



Tratamiento eficiente de aguas residuales orgánicas con filtros anaerobios de flujo ascendente de tres fases

Efficient treatment of organic wastewater with anaerobic filters of three-phases ascending flow

Julio Isaac Maldonado M¹; Adriana Mercedes Márquez R² y Jarson Alexis Rodríguez Chona³

1.* Docente Investigador Universidad de Pamplona- Colombia. Grupo GIAAS. - Programa Doctorado en Ingeniería Área – Ambiental, Universidad de Carabobo. jimaldonadom@hotmail.com.

2. Docente. Universidad de Carabobo - Centro de Investigaciones Hidráulicas y Ambientales CIHAM-UC. ammarquezesistas2@gmail.com

3. Maestría en Ingeniería Ambiental Facultad de Ingenierías y Arquitectura Universidad de Pamplona-Col.- Grupo GIAAS. jalexsrch@gmail.com

Resumen

Las aguas residuales orgánicas son descargas líquidas que contribuyen con una contaminación de alto impacto sobre los cuerpos receptores: ríos, lagos, embalses y el mar, además sobre los suelos y acuíferos. Para ayudar a resolver este problema ambiental, esta investigación se llevó a cabo con el objetivo de optimizar la eficiencia de los filtros ascendentes anaeróbicos, separándolos en dos y tres fases a escala de laboratorio, que se operaron con tiempos de retención: 18 ± 0.5 horas y 16 ± 0.5 horas respectivamente, con tres cargas volumétricas orgánicas: baja: 2.25, media: 3.45 y alta: 4.64; Kg DQO/m³-día y con temperaturas de 20, 27 y 34°C. En los reactores de dos fases (DI-FAFS) se obtuvieron eficiencias en la eliminación de materia orgánica de hasta 72% DQO, con una relación volumétrica de Fase I/Fase II = 20/80% y en los reactores de tres fases (TRI-FAFS) fue posible aumentar las eficiencias hasta 95% DQO con relaciones volumétricas de Fase I/Fase II/Fase III de 10/10/80%, obteniendo reactores óptimos para tratar aguas residuales orgánicas con alta eficiencia, con gran beneficio económico y ambiental.

Palabras clave: bioreactores, di-fafs, lixiviado, tri-fafs.

Abstract

The organic wastewaters are liquid discharges that contribute to high impact pollution on the receiving bodies: rivers, lakes, reservoirs and the sea, as well as on the soils and aquifers. To help solve this environmental problem, this research was carried out with the objective of optimizing the efficiency of the anaerobic upstream filters, separating them into two and three phases at laboratory scale, which were operated with retention times: 18 ± 0.5 hours and 16 ± 0.5 hours respectively, with three organic volumetric loads: low: 2.25, medium: 3.45 and high: 4.64; Kg COD/m³-day and with temperatures of 20, 27 and 34°C. In the two-phase reactors efficiencies were obtained in the elimination of organic matter of up to 72% COD, with a volumetric ratio of Phase I/Phase II = 20/80% and in the reactors of three phases it was possible to increase the efficiencies up to 95% COD with volumetric ratios of Phase I/Phase II/Phase III of 10/10/80%, obtaining optimum and hermetic anaerobic reactors to treat organic wastewater with high efficiency, with great economic and environmental benefit.

Keywords: bioreactores, di-fafs, lixiviado, tri-fafs.

Introducción

La cantidad y calidad del agua disponible en el mundo día a día se viene reduciendo como consecuencia del aumento de la población, los altos niveles de vida, el calentamiento global, el desarrollo industrial y comportamiento irresponsable antrópico; han generado como consecuencia incremento del vertimiento de grandes volúmenes de aguas residuales e industriales y lixiviados, vertidos al medio ambiente, con fuerte impacto y gran deterioro de las aguas receptoras y de los suelos; razón por la cual es importante buscar alternativas eficientes para el tratamiento de aguas residuales altamente contaminadas y mejorar procesos de tratamiento.

Existen muchos antecedentes de tratamiento aerobio y anaerobio de lixiviados, que van desde experiencias a escala laboratorio y experiencias a escala real (Torres et al. , 2014) (1). El tipo de tratamiento aerobio más extendido es el de los lodos activados y las lagunas aireadas, como también los Discos Biológicos Rotatorios.

Los sistemas anaerobios son de los bioprocesos que operan con muy buenos resultados en la remoción de M.O., siendo de las alternativas de tratamiento más estudiadas, que se emplean para mejorar la calidad de los vertimientos y reducen los impactos sobre las fuentes receptoras, siendo las lagunas anaerobias y el reactor UASB de los más utilizados por los buenos resultados.

De lo anterior se concluyéndose que los sistemas biológicos tanto anaerobio solo o combinado con otros procesos podrían ser una biotecnología viable para el tratamiento de los lixiviados, principalmente en regiones con climas cálidos, que ayudan a elevar la biodegradabilidad, representando una ventaja técnica y económica, importante, por la alta reducción de la M.O. con menor producción de lodos digeridos, menores requerimientos de área comparados con otros métodos, con generación de subproductos energéticos como el CH₄ contenido en el 70% del biogás; con bajo o nulo requerimiento de insumos químicos, dadas las condiciones adecuadas de pH, alcalinidad y de nutrientes de los lixiviados.

