

Artículo científico

Estudio de coeficientes cinéticos de filtros percoladores por etapas, con medio filtrante de piedra volcánica.

Zenobio Huamaní Galindo

Ingeniero Químico, Ingeniero Civil, M.Sc. Ingeniería Sanitaria, ERIS – USAC. Guatemala

Trabajo: Consultor independiente; Ayacucho – Perú

Dirección para recibir correspondencia: redesepez@gmail.com.pe

Adán Ernesto Pocasangre Collazos

Profesor de la maestría de Ingeniería Sanitaria, ERIS, USAC

apocasangre@crs.org

Recibido 22.10.2018 Aceptado 29.11.2018

Resumen

El estudio de coeficientes cinéticos de filtros percoladores por etapas, con medio filtrante de piedra volcánica, en el tratamiento del agua residual en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, el cual responde un buen rendimiento en la eficiencia de la remoción de la materia orgánica; pero es importante el estudio de los coeficientes cinéticos para determinar parámetros de diseño para este tipo de unidades.

La caracterización del agua residual de origen doméstico, como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) son los principales parámetros a ser evaluados. En este estudio se utiliza la ecuación de Eckenfelder, cuyo modelo considera los coeficientes cinéticos de: (n) y (K); y según la metodología se resuelve utilizando los datos determinados de DBO_5 y DQO en el laboratorio por método gráfico.

Según los resultados de los filtros percoladores se logra remover el 89.70 % de la materia orgánica, considerando que el medio filtrante es de piedra volcánica de tamaños de 2 ½", 3" y 3 ½" respectivamente en cada filtro. La característica de la carga orgánica e hidráulica son de carga baja, y la temperatura promedio de 25 °C. Los coeficientes cinéticos determinados son: $n = 0.673$; $K = 0.0294 \text{ m}^{0.673} \cdot \text{día}^{-0.673}$.

PALABRAS CLAVE: Filtro percolador, Coeficientes cinéticos, Materia orgánica, Tratamiento de Aguas residuales.

Abstract

The study of kinetic coefficients of trickling filters in stages, filtration medium of volcanic stone, