

CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE GRANULACIÓN EN REACTORES UASB

Adis Terry Broun, Maikel Fernández Boizán, Delys Zenia Almeida
Centro de Estudios de Biotecnología Industrial (CEBI), Universidad de Oriente

*La tecnología de la digestión anaerobia es de gran utilidad para el tratamiento biológico de residuales líquidos de alta carga orgánica con el empleo de reactores de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB). En el trabajo se pretende realizar una revisión de los principales factores bióticos y abióticos, de mayor incidencia en el proceso de granulación de inóculos naturales en reactores UASB, tales como el desarrollo de bacterias *Methanothrix* en el lodo, la producción de polímeros extracelulares (EPC), la velocidad ascensional, el contenido de sólidos suspendidos y las características del sustrato. La evaluación de los factores anteriormente analizados permitió el desarrollo de una estrategia de granulación, que va desde la selección y caracterización de las fuentes de inóculos empleadas y la caracterización del agua residual por tratar, hasta el análisis de los principales parámetros operacionales con mayor repercusión en el arranque, puesta en marcha y funcionamiento de este tipo de reactor anaerobio.*

Palabras clave: *tratamiento anaerobio, aguas residuales.*

*The anaerobic digestion technology is widely employed for biological treatment of wastewater containing high concentrations of organic matter with the use of upflow anaerobic sludge blanket (UASB). In the present work it is carried out a revision of principal biotic and abiotic factors of the major incident in the granulation process of natural inoculum in UASB reactors, for example, development of *Methanothrix* bacteria in the sludge, the production of extracellular polymers (EPS), upflow velocity, suspended solids contents, and the characteristics of substrate. The evaluation of the previously analyzed factors, allowed the development of a granulation strategy that goes from the selection and characterization of the sources of used inoculum, and the characterization of the residual water to be tried, until the analysis of the main operational parameters with more repercussion in the outburst, setting in march and operation of this type of anaerobic reactor.*

Key words: *anaerobic treatment, wastewaters.*

Introducción

La tecnología de la digestión anaerobia de residuos responde a los principios básicos de la Biotecnología Ambiental, y constituye una de sus herramientas más importantes. /5/ Con su aplicación se pretende degradar materiales de una elevada complejidad química, que inciden desfavorablemente en el entorno, causando problemas de contaminación ambiental. En tal sentido, el aprovechamiento de las capacidades de la actividad metabólica de los microorganismos anaerobios en la biodegradación de la carga contaminante de los residuos, permite disminuir su impacto ambiental.

El desarrollo actual de la biotecnología para el tratamiento de aguas residuales, señala a los reactores anaerobios de segunda generación como

los más atractivos para su implementación a escala industrial. /2/ La explotación de éstos constituye un campo promisorio a disposición de ingenieros e investigadores, para eliminar la contaminación de los acuatorios que sirven como cuerpos receptores. /16/ La tecnología anaerobia es por tanto, una opción viable en países de clima tropical para el tratamiento de aguas residuales, ofreciendo ventajas en términos de menores requerimientos de área, menores costos de operación y mantenimiento, y obtención de subproductos, por lo que dicha tecnología cuenta con las características necesarias para un manejo integrado de los recursos hídricos. A pesar de los aspectos favorables, esta tecnología también presenta limitaciones de naturaleza biológica, debido a la complejidad de la microbiología del proceso (diversas etapas y poblaciones bacterianas involucradas), y

a la poca disponibilidad de inóculos de buena calidad y en cantidad suficiente. Esta situación conlleva a períodos de arranque relativamente largos, que pueden ser acompañados de otras limitaciones según el diseño del reactor y de los parámetros fisicoquímicos y termodinámicos asociados a la tecnología anaerobia, y que determinan la ocurrencia del proceso. /7 /

A partir de la década de los 70, se comenzaron a emplear los reactores de Flujo Ascendente con Manto de Lodo (UASB) para el tratamiento de las aguas residuales. Éstos son los más empleados en el tratamiento de residuales líquidos con alta carga orgánica; tanto domésticos como agroindustriales, con el fin de disminuir la carga orgánica contaminante de los residuales antes de su vertimiento al cuerpo receptor final, debido precisamente a que estos reactores basan su funcionamiento en la inmovilización de la biomasa en forma de gránulos sin el empleo de soportes. Esta característica lo identifica por su reconocida participación en la degradación de los más diversos sustratos y por todos los beneficios que proporcionan, y exige a su vez de un conocimiento más profundo. Por ello, los gránulos constituyen el “corazón” de la tecnología, pues las células microbianas que lo conforman son las que degradan la materia orgánica hasta compuestos volátiles con una mayor eficiencia. /26/

En Cuba, no existen experiencias reportadas de granulación en instalaciones a escala real, por lo que el objetivo general de este trabajo es realizar una revisión desde el punto de vista teórico-práctico de los principales factores bióticos y abióticos con mayor incidencia en la formación de gránulos, a partir de inóculos naturales durante el tratamiento de residuos líquidos.

Desarrollo

Como ha sido descrito por algunos autores, los reactores UASB son muy convenientes para el tratamiento de aguas residuales con elevada carga orgánica, pues la formación de flóculos o gránulos en el interior de éste permite aumentar el contacto entre los microorganismos y el agua residual por tratar, además, de disponer de una alta concentración de biomasa y una elevada diversidad microbiana. /22/

Considerando que la formación del gránulo en un reactor UASB, involucra procesos microbiológicos y fisicoquímicos entre las células e interacciones de éstas con los factores medioambientales (nutrientes, fuerzas hidráulicas debido al flujo y producción de gas, temperatura, pH, etcétera), se hace necesario el diseño de una estrategia de trabajo que permita, en nuestras condiciones favorecer el proceso de granulación (figura 1).

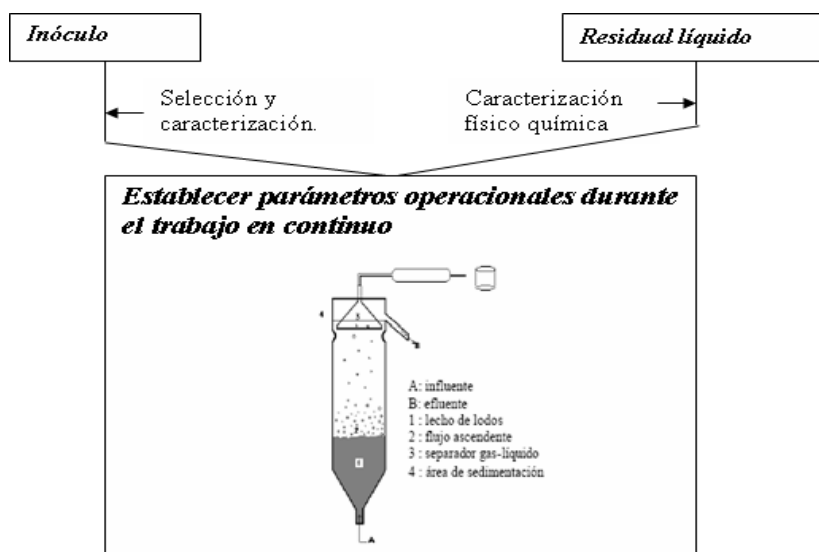


Fig. 1 Estrategia de trabajo para favorecer la granulación en reactores UASB.

Inóculo

Fuente de inóculo

La selección del inóculo constituye uno de los primeros pasos para realizar un tratamiento biológico a un agua residual, y de ello depende mantener las condiciones de estabilidad operacional del reactor. Las características intrínsecas del inóculo, como la presencia de un consorcio bacteriano balanceado, que le permita su adaptación al medio sin mayores cambios, son de vital importancia para llegar a la formación de gránulos activos y estables, además, de lograr la consecuente disminución de la carga orgánica contaminante.

El hecho de seleccionar un lodo proveniente de fuentes naturales como inóculo, además, de evitar problemas de costo, exige conocer la composición del mismo para detectar y eliminar aquellos elementos que puedan afectar el proceso de tratamiento, y por otro lado, aprovechar las ventajas que nos brinde el consorcio que posea.

Entre las fuentes de inóculo con mayor disponibilidad en nuestra región, se encuentra el estiércol vacuno /20/, el cual posee un alto contenido de bacterias anaerobias metanogénicas; lo que constituye una característica muy favorable, aunque el mismo posee la desventaja de tener un alto contenido de material lignocelulósico, que tiende a flotar dentro del reactor, provocando problemas operacionales a causa de obstrucciones en el sistema. Por esto, es recomendable no tomar dicho inóculo directamente del medio natural, sino proveniente de un digestor que esté en funcionamiento alimentado con dicho estiércol; lo que proporcionará un inóculo con microorganismos adaptados y con la menor cantidad de material lignocelulósico.

Otra de las posibles fuentes de inóculos factibles de ser empleadas es el estiércol porcino, que pudiera ser tomado de una laguna de estabilización de una granja porcina. Además, debido a que en estos momentos se ha establecido una estrategia por parte del Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, que exige la construcción de lagunas de estabilización asociadas a cualquier centro porcino, permite una mayor disponibilidad de esta fuente.

Los lodos provenientes de las lagunas de estabilización de residuales agroindustriales, como es el caso de la industria azucarera y la cafetalera, también pueden ser empleados como inóculos para este proceso. Con mayor preferencia se escogen aquéllas en las cuales se trata el mismo residual. En este caso, la recolección del inóculo debe realizarse asegurándose las condiciones de anaerobiosis, evitándose el efecto tóxico que el oxígeno molecular pudiera ejercer sobre las bacterias anaerobias. La toma del inóculo no debe realizarse muy cercano a los límites de la laguna, pues existe la probabilidad de arrastrar material inerte (arcilla y arena), los cuales contribuyen de igual manera al mal funcionamiento del reactor, recomendándose las lagunas que posean algún sistema de impermeabilización.