En general los tratamientos anaerobios a temperaturas entre 15 y 40°C alcanzan eficiencias de reducción de DQO en los lixiviados entre el 50% al 70%, dependiendo de la edad del lixiviado y de la relación DBO₅/DQO denominada índice de biodegradabilidad, que indica la capacidad que tiene un grupo de microorganismos de descomponer una sustancia compleja en sustancias más simples.

Los lixiviados maduros se caracterizan por baja relación de DBO₅/DQO y muy altos contenidos de sales disueltas, en particular de cloruros, sodio, carbonatos y amonio (2)

Los filtros anaeróbicos de flujo ascendente tiene más de 47 años de antigüedad éstos reactores han recibido poca atención en

Colombia, básicamente por problemas operativos, como generación de olores asociada a la acidificación, taponamiento por sólidos y/o material orgánico y baja velocidad para romper los productos de cadena larga (Hidrólisis), que riñe con la alta velocidad de los bioprocesos de fermentación, formación de hidrógeno, ácido acético y formación del CH_4 , problemática que se ha venido estudiando con el fin de disminuir los tiempos de biodegradación y aumentar la eficiencia del tratamiento, siendo éstos los factores limitantes más importantes.

Con el propósito de aumentar la eficiencia de los procesos de tratamiento anaerobios, de los cuales no se conocen criterios específicos de diseño, Cohen (3) y Romero (4) en han propuesto separar en dos fases la hidrólisis y formación de ácidos grasos de la fermentación metanogénica, así que en éste estudio el proceso de biodegradación de M.O. se realiza empleando filtros anaerobios de flujo ascendente separados en dos fases denominados DI-FAFS y tres fases llamados TRI-FAFS, donde se obtuvieron las relaciones óptimas de alturas y volúmenes de fases ídem, usando como sustrato los lixiviados del relleno sanitario "Los Guayabales", de Cúcuta (Col.) y la Cortada de Pamplona (Col.) respectivamente.

1. Metodología

En esta investigación se desarrolló en dos etapas:

I. Etapa: Determinación del volúmenes óptimo en DI-FAFS (publicada).

II. Etapa: Determinación de los Volúmenes óptimos en los TRI-FAFS.

2.1. Diseño Experimental: Son tres las variables independientes: la temperatura (T), la carga orgánica volumétrica (COV) y el volumen del reactor; cada una en tres niveles cuantitativos fijos y construcción de tres series de tres DI-FAFS y tres TRI-FAFS, cada una, con tres reactores por fase y serie, es decir bajo el diseño experimental tipo factorial de 3^3

2.1. Caracterización de los lixiviados: A los lixiviados del relleno sanitario "Los Guayabales" de Cúcuta y de "La Cortada de Pamplona" se le determinaron por métodos estandarizados los parámetros de mayor interés sanitario (pH, DQO, DBO_5 , ST, SST, SSV, Conductividad, Turbiedad, Cloruros, Dureza, Alcalinidad Total, N, NH_3 , Nitritos, Fosfatos, Sulfatos, Metales pesados, Grasas y Aceites y Coliformes totales y fecales).

2.2. Actividad Metanogénica Específica (AME): A cuatro lodos procedentes de las PTAR de Rio Frio, Campollo, M^c Pollo y estiércol fresco de cerdo, previa caracterización (SST, SSV y SSV/SST) mediante análisis estándar (7), se les midió la AME siguiendo la metodología indicada por Field J. (5) y aplicada por Maldonado J. (16).

2.3. Diseño y construcción de reactores: Se diseñaron y construyeron las unidades de:

2.3.1 Unidades de pretratamiento: Para para remover grasas y aceites se dispuso de dos trampas de grasas en paralelo, cada una con L: 0.16 m, ancho: 0.04 m y una profundidad de 0.08 m, volumen de 0.512 L y TRH = 0.43 horas, ambas convergen a la salida en un sedimentador primario de 0.32 m de largo, ancho: 0.16 m, profundidad: 0.08 m, volumen de 4,096 L y TRH = 1,73 horas para un tiempo total de pretratamiento de 2.16 horas.

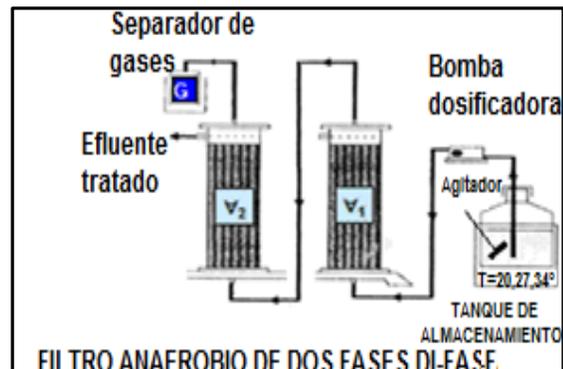
2.3.2. Dimensionamiento y Construcción DI-FAFS (Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente separado en Dos Fases). En esta investigación se planteó separar el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) en dos fases con volúmenes V_{D1} y V_{D2} en el sentido del flujo, con volumen total (V_{total}) = $V_{D1} + V_{D2}$.

