



TREATMENT SYSTEM FOR INDUSTRIAL WASTEWATER OF THE SLAUGHTERHOUSES

SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EN MATADEROS

**M.Sc. Julio Isaac Maldonado M, Ph. D.
Jacipt Alexander Ramón**

Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS) Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura - Universidad de Pamplona e-mail: jimaldonadom@unipamplona.edu.co

Abstract: The industrial wastewater of the slaughterhouses of cattle and pig are the Municipal liquid laid that hit more well is the sanitary sewage systems and the receiving bodies, contamination that in small populations represent until 80% of the contribution of the organic laid, therefore they were constructed, operated and evaluated on scale laboratory a system of treatment in series conformed by Anaerobic Filter Up Flow (FAFA in Spanish) inoculated and an Rotating Biological Contactors (RBC), verifying itself that this system allows to deal with the Industrial residual water of slaughter house, obtaining very good results (92 - 97% in terms of DBO5 and 87,72 - 94,5% DQO) in the removal of Organic Matter with TRH = 3,33 and 2,10 days, with "Organic Volumetric Charge " applied on the FAFA between 2,62 and 6,3 kg DQO total/m³ - d and 2,25 - 6,32 g DQO total/m²-day applied on the reactor of Rotating Biological Contactor Biological Contactor (q = 1,33 - 2,11 days), making in addition, that this system can make acceptable removals of Fecal coliforms superior to 97% (FAFA = 78%; BIODISCOS = 88,8 - 95%).

Resumen: Las aguas residuales de mataderos industriales de ganado vacuno y porcino son los vertimientos líquidos que impactan los sistemas de alcantarillados sanitarios y los cuerpos receptores, con cargas orgánicas que representan en poblaciones pequeñas y medianas hasta el 80% del aporte contaminante municipal, por esta razón se construyó, operó y evaluó a escala laboratorio un sistema de tratamiento en serie conformado por un Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA) inoculado y un reactor secundario aeróbico de Discos Biológicos Rotatorios (Biodiscos), comprobándose que este sistema permite tratar estas aguas residuales industriales con buenas eficiencias en la remoción de Materia Orgánica (92 - 97% DBO5 y 87.72 - 94.5 % DQO) con TRH entre 3.33 y 2.10 días, con cargas orgánicas volumétricas (COV) aplicadas sobre el FAFA entre 2.62 y 6.3 Kg. DQO total/m³-d y entre 2.25 - 6.32 gDQO total/m²-día aplicadas sobre los Biodiscos (TRH = 1.33 - 2.11 días), realizando aceptables remociones de Coli-fecales > al 97% (FAFA: 78%; Biodiscos: 88.8 - 95%).

Keywords: Tratamiento Biológico, Filtro Anaeróbico, Biodiscos, Residuos líquidos. Aguas residuales de mataderos, Remoción de MO, Remoción de Coli-Fecales, Inoculación, Relación AGV/Alcalinidad Total, Actividad Metanogénica Específica (AME)





1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico e industrial, el incremento de la producción industrial y el crecimiento de las poblaciones ha ocasionado que los contaminantes de los residuos líquidos (industriales, domésticos) se incrementen día a día, en volumen, carga, concentración y diversidad, que al verterlas sobre los cuerpos receptores generan también incrementos en el grado de contaminación y efectos nocivos sobre las distintas formas de vida presentes en estas corrientes, rompiendo el equilibrio biológico, alterando cada uno de los componentes del ciclo biodinámico, llegando al extremo de causar enfermedad y muerte; acciones que han inducido a los investigadores a desarrollar diferentes tipos y sistemas de tratamiento, tendientes a reducir estos impactos y efectos.

A nivel urbano una de las principales fuentes de contaminación orgánica es la producida por los mataderos municipales, cuyos vertimientos líquidos presentan concentraciones muy alta especialmente de MO, grasas, sólidos y coli-fecales y su impacto sobre las redes de alcantarillados sanitarios se hacen más notorios en poblaciones medianas y pequeñas, situación que obliga a realizar tratamientos antes de sus descargas

En términos generales, los tratamientos químicos ofrecen altas eficiencias en la remoción de contaminantes, pero a costos muy elevados tanto en la construcción como en la operación de plantas de tratamientos de aguas residuales (PTAR), hecho que indujo el surgimiento de los tratamientos biológicos, mediante sistemas que han tenidos gran acogida por ser relativamente fáciles de construir y económicos de operar y de mantener, con altas eficiencias en la remoción de MO (> 85% DQO). En Colombia se han venido realizando estudios de tratamiento biológicos (anaeróbicos y aeróbicos) para las aguas residuales de matadero, se ha implementado en este caso, un sistema conformando por un Filtro Anaeróbico de Flujo

Ascendente (FAFA) en la primera etapa y los Discos Biológicos Rotatorios (Biodiscos) como reactor aeróbico secundario, construidos a escala laboratorio, reactores que una vez arrancados y estabilizados se acoplaron en serie y operaron bajo tres cargas orgánicas (CO) e hidráulicas diferentes e incrementales, dentro de intervalos operativos de carga conocidas, hasta obtener un sistema en condiciones de estado estable (E.E).

2. MARCO TEÓRICO

El proceso anaeróbico o fermentación:

Se definir como la descomposición u oxidación de compuestos orgánicos en ausencia de O_2 libre, realizado por un grupo complejo de bacterias facultativas unas y otras estrictamente anaeróbicas, hasta convertirlos básicamente en CO_2 y CH_4

Sistemas de tratamiento anaeróbicos:

Son procesos que tienen más de cien años (Mc Carty, P.L, 1981), reactores que se han venido utilizando en la biodegradación de la materia orgánica, ofreciendo una serie de ventajas, que los posicionan como uno de los sistemas de tratamientos más viables por sus ventajas fundamentales: bajo costos de construcción y operación, generación y aprovechamiento de biogás como fuentes de energía (Oleszkiewicz et al., 1982).

El sistema de tratamiento anaeróbico se realiza en dos etapas:

Etapa no metanogénica: Fermentación ácida que Parkin y Owen (1986) subdividen en hidrólisis, licuefacción, fermentación, formación de hidrógeno y ácido acético, donde las macromoléculas orgánicas de estructura compleja (proteínas, grasas, carbohidratos) son desdoblas y convertidas en moléculas simples, para ser llevadas posteriormente ácido acético y otros ácidos de cadena corta, obteniéndose como producto de esta fermentación el CO_2 e H_2 , acción biológica donde intervienen un complejo consorcio bacteriano.