El proceso de digestión anaerobia se puede mejorar empleando mezclas de inóculos, que al presentar una mayor diversidad microbiana adaptada a diversos sustratos, garantiza la disminución del período de arranque y puesta en marcha del reactor, así como la disminución del tiempo requerido para la granulación, por lo que el empleo de mezclas de inóculos tal como lo sugieren /29/, es recomendable para mejorar la eficiencia del proceso.

Caracterización y selección de los inóculos

La optimización de los procesos biológicos y de los reactores anaerobios encontrará siempre una limitación, si no se cuenta con un conocimiento profundo de las características químicas y microbiológicas del lodo empleado como inóculo. Entre las herramientas indispensables con las cuales debe contar un laboratorio para lograr el éxito del proceso de granulación anaerobia, se encuentran los ensayos de actividad metanogénica específica (AME), sólidos suspendidos volátiles (SSV), polímeros extracelulares (EPS) y el índice volumétrico de lodo (SVI). Dichos parámetros deben ser medidos antes y durante la operación del reactor; por lo que se recomienda realizar las colectas del lodo de forma periódica, desde cada uno de los puntos de toma de muestra que posea el digestor para estudiar la adaptación de los diferentes microorganismos a las condiciones de arranque.

Ensayo de Actividad Metanogénica Específica (AME)

La actividad metanogénica específica es una medida de la producción de metano por unidad de sólidos suspendidos volátiles y por unidad de tiempo, en otras palabras, expresa las potencialidades que tiene el inóculo de reducir la materia orgánica hasta metano. Generalmente, se expresa como g DQO/ gSSV * d. y se calcula a través de la siguiente expresión:

$$AME = (R * 24) / (FC * V * SSV) \quad (1)$$

donde:

R: velocidad de producción de metano en CH₄/h;
24: h/d;

FC: factor de conversión en mL CH₄/g DQO
(382 * (273 + Temp °C)/(273 + 25))

V: volumen efectivo líquido en el digestor en L
SSV: concentración del lodo en g SSV/L.

Para evaluar la actividad metanogénica de los inóculos, se realiza una cinética en botellas serológicas de 500 mL, para ello se adicionó en las botellas 50 mL de inóculo y 450 mL de medio de cultivo descrito para este propósito /21/, con el empleo de acetato de sodio como fuente única de carbono. En todos los casos, las determinaciones se hacen por triplicado y se mantienen a temperatura entre 27-30 °C, siendo la variable de respuesta la producción de metano en el tiempo, medida por el desplazamiento de una solución de NaOH al 5 %.

Las variantes de inóculos descritas anteriormente, fueron ensayadas para evaluar la actividad metanogénica específica que eran capaces de expresar: estiércol vacuno digerido (LDA_CEBI), estiércol porcino (FE) y mezcla de inóculos (M), con potencialidades de ser utilizadas para este tipo de proceso (tabla 1).

El análisis estadístico muestra la no existencia de diferencia significativas entre los tres inóculos, al ser comparados los valores de AME expresados por los mismos, a través del empleo de un ANOVA de clasificación simple.

Para el arranque de un reactor anaerobio, lo ideal sería contar con lodos granulares provenientes de un reactor en funcionamiento, ya que presentan valores

de actividad metanogénica elevados, en un rango de 0,5–1,5 gDQO-CH₄/gSSV.d. /6/ Desafortunadamente, en nuestro país no se cuenta con plantas de tratamientos anaerobias que permitan la obtención de estos inóculos, por lo que se hace necesario emplear fuentes naturales. No obstante, todavía se encuentra por debajo del valor recomendado para emplearse en el arranque de un reactor (0,2 kgDQO-CH₄/ kg SSV.d), lo que requiere de la estimulación del inóculo antes de ser utilizado. Bajo circunstancias que conlleven a una disminución de los valores de actividad metanogénica se sugiere la estimulación del lodo con cationes como el Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ y NH⁴⁺ /18/ o con cloruro férrico a 0,5 mg/L /25/, que mejora la actividad metanogénica y además las características de sedimentación.

Tabla 1
Actividad metanogénica específica de los inóculos ensayados

INÓCULOS	X AME (Kg DQO-CH ₄ /Kg VSS*d)
LDA_CEBI	0,062 a
FE	0,071 a
M	0,087 a

Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las muestras (p<0,05).