En la parte inferior se dispuso un falso fondo de PVC con un $\Phi = 2+1/2''$, una altura de 0.25 m y un volumen de 0.77 L, con dos conductos de $\Phi=3/8''$, el primero ubicado en la parte inferior por donde ingresa el lixiviado pretratado e impulsado por bombas peristálticas y el segundo ubicado en la parte lateral que funciona como purga lateral de lodos generados en el pretratamiento.

Se diseñaron y construyeron nueve reactores DI-FAFS con tubería de PVC presión (200 PSI) y $\Phi = 2+1/2'' = 0.0635$ m, en tres series, con alturas porcentualmente variables, con relaciones de la alturas fase I/fase II de 20%/80% (0.24m/0.96 m); 50%/50% (0.6m/0.6m)

y 80%/20%(0.96m/0.24 m), teniendo como condición que la sumatoria de las dos alturas en cada reactor debe ser igual a 1.20 m, altura estándar del FAFA, con un tiempo de retención (fafTRH) de $18 \pm 0,5$ horas y un caudal de 4.0 ml/min, para volumen total de 4.11 L y útil de 3.8 L.

Figura 1. Esquema de montaje de los DI-FAFS.



Los cuerpos de los DI-FAFS y TRI-FAFS, se rellenaron utilizando como material soporte, trozos de tubería de CPVC $\Phi=1/2''$; L= 1.0 cm.

La salida del efluente de cada Di-FAFS se realiza por medio de un ducto conectado a una manguera plástica de $\Phi = 1/4''$ ubicado en la parte superior, que entrega la mezcla a un separador de fases, donde el efluente tratado sale por la zona lateral media y el gas sale por la parte superior; ver figura 2: Montaje los DI-FAFS

Figura 2. Montaje de las tres series de DI-FAFS



Fuente: Rodríguez, J. y Maldonado J.I., (2015).

2.4. Inoculación y Adaptación DI-FAFS:

Con el lodo de mejor AME se inoculan los DI-FAFS agregando un volumen de lodo equivalente al 30% del volumen de cada fase, para iniciar la formación de biopelícula adherida al medio de soporte, recirculando por cada DI-FAFS y durante 8 días continuos solo agua residual municipal doméstica ARD [DQO: 250-800 mg/L].

2.5. Aclimatación de los DI-FAFS:

Se inició recirculando una mezcla de 36 L de agua residual y lixiviado que se incrementaba en un 5% diariamente y se reducía en el mismo porcentaje el agua residual, hasta aplicar finalmente en todos los reactores solo lixiviados con concentraciones constantes en cada una de las tres series de los DI-FAFS así: Serie 1 [baja]: 1700; Serie 2 [media]: 2600 y Serie 3 [alta]: 3500 mg DQO/L

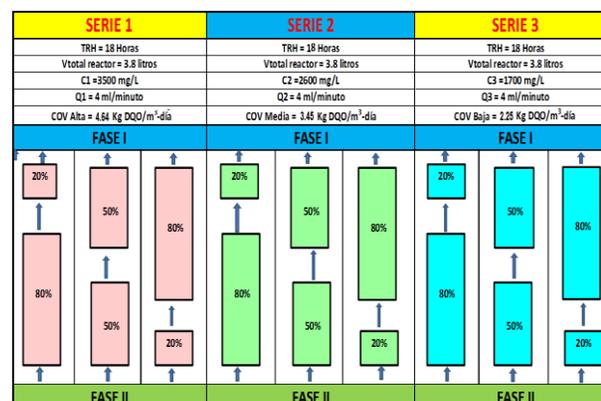
2.6. Arranque y Operación DI-FAFS:

Se inició el tratamiento de los lixiviados a 20°C constante (en todas series) y con Cargas Orgánicas Volumétricas (COV) netas y variables en cada serie así: Serie 1 COV_{baja}: 2,25, Serie 2 COV_{media}: 3,45 y Serie 3 COV_{alta}: 4.64 DQO kg/m³- día.

El sistema de alimentación siempre se mantuvo mezclado por medio de un sistema de agitación construido con un moto-reductor eléctrico que inicialmente agitaba la mezcla del lixiviado + ARD y finalmente solo los lixiviados, depositados en los tanques de almacenamiento del sistema, mientras que la temperatura fue controlada mediante el montaje de un controlador digital de encendido de las resistencias generadoras de calor.

Una vez logradas las condiciones estables para cada carga, se incrementó la temperatura a la media de 27°C (media) y posteriormente a 34°C (alta), monitoreando siempre las concentraciones del DQO afluente y efluente en todos los DI-FAFS. Una vez lograda la última condición estables se procedió a determinar las eficiencias en la remoción de M.O. (DQO) en cada uno de los reactores nueve DI-FAFS y con el Volumen Optimo de la fase II (V_{D2}). En la figura 3 se presenta el montaje experimental de los DI-FAFS

Figura 3. Montaje experimental con los DI-FAFS



2.7. Dimensionamiento y Construcción de los TRI-FAFS.

El TRI-FAFS es un filtro anaerobio de flujo ascendente separado en tres fases, diseñado también para biodegradar M.O. bajo condiciones anaerobias separados en tres volúmenes (V_{D1} , V_{D2} y V_{D3}) en el sentido del flujo, que resultó de dividir la fase I del DI-FAFS óptimo ahora en dos nuevos volúmenes (V_{D1} y V_{D2}), manteniendo el Volumen óptimo de la fase II DI-FAFS (V_{D2}) como el Volumen de la Fase III (V_{D3}), cumpliendo la condición que el volumen total ($V_{total} = V_{D1} + V_{D2} + V_{D3}$) (Figura 4).

Se diseñaron y construyeron nueve reactores TRI-FAFS con tubería de PVC presión (200 PSI) y $\Phi = 2+1/2'' = 0.0635$ m, en tres series, con alturas porcentualmente variables, con relaciones de la alturas faseI/faseII/faseIII de 4%/16%/80%, (0.048m/0.192m/0.96m); 10%/10%/80%, (0.12m /0.12m/0.96m) y 16%/4%/80% (0.192m/0.08m/ 0.96 m), teniendo como condición que la sumatoria de las tres alturas en cada reactor debe ser a 1.20 m, altura estándar del FAFAs, con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de $16 \pm 0,5$ horas y un caudal de 4.0 ml/min, para volumen total de 4.11 L y útil de 3.8 L.(Ver Figuras 4 y 5)

Figura 4. Esquema del montaje de los TRI-FAFS

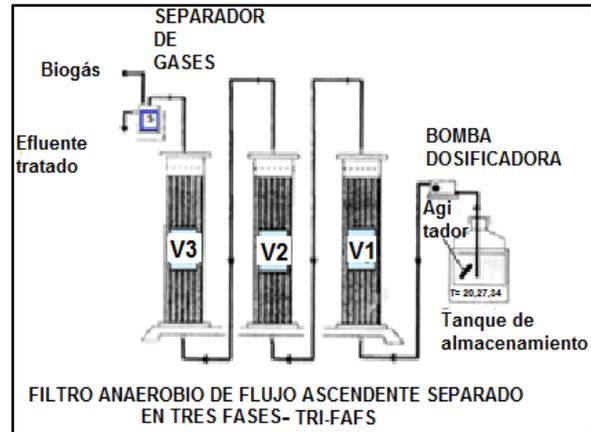


Figura 5. Montaje experimental de los TRI-FAFS

SERIE 1	SERIE 2	SERIE 3
TRH=16 Horas	TRH=16 Horas	TRH=16 Horas
Vr=3.8 litros	Vr=3.8 litros	Vr=3.8 litros
C1=3500 mg/l	C2=2800 mg/l	C3=1700 mg/l
COV alta = 4.64 KgDQO/m ³ -día	COV baja = 3.55 KgDQO/m ³ -día	COV baja = 2.25 KgDQO/m ³ -día
Q=4 ml/minutos	Q=4 ml/minutos	Q=4 ml/minutos
FASE I	FASE I	FASE I
VMO%	VMO%	VMO%
FASE II	FASE II	FASE II
20% 8% 20%	20% 8% 20%	20% 8% 20%
R1 R2 R3	R1 R2 R3	R1 R2 R3

El sistema de tratamiento, las zonas de entrada, el cuerpo, en la zona de salida y sistema de recolección de gases de los TRI-FAFS es similar al de los DI-FAFS, varía solo en el número de fases y las alturas de cada una de ellas

2.8. Inoculación y Adaptación TRI-FAFS: Proceso similar a la inoculación de los DI-FAFS.

2.9. Aclimatación de los TRI-FAFS: Similar al de los DI-FAFS.

2.10. Arranque y Operación TRI-FAFS:

Proceso similar al arranque de los DI-FAFS; que logradas condiciones estables en cada carga a T_{baja} de 20°C, se incrementó a la T_{media} de 27°C y posteriormente a T_{alta} de 34°C, monitoreando siempre las concentraciones del DQO afluente y efluente en todos los TRI-FAFS. Lograda las últimas condiciones estables se determinaron las eficiencias en la remoción de M.O. (DQO) en cada reactor y se procesaron los resultados.

2.11. Procesamiento Estadístico de Resultados

La metodología de superficies de respuesta (MSR) fue utilizada, por ser una estrategia experimental y de análisis matemático y estadístico que permitió encontrar las condiciones óptimas de operación de los DI-FAFS. La condición del proceso corresponde a aquellos factores o variables cualitativas o cuantitativas que producen un efecto en la variable respuesta que corresponde a una cantidad medible cuyo valor se ve afectado al cambiar los niveles de los factores y cuyo objetivo es optimizar dicha variable.

