
Diseño de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente a Nivel de Laboratorio Para el Tratamiento de Agua Residual Municipal en el Distrito de Guadalupe

Design of an Upstream Anaerobic Flow Reactor for the Municipal Wastewater Treatment at Laboratory Level in the District of Guadalupe

Isis C. Córdova Barrios

isiscordovabarrios@hotmail.com - Universidad Nacional San Luis Gonzaga - Ica

Pedro Córdova Mendoza

pedrocordovamendoza@hotmail.com - Universidad Nacional San Luis Gonzaga - Ica

Teresa O. Barrios Mendoza

lobarriosm17@yahoo.es - Universidad Nacional San Luis Gonzaga - Ica

Antonina J. García Espinoza

garcianina40@hotmail.com - Universidad Nacional San Luis Gonzaga - Ica

Ana María Huayta Arroyo

anamariahuayta@yahoo.com - Universidad Nacional San Luis Gonzaga - Ica

Resumen

El objetivo fue diseñar y construir un reactor RAFA para el tratamiento de aguas residuales municipales del distrito de Guadalupe a escala de laboratorio. Para el diseño del reactor RAFA se usó el método tradicional o empírico, siguiendo una secuencia que consiste en proponer parámetros de partida, que en este caso fue la carga orgánica volumétrica ($2,35 \frac{\text{Kg DQO}}{\text{m}^3 \text{d}}$), la concentración inicial del agua residual municipal o del sustrato (1 Kg DQO/m^3), el flujo de alimentación ($0,01152 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$), la eficiencia de depuración asumida (85%), y el tiempo de residencia hidráulica asumido (12 horas). Con estos parámetros se calculó el volumen del reactor, que es de 5L con un diámetro de 0.12 m, una altura total de 0.60538 m, el área de la abertura del separador gas-liquido-sólido (GLS) es de $0,03 \text{ m}^2$, el área de la sección transversal de la campana del separador (GLS) es $0,90 \text{ m}^2$ y su altura es de 0.075385 m con un ángulo de 60°. El ancho de los deflectores es de 0.0207 m y su longitud es 0.0414 m con un ángulo de 45°. El reactor fue construido en acrílico de 3 mm. Para poner en marcha el reactor en primer lugar se caracterizó las aguas residuales municipales del colector Laguna de Oxidación ubicado en el Parque Ecológico Golder Meir – Distrito de Salas Guadalupe.

Palabras claves: *Tratamiento de aguas residuales municipales, RAFA, carga orgánica volumétrica, tiempo de residencia hidráulica, biopelícula.*

Abstract

The objective was to design and build a RAFA reactor for the treatment of municipal wastewater in the Guadalupe district on a laboratory scale. For the design of the RAFA reactor the traditional or empirical method was used, following a sequence that consists of proposing starting parameters, which in this case was the volumetric organic load ($2.35 \text{ (Kg COD) / (m}^3 \text{ d)}$), the initial concentration of municipal wastewater or the substrate (1 kg COD / m^3), the feed flow ($0.01152 \text{ m}^3 \text{ / d}$), the purification efficiency assumed (85%), and the assumed hydraulic residence time (12 hours). With these parameters the reactor volume, which is 5L with a diameter of 0.12 m, a total height of 0.60538 m, was calculated, the area of the gas-liquid-solid separator (GLS) opening is 0.03 m^2 . The cross-sectional area of the separator bell (GLS) is 0.90 m^2 and its height is 0.075385 m at an angle of 60° . The width of the baffles is 0.0207 m and its length is 0.0414 m with an angle of 45° . The reactor was built in 3mm acrylic. To start the reactor, the municipal wastewater of the Laguna de Oxidación collector located in the Golder Meir Ecological Park - Salas Guadalupe District was characterized.