Índice volumétrico de lodo (SVI)

Debido a que la sedimentabilidad es una característica que permite medir la capacidad y eficiencia en la retención del lodo, el índice volumétrico de lodo es una variable importante en la evaluación de la calidad de lodos anaerobios. Para lograr su determinación se emplea un cono de 1 L, se diluye el lodo con agua corriente hasta un contenido en sólidos totales de 2,5–5 kg ST /L y se deja decantar durante 30 min. El SVI (mg * gST⁻¹) está basado en la fracción sedimentable del lodo, es decir, la fracción de lodo que no se

decanta en este tiempo, y que tiene mayor tendencia a permanecer dentro del reactor durante los períodos de arranque y funcionamiento. /6/

Los mejores valores de índice volumétrico de lodo reportados, se encuentran en un rango de 10–20 mL/g /10 y 11/, correspondiente a un lodo granular. Mientras mayores sean los valores de SVI, esto permitirá aumentar el caudal de alimentación, es decir, trabajar con altas velocidades ascendentes, sin correr el riesgo de que el inóculo pueda ser arrastrado.

La biomasa granular tiene varias ventajas en relación con los lodos floculentos, como son: un alto tiempo de retención de sólidos debido a sus excelentes propiedades de sedimentación, provee una máxima cantidad de microorganismos en relación con el espacio, y pueden ser aplicadas altas velocidades de carga orgánica en comparación con los reactores UASB con lodos floculentos. /9/

Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

La determinación de la actividad metanogénica específica y del índice volumétrico de lodo requiere de un previo análisis químico del contenido de los sólidos suspendidos, que se determinan por gravimetría según la metodología mostrada en /1/, a través de las diferencias de pesada a 105 °C para los sólidos suspendidos totales y a 500 °C para los volátiles. Se emplea papel de filtro de lanas de vidrio y se filtra al vacío.

Este parámetro también puede ser empleado como criterio de selección de un inóculo, ya que según /6/, los sólidos suspendidos volátiles deben estar alrededor de 10-20 kg SSV/m³.

Las concentraciones de sólidos suspendidos observadas en las variantes de inóculo FE, LDA-CEBI y M, son representadas en la tabla 2.

Tabla 2
Caracterización de los inóculos sobre la base de los sólidos suspendidos

Inóculos	SST (g/L)	SSV (g/L)	SSF (g/L)	Relación SSV/SST
FE	45,83 _b	23,91 _b	21,50 _b	0,5 _c
M	88,66 _a	53,16 _a	35,33 _a	0,6 _b
LDA-CEBI	33,41 _c	25,16 _c	8,250 _c	0,7 _a

Letras diferentes indican la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las medias de cada uno de los tratamientos ($p < 0,05$).

El análisis estadístico muestra la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las tres variantes de inóculos ensayados, al ser comparados los valores medios expresados para cada uno de los tratamientos, a través de un test de rangos múltiples, empleando como método el procedimiento de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD).

Es importante conocer la relación de sólidos suspendidos volátiles (SSV) y sólidos suspendidos totales (SST) presentes en el inóculo, debido a que una mayor concentración de SSV, nos da

indicio de la presencia de microorganismos, los cuales son el núcleo del proceso de granulación. Esto se apoya, además, en las observaciones realizadas por /9/, donde la proporción de sólidos suspendidos volátiles (SSV)/ sólidos suspendidos (SST) entre 0,4-0,6 favorece la granulación en caso de un lodo no granular. No obstante, la presencia de material sólido inerte favorece los procesos anaerobios, debido a que permiten que los microorganismos se adhieran a éstos, formándose aglomeraciones de bacterias que van a actuar sobre la materia orgánica presente en el agua

residual, y que además, estos sólidos permitan el atrapamiento de parte del material orgánico por biodegradar, exponiéndolos más a la acción de los microorganismos presentes.

Polímeros Extracelulares (EPS)

Un gran número de bacterias produce exopolisacáridos (EPS) que son liberados al medio circundante. A estos compuestos se les han atribuido una serie de funciones: patogenicidad, capacidad de asociación a un huésped particular, protección contra la desecación, contra bacteriófagos, formación de biopelículas, etcétera. Una posible vía para la determinación de los polímeros extracelulares es la descrita por /27/.

En la caracterización química del inóculo es recomendable la determinación del contenido de polímeros extracelulares en la muestra. Una cantidad apreciable de los mismos favorece los procesos de granulación, debido a que estimulan la unión entre las bacterias, mientras que una baja producción de los polímeros extracelulares, alargaría el tiempo de producción de los gránulos.

La extracción de las sustancias poliméricas extracelulares, se puede realizar tomando 5 g de lodo en 10 mL de agua ultrapura en una autoclave a 80 °C bajo una presión de una atmósfera por 10 min, y luego se centrifuga caliente a 80 000 g por min. Una vez realizada la extracción, se determina la concentración de carbohidratos y proteínas, empleando métodos espectrofotométricos. /12/

Aun cuando la muestra de inóculo posea niveles adecuados de polímeros extracelulares, se sugiere la adición de un polímero catiónico en el arranque del reactor a concentraciones de 1 ppm en el reactor /19/, para acelerar el surgimiento de los primeros gránulos.