Entre los principales grupos bacterianos que participan en esta primera etapa se tienen las bacterias hidrolíticas (facultativas y anaeróbicas estrictas) encargadas de romper los polímeros orgánicos (proteínas, polisacáridos y lípidos) para convertirlos en compuestos de bajo peso molecular tales como ácidos grasos volátiles, alcoholes, H_2 , CO_2 , N amoniacal y sulfuros; posteriormente participan en el proceso las bacterias fermentativas o acidogénicas que fermentan los azúcares y aminoácidos formados en la hidrólisis, llevándolos a acetato, propionato, butirato, H_2 , CO_2 y en menor medida a formiato, lactato, valerato, metanol, etanol, butanodiol (acetona), amonio, sulfuros y succinato, este último previa descarboxilación realizada por otro grupo bacteriano antes de producir propionato y CO_2 .

Se aclara que en esta etapa las bacterias acidogénicas tienen un tiempo de duplicación mínimo de dos a tres horas y muchas de las bacterias hidrolíticas y otras bacterias estrictamente anaeróbicas tales como la *Bacteriodes*, *Clostridium*, *Bifidobacterias* y otros bacilos Gram (+) y Gram (-) son la flora predominante de este grupo, además, algunos anaeróbicos facultativos como *Streptococcus* y bacterias miembros de la familia *Enterobacteriaceae* han sido detectadas.

Desde 1967 se conoce que existe una relación simbiótica (sintrófica) entre algunos tipos de bacterias productoras de H_2 y las bacterias metanogénicas utilizadoras del H_2 y se reconoció que para la completa oxidación de un compuesto simple como el etanol a CO_2 y CH_4 es necesario la participación de por lo menos tres especies a las que denominaron bacterias acetogénicas

Etapas Metanogénicas: Proceso que en su conjunto es realizado por 5 grupos bacteriales, donde los productos de la fase anterior son transformados en CH_4 , CO_2 y H_2O por las bacterias metanogénicas estrictamente anaeróbicas, Gram (+) ó Gram (-), que requieren un bajo potencial de oxidación-reducción para su crecimiento y ausencia total de

oxígeno (para no ser inhibidas), y esto solo puede lograrse con la presencia de las bacterias fermentativas del metano que se consideran como un grupo único por su capacidad de formar metano producto de su metabolismo energético y por su limitado espectro de sustratos utilizables. Han sido muy pocas las bacterias metanogénicas acetoclásticas que se han aislado en cultivos puros entre otros las bacterias *Methanosarcina barkeri*, *Methanosarcina mazei*, *Methanotrix soehngenii* (*Methanosaeta concilli*) y una termofílica llamada *Methanosaeta thermoacetophila*, bacterias de crecimiento lento sobre el sustrato (Ej. *Methanotrix soehngenii* tiene un tiempo de generación de diez días o más), por lo tanto, el tiempo de retención celular debe ser lo suficientemente largo para permitir su crecimiento e impedir su extracción del sistema; siendo esta una limitante del proceso general de biodegradación anaeróbica de la M.O.

El CH_4 generado de la reducción del CO_2 se logra a través de etapas en las cuales el formiato, formaldehído y el metanol se presentan como intermediarios no libre y la mayoría de las bacterias metanogénicas que participan en el proceso crecen sobre CO_2 e H_2 como la única fuente de energía y su crecimiento óptimo se presenta en un pH entre 6.8 y 8. Adicionalmente se conoce que aproximadamente un 72% del CH_4 formado proviene de la descomposición del acetato (ácido acético) por parte de las bacterias acetoclásticas y un 13% del ácido propiónico (formado durante la fermentación de carbohidratos y proteínas) y un 15% de otros productos intermedios.

El filtro anaeróbico de flujo ascendente: Es un reactor desarrollado por Young y Mc Carty (1969) para el tratamiento para aguas residuales, siendo el más sencillo de los sistemas de tratamiento anaeróbico de mantener, porque la biomasa permanece como una biopelícula microbiana adherida a un medio de soporte conformando una matriz la cual remueve la materia bajo condiciones





anaeróbicas; de esta forma a medida que el agua residual pasa a través del FAFA entra en contacto con los microorganismos contenidos en él, logrando su tratamiento.

Las primeras unidades de laboratorio estudiadas fueron construidas en plásticos, en columnas de 0.14 m de diámetro y 1.83 m de altura y un volumen de 28 litros, empacados con piedra de cuarcita y operados con cargas orgánicas que oscilaron entre 1 - 8 Kg. DQO/m³-día utilizando como sustrato residuos sintéticos, con [DQO soluble] entre 375 y 12000 mg/L y temperatura ambiente de 25 °C, reactor que ha venido sufriendo diferentes modificaciones en el tiempo, variando los diámetros, alturas y cargas aplicadas hasta mayores de 40 Kg. DQO/m³-día, siendo construido en 1970 el primer FAFA a escala real para tratar residuos de almidón en operaciones de procesamiento del trigo

Biodiscos: Es un sistema de tratamiento biológico aerobio secundario de lecho de medio fijo de origen alemán (1960), donde la biomasa se fija de manera adherida a unos discos parcialmente sumergidos (> 90 %) en el agua residual a tratar, discos construidos generalmente de polietileno de alta densidad, colocados en serie, espaciados entre sí y unidos a un eje central posicionado de manera perpendicular o paralela al flujo y girando muy lentamente (<10 rpm) con una área inmersa donde crece la biopelícula (Orozco y Salazar, 1987)

Cuando parte del disco está en contacto con el AR, los microorganismos presentes en la biomasa adherida al disco toman el alimento o sustrato del líquido para metabolizarlo, mientras que otros microorganismos que se encuentran formando parte del agua residual, se adhieren a la película microbiana ya formada, y luego, cuando esa parte del disco que estaba inmersa, queda expuesta al aire para obtener el O₂ requerido por los microorganismos, para lograr así una completa estabilización de MO en forma aerobia (Maldonado M., 1992).