2. Resultados

Las Tabla 1 y 3 presenta la caracterización del lixiviado utilizado como sustrato de los DI-FAFS y los TRI-FAFS respectivamente. El pH tiene condiciones ligeramente básicas que pueden ser un factor de inhibición durante el tratamiento. Según Nájera et.al.(8) los valores de pH y la alcalinidad corresponden a un lixiviado

tipo 3 o intermedio; las concentración de M.O. tanto en términos de DQO, como de DBO_5 , que lo ubican dentro de los rangos típicos para un lixiviado de vertedero nuevo según Salgado y Trujillo (9), pero intermedio según Renou, et al , 2008, (15), que por el tiempo de funcionamiento se puede indicar que presenta una mezcla de lixiviados provenientes de celdas jóvenes e intermedias, ya que el relleno sanitario Los Guayabales tiene 10 años de operación.

Tabla 1. Caracterización de lixiviados relleno sanitario Los Guayabales - Cúcuta

PARAMETRO	UNIDAD	PROMEDIO	PARAMETRO	UNIDAD	PROMEDIO
pH	Und	8,47	Sulfatos	mg/l SO_4	200,00
DBO_5	mg/l	2.925,00	Cobre	mg/l Cu	0,51
DQO	mg/l	9.438,33	Plomo	mg/l Pb	0,59
DBO_5/DQO	-	0,31	Cromo	mg/l Cr	0,76
ST	mg/l	13.562,92	Zinc	mg/l Zn	0,58
SSV	mg/l	5.337,08	Manganeso	mg/l Mn	0,87
Conductividad	$\mu s/cm$	21,43	Hierro Total	mg/l Fe	20,19
Turbidez	UNT	695,88	Potasio	mg/l K	2.381,00
Cloruros	mg/l Cl	2.147,86	Sodio	mg/l Na	1.056,87
Dureza Total	mg/l $CaCO_3$	2.142,86	Calcio	mg/l Ca	182,42
Alcalinidad T.	mg/l $CaCO_3$	9.736,81	Magnesio	mg/l Mg	220,39
N-NH ₃	mg/L NH ₃	33,33	Grasas y Aceites	mg/l	8,00
Nitritos	mg/l NO_2	1,95	Coli Totales	NMP/100 ml	2.150
Fosfatos	mg/l PO_4^{3-}	284,50	Coli Fecales	NMP/100 ml	1.300

El índice de biodegradabilidad es bajo de solo 0,35 y según Luo et.al. (11) registros entre 0,1 - 0,5 considera que el lixiviado es de tipo intermedio con un índice de biodegradabilidad medio. Además reportó baja concentración de metales, con presencia de materiales orgánicos recalcitrantes que son parcialmente estables y biológicamente resistentes.

La Tabla 2 muestra las concentraciones de metales pesados encontrados en caracterizaciones de lixiviados de diferentes rellenos sanitarios del mundo reportados por Pellón et.al (11), Montenegro (12), Nájera et.al.(8), Méndez (13) y Villamizar y Plata(14) y los reportes de la caracterización hecha en 2014 a los

lixiviados del Relleno Sanitario Los Guayabales de Cúcuta, donde se encontraron las concentraciones del plomo, cromo, hierro en valores intermedios; mientras que los valores para zinc, potasio y sodio se encuentran por debajo de los rangos encontrados; y el manganeso ligeramente por encima de estos valores medios, aclarándose que los análisis de calcio y magnesio no se les pudieron realizar la comparación.

Tabla 2: Metales pesados en los lixiviados cinco rellenos sanitarios diferentes

Parámetro	Unidad	(Estudio Actual) Relleno Sanitario Guayabales, Cúcuta, 2014.	Vertedero de Guanabacoa, la Habana 2014	Relleno Sanitario Doña Juana, 2011	Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México 2008.	Relleno Sanitario Mérida; Yucatán, México 2002-2003.	Relleno Sanitario el Carrasco, Santander, Colombia. 2001.
Cobre	mg/L Cu	0,51	1,4	0,067	0,19	0,214	0,16
Plomo	mg/L Pb	0,59	0,71	0,23	1,851	0,236	ND
Cromo	mg/L Cr	0,76	0,12	ND	0,827	6,98	0,79
Zinc	mg/L Zn	0,58	6,2	0,59	3,425	3,2	4
Manganeso	mg/L Mn	0,87	ND	0,17	ND	0,81	ND
Hierro total	mg/L Fe	20,19	ND	17,73	21,159	64,05	312,5
Potasio	mg/L K	2381	ND	ND	ND	10252	ND
Sodio	mg/L Na	1056,87	ND	ND	ND	11850	ND
Calcio	mg/L Ca	182,42	ND	ND	ND	ND	ND
Magnesio	mg/L Mg	220,39	ND	ND	ND	ND	ND