Residual

Debido a que existe un gran número de compuestos tóxicos que atentan contra el éxito del tratamiento anaerobio, en dependencia de la concentración en que los mismos están presentes en las aguas residuales (metales pesados, fenoles,

tiosulfatos, tiocianatos, aceites esenciales, cianuros, agentes oxidantes fuertes como cromatos y cloro, compuestos donde están presente halógenos, tensioactivos, antibióticos, pesticidas, etcétera), es por ello necesario controlar las características químico-físicas del agua residual.

Características químico-físicas de las aguas residuales

Antes de iniciar el tratamiento de un agua residual es recomendable la caracterización de la misma, la cual debe estar dirigida a la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), pH, ácidos grasos volátiles (AGV), sólidos suspendidos totales (SST), alcalinidad y nutrientes.

Demanda Química de Oxígeno

La determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) permite evaluar la carga orgánica contaminante de las aguas residuales antes de su deposición final en el cuerpo receptor. Resulta importante realizarlo previo y durante el tratamiento anaerobio, pues según el nivel de carga contaminante que muestre el residual, así será el sistema de tratamiento que se seleccione. Se puede evaluar la eficiencia del proceso mediante la determinación del porcentaje de remoción de la DQO.

Entre las aguas residuales que son consideradas de alta carga por poseer valores elevados de DQO se encuentran las procedentes de las destilerías (DQO entre 50-70 g/L), en especial, las que se generan en la producción de alcohol a partir de las mieles finales (melazas) que resultan de la producción de azúcar. Durante el tratamiento anaerobio de vinaza de destilería en reactores UASB /18/ se han reportado remociones de la DQO entre 65-75 %, lo que hace al tratamiento anaerobio el proceso más adecuado para tratar este residual.

Las aguas residuales provenientes de una despulpadora de café, poseen también una alta concentración de contaminantes orgánicos, entre 1-8 kg DQO/m³/8, 28/. Durante la digestión anaerobia de aguas residuales del café alcanzó valores de remoción de la DQO por encima del 90 %.

Ensayo de biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales

La determinación de la biodegradabilidad anaerobia de un agua residual permite estimar la fracción de DQO que puede ser eliminada, y la fracción que permanecerá en el efluente como refractario. El concepto de biodegradabilidad anaerobia se puede aplicar tanto a corrientes residuales como a sustancias químicas específicas. /17/ Esto dependerá del sistema utilizado, de la adaptación del lodo al agua residual y de los parámetros físico-químicos que afectan la digestión anaerobia.

pH, AGV, alcalinidad

El pH constituye otro de los parámetros del agua residual que hay que tener en cuenta. Generalmente, dentro del reactor el agua residual tiende a acidificarse, lo cual ocasiona cambios microbiológicos en la cama de lodo del reactor, y afecta además, el nivel de toxicidad de diferentes compuestos como los ácidos grasos volátiles (AGV) y la alcalinidad, característicos del residuo en cuestión, debido a la fuerte dependencia que existe entre estos parámetros. Esto ocurre debido a que a pH ácido, predomina la forma no disociada de los ácidos grasos volátiles (AGV), que son capaces de atravesar la membrana celular de las bacterias metanogénicas, alterando de esa forma el equilibrio que debe prevalecer en el citoplasma. Mantener las condiciones adecuadas de pH del residual, garantiza que la actividad de las bacterias presentes en el lodo no se afecte. Las bacterias hidrolíticas realizan su actividad metabólica a un pH entre 7,2-7,4; el de las bacterias acetogénicas se encuentra por debajo (6,6), por lo que la influencia a la que estaría sometida sería menor, lo mismo ocurriría con las acidogénicas que pueden mantenerse activas, incluso a pH tan bajos como 4,5. En especial, las bacterias más sensibles a este parámetro son las metanogénicas. /6, 18, 23, 30/

Los ácidos grasos volátiles (AGV), son productos naturales e intermediarios necesarios del proceso de digestión anaerobia, su concentración por tanto, contribuye a la caracterización química del residual y a establecer los niveles adecuados

para acelerar el proceso de granulación. /9/ Se observó que la concentración de los AGV no debe exceder los 200 mg/ L en el reactor, para que influya favorablemente en la formación de un lodo granular de calidad y para la obtención de altos porcentajes de eficiencia de remoción de la DQO.

La alcalinidad de las aguas residuales es una característica por seguir para evitar la acidificación del medio, y por tanto, el desempeño eficiente de los microorganismos en el proceso de digestión anaerobia. Las bacterias acidogénicas en un reactor anaerobio son más activas que las metanogénicas, por lo que pueden ocasionar problemas de acidificación que se evitan manteniendo en el digestor una óptima concentración de alcalinizantes. En el caso de aguas residuales que contienen una alta fracción orgánica y son sometidas a tratamiento, puede suceder que se liberen moléculas, que al combinarse con moléculas solubles del alcalinizante empleado, alteren la alcalinidad de las aguas. Es preciso efectuar un estudio de la composición química del compuesto que se va a emplear para la neutralización y de su posible reacción frente al agua residual.