Por lo general los Biodiscos no usan recirculación porque experimentalmente se ha comprobado que es bajo el incremento de eficiencia que se logra, pero para maximizar la remoción de DBO y nitrógeno amoniacal se recomienda incorporar al sistema más de cuatro etapas y como una aproximación al número de etapas se aconseja asegurar que la COS aplicada en cualquier etapa sea < de 112 g de DBO soluble/m²-día (ó 31 g de DQO total/m²-día). El exceso de biomasa que se forma como resultado de la oxidación biológica se desprende continuamente por la acción del esfuerzo cortante originado por la rotación de los Biodiscos.

La biomasa que se forma en esta conformada por bacterias filamentosas, protozoos, nematodos, rotíferos y anélidos y su predominio está relacionado con la carga orgánica y el oxígeno disuelto, considerado apropiado mantener en una concentración mínima de 2 mg/l en los reactores (Romero R., 2000)

Actualmente se utiliza para el diseño varios modelos matemáticos entre los que podemos citar el Modelo de Wu (Wu y Smith 1982), y el Modelo de Steels (Wilson F. 1980)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Características de las aguas residuales de matadero ARM

Las aguas residuales industriales (ARI) crudas del matadero Municipal de la ciudad de Cúcuta (Col) estaban conformadas por una mezcla de agua-sangre (40 - 50%) y el porcentaje restante conformado por desechos ruminales producto del lavado de vísceras, grasas y estiércol. Los análisis de laboratorio realizados a muestras compuestas e integradas de AR crudas, tomadas antes de su vertimiento al alcantarillado sanitario y tamizadas previamente (malla F = 4.5 mm) determinándose concentraciones promedio ponderadas de DBO₅ = 2574 mg/l, DQO total = 5364 mg/l, ST 3837 mg/l, SSV = 1733 mg/l,





N total = 28 mg(N)/l y de P total = 29 mg (P)/l y una relación de DQO: N: P de 963 : 5 : 5 mayor que la mínima establecida por Lettinga (1982) y ajustada a los requerimientos nutricionales recomendados por Van Der Berg, (1980), determinándose que no se requería adición de nutrientes para el tratamiento anaeróbico, presentando concentraciones del mismo orden de magnitud que las reportadas en la literatura para este tipo de industrias, con excepción hecha para las grasas y aceites que presentó contenidos muy altos, que incrementan las concentraciones del DQO, de los ST y SSV, pero de baja incidencia en las determinaciones de DBO_5 .

3.2 Sistema de alimentación: Operó inicialmente a gravedad, solamente durante el proceso de arranque del FAFA cuyo efluente se recirculó mediante bombeo, pero ante las continuas obstrucciones presentadas en los ductos y dentro del filtro, se optó por suministrar el afluente a este primer reactor mediante bombeo directo del ARCruda, pretamizada, cuyo efluente fluyó siempre a gravedad hacia el Biodisco. Para el bombeo se utilizó una electrobomba peristáltica (110 V) dosificadora de caudal (0 -12 l/min.), con flujo intermitente, tipo diagrama de 20 psi de presión de servicio (Máx. 60 psi), marca Blue White, Modelo. No C-660P, serial Kr675.

3.3. Construcción, adecuación y montaje de los reactores. La parte experimental de este proyecto se montó en la Ciudad de Cúcuta, Altitud = 275 msnm, T(aire) promedio = 27°C, P(atm) = 727 mm Hg. dentro de las instalaciones de la Planta el Pórtico de EIS -Cúcuta- E.S.P, hoy "Aguas Kpital -Cúcuta", sistema conformado por dos reactores a escala laboratorio conectados en serie (FAFA de una sola fase + Biodiscos).

3.3.1. Cuerpo del FAFA: Conformado por una columna de PVC (material opaco) de H = 1,20 m y F = 4" ; con un visor en acrílico transparente localizado verticalmente a todo lo largo del reactor, para visualizar a través de él eventualmente y en los periodos de

aclimatación y arranque, la formación de la biopelícula anaeróbica adherida al medio de soporte; adicionalmente el reactor contó con 3 puntos de muestreo (a 0.40, 0.70 y 1.0 m de la base del reactor) mediante la incorporación de racores de bronce F = ¼". El material de soporte se empacó en el cuerpo del filtro entre dos discos perforados de acrílico (e= 5 mm), donde el disco base permitió la distribución del flujo uniforme y el disco superior evitó el arrastre del medio de soporte fuera del reactor. Adicionalmente entre la tapa inferior y el disco de la base se incorporó una placa perforada con el fin de disminuir el impacto del flujo y propiciar una nueva sedimentación del material en suspensión. Un sistema de sello hermético tanto en la parte superior como en la parte inferior, permitió garantizar condiciones anaeróbicas en el reactor. El efluente se extrajo del filtro por un ducto F = ¼" localizado en la tapa superior del filtro.

3.3.2. Medio de Soporte: Se utilizó ladrillo triturado de arcilla cocida, seleccionado teniendo en cuenta la porosidad, el diámetro de los orificios del disco de soporte y la disposición de vacíos del medio de soporte, para evitar al máximo la obstrucción del filtro, con un tamaño entre ¼"- ½", siendo su alta rugosidad la característica más importante para facilitar la adherencia de la biopelícula. Características físicas del reactor: "vacío = 9728.78 ml, Porosidad del medio = 51,36%, "medio = 4732.08 ml y "útil = 4996.70 ml.

3.3.3. Sistema de separación, recolección y medición del biogás: El sistema de separación fue conformado por "un separador de fases", cámara ó unidad independiente requerida para evitar las sobrepresiones generadas en la parte superior del FAFA y permitir la fácil evacuación del efluente y del biogás por la parte superior del reactor, construido en PVC F=3" y L= 0.41 m, donde el efluente y el biogás ingresan por la parte superior y descienden casi hasta el fondo, a través de un ducto F=5/16", donde entrega la mezcla a un depósito, donde se realiza la





separación de las dos fases; el líquido se extrae lateralmente por un ducto de $F=1/4"$ localizado en la mitad de la columna del separador, mientras que el biogás sale por otro ducto de $F=1/4"$ localizado en la tapa superior del separador.

Para medir la producción de CH_4 fue necesario la eliminación previa del gas sulfhídrico y del CO_2 , haciendo pasar el biogás primero a través de un filtro con viruta de hierro quedando removido el H_2S como sulfuro de hierro y después través de una solución alcalina (1,5% de NaOH) depositada en un recipiente de 2000 ml, para finalmente llevar solo el CH_4 al sistema de medición.

