantidad suficiente como para ser utilizado en el propio calentamiento y mezclado del reactor e incluso se produce un exceso que puede usarse en otros fines energéticos, incluyendo las propias necesidades de un sistema aerobio de tratamiento de líquidos (Borzacconi *et al.*, 1999). La reducción de sólidos normalmente está en un rango del 25 al 45%. Normalmente se requieren largos tiempos de retención, superiores a los 10 días, por lo que los reactores son relativamente grandes.

Los propios residuos sólidos urbanos son degradados anaeróbicamente ya sea en un relleno sanitario convencional con o sin recuperación de biogás como en un relleno concebido como biorreactor (Pholand, 1977).

Nuevos sistemas para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, de lodos de plantas de tratamiento u otros residuos sólidos orgánicos, e incluso la digestión anaerobia de cultivos energéticos, se han desarrollado en las últimas décadas con mayor o menor grado de aplicación según los países. Algunas opciones implican el pretratamiento mecánico de los residuos para disminuir el tamaño de los sólidos. Otras opciones separan el proceso en dos fases, una fase hidrolítica que pasa la materia orgánica a la fase líquida y posteriormente este líquido es tratado en un reactor anaerobio convencional (Lissens *et al.*, 2001).

LA TECNOLOGÍA ANAEROBIA EN UNA CONCEPCIÓN INTEGRAL DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

En la actualidad las trabas que se observaban hace algunas décadas para el desarrollo de la tecnología anaerobia han sido superadas en su mayoría. Podemos hablar de una tecnología consolidada y en expansión. Se tiene un conocimiento profundo que avanza día a día de los fundamentos microbiológicos y concomitantemente se desarrollan los aspectos ingenieriles.

Pero además la tecnología anaerobia aparece como un eje fundamental dentro de una concepción sustentable del tratamiento de residuos y se ajusta perfectamente a las directivas en materia ambiental que están imponiendo los países desarrollados (Lema y Omil, 2001; McCarty, 2001).

Con el objeto de reducir el consumo de agua y optimizar el tratamiento de efluentes la nueva concepción en el diseño de un proceso industrial tiende al tratamiento *in situ* de los residuos generados y a la reutilización del agua en el propio proceso. La figura 11, tomada de Lema y Omil (2001) esquematiza la vieja concepción y la nueva. El layout final lógicamente dependerá de una adecuada combinación de procesos (anaeróbico, aeróbico, nitrificación, desnitrificación, etc.) pero el objetivo es realizar procesos de alta calidad, con el menor consumo energético y la mayor recuperación y reciclaje posibles. Bajo esta concepción la tecnología anaerobia se encuentra muy bien posicionada, debido a los siguientes aspectos: bajos costos de tratamiento, inclusive con posibilidad de recuperación energética; gran flexibilidad, pues puede aplicarse a una gran variedad de efluentes, inclusive algunos que no son degradables aeróbicamente; capacidad para procesar altas cargas, lo cual implica menores requerimientos de espacio; menor exceso de lodos; capacidad de preservar los lodos durante períodos de tiempo relativamente largos.