Sólidos suspendidos totales

Conocer la concentración de los sólidos suspendidos en el residual, así como la biodegradabilidad de éstos es de vital importancia para la aplicación de reactores UASB, pues pueden ocasionar problemas graves en su funcionamiento, tales como son: la reducción de la AME, producción de natas debido a materiales poco densos que provocan la flotación de la cama de lodo, entre otros.

Nutrientes

La determinación de las concentraciones de DQO, N y P del residual, brindará información de la existencia o no de una deficiencia de alguno de estos elementos esenciales para la digestión anaerobia. Según /8 y 15/ la relación DQO: N: P debe ser 1 000: 5: 1 como valor óptimo para el tratamiento de aguas residuales que contienen fundamentalmente AGV y una relación de DQO: N: P de 330: 5: 1 para aguas más complejas, como por ejemplo, ricas en carbohidratos.

Hay que evitar en el proceso, concentraciones de nitrógeno amoniacal entre 1 500 y 3 000 mg/L, porque causaría la inhibición de los microorganismos y directamente a los metanogénicas e indirectamente a las bacterias acetanogénicas productoras obligadas de hidrógeno. Mediante un proceso biológico de nitrificación-desnitrificación, que es el más empleado en la eliminación de nitrógeno, se podría lograr la disminución del mismo. /23/

Compuestos tóxicos

La caracterización del residual sobre la base de los parámetros explicados (DQO, pH, AGV, nutrientes, alcalinidad) debe ser enriquecida con la determinación de aquellos compuestos que son inhibitorios del proceso anaerobio. Entre los compuestos que causan graves problemas en el tratamiento anaerobio de agua residuales se encuentran los lípidos, destacándose entre éstos los aceites y las grasas, los cuales están presentes en residuos originados de la producción de lácteos, cárnicos y aceites comestibles. Se ha comprobado que concentraciones mayores de 150 mg/L de grasas en reactores UASB causan serios problemas en el comportamiento de éstos, debido a que son difíciles de biodegradar y aun en pequeñas cantidades, dificultan el contacto entre los microorganismos y la materia orgánica en los reactores anaerobios debido a su baja solubilidad. Por otra parte, aguas residuales con alto contenido de lípidos sometidas a procesos anaerobios pueden generar cantidades significativas de ácidos grasos de cadenas largas, los cuales pueden causar toxicidad al consorcio anaerobio al acumularse en la biomasa y provocar inhibición de la β -oxidación y la metanogénesis e inducir el lavado de la biomasa. /14/

Parámetros operacionales durante el trabajo en continuo

Se emplearon prototipos de laboratorios de reactores UASB para la selección de los inóculos

y su adaptación. Los parámetros operacionales tomados mayormente en cuenta son:

Carga orgánica volumétrica

Este parámetro no es más que la cantidad de DQO alimentada al reactor por unidad de volumen y tiempo, y se expresa en kgDQO/m³.d. Este parámetro es de vital importancia para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica (DQO > 5 kg/m³), ya que fijando su valor se puede determinar el volumen del reactor. Generalmente, se establecen cargas orgánicas volumétricas entre 4 y 12 kgDQO/m³.d, aunque pueden llegar a obtenerse valores de 30 kgDQO/m³.d para lograr menores tiempos de retención y disminuir el volumen del reactor.

Velocidad ascensional

Es otro parámetro que influye en el proceso, y nos da la velocidad con que el residual pasa a través del reactor; se expresa en m/h. El valor recomendado para favorecer los procesos de granulación es de 0,5 a 1 m/h /4, 24/ para evitar el lavado de la biomasa en el reactor ejercer una presión de selección sobre el lodo.

Este parámetro puede ser calculado usando la siguiente expresión:

$$V_a = q / A \quad (2)$$

donde:

- A: área de la base del reactor (m²);
- V_a: velocidad ascensional (m/h);
- q: flujo de agua residual que entra al reactor (m³/h).

A la par de estos ensayos realizados en continuo, se hace necesario desarrollar ensayos discontinuos, para la determinación de biodegradabilidad de los diferentes residuales y la actividad metanogénica de los lodos ensayados. Estos ensayos se realizaron en botellas serológicas conectadas a recipientes conteniendo NaOH al 3 %, permitiendo la determinación de metano por un sistema de desplazamiento líquido.