Keywords: *Municipal wastewater treatment, UFA, organic load volumetry, hydraulic residence time, biofilm.*

Introducción

Actualmente estamos viviendo la crisis más grande de todos los tiempos debido a la contaminación tanto en aire, suelo y agua. El agua residual se puede definir como la combinación de los residuos líquidos o aguas portadoras de residuos procedentes, tanto de residencias como instituciones públicas, plantas industriales y comerciales. La acumulación y estancamiento de aguas residuales, la descomposición de materia orgánica que contiene, pueden conducir a la generación de grandes cantidades de gases malolientes. A este hecho debe añadirse la frecuente presencia de numerosos microorganismos causantes de enfermedades, que pueden estar en las plantas industriales. Esta agua puede contener componentes que actúan como nutrientes y/o compuestos tóxicos que son altamente contaminantes para un determinado ecosistema (Azimi & Zamanzadeh, 2004). Según su origen, las aguas residuales pueden clasificarse en domésticas o urbanas, industriales, agropecuarias, de origen incontrolado (vertidos ilegales, infiltraciones) y pluviales. Sin embargo, ciñéndose a los objetivos del estudio, se entiende por aguas residuales municipales a aquellas de origen doméstico, con alguna posible aportación de pluviales y/o de procedencia incontrolada (Banu, Kaliappan, & Yeom, 2007).

Los parámetros más utilizados para evaluar el comportamiento de las aguas residuales son 1) la demanda química de oxígeno (*DQO*), que caracteriza la carga orgánica y la cantidad de oxígeno consumido en la oxidación química de la materia orgánica; 2) el número de coliformes totales (*CT*), que indica el grado de contaminación fecal, y 3) el número de bacterias saprofitas (*BS*), que indica la cantidad de microorganismos transformadores de materia en componentes más simples (Cavalcanti, van Haandel, & Lettinga, 2002).

En el Perú, el mayor número de plantas industriales que se han interesado en dar tratamiento a los residuos líquidos emplean pozas de estabilización, sin mantenimiento, ni monitoreo alguno, por lo que son completamente ineficientes, generando problemas de deterioro ambiental (Azimi & Zamanzadeh, 2004). Por ello el tratamiento de las aguas residuales es una obligación inaplazable para todos los países latinoamericanos. Sin embargo, dadas las limitaciones económicas de la región es necesario buscar

alternativas tecnológicas que garanticen efectividad, sencillez y bajo costo que permitirá desarrollar una verdadera política de control de la contaminación hídrica. Para el efecto es importante aprovechar todas aquellas experiencias de países como Colombia, México, Cuba, Brasil, entre otros.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las experiencias, podemos decir que la tecnología anaerobia y particularmente el sistema RAFA, parece constituir una solución muy apropiada para nuestra condición de país en desarrollo. Es un hecho que las tecnologías convencionales, financieramente están muy alejadas de las posibilidades de cualquier municipalidad. Mas aun cuando las ciudades capitales de región se caracterizan por tener altas tasas de crecimiento poblacional y una deficiente infraestructura sanitaria, para mencionar solo dos de los innumerables problemas que las aquejan (Collazos & Cala, 1992).

Los reactores (RAFA) han sido ampliamente usados para el tratamiento de aguas residuales de baja y alta carga orgánica, de naturaleza soluble y compleja. La operación de éstos se basa en la actividad autorregulada de diferentes grupos de bacterias que degradan la materia orgánica y se desarrollan de manera continua, formando un lodo biológicamente activo dentro del reactor, siempre y cuando en el interior se tenga un buen contacto con el agua residual y un tiempo de permanencia suficiente para alcanzar una alta eficiencia en la remoción de material orgánico biodegradable. Para garantizar una buena operación de este tipo de reactores, es necesario evaluar su comportamiento hidráulico con el fin de identificar el tipo de flujo y los problemas que lo afectan (Azimi & Zamanzadeh, 2004).