La caracterización de los lixiviados del relleno La Cortada se muestra en la tabla 3:

Tabla 3. Caracterización de lixiviados relleno sanitario La Cortada - Pamplona

PARAMETRO	UNIDADES	PROMEDIO
DBO ₅	mg / L	5500
DQO	mg / L	8950
DBO ₅ /DQO	-	0,61
PH	Unid	7,49
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	6750
Acidez	mg CaCO ₃ /L	7500
Dureza	mg CaCO ₃ /L	7850
Cloruros	mgCaCO ₃ /L	14750
Fosfatos	mg / L	2,8
Conductividad	ms/mc	23.305
Nitritos	mg / L	0.0465
ST	mg / L	680
SST	mg / L	770
SSV	mg / L	2350
Turbidez	UNT	605

Torres et al. (1) indica el rango de los valores de los ST para los lixiviados

jóvenes, intermedios y maduros, que comparados con los datos del RS los Guayabales y La Cortada se clasifican como lixiviado como de tipo Intermedio porque tiene una edad entre 5 - 10 años.

Se caracterizaron los lodos y se determinaron en todos la relación SSV/SST indicando que la biomasa presente en los lodos es alta, que permite buenos rendimientos en la biodegradabilidad de sustratos orgánicos y producción de CH₄, siendo el estiércol de cerdo el que reportó la mayor SSV/SST = 0,78.

Se realizó el ensayo de AME para los mismo cuatro lodos y se observó que la AME se debe al crecimiento bacteriano, siendo la primera AME I la que se debe seleccionar, siendo el estiércol de cerdo el que reportó la mayor AME1= 0.05, quedando seleccionado como inóculo.

Se inocularon todos los reactores (DI-FAFS/TRI-FAFS) incorporando un volumen equivalentes al 30% del volumen en cada una de las fases. (ver figura 4) y seguidamente se hizo recircular solo agua residual (250-800 mg DQO/l) durante cinco días para inducir la formación de la biopelícula adherida en los (DI-FAFS/TRI-FAFS).

Posteriormente se aclimató mediante la alimentación con una mezcla de agua residual y lixiviados diluido, cuyo porcentaje volumétrico de lixiviados se incrementó diariamente en un 5% mientras que en el mismo porcentaje se disminuyó también diariamente el volumen de agua residual, revisando

siempre la concentración diluida del lixiviado mediante ensayos de DQO.

Figura 4. Fotos de inoculación de los DI-FAFS.

Fuente: Rodríguez, J. y Maldonado J.I., (2015).

Finalmente se inició el tratamiento de los lixiviados con diferentes COV aplicadas simultáneamente (una por serie) inicialmente con T_{baja} de 20°C, la que se incrementó a 27°C y por último a 34°C a medida que se lograban condiciones de estado estable teniendo como variable de control la eficiencia en la remoción de la M.O. en términos de DQO.

La salida del efluente en cada DI-FAFS/TRI-FAFS se realiza por un ducto conectado a una manguera plástica de $\Phi = 1/4''$ ubicado en la parte superior de la última fase del reactor respectivo, que entrega la mezcla a un separador de fases, donde el efluente sale por la zona lateral media y el gas por arriba.

Los resultados en cuanto a eficiencias en la remoción de M.O. medida en mg DQO/l en cada reactor (DI-FAFS/TRI-FAFS), en las diferentes condiciones de volúmenes, cargas y temperaturas de operación se muestran en las Tablas 4 y 5; observándose que las mayores eficiencias en los DI-FAFS se obtuvieron cuando se aplicaron COV entre media y alta, operados con temperaturas entre 27°C y 34°C y con volúmenes de la Fase I de medios a bajos (50%Vt - 20%Vt) y volúmenes de la Fase II de medios a altos (50%Vt - 80%Vt).

Tabla 4. Eficiencias en los DI-FAFS



		CARGA ORGANICA VOLUMETRICA (kg DQO/m ³ - día)								
		4,64			3,45			2,25		
T °C	DI-FAFS	DI-FAFS2	DI-FAFS3	DI-FAFS1	DI-FAFS2	DI-FAFS3	DI-FAFS1	DI-FAFS2	DI-FAFS3	
	80-20	50-50	20-80	80-20	50-50	20-80	80-20	50-50	20-80	
20	227,5	37,5	48,75	40,38	42,31	44,23	31,25	43,75	37,5	
27	41,73	53,3	66,45	55,77	63,25	70	46,4	52	60,45	
34	59,42	63,77	65,22	62,26	64,15	72,86	52,94	59,45	68,57	

Fuente: Rodríguez, J. y Maldonado J.I., (2015)

El procesamiento estadístico en esta investigación se realizó aplicando la metodología de superficies de respuesta (MSR) como estrategia experimental y de análisis matemático y estadístico, que permitió encontrar las condiciones óptimas de operación de los DI-FAFS y de los TRI-FAFS, donde la variable dependiente fue la eficiencia (variable cuantitativa) y los factores fueron tres: la temperatura con tres niveles (20, 27, 34°C); la distribución volumétrica de los reactores con tres niveles (20, 50, 80%) y la carga COV aplicada, con niveles factoriales: 2,25, 3.45 y 4.64 kg DQO/m³-día. El análisis estadístico desarrollado para los DI-FAFS a través del software Design Expert que genera una matriz de diseño, que evalúa las superficies de

respuesta, según la información suministrada en cada factor.