3.4. Reactor de Discos Biológicos Rotatorios: El reactor es similar al construido por Ávila y Ramírez en la Universidad de Colombia, fabricado en vidrio espesor (e) = 5 mm; dividido en siete cámaras separadas por baffles del mismo material para garantizar un flujo ascendente y descendente de manera alterna. Las cámaras tienen en el fondo tolvas en forma de tronco de pirámides y en las cinco cámaras centrales (más grandes), llamadas etapas albergan un número determinado de discos de acetato ($F=30$ cm. y $e = 2$ mm aprox.) montados sobre un eje de acero $F=1/2"$, con separación entre discos = 8 mm; además se dispuso en cada etapa de un sistema de purga de lodos ($F=1/4"$). Un motor-reductor electromagnético (110 V, Potencia = $1/4$ HP) y un sistema de poleas fue el mecanismo encargado de inducir un movimiento rotacional de 4 rpm al eje del reactor.

El primer compartimiento es una cámara de quietamiento, que realiza la estabilización del efluente logrando garantizar que el flujo ingrese en forma continua y uniforme a la primera etapa del Biodisco, mientras que el último compartimiento recibe el efluente. El nivel del agua dentro del reactor se dispuso para que el 40% del área de los discos permaneciera sumergida y el 60% restante en contacto con la atmósfera (Tabla 1).

Tabla 1. Especificaciones por etapas del modelo de Biodiscos a escala laboratorio

ETAPA	No de Discos	Área (m^2) del medio de contacto	Volumen útil ($\times 10^{-3} m^3$)	Área/Volumen (m^2/m^3)
1	12	1,357	4,393	308,90
2	9	1,018	3,364	302,61
3	8	0,905	3,021	299,57
4	8	0,905	3,021	299,57
5	8	0,905	3,021	299,57
5	45	5,090 m^2	16,82 $\times 10^{-3}$	-

3.5. Arranque de los Reactores

3.5.1. Inoculación y Arranque del FAFA:

Para realizar este arranque se consideró conveniente realizar la inoculación del reactor para facilitar el logro de condiciones estables

3.5.1.1. Inóculo ó Lodo Semilla: Se evaluaron 3 muestras de lodo anaeróbico de reactores UASB y estiércol de cerdo (Tabla 2), determinando en ellos la (AME) Actividad Metanogénica Específica siguiendo la metodología establecida por Jim Field (1987), bioensayo que permitió determinar la capacidad que tienen los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) de un lodo anaeróbico para biodegradar un sustrato específico, bajo condiciones anóxicas, medidas en función de la producción de CH_4 .

Tabla 2: Características de los lodos evaluados en estado original

TIPO DE LODO	S.S.T. (mg/l)	S.S.V. (mg/l)	SSV/SST (%)	A.M.E. ©.
UASB 1 (*)	61.720	32.760	53	0.09
UASB 2 (**)	38520	22320	58	0.12
UASB Arboleda	54440	31000	57	0.041
Estiércol' cerdo	47.200	34.680	73	0.040

(*) Urb.San Martín I (***) Urb.San Martín II

© g DQOCH₄ / g SSV - d

3.5.1.2. Selección del Inóculo El lodo seleccionado como inóculo para el FAFA fue el que presentó mayor AME y correspondió al lodo proveniente del reactor UASB₂ (Urb. San Martín II), que presentó 0,12 g DQO CH₄ /g SSV-d,





siendo el más apto de los lodos evaluados, a pesar de su baja actividad con respecto a la AME de los lodos granulares de sistemas de tratamiento similares (0.6 - 1.5 g DQOCH₄/gSSV-d), inóculo cualificado como simple lodo doméstico digerido, a pesar de provenir de un UASB en operación.

3.5.1.3. Inoculación del FAFA: Se realizó con el lodo seleccionado como inóculo, que se depositó en el reactor entremezclado con el medio de soporte, incorporando un volumen de inóculo equivalente al 40% del "útil del reactor (2000 ml), mientras que el volumen útil restante se completó con Agua Residual Doméstica (ARD) y mediante alimentación a gravedad, con caudal constante tratando de mantener un flujo que garantizara un Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) de 72 horas. Sin embargo por las características del medio de soporte ($1/4 < f < 1/2$ ", Porosidad = 51,36%), la presencia del lodo de inoculación, la ligera formación de biopelícula adherida y las altas pérdidas hidráulicas, no permitieron la recirculación con caudales menores a 2.50 ml/min.; por esta razón la tendencia operativa fue arrancar el reactor con TRH = 60 horas en promedio, cuyo efluente se recirculó por bombeo, reemplazando las ARD cada 48 horas por ARD frescas, hasta que a través del visor se constató la formación de una delgada capa de biopelícula adherida al medio de soporte (15 días).

3.5.1.4. Aclimatación biopelícula del FAFA: Terminada la inoculación se suspendió la recirculación y se inició el período de aclimatación de la simiente del FAFA al ARM, pero ahora alimentando de manera continua con una mezcla de ARM y ARD, cuya proporción (%Vol) se varió cada 48 horas hasta aplicar sobre él solo ARM, con un TRH " 2 días, condición imposible de garantizar con el sistema de alimentación por gravedad, razón por la que se requirió bombeo.

El comportamiento de la simiente y de la biopelícula formada y adherida al medio de soporte ante la presencia de un nuevo sustrato con una composición orgánica diferente, generó como respuesta, variación

representativa en los parámetros de control (temperatura, pH y DQO y eficiencias en la remoción de MO).

3.6. Arranque del FAFA: Se suministro a este reactor una COV incremental desde 2.5 hasta 6.21 Kg. DQO/m³-d, aportada por ARM con concentraciones entre 3000 y 4000 mg DQO/l, registrando en cada incremento de carga, fluctuaciones en el pH del efluente, en la relación entre la Alcalinidad aportada por las sales de los AGV y la Alcalinidad Total y en la eficiencia en la remoción MO, logrando condiciones "semiestables" en 40 días

3.7. Medición del Biogás: Se realizó mediante la aplicación de la metodología de la botella de Mariotte, midiendo el desplazamiento que el metano ejerce sobre la columna de agua alcalina, depositada en una probeta graduada e invertida colocada dentro del recipiente que contiene también solución alcalina.