Estudios realizados identificaron diferentes zonas hidráulicas en un reactor RAFA; en el lecho de lodo el flujo es tipo pistón, en el manto de lodo el comportamiento es turbulento y el flujo puede llegar a ser completamente mezclado y en la parte del sedimentador, el flujo es laminar parecido a flujo pistón. Este reactor tiene entonces un modelo de flujo pistón- mezcla completa- pistón y de una forma global, este comportamiento se inclina más hacia flujo completamente mezclado (Fabián & Chumbe, 1992).

En general en el diseño de un proceso que involucra a un RAFA se considera necesaria una etapa de

acidificación con un tiempo de retención de 6 – 24 horas, la cual puede lograrse en el mismo tanque de homogenización. Si la *DQO* es superior a 10 g/L, deberá considerarse la inclusión de un separador de sólidos suspendidos antes de entrar al RAFA, con el objeto de impedir la entrada de la biomasa acidogénica formada en el reactor de pre acidificación. Para evitar esto se puede diseñar el RAFA considerando el incremento de sólidos suspendidos volátiles (*SSV*) que representa esa biomasa. Si el residuo tiene una *DQO* menor de 1500 mg/L, generalmente el diseño es fijado por la carga hidráulica (velocidad ascendente) y para aguas más concentradas, el diseño lo impone la carga orgánica volumétrica (García & Polanco, 1995). Es por ello que el presente trabajo de investigación tiene por objetivo diseñar y construir un reactor RAFA para el tratamiento de aguas residuales municipales del distrito de Guadalupe.

Caracterización de las Aguas Residuales Municipales

Toma de muestra

Se tuvo mucho cuidado al tomar la muestra ya que solo se haría el análisis en una muestra por ser muy peligroso el contenido, para la salud, y esta tenía que ser representativa. La muestra para el análisis químico y físico, se tomó en un frasco limpio e incoloro de 250 mL, con tapa hermética igualmente limpia. El frasco se lavó con detergente adecuado y se enjuago diez veces con agua destilada para remover cualquier residuo y olores que hubiera en ella.

La muestra tomada se guardó en un envase con hielo, para mantenerla a una temperatura de 8°C a fin de no alterar el análisis. Al momento de sacar la muestra esta se enjuago tres veces con la misma agua, se llenó completamente y se cerró inmediatamente. Enseguida, el frasco se etiqueto indicando el tipo de análisis, nombre del lugar, fecha y hora.

Para la toma se tuvo que sujetar el frasco con una cuerda formando tres lazos alrededor de ella, lo cual permitió obtener mayor profundidad y seguridad al momento de coger la muestra. La muestra *ARM* se tomó a las 7:00 horas del 03/09/14 en el colector Daniel Alcides Carrión, resultando *DQO* 518.0 mg/L. Los resultados de análisis de *DQO* varían según la estación y la hora de la toma. De todos los parámetros el *DQO* es el más confiable para realizar los análisis de biodegradación de la materia orgánica de las *ARM*.

Análisis de la demanda química de oxígeno por el método de digestión con el bioreactor y determinación de la demanda bioquímica de oxígeno

Estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Agua de la FIQ-UNCP. El método de la demanda química de oxígeno (*DQO*) se empleó para medir el contenido de materia orgánica del *ARM*, ya que este parámetro determina el equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse. Para este análisis se usó un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido (bicromato potásico). Este ensayo se realizó a temperatura

elevada para facilitar la oxidación de ciertas clases de compuestos orgánicos. Para el análisis de determinación (*DBO*)₅ que consiste en un periodo de incubación, para la degradación bioquímica de la materia orgánica. Estos dos parámetros son los más usados, aplicados para la determinación de contaminación orgánica en las aguas residuales.

Análisis de OD, SST, SSV, pH, T, Olor y Color

Estos parámetros fueron analizados igualmente en el laboratorio de la FIQAS-UNICA. El oxígeno disuelto (*OD*) depende de la actividad física, química, y bioquímica del sistema de aguas; este análisis es una prueba clave en la contaminación del agua y el control del proceso de tratamientos de aguas residuales. El análisis de este parámetro se realizó por el método electrométrico que utiliza electrodos de membrana.