Se obtuvo además los resultados de la regresión, lineal, cuadrática y cúbica, donde el mismo software Design Exper sugiere ajustar a un modelo cuadrático para calcular la eficiencia óptima con las variables independientes; se observa el valor de R^2 del 89.37% y un p-valor ($p < 0.05$), indicando que las variables COV, Temperatura y Volumen modifican los valores de la eficiencia. Además, presenta un posible modelo aliado que es el polinomio cúbico.

En regresión lineal confirman el modelado de las variables a través de un polinomio cuadrático, donde las variables independientes están haciendo variar a la eficiencia en un 89.37% y se estima que el R^2 estimado iría a ser de aproximadamente el 79.70% indicando una alta confiabilidad del modelo que tiene la particularidad que se enfoca en el modelo que minimiza la suma de cuadrados del error predichas "PRESS" con el menor valor y el mayor valor de R^2 ajustado.

El modelo cuadrático para los DI-FAFS es:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

Reemplazando los factores codificados obtenidos a través del programa Design Expert se obtiene que la ecuación para la eficiencia que permite realizar predicciones sobre la respuesta dados los niveles de cada factor, obteniéndose los

siguientes coeficientes: término independiente = +61.10; A= +11,97; B= +0,63; C= +6,46; AB = +0,52; AC= +0,057; BC = +1,32; $A^2 = -5,38$; $B^2 = -6,36$; $C^2 = -0,40$, valores que permiten plantear la ecuación:

$$E = 61.1 + 11.97T + 0.63COV + 6.46V + 0.52T * COV + 0.057T * V + 1.32COV * V - 5.38T^2 - 6.36COV^2 - 0.4V^2$$

Con los factores y los valores máximos y mínimos de cada uno de los niveles estudiados, finalmente se realizaron 75 corridas que el mismo programa estadístico hizo para los datos suministrados y los resultados de la MSR para la eficiencia en relación de la carga COV, Temperatura y Volumen, siendo el valor de la eficiencia teórica máxima del 74% con un volumen de reactor metanogénico del alto, COV_{media} y T_{alta} de 34°C.

Para los TRI-FAFS se operaron bajo diseño experimental factorial 3^3 con Tiempos de Retención de 16 horas, Cargas Orgánicas Volumétricas de 2.25, 3.45 y 4.64 KgDQO/m³-día y temperaturas de 20, 27 y 34°C, con una relación volumétrica óptima en los DI-FAFS de $D_1/D_2 = 20/80\%$ en el sentido del flujo y en los TRI-FAFS con relaciones: $D_1/D_2/D_3$, 4/16/80%, 16/4/80% y 10/10/80% del volumen útil, lográndose eficiencias hasta del 92 % en los TRI-FAFS como se puede observar en la Tabla No 5, concluyéndose que estos últimos pueden dimensionarse con un volumen en la primera fase igual a $0.1 * V_{Total}$; la Segunda Fase igual a $0.1 * V_{Total}$ y la Tercera Fase igual a

$0.8 \cdot V_{\text{Total}}$; y que pueden emplearse para tratar eficientemente aguas orgánica y lixiviados con alta concentraciones orgánicas.

Tabla 5. Eficiencias en los TRI-FAFS

T °C	CARGA ORGANICA VOLUMETRICA (kg DQO/m ³ - día)								
	4,64			3,45			2,25		
	TRI-FAFS	TRI-FAFS2	TRI-FAFS3	TRI-FAFS1	TRI-FAFS2	TRI-FAFS3	TRI-FAFS1	TRI-FAFS2	TRI-FAFS3
	4-16-80	10-10-80	16/04/1980	4-16-80	10-10-80	16/04/1980	4-16-80	10-10-80	16/04/1980
20	84	86	88	85	87	84	88	89	89
27	88	92	90	88	90	89	86	90	92
34	89	91	89	89	92	90	90	93	92

Fuente: Maldonado J.I. et al, (2017)

Conclusiones.

- Los lixiviados provenientes de los rellenos sanitarios de Los Guayabales de Cúcuta y La Cortada de Pamplona se clasificaron como de Tipo 3 (Intermedio) y pueden ser tratados por un sistema biológico anaerobio como los DI-FAFS y los TRI-FAFS
- Se comprobó que los DI-FAFS y los TRI-FAFS son una biotecnología anaerobia viable para remover de M.O. de los líquidos residuales.
- Se confirmó mediante software estadístico del método de superficie de respuesta que los DI-FAFS operando con $T \geq 27^\circ\text{C}$ y $\text{TRH} = 18$ horas, con $\text{COV}_{\text{aplicada}} \geq 4,45 \text{ KgDQO/m}^3\text{- día}$ pueden remover hasta del 74% DQO.
- La construcción óptima de los DI-FAFS puede realizarse con volúmenes de las fases I igual al 20% del volumen total del reactor y de la Fase II con volúmenes igual al $80\% \cdot V_t$ del reactor.