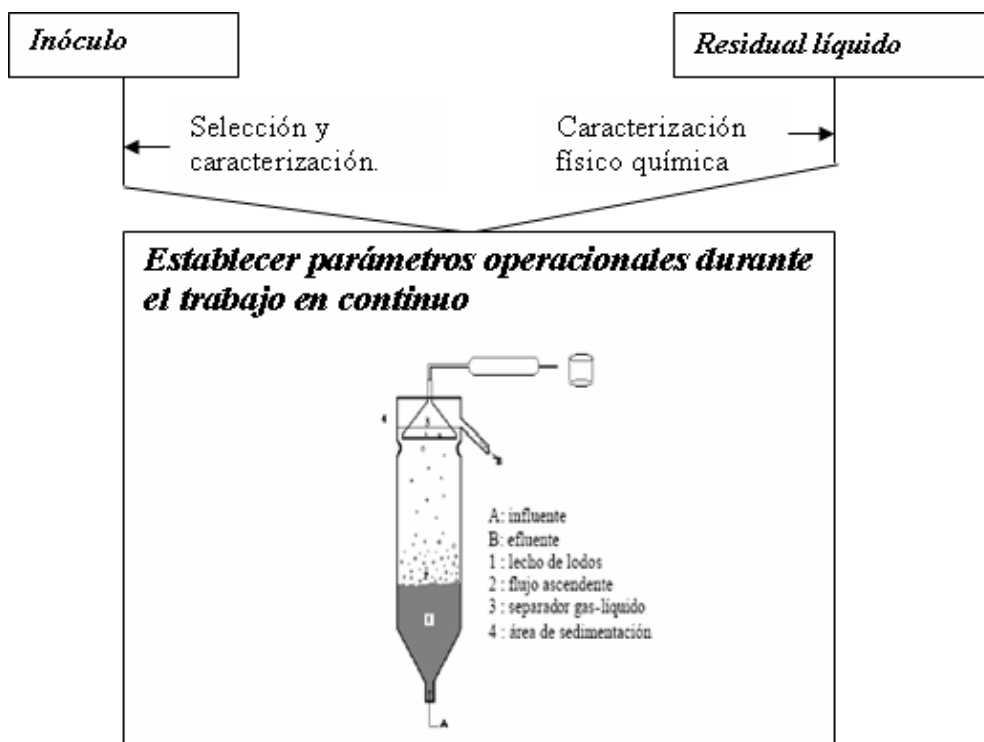


Fig. 1 Estrategia de trabajo para favorecer la granulación en reactores UASB.

Conclusiones

- Los principales factores bióticos y abióticos de mayor incidencia en el proceso de granulación son el desarrollo de bacterias *Methanotrix* en el lodo, la producción de polímeros extracelulares (EPC), la velocidad ascensional, el contenido de sólidos suspendidos y las características del sustrato.
- La estrategia de granulación para el tratamiento de residuales líquidos por vía anaerobia, empleando un reactor UASB, debe tener en cuenta la caracterización del residual por tratar, del inóculo empleado y el monitoreo de los parámetros operacionales.

Bibliografía

1. APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, Washington D. C., USA, 1124, 1998.
2. Bermúdez, R. C., *Aprovechamiento biotecnológico de residuos con el empleo de la tecnología de digestión anaerobia*, Universidad de Chimborazo, Ecuador, 1995.
3. Bermúdez, R. C.; Rodríguez, S.; Martínez, M. C.; Terry, A. I., "Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás", *Revista Tecnología Química*, vol. XXIII, No. 2, 2003, págs. 37-44.
4. Brito, A.; Rodrigues, A.; Melo, L., "Granulation During the Start-up of a UASB Reactor Used in the Treatment of Low Strength Wastewaters", University of Minho, Portugal, *Biotechnology Letters*, vol. XIX, No. 4, 1997, págs. 363-367.
5. Chávez, C.; Castillo, R.; Dendooven, L.; Escamilla-Silva, E. M., "Poultry Slaughter Wastewater Treatment With an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor", *Bioresource Technology* 96, 2005, págs. 1730-1736.
6. Elías, A., Tesis doctoral *Separación de etapas en el tratamiento anaerobio de efluentes con reactores UASB*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de Bilbao, Universidad de Bilbao, España, 1992.
7. Elías, A. *et al.*, "Anaerobic Treatment of Acidified and Non-acidified Substrata in UASB Reactors", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. LXXIV, 1999, págs. 949-956.
8. Fernández, G.; Vázquez, E.; Martínez, P., "Inhibidores del proceso anaerobio: compuestos utilizados en porcicultura", *Ingeniería Revista Académica*, vol. VI, No. 003, 2002, págs. 67-71.