“Sólidos Totales” es la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación y su consecutivo secado en la estufa a temperatura definida. Los sólidos totales incluyen “sólidos totales suspendidos”, o porción de sólidos totales retenida por un filtro, y los “sólidos disueltos totales” o porción que pasa por el filtro. Estos análisis se realizaron en el laboratorio de No Metálicos ya contaba con una mufla utilizada para secar el residuo a 105°C, que ayudo a determinar los *SST* y *SSV*.

El tipo de filtro que usamos fue el cuantitativo ya que permitía obtener mayor cantidad de residuo. El *pH* es un parámetro que frecuentemente se midió en el bioreactor para la caracterización química del *ARM*, ya que éste determina la intensidad de carácter ácido o básico de una solución. Para realizar la medición de *pH* del *ARM* se empleó el método electrométrico con cuidado ya que este instrumento es muy sensible.

La temperatura del agua se midió con un termómetro de 0 – 100°C. El olor y el sabor dependen del contacto de una sustancia estimulante con la adecuada célula receptora, estos estímulos son de naturaleza química, es por ello que el olfato y el gusto son “sentidos químicos”. El olor es un parámetro en la que no usamos ningún tipo de instrumento, solo nos guiamos por nuestros sentidos. Para el color se realizó una comparación con discos de vidrio los cuales fueron calibrados con los patrones de platino cobalto de color de agua. En la Tabla 1 se muestra los métodos y equipos que se usaron para los análisis.

Tabla 1.
Análisis de la muestra del ARM

ANÁLISIS	MÉTODO	EQUIPO
DQO	Electrodo de Membrana	Oxímetro marca (Hach)
DBO	Espectrofotómetro de reflujo abierto.	Espectrofotómetro, rango (400-1100nm)
SST	Gravimétrico	Mufla para le desecación a 180°C
SSV	Gravimétrico	Mufla para le desecación a 180°C
pH	Electrométrico.	Medidor de pH,(0.0–14.0 unidades)
T	Medición directa	Termómetro (0– 100°C)
COLOR	Comparación visual	-----
OLOR	Organoléptico	-----

Nota. Elaboración propia.

DISEÑO DEL REACTOR RAFA

Para diseñar un reactor biológico RAFA se ha seguido una secuencia que consiste en proponer los parámetros de diseño que en este caso fue la carga orgánica volumétrica, la concentración inicial del agua residual municipal o del sustrato, el flujo de alimentación, la eficiencia con que se debe trabajar el reactor, y la determinación del tiempo de residencia hidráulica, para luego ver si esta se encuentra dentro del rango de operación.

Determinación de los parámetros de alimentación

a) Carga orgánica volumétrica (Bv)

Teniendo en cuenta la concentración tan variable del agua residual municipal, se tomó como base de cálculo para el diseño 2.5 kgDQO/m³ basados en la literatura.

$$B_v = 2.35 \frac{\text{Kg DQO}}{\text{m}^3 \text{ d}} \quad (1)$$

b) Flujo de alimentación (Q)

El flujo de alimentación a nivel laboratorio que se propone es:

$$Q = 0.01152 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (2)$$

c) Eficiencia de depuración

La eficiencia de depuración asumida para el presente diseño fue del 85%

$$\eta = 0.85 \quad (3)$$

d) Tiempo de residencia hidráulica (THR)

El tiempo de residencia hidráulica asumida es de 12 horas.

e) Concentración inicial del sustrato (S₀)

La concentración inicial del sustrato determinada es de 1 Kg DQO/m³. Los resultados del diseño del reactor RAFA se han realizado con la metodología propuesta, los resultados de las especificaciones y dimensionamiento se presentan en la tabla 2.