3.8. Arranque Biodiscos Rotatorios: Inicialmente se aplicó durante 2 días solo ARD recirculada con el objeto de formar la biopelícula adherida a los discos, la que se adaptó al nuevo sustrato, alimentándolo posteriormente con una mezcla de ARD y ARM cuyos porcentajes (%Vol) se variaron diariamente (5%) hasta lograr aplicar solo ARM, proceso que se logró en 19 días cuando adquiere condiciones "semiestables" en la operación, porque la biopelícula se aclimató más fácilmente y se adaptaron en menos tiempos a los incrementos de carga orgánica (CO), llegando a obtener eficiencias en la remoción de MO > 80%(DQO), con aplicación de COS hasta de 20 g DQO/ m²-d, dejando ver que los Biodiscos son reactores biológicos más eficientes, que pueden operar con TRH < a los requeridos por el FAFA.

3.9. Acople del sistema: Como el reactor de Biodiscos se adaptó mucho más rápido que el FAFA al ARM, entonces el efluente del FAFA se conectó al Biodisco para ahora lograr la adaptación de esta biomasa al ARM previamente tratada de manera anaeróbica, proceso que se logró muy fácilmente, gracias a "Bondad





Biológica" de la biomasa adherida en el reactor aeróbico.

3.10. Operación Sistema: FAFA +Biodiscos

Una vez el FAFA adquirió condiciones "semiestables", se inició de manera definitiva el arranque del sistema FAFA + Biodiscos, determinando a nivel de laboratorio los parámetros de control. El FAFA operó con tres COV de 2.62, 4.45, 6.32 KgDQO/m³ - d que se incrementaban una vez adquiría condiciones estables, cargas aportadas por las ARM con DQO total de 3200, 4100 y 4800 mg/l respectivamente, aplicadas con caudales de 5.5, 7.4 y 8.76 ml/min., que permitieron en el FAFA tiempos de retención dentro de los rangos operativos conocidos, pero altos TRH en los Biodiscos; aclarando que para incrementar la CO sobre el FAFA fue necesario aumentar el caudal afluente y las concentraciones de MO del agua residual cruda, incrementando por ende las cargas del reactor de Biodiscos, reactor al que también se le aplicaron CHS de manera continua, proporcionales a las COV aplicadas al FAFA.

El filtro anaeróbico logro condiciones estables para cada una de las cargas en un tiempo no superior a los 51 días (incluyendo los 5 días de evaluación) (Ver Tabla 3)

Tabla 3: Tiempo de aplicación de las COV sobre el sistema FAFA - Biodiscos

C. O.V. (*)	TIEMPO DE APLICACIÓN (días)	TIEMPO EN ESTADO ESTABLE	TIEMPO TOTAL (días)
2,62	46	5 días	51
4,45	37	5 días	42
6,32	35	6 días	41

(*)(Kg DQO / m³ - d)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación del FAFA: Una vez arrancó el FAFA se le aplicó la primera COV e hidráulica de manera continua hasta lograr condiciones estables, momento en el que incrementó nuevamente la COV aplicada,

registrando el reactor descompensación reportando en el efluente variaciones de pH, aumento en la relación de la alcalinidad de las sales de los AGV/Alcalinidad total y reducción en la eficiencia (remoción de MO).

La COV aplicada se mantuvo constante durante cada periodo de evaluación (51, 42 y 41 días) como para que el reactor ganara estabilidad, prueba de esto son las bajas relaciones entre la Alcalinidad aportada por las sales de los AGV/Alcalinidad total (0.24, 0.25 y 0.36) logradas en el efluente del FAFA en condiciones estables, situación acorde con lo presentado por Olga Rojas CH. (1987)

En condiciones estables el FAFA reportó eficiencias del 56.4%(DQO) para una COV aplicada de 2.62 Kg.DQO total/ m³-d (Figura 1), eficiencia que se mantuvo en 56.4%(DQO) para la segunda carga aplicada de 4.45 Kg. DQO total/m³-d y del 55.58% para la tercera y última carga de 6.32 Kg. DQO total/m³-d, comprobando que el inóculo estaba adaptado al sustrato e indicando alta presencia de población metanogénica (Figuras 2 y 3)

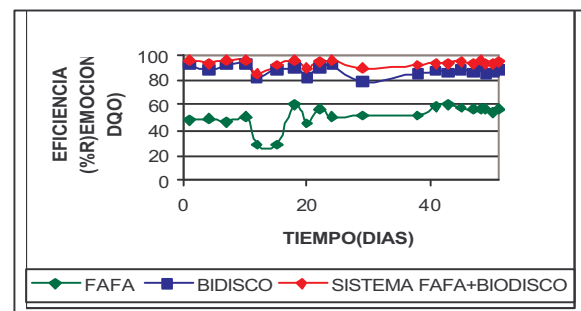


Figura 1: Eficiencias en reactores y sistema Carga No 1

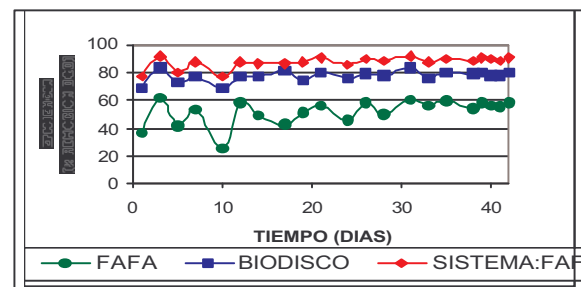


Figura 2: Eficiencias en reactores y sistema Carga No 2



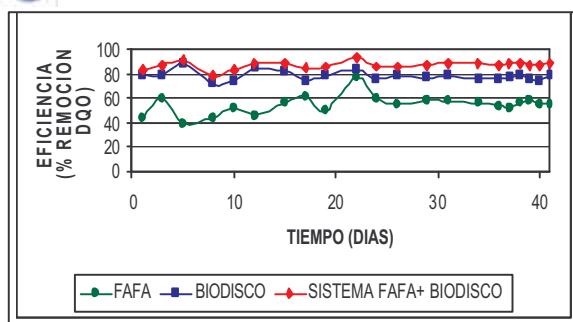


Figura 3: Eficiencias en reactores y sistema Carga No 3

Se Concluye que el filtro anaeróbico puede remover en promedio hasta el 55% de la MO (Figura 4) siempre que se aplique una COV hasta 6.32 Kg. DQO total/m³-d, para ARM y el hecho de aplicar cargas orgánicas e hidráulicas por largos periodos de tiempo permite al reactor inoculado, estabilizarse presentando el valor de la relación de Alcalinidad aportada por las sales de los AGV/ Alcalinidad total con valores muy cercanos a 0.20, indicando una buena capacidad buffer del reactor aunque el efluente del mismo presentó ligeras variaciones del pH.