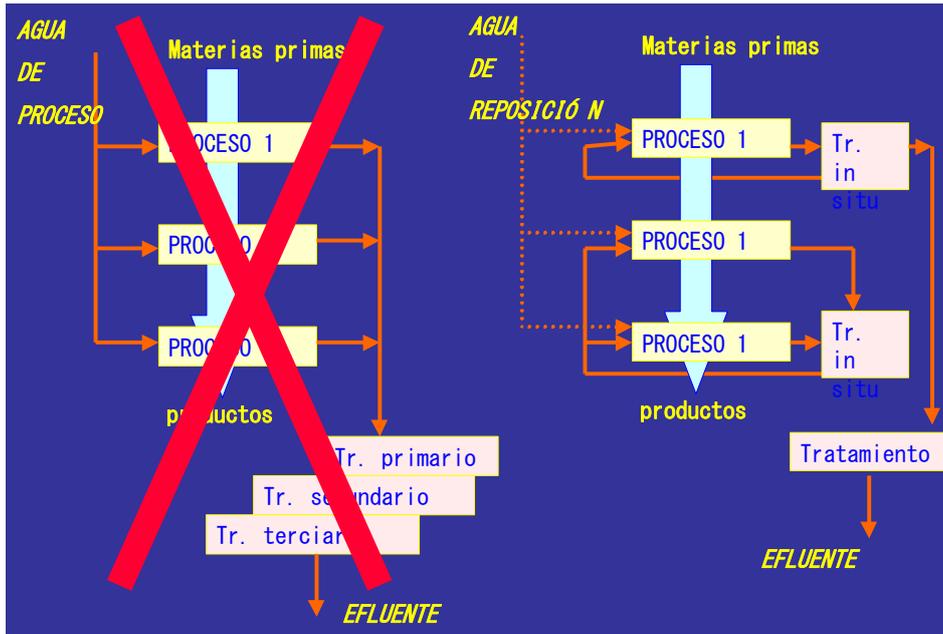


Figura 11 A la izquierda, vieja concepción de los procesos productivos; a la derecha, nueva concepción sustentable (tomado de Lema y Omil, 2001).

Junto con el anterior, el esquema de la Figura 12 (tomado de Lettinga, 2001) apunta a ubicar a la tecnología anaerobia no como una panacea en contraposición a otras tecnologías, sino en un concepto integrador que intenta optimizar el uso de los recursos naturales adoptando la mejor tecnología disponible para cada caso concreto.

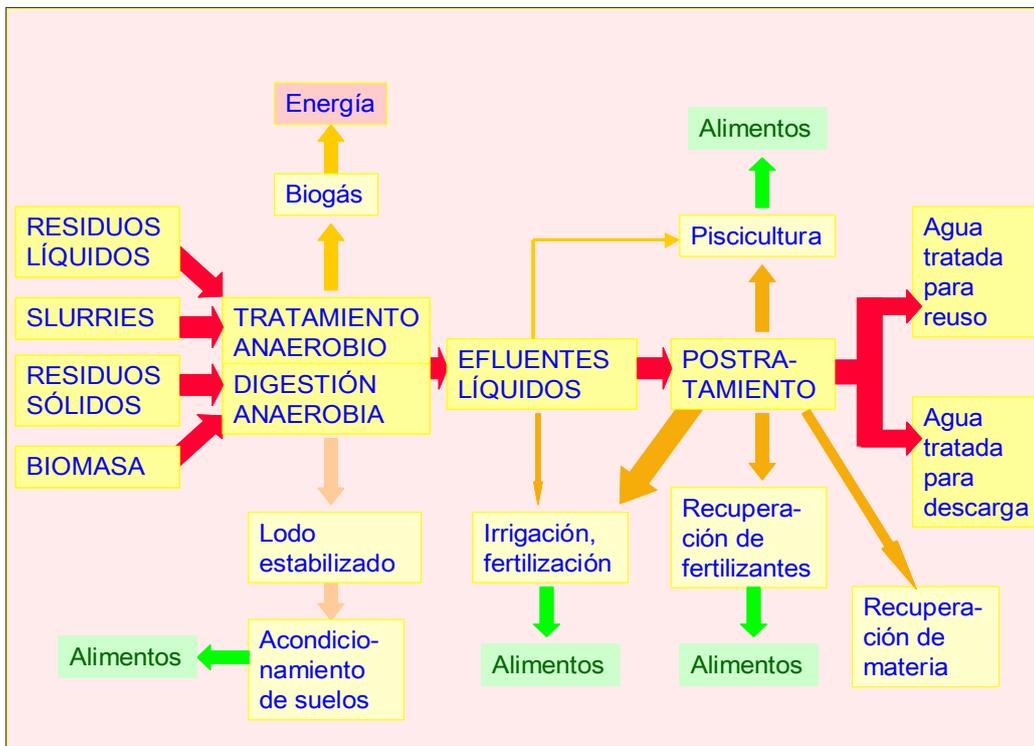


Figura 12 Esquema que muestra la ubicación de la tecnología anaerobia dentro del concepto de protección ambiental y conservación de recursos (tomado de Lettinga, 2001)

CONCLUSIONES

La tecnología anaerobia tiene un potencial muy importante para jugar en un concepto integral de tratamiento de residuos, y resulta una tecnología afín con el concepto de sostenibilidad. El conocimiento del proceso ha permitido el desarrollo acelerado en las últimas décadas de diversas aplicaciones tecnológicas, abarcando una amplia variedad de residuos y con un crecimiento sostenido en el número de reactores instalados.