Tabla 2.
Resumen del Dimensionamiento del Reactor RAFA

CARACTERÍSTICAS	DIMENSIONAMIENTO	
	DISEÑO	CONSTRUCCIÓN
Volumen del reactor (mL)	4900	5000
Área del reactor (m ²)	0.011	0.011
diámetro del reactor (m)	0.12	0.12
altura del reactor (m)	0.53	0.53
altura total del reactor (m)	0.605	0.61
Área de la abertura del separador (GLS) (m ²)	0.03	0.03
Área de la sección transversal de la campana del separador (GLS) (m ²)	0.9	0.9
Ancho de la abertura del separador (GLS) (m)	0.026	0.03
Angulo de inclinación de la campana del separador (GLS)	60°	60°
Altura de la campana del separador GLS (m)	0.075	0.08
Traslapo (m)	0.0124	0.012
Ancho de los deflectores (m)	0.0207	0.02
Longitud de los deflectores (m)	0.0414	0.04
Angulo de inclinación de los deflectores	45°	45°

Nota. Elaboración propia

La diferencia entre el dimensionamiento y la construcción del reactor ha sido mínimo, por ejemplo, el dimensionamiento del volumen del reactor con respecto a la construcción tuvo un margen de error de 2%, este margen de error que fue mínimo, nos dio la confiabilidad de nuestro diseño.

PUESTA EN MARCHA DEL REACTOR

a) Procedencia y adaptación del lodo

Procedencia del Lodo. El lodo fue obtenido de la planta de tratamiento DOE RUN – PERU ubicado en la provincia de la Oroya, esto con la finalidad de que se adapten mejor y en el menor tiempo posible para biodegradar la materia orgánica del agua residual municipal. El lodo, que era de color marrón, fue obtenido el 14 de enero del 2014; y trasladado hasta la FIAS-UNICA, conservándose a 4°C hasta su adaptación.

Adaptación del lodo anaerobio. La adaptación de la biomasa se logró alimentando agua residual municipal al reactor por 14 días a un flujo constante y a temperatura ambiente, luego se colocó en un sistema de calefacción a una temperatura de 35°C por 72 días, en este caso el *pH* es constante pero el flujo fue variando.

b) Puesta en marcha del reactor

La instalación del reactor y sus componentes se inició introduciendo agua para verificar si tiene alguna fuga, se revisó las soldaduras que tiene y se selló algunas que estaban abiertas. Se dejó el reactor con agua por 3 días para comprobar que ya no existía fuga de agua. Al término de esta operación se procedió a instalar las mangueras y el tanque de alimentación para realizar las pruebas y poder alimentar al flujo de operación deseada. Después del arranque, este permaneció vigilado por varias horas para asegurar que las distribuciones estén funcionando apropiadamente.

c) Instalación del reactor y sus componentes

Antes del arranque la instrumentación y energía suministrada deben ser chequeadas. Al término de la revisión se procedió a instalar todo el sistema completo, es decir el sistema de calefacción, mangueras, tanque de alimentación para poder realizar en primer lugar la adaptación de lodo, segundo, la alimentación del sustrato real (agua residual).

d) Prueba Hidráulica del Sistema

Una vez instalado todo el sistema, se procedió a realizar la prueba hidráulica que consistió en hacer circular agua por todo el sistema para comprobar si existe alguna fuga ya sea por las mangueras, por el reactor mismo y también poder comprobar el funcionamiento del sistema de calefacción.



Figura 1. Prueba hidráulica del reactor RAFA

e) Toma de muestra del agua residual

El agua residual fue extraída del colector del Distrito de Guadalupe que se encuentra ubicado en la ribera. El agua residual para la alimentación del reactor se recogió en 2 baldes de 18 L cada dos días durante los meses de diciembre, enero, febrero y marzo.