La producción de biogás fue muy alta en este reactor y difícil de medir durante las 24 horas del día, razón por la cual se realizó mediciones diarias, durante algunas horas del día (generalmente dos horas), para cada una de las cargas aplicadas. La producción de CH₄ en el FAFA fue en promedio de 8.72, 11.50 y 12.4 ml/min, durante la aplicación de COV de 2.62, 4.45 y 6.45 y 6.32 Kg. DQO total/m³-d respectivamente, dejando ver un comportamiento lineal similar al obtenido por León y Montagut (1987).

Se observó también que la producción de biogás es afectada por las variaciones de temperatura y éstas se realizaron durante el día, los valores reportados son mayores que los promedios diarios reales, por lo tanto, los datos obtenidos no son los suficientemente confiables, para que permitan un análisis real del comportamiento del FAFA.

Se comprobó además, que un incremento de la COV produce también sobre FAFA variación temporal de la relación AGV/ Alcalinidad total, aclarando que esta puede servir como parámetro de control, sensible al comportamiento de estos reactores, cuya determinación es muy fácil de realizar a nivel de laboratorio y puede "anunciar" cualquier desequilibrio de las poblaciones bacterianas acidogénicas y metanogénicas, situación útil desde el punto de vista operativo, donde valores muy próximos a 1.0 indican inestabilidad del proceso anaeróbico por cargas choques u otros factores y valores menores a 0.5 indican estabilidad.

Se realizaron determinaciones de SST en el afluente y el efluente del FAFA para determinar las remociones respectivas, registrando remoción entre el 62 y 72%, valores aparentemente bajos pero que en realidad son afectados por el desprendimiento de la biomasa adherida al medio de soporte situación que dificulta la determinación experimental de esta eficiencia real.

En lo referente a la remoción de Coli-fecales, el FAFA no es una buena alternativa, porque presenta remociones de solo 83%, 77.7% y 78.7%, para COV de 2.62, 4.29 y 6.23 Kg. DQO total/ m³ -d, aplicadas con tiempos de retención hidráulico de 1.22, 0.92 y 0.77 días respectivamente, indicando que la eliminación de Coli-Fecales además de estar relacionadas con factores ambientales, depende de manera directa del TRH, lográndose obtener remociones alrededor del 80% para las condiciones específicas en que se operó el filtro anaeróbico.

El FAFA utilizó como medio de soporte ladrillo de arcilla triturado, con una porosidad de 51.36% y obtuvo en promedio una eficiencia en la remoción de MO del 55% en términos de DQO, aplicadas en COV hasta de 6.32 Kg. de DQO total/ m³ -d; eficiencias un poco mayor a las obtenidas por Pineda y Pinzón(1989) del 50% , cuando operaron filtros anaeróbicos a 15 grados centígrados, en el tratamiento de





las aguas residuales del matadero ICTA de la Universidad Nacional de Colombia, pero utilizando anillos plásticos como medio de soporte del reactor, con una porosidad de 83.4%, situación que permite respaldar la hipótesis de que "la porosidad del medio de soporte, no es un factor preponderante que afecte el rendimiento del filtro anaeróbico, pero si su operación.

4.2 Evaluación del Reactor de Biodiscos.

Como al FAFA se le aplicaron tres COV diferentes y su efluente se entregó directamente al reactor de Biodiscos, esto implicó que se aplicará sobre él y de manera reciproca tres COS (2.25, 4.29 y 6.31 gDQOtotal/m²-d) aportadas por la MO más resistente a la degradación biológica, presentando el reactor aeróbico al comienzo de la aplicación de cada carga, grandes variaciones en el DQO efluente, porque la población microbiana presente en la biopelícula adherida requería un periodo de adaptación al incremento de carga y una vez adaptados los microorganismos, este reactor comienza a estabilizarse, conservando como característica la disminución lineal de la eficiencia con el incremento de la COS aplicada (Figura 4), registrando una remoción del 87.77% (DQO) y del 92.23% (DBO₅) para una COS aplicada sobre el Biodisco de 2.25 g DQO total/ m² -d, posteriormente se alcanzó eficiencias del 79.29% DQO (93.22% DBO₅) y del 76.5% DQO (86.18% DBO₅) cuando la COS Aplicada fué de 4.29 y 6.31 g DQO total/m²-d respectivamente (Ver Figuras 1, 2 y 3), eficiencias altas para TRH también altos, comparados con los empleados por Escobar R. y Rodríguez G.(1989) en la operación de reactores similares

La mayor producción de biomasa se presentó en las primeras etapas del Biodisco, indicando que es allí donde se realiza mayor remoción de MO; estabilizando primero la más fácilmente biodegradable, siendo en este caso la tasa de remoción del sustrato proporcional

a la concentración de MO remanente y además en estas primeras etapas el área de soporte de la biomasa es mayor, comparadas con las subsiguientes.

La remoción de sólidos suspendidos es un parámetro que no determinó realmente, porque la formación de flocs biológico en el biodisco y el desprendimiento de este tienen un alto aporte de sólidos al efluente del reactor; especialmente del floc de baja densidad que no alcanza a removerse en las tolvas de las etapas del reactor, ni en el sedimentador secundario, saliendo con el efluente de los Biodiscos, incrementando así el valor de SS. Esto permitió concluir que la formación de floc biológico y la frecuencia de purga de lodos, afectan la concentración del DQO₅ total y de los SST y su impacto es mayor a medida que el reactor se reduce de escala, teniendo mayor impacto sobre reactores a escala laboratorio, porque el tamaño del floc formado es independiente del tamaño de este reactor

Los Biodiscos removieron coli-fecales del orden de 96.42%, 91.37% y 89% para TRH respectivos de 2.11, 1.59 y 1.33 días, confirmando correlación con los TRH de los reactores, siendo aceptables las remociones obtenidas