9. Ghangrekar, M.; Asolekar, S.; Joshi, S., "Characteristics of Sludge Developed Under Different Loading Conditions During UASB Reactor Start-up and Granulation", *Water Research* 39, 2005, págs. 1123–1133.
10. González, J., Rivera, A.; Borja, R.; Sánchez, E., "Influence of Organic Volumetric Loading Rate, Nutrient Balance and Alkalinity: Cod Ratio on the Anaerobic Sludge Granulation of an UASB Reactor Treating Sugar Cane Molasses", *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. XLI, 1998, págs. 127–131.
11. Gutiérrez, M., Revah, S.; Monroy, M., Gómez, J. Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería A. C. Curso Pre-Congreso, Biotecnología Ambiental, VII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería, Mazatlán '97, II Simposio Internacional sobre Ingeniería de Bioprocesos, Mazatlán, Sinaloa, 1997.
12. Hullebusch, E.; Peerbolte, A.; Zandvoort, M.; Lens, P., "Sorption of Cobalt and Nickel on Anaerobic Granular Sludges: Isotherms and Sequential Extraction", *Chemosphere* 58, 2005, págs. 493–505.
13. Hulshoff, L. W.; de Castro, S. I.; Lettinga, G., "Anaerobic Sludge Granulation", *Water Research* XXXVIII, 2004, 1376–1389.
14. Kim, S.; Han, S.; Shin, H., (2004). Two-Phase Anaerobic Treatment System for Fat-Containing Wastewater", *Journal Chemical Technology and Biotechnology*, vol. LXXIX, 2005, págs. 63–71.
15. Lettinga, G.; Hulshoff, L. H., "UASB- Process Design for Various Types of Wastewaters", *Water Science and Technology*, vol. XXIV, No. 8, 1991, págs. 87–107.
16. Mansur, M., Tratamiento de aguas residuales en reactores anaeróbicos, de flujo ascendente, en manto de lodos, 2000, Disponible en <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/proyecto/rapidisc/publica/hdt/hdt27/hdt027.html> revisado el 10 de enero de 2006.
17. Méndez, D., Toxicidad y biodegradación anaerobia de formaldehído, Tesis de Doctorado, Universidad de Santiago de Compostela, España, 1997.
18. Montalvo, S.; Guerrero, L., *Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás*, Editado por Talleres Gráficos de Fermín Pastén, Valparaíso, Chile, 2003.
19. Ong, S. L.; Hu, J. Y.; Ng, W. J.; Lu, Z. R., "Granulation Enhancement in Anaerobic Sequencing Batch Reactor Operation", Water & Biotreatment Group, Dept. of Civil Engineering, National Univ. of Singapore, *Journal Envir. Engrg*, vol. CXXVIII, No. 4, 2002, pág. 387.
20. Pérez, R. M.; Bermúdez, R. C.; Terry, A.; Rodríguez, S.; Martínez, M., Informe final del proyecto PTCT, Optimización de los digestores anaerobios de la provincia de Santiago de Cuba, 2000.
21. Pierre, J. y otros, *Manual de técnicas para el análisis de aguas residuales*, Compilado por Olguín, P. y Monroy, O. Editorial Orstom, 1992.
22. Pires, E.; Varesche, M.; Sakamoto I.; Buzzini, A., "Evaluation of the Microbial Diversity in an UASB Reactor Treating Wastewater from an Unbleached Pulp Plant", *Process Biochemistry* xxx, 2005, xxx–xxx
23. Soubes, M.; Viñas, M.; Borzacconi, L.; Muxi, L., "Tratamiento anaerobio de aguas residuales, III Taller y Seminario Latinoamericano, Montevideo, Uruguay, 1994.
24. Torkian, A.; Amin, M.; Kermanshahi, R. K.; Iranpour, R., Pre and Post-granulation Performance of UASB System Treating High-strength Industrial Effluent, 2003, Disponible <http://sharif.edu/~torkian/granulapweftec2003.pdf> revisado el 12 de noviembre de 2007.
25. Torres, P.; Cardoso, A.; Rojas, O., "Mejoramiento del arranque de lodos anaerobios tipo UASB", Influencia de la adición de cloruro férrico, *Revista Ingeniería y Competitividad*, vol. V, No. 2, 2004, Artículo 3.
26. Uyanik, S., "Granule Development in Anaerobic Baffled Reactors", Harran University, Faculty of Engineering, *Turkish Journal Environmental Engineering Science*. 27, 2003, págs. 131-144.
27. Veiga, M., *et al.*, "Composition and Role of Extracellular Polymers in Methanogenic Granules", *Applied and Environmental Microbiology*, vol. LXIII, No. 2, 1997, págs. 403–407.
28. Wasser, R.; Orozco, C.; Cantarero, V.; Mesías, O., Experiencias sobre el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del café en Matagalpa, Nicaragua, Seminario Taller sobre Tratamiento de Aguas Residuales Agroindustriales, 1992.
29. Weiland, P.; Rozzi, A., The start-up, Operation and Monitoring of High-rate Anaerobic Treatment Systems: Discusser'S Report", *Water Science and Technology*, vol. XXIV, No. 8, 1991, págs. 257–277.
30. Zegers, F., *Microbiología*, Manual del Curso: Arranque y Operación de Sistemas de Flujo Ascendente con Manto de Lodo UASB, Cali, 1987, pág. A1.