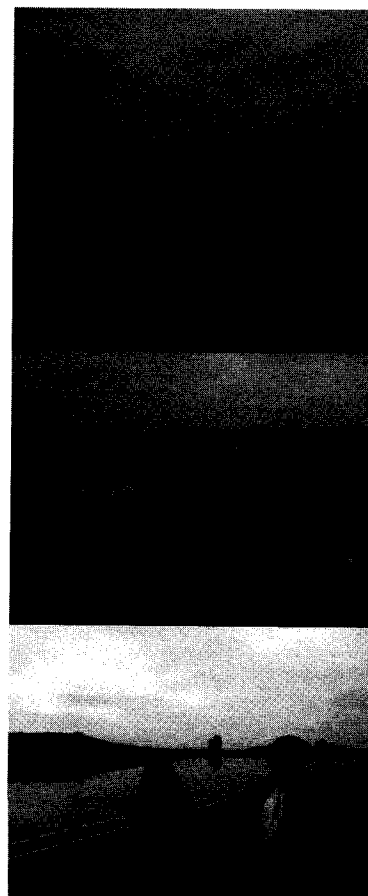


Figura 2. Toma de muestra del ARM del colector del distrito de Salas Guadalupe

f) Puesta en marcha del reactor continuo

La puesta en marcha del reactor continuo se inició adicionando el inoculo que viene a ser la mezcla de lodo (color marrón) y agua residual (la cual se obtuvo agua residual municipal en el distrito de Guadalupe). El inoculo adicionado al reactor fue el 23% del volumen total, equivalente a 1,130.4 ml el resto fue agua residual haciendo un total de 5,000 ml. Se alimentó el reactor con agua residual del colector del distrito de Guadalupe por 95 días de los cuales, 14 días el reactor estuvo a una temperatura ambiente, donde la biomasa cambio de color marrón a marrón oscuro); y 78 días a 350 días, donde el reactor se colocó en un sistema de calefacción para mantener esta temperatura constante, el color de biomasa tomo de marrón oscuro a negro y después de negro a negro intenso, también se observó la presencia de nata en la zona de separación GSL del reactor, lo cual indica que el reactor está funcionando adecuadamente.

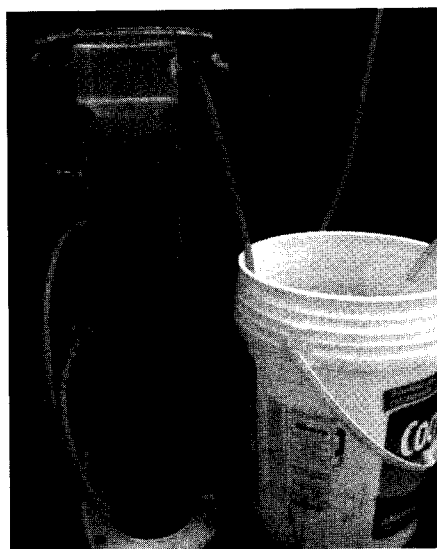


Figura 3. Puesta en marcha del reactor RAFA a temperatura ambiente

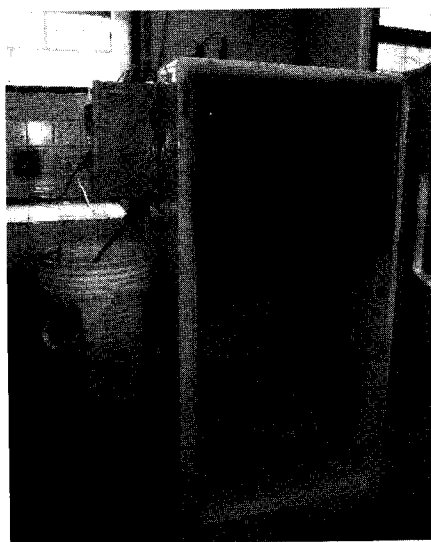


Figura 4: Puesta en marcha del reactor RAFA a 35°C

Resultados y discusión

Se realizaron en total cuatro experimentos (Gutierrez-Pulido & De la Vara-Salazar, 2008), cuyos resultados se presentan a continuación:

Resultados del primer experimento

Después del periodo de adaptación de 53 días de la biomasa, analizamos el afluente y el efluente para comprobar que la biodegradación de la materia orgánica se esté realizando en el reactor con un TRH de 12 horas. En la figura 5 se puede distinguir que la concentración de DQO disminuye más en los primeros días, obteniendo una eficiencia del 80.76%.