REFERENCIAS

Batstone, D.J., Keller, J., 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 N°1 (ADM1), *Wat. Sci. & Tech.*, **45** (10), 65-74.

Borzacconi, L., López, I. (1994), Relevamiento de reactores anaerobios en América Latina, en *Tratamiento Anaerobio*, Viñas, Soubes, Borzacconi y Muxi eds., Montevideo.

Borzacconi, L., López, I., Mallo, M., Martínez, J. (1999) Potential biogas production from sludges and MSW in Uruguay, en Proceedings ORBIT 99, Alemania, pp 867-873.

Foresti, E. (2002), Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives, *Wat. Sci. & Tech.*, **45** (10), 181-186.

Frankin, R.J. (2001), Full-scale experiences with anaerobic treatment of industrial wastewater, *Wat. Sci. & Tech.*, **44** (8), 1-6.

Lema, J.M., Omil, F. (2001), Anaerobic treatment: a key technology for a sustainable management of wastes in Europe, *Wat. Sci. & Tech.*, **44** (8), 133-140.

Lettinga, G., van Velsen, A.F.M., Hobma, S.W., de Zeeuw, W., Klapwijk, A. (1980), Use of the upflow sludge blanket reactor concept for biological waste water treatment, specially for anaerobic treatment, *Bio. Bio.*, **22**, 699-734.

Lettinga, G. (1992), Treatment of raw sewage under tropical conditions, en *Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes*, Malina y Pohland eds., Technomic Publishing Company, USA, ISBN 87762-942-0.

Lettinga, G., Hulshoff Pol, L. (1992), UASB process design for various types of wastewaters, en *Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes*, Malina y Pohland eds., Technomic Publishing Company, USA, ISBN 87762-942-0.

Lettinga, G. (2001), Digestion and degradation, air for life, *Wat. Sci. & Tech.*, **44** (8), 157-176.

Lissens, G., Vandevivere, P., De Baere, L., Biey, E.M., Verstraete, W. (2001), Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion, *Wat. Sci. & Tech.*, **44** (8), 91-102.

López, I., Martínez, J., Mallo, M., Borzacconi, L., Fuentes, I., Saldaña, M., Dellepere, A. (2000), Arranque de reactores de manta de lodos para el tratamiento de aguas domésticas a escala real en un país de clima templado, *Anales del VI Taller y Seminario Latinoamericano de Digestión Anaerobia*, Recife, Brasil, Vol 2, pp.49-54.

Malina, J.F., Jr. (1992), Anaerobic sludge digestion, en *Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes*, Malina y Pohland eds., Technomic Publishing Company, USA, ISBN 87762-942-0.

McCarty, P.L. (2001), The development of anaerobic treatment and its future, *Wat. Sci. & Tech.*, **44** (8), 149-156.

Pholand, F. (1977) Landfill bioreactors developments for solid waste management, en *Proceedings 8th International Conf. On Anaerobic Digestion, vol.1, pp. 59-66.*

Seghezzo, L., Castañeda, M.L., Trupiano, A.P., González, S.M., Guerra, R.G., Torres, A., Cuevas, C.M., Zeeman, G., Lettinga, G. (2000), Anaerobic treatment of pre-settled sewage in UASB reactor in subtropical regions (Salta, Argentina), *Anales del VI Taller y Seminario Latinoamericano de Digestión Anaerobia*, Recife, Brasil, Vol 1, pp.7-13.

van Haandel, A.C., Lettinga, G. (1994), Anaerobic sewage treatment. A practical guide for regions with a hot climate, J.Willey&Sons, England, 226p.

van Lier, J., Tilche, A., Ahring, B.K., Macarie, H., Moletta, R., Dohanyos, M., Hulshoff Pol, L.W., Lens, P., Verstraete, W. (2001), New perspectives in anaerobic digestion, *Wat. Sci. & Tech.*, **43** (1), 1-18.

van Lier, J. (2008) High-rate anaerobic wastewater treatment: diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques, *Wat. Sci. & Tech.*, **57** (8), 1137-1148.