4.3 Evaluación del sistema: FAFA + BIODISCOS

4.3.1. Remoción de MO: Una vez adaptados los microorganismos en los dos reactores al tipo y cantidad de sustrato, se observa que el sistema (FAFA + Biodisco) alcanza Estado Estable en periodos de tiempo cada vez mas cortos independiente de la CO aplicada

Para incrementar la CO aplicada, se aumentó simultáneamente la carga hidráulica y la concentración del sustrato; los siguientes son los porcentajes de las eficiencias del sistema en la remoción de MO medidas en términos de DQO y DBO₅ (Tabla 4 y Figura 4):





Tabla 4: Relación de cargas y eficiencias en el sistema FAFA - Biodisco

C.O.V. DQO Kg./m ³ - día	(%)Eficiencia Remoción (DQO)	(%)Eficiencia Remoción (DBO ₅)
2.62	94.49	96.62
4.45	89.55	96.91
6.33	87.71	92.42

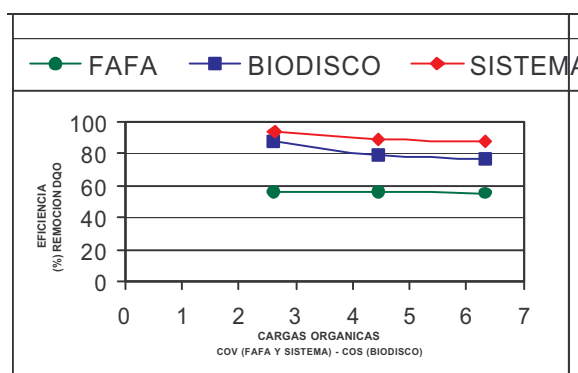


Figura No 4: Cargas vs. eficiencias en la remoción DQO

En tabla 4 y figura ídem se observa que el porcentaje de remoción de MO disminuye a medida que se incrementa la carga aplicada

El porcentaje de MO biodegradable en el agua residual, se calculó de manera aproximada mediante la relación entre la DBO /DQO total y filtrada, encontrándose un mayor porcentaje en le afluente, en comparación con el efluente, indicando que el sistema remueve la MO más fácilmente biodegradable, indicando que la MO presente en el efluente será ligeramente más difícil de remover por sistema aeróbico.

4.3.2. Sólidos Suspendidos: Los reactores evaluados fueron operadores en condiciones diferentes pero presentan como características, la formación de biopelícula adherida a los medios de soporte y la autorregulación de los espesores de biopelícula que generan el desprendimiento de la biomasa. La biomasa desprendida por el FAFA es finalmente depositada en la cámara de llegada a los Biodiscos, donde realiza el

proceso de sedimentación y la biopelícula desprendida por los Biodiscos es más voluminosa y se deposita en las tolvas, para luego ser removidas como lodos mediante purgas

En la operación de los Biodiscos se forman una gran cantidad de flocs biológico, que se deposita en las tolvas y en las cámaras de salidas del mismo y una parte (los menos densos), salen del sistema con el efluente, incrementando de esta forma la concentración total de los SS, la DQO total y la DQO total; por esta razón la remoción de sólidos suspendidos en el Biodisco no es cuantificable, quedando sujeta la eficiencia del sistema en la remoción de SS, a la que pueda realizar el FAFA.

4.3.3. Coliformes fecales: La aplicación de las tres COV sobre el filtro, obligó por razones operativas a incrementar también de manera simultánea, las CO's aplicada sobre el sistema, operándose con diferentes tiempos de retención. La remoción de Coli-fecales en el sistema fue de 98.42, 99.42 y 98.08%, para TRH de 3.33, 2.51 y 2.10 días respectivamente, demostrando la incidencia del TRH en la eficacia del sistema en el proceso de desinfección biológica.

4.3.4. pH y relación entre la Alcalinidad aportada por sales de los AGV/alcalinidad total

El ARM durante el paso por el filtro registra una disminución en el valor del pH, reducción que se hace más notoria a medida que se incrementa la carga aplicada, a pesar de esto permite entregar efluentes al Biodisco con un pH dentro del rango normal de operación de los sistemas aeróbicos (6.5 - 8.5). El Biodisco a su vez ocasiona una reducción del pH en su efluente a medida que se aumenta la carga aplicada; condición ligeramente ácida causada por altos TRH en este reactor y la alta producción de lodo que tienden generar condiciones anaeróbicas en las tolvas.





También se concluye que la relación: alcalinidad producida por las sales de los AGV/ Alcalinidad total, permitió predeterminar de manera el comportamiento del FAFA y el grado de estabilidad del mismo.

4.4. Problemas operativos

4.4.1. Filtro Anaeróbico (FAFA)

- Continuas obstrucciones en el sistema de alimentación (taponamiento de válvulas reguladoras de caudal) cuando se operó a gravedad (baja presión hidráulica) causado por alta presencia de grasas y aceites y colmatamiento de los poros del medio

- Continuo incremento en la pérdida de carga hidráulica como producto del crecimiento de la biopelícula adherida.

- Generación de altas presiones internas (formación de biogás) que impidieron el drenaje continuo del efluente, presentado flujos intermitentes que hicieron muy difícil calibrar el sistema de alimentación por gravedad y la aplicación de las cargas deseadas, optando por el bombeo directo con caudales regulables y la construcción y montaje del separador de fases (líquido-gas) para disminuir las presiones en el FAFA y facilitar la separación, recolección y medición del biogás producido.

4.4.2. Biodiscos

- Alta producción de lodos, especialmente en las tres primeras etapas del reactor

- Presencia de larvas de mosca blanca en todas las esquinas del reactor

5. CONCLUSIONES

La caracterización permitió determinar que las aguas residuales del matadero de Cúcuta no requerían la adición de nutrientes para su tratamiento primario anaeróbico, porque más del 50% del material orgánico es aportado por los SS.

Se logró establecer que al inocular los

FAFA's con lodos domésticos digeridos (AME: 0.12 g DQO-CH₄ / g SSV-d), estos arrancan más fácilmente, logrando condiciones estables en periodos de tiempo menores a los 50 días, siempre que se apliquen las COV's de menor a mayor hasta de 6.32 Kg. DQO total / m³ -d.