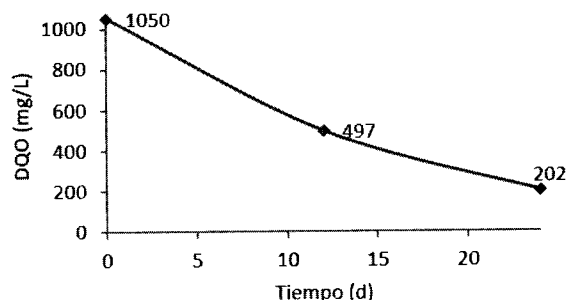


Figura 5. Biodegradación de la Materia Orgánica en 24 días

Es por ello que en el segundo experimento se programó cada 24 horas por 2 días.

Resultados del segundo experimento

El afluente a tratar en el reactor se tomó del colector Daniel Alcides Carrión al cual se le realizó su respectivo análisis, dando un resultado de 945 mg DQO/L.

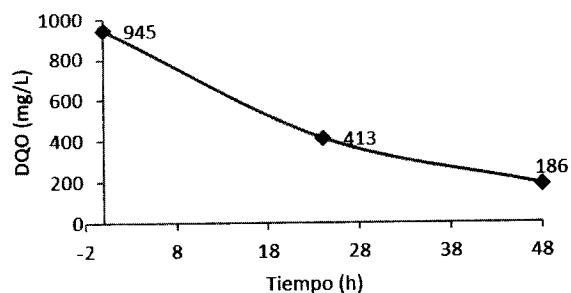


Figura 6. Biodegradación de la materia orgánica en 48 horas

En la figura 6 se puede distinguir que la concentración de DQO disminuye más en las primeras horas, obteniendo una eficiencia del 82.11%.

Resultados del tercer experimento

El afluente a tratar en el reactor se tomó del colector Daniel Alcides Carrión al cual se le realizó su respectivo análisis, dando un resultado de 1,025 mg DQO/L. Este experimento se ha realizado durante 21 horas, con una toma de muestra durante un intervalo de tiempo de 3 horas, en un total de ocho muestras.

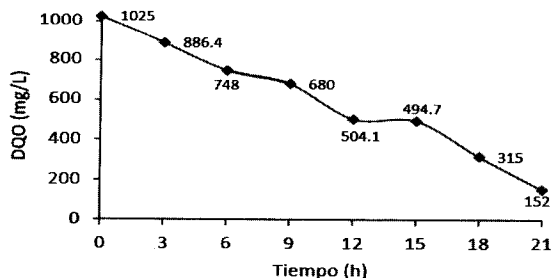


Figura 7. Biodegradación de la materia orgánica en 21 horas

Como se puede observar en la figura 7 se logró una eficiencia de biodegradación de 85.17%. En un tiempo de 12 horas la eficiencia del reactor arrojó 50.81%, con este resultado decidimos muestrear en menor tiempo de biodegradación para determinar la remoción con mayor precisión y exactitud.

Resultados del cuarto experimento

En vista que el afluente se fue consumiendo, se procedió a alimentar con una nueva muestra que se tomó del colector Daniel Alcides Carrión, al que se le realizó su respectivo análisis, dándonos un resultado de 1,013 mgDQO/L. Este experimento se ha realizado durante 14 horas, con una toma de muestra durante un intervalo de tiempo de 2 horas, en total de ocho muestras. El DQO inicial no varía mucho con respecto al primer experimento. En este experimento se logró obtener un porcentaje de remoción de 88.94%, lo que indica que conforme va transcurriendo el tiempo desde la puesta en marcha del reactor se van adaptando mejor las bacterias para biodegradar la materia orgánica del agua residual municipal.