- Los TRI-FAFS con $T \geq 27^\circ\text{C}$ y con relaciones $F_1/F_2/F_3 = 10/10/80$ en el sentido del flujo y $\text{TRH} \geq 16$ horas son suficiente para alcanzar $E \geq 90\%$ en la remoción de DQO, llegando hasta el 95%
- Las ventajas técnico- económicas convierten a los TRI-FAFS en un sistema viable para la remoción de M.O. en aguas residuales, siempre que se puedan controlar las variables que influyen en el proceso (COV, temperatura) y el pH.
- Los TRI-FAFS óptimos se puede construir con el volumen de la fase I igual al $10\% \cdot V_{\text{total}}$; fase II también igual al $10\% \cdot V_{\text{total}}$ y de la Fase III con Volúmen igual al $80\% \cdot V_{\text{total}}$ del reactor.

Referencias Bibliográficas

1. Torres P., Barba-Ho, L. E., Ojeda C., Martínez, J., and Castaño, (2014). Influence of leachates age on its physico-chemical composition and toxicity potential. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 17(1), 245–255.
2. Torres, P., (2010). Impacto de la incorporación de lixiviados en el arranque de reactores anaerobios al tratar aguas residuales doméstica. Ingeniería y Universidad, 313–326.
3. Cohen A. (1983). Two-Phase Digestion of Liquid and Solid Waste. Third International Symposium on Anaerobic Digestion, Boston-USA
4. Romero R., J. (2001) Tratamiento de aguas residuales: Teoría y Principios de



Diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería, Primera Edición Reimpresa, Bogotá.

5. Field, J., (1987). Medición de parámetros en reactores del manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente, U. Agrícola de Wageningen Holanda - U. del Valle – CAR Cauca

6. Maldonado, J. I. (1993) Evaluación de un sistema de tratamiento para aguas residuales de matadero. Tesis: Universidad Nacional de Colombia - Facultad Ingeniería.

7. Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. APHA, AWWA, WPCF. (1992) Madrid (España): Ediciones Díaz de Santos, S.A

8. Nájera, H; Castañón, J; Figueroa, J y Rojas-Valencia, M. (2009). caracterización y tratamiento fisicoquímico de lixiviados maduros producidos en el sitio de disposición final de tuxtla gutiérrez, Chiapas, México.

9. Salgado, P., & Trujillo, V. (2004). Estudio de la calidad del lixiviado del relleno sanitario filtro, esmeralda y su respuesta bajo tratamiento en ascendente, anaerobio piloto de flujo.

10. Luo, J., Qian, G., Liu, J., & Xu, Z. P. (2015). Anaerobic methanogenesis of fresh leachate from municipal solid waste: A brief review on current progress. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 21–28.

11. Alexis Pellón., Matilde López., María Espinosa., Orestes González (2015). Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos

urbanos. Ingeniería Hidráulica Y Ambiental, 36(2), 3–16

12. Montenegro, D. (2013). Estimación del efecto del lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana sobre la calidad del agua del Río Tunjuelo y su posible tratamiento en la PTAR Canoas

13. Méndez Novelo, R. I., Castillo Borges, E. R., Sauri Riancho, M. R., Quintal Franco, C. A., Giácoman Vallejos, G., & Jiménez Cisneros, B. (n.d.) (2008). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 25(3), 133–145.

14. Villamizar, O. D., y Plata, S. M. (2013). Characterization and implementation of a physicochemical method of treatment from the landfill carrasco. inovaciencia, 1, 23–2.

15. Renou, S. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. Journal of hazardous materials. Obtenido de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17997033>

16. Maldonado J. et al (2017). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios con filtros anaerobios de flujo ascendente de dos fases. Revista Ingeniería UC, Vol 14 No 1. 91-104.



41

J. I. Maldonado M., Ing. Civil (1989) Universidad Francisco de Paula Santander UFPS; Magister Ingeniería Ambiental (1993) -Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, DC. Profesor Asociado Universidad de Pamplona; Integrante Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS), Director de Ambiental - Unipamplona; Consultor Ambiental y Sanitario.
<http://orcid.org/0000-0002-5956-5917>.

*Para citar este artículo: Maldonado M J.I; Márquez R.A.M ;Rodríguez Chona. J.A. Efficient treatment of organic wastewater with anaerobic filters of three-phases ascending flow .Revista Bistua.2018.16(2):29-41

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas Julio Isaac Maldonado. Docente Investigador Universidad de Pamplona- Colombia.Grupo GIAAS. - Programa Doctorado en Ingeniería Área – Ambiental, Universidad de Carabobo. jimaldonadom@hotmail.com.

Recibido: Noviembre 20 de 2017

Aceptado: Febrero 22 de 2018