El FAFA es una alternativa viable para remover cerca del 55% de la MO (DQO) presente en las ARM y a pesar de los problemas operativos es un reactor eficiente en el tratamiento de ARM con concentraciones de DQO total mayores de 3000 mg./L, aplicadas con COV's hasta de 6.32 Kg. DQO total/ m³ -d, operados con TRH de 0.77 días (18.5 horas), porque funciona como un reactor anaeróbico de alta tasa, previo sometimiento de las ARM a tratamientos preliminares y primarios: Estas eficiencias obtenidas son un poco mayor a la obtenida por Pineda y Pinzón (50%) (2), cuando operaron factores similares a 17 °C de temperatura ambiente, comprobando que la temperatura incide en los procesos anaeróbicos, porque afecta la producción de biomasa, la utilización de sustrato y la tasa de crecimiento de las bacterias acidogénicas y metanogénicas.

Además, para las condiciones de operación, el incremento de la temperatura en 10 grados (de 17 a 27°C) por debajo del intervalo mesofílico (35°C) no fué muy significativo en el propósito de incrementar la eficiencia de reactor anaeróbico, logrando un incremento de solo 5% en la eficiencia en la remoción de MO.

Se plantea la posibilidad de separar la fase ácida de la fase metanogénica y operarla de manera controlada, buscando incrementar la eficiencia del FAFA, evitando así las continuas obstrucciones, planteamiento acorde a lo planteado por Jairo Romero R (2000)

Se encontró también que es viable tratar por medio de los Biodiscos AR previamente tratadas en reactores anaeróbico, logrando eficiencias entre 76- 88% de remoción de MO, para COSA's entre 2.25 y 6.32 g DQO total / m² -d, con TRH entre 2.11 y 1.33 días.





Se concluyó además que el sistema (FAFA + Biodiscos) se puede utilizar en la remoción de MO de las ARM con eficiencias entre el 92% y el 97%, (DBO_5) para COV's aplicadas sobre el FAFA entre 2.62 y 6.3 Kg. DQO total / m^3 -d, con TRH entre 3.33 y 2.10 días.

Los resultados obtenidos permiten afirmar también que la CO aplicada al sistema y medida en términos de COV aplicada al FAFA tiene incidencia directa sobre el comportamiento del sistema, porque la eficiencia en la remoción de MO disminuye a medida que se aumenta la CO aplicada.

Por presentar el FAFA desprendimiento de biopelícula removidas por sedimentación simple y por presentar adicionalmente

Biodiscos formación de flocs biológicos que generalmente sale con el efluente, se recomienda diseñar y construir sedimentadores a la salida de cada reactor.

La metodología aplicada en este proyecto para el arranque, aclimatación y operación del FAFA del reactor de Biodiscos y para la evaluación del sistema es una buena y puede ser adoptada para arrancar y operar, sistemas de TAR similares concluyendo de manera general que el sistema FAFA + Biodiscos permite reducir el impacto contaminante de las ARM sobre los alcantarillados sanitarios y/o sobre cuerpos de agua, logrando cumplir con las normas establecidas en el decreto 1594/84, confirmando la factibilidad de tratar las ARM y de origen cárnico por este sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Mc Carty, P.L One Hundred Years of Anaerobic Treatment, Second International Conference on Anaerobic Digestion, Travemunde, Germany, september, 1981.

OLOESZKIEWICZ, J. A. Y KOZIARSKI, S. Low Temperature Anaerobic Biofiltration in Upflow Reactors J. WPCF, Vol 54, No 11 Nov 1982

PARKIN, G.F. y OWEN, W.F. Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges, J. Vol. 112, N° 5, ASCE, October 1986.

YOUNG, J.C. y Mc CARTY P.L The Anaerobic Filter for Waste Treatment, J. WPCF, Vol. 41, N° 5, Parte 2, Mayo 1969

LETTINGA, g. Pol, L. Field, J. "Tratamiento de aguas residuales complejas" Manual del curso: Criterios de Diseño para sistemas UASB. Cali (1989).

MALDONADO M. Julio Isaac. Evaluación de un Sistema de Tratamiento para Aguas Residuales de Matadero. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1992.

OLOESZKIEWICZ, J. A. Y KOZIARSKI, S. Low Temperature Anaerobic Biofiltration in Upflow Reactors "J. WPCF, Vol 54, Nov 1982

OROZCO J. Álvaro y SALAZAR A. Álvaro. Tratamiento biológico de las aguas residuales. Universidad de Antioquia, facultad de ingeniería. Departamento de sanitaria. CESET. Segunda edición Medellín, Mayo 1987.

ROMERO Rojas, J. "Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño" Escuela Colombiana de Ingeniería, Primera Edición reimpressa, Bogotá, 2001.

WU Y. C. y SMITH. E. D." Rotating Biological Contactor System Design" Journal EED, Vol. 108 EE3, ASCE, June,1982.





WILSON F. Design Calculations in Wastewater Treatment, E & F.N. Spon Ltd., 1980
STEELS, I., H., design basis for the rotating disc process, Effluent and water treatment Journal, 1974.

VAN DER BERG, L., et al 1980, effects of sulphate, iron and Hydrogen on the microbial conversion of acetic acid to methan, Journal of Applied Bacteriology 48, in: LEON B. Melitón y MONTAGUT B. Roque Julio. Diseño, construcción y evaluación de un filtro anaeróbico a escala de laboratorio. Tesis de grado. Universidad nacional de Colombia. Facultad e ingeniería. Bogotá. 1987.

FIELD Jim. Medición de parámetros en reactores del manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente, Universidad Agrícola de Wageningen Holanda EN: Universidad del Valle, Corporación Autónoma Regional del Cauca, Universidad Agrícola de Wageningen. Arranque y operación de sistema de flujo ascendente con manto de lodos UASB, Santiago de Cali. Noviembre, 1987.

ROJAS Olga, Relación Alcalinidad - Ácidos Grasos Volátiles. Universidad del Valle Arranque y operación de sistema de flujo ascendente con manto de lodos UASB, Santiago de Cali. Noviembre, 1987

PINEDA VEGA Carlos Arturo y ESCOBAR RINCÓN Marco Tulio. Efecto de la variación de la temperatura, cargas orgánicas y volumétricas sobre un reactor de película fija y flujo ascendente. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá. 1989.

RODRÍGUEZ GUERRERO Herman y ESCOBAR RINCÓN Marco. Influencia de la carga hidráulica y la orgánica en el sistema de Discos Biológicos Rotatorios. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá 1989.