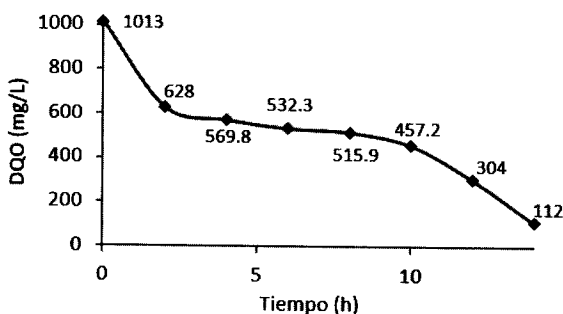


Figura 8. Biodegradación de la materia orgánica en 14 horas

Cabe recalcar que en tan solo 2 horas la eficiencia de remoción es de 38 %, a partir de este momento se mantiene casi constante, lo que nos indica que el reactor está trabajando adecuadamente.

Conclusiones

Se caracterizó las aguas residuales municipales del colector Daniel Alcides Carrión La Ribera – Guadalupe, dando como resultado la DBO₅ de 412.0 mg/L, DQO de 518.0 mg/L, OD de 0.16mg/L, pH de 6.8, SSV de 85 mg/L y SST de 289 mg/L.

Se ha diseñado el reactor RAFA a escala de laboratorio con un volumen de 4,900 mL para la biodegradación de la materia orgánica. El reactor tiene una geometría cilíndrica cuyo diámetro interno es de 0.12 m, una altura total de 0.60538 m, el área de la abertura del separador gas-líquido-sólido (GLS) es de 0.03 m², el área de la sección transversal de la campana del separador (GLS) es 0.90 m² y su altura es de 0.075385 m con un ángulo de 60°. El ancho de los deflectores es de 0.0207 m y su longitud es 0.0414m con un ángulo de 45°.

El reactor diseñado fue construido con material acrílico de 3 mm y 6 mm con las características de diseño. Su construcción no tuvo mucha variación con respecto al dimensionamiento de diseño, pues solo tuvo un margen de error entre 1 a 2 %.

El tiempo de residencia hidráulica en el reactor es de 12 horas, lo que implica que el volumen de diseño no tendrá problemas para trabajar con otras cargas orgánicas.

La eficiencia de biodegradación de la materia orgánica final del experimento es de 77.29%

Referencias bibliográficas

- Azimi A. and Zamanzadeh M., "Determination of design criteria for RAFA reactors as a wastewater pretreatment system in tropical small communities", *Journal Environmental Science Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 51-57, 2004.
- Banu J. R.; Kaliappan S.; Yeom I. T., "Treatment of domestic wastewater using upflow anaerobic sludge blanket reactor", *Journal Environmental Science Technology*, 4 (3): 363-370, 2007.
- Cavalcanti P. F. F., Van Haandel A. and Lettinga G., "Influence of the phase separator design on the performance of the RAFA reactor and on excess sludge production", Federal University of Campina Grande, Brazil, 2008.
- Collazos, C.J. y Cala J.M. "PTAR 'Rio Frio': RAFA más laguna facultativa exitosa aplicación en Colombia. Trabajo presentado en el VIII congreso nacional de ingeniería sanitaria y ambiental, SMISAAC, Cocoyoc, Morelos, México. 1992
- Fabián L., R.; Chumbe S., R., M. Diseño de un Reactor Anaerobio Tipo Filtro Para el tratamiento de Aguas Residuales Industriales. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería Química. UNCP. Guadalupe-Perú. 87 p. 2003.
- García E., P.; Polanco F. "Filtro anaerobio. Grupo Biotecnología Ambiental". España. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Valladolid .Editorial Reverte. 1995.
- Gutiérrez P., H.; De la Vara S., R. Análisis y Diseño de Experimentos. México. Segunda Edición. Editorial MC Graw Hill Interamericana Editores S.A. 545p. 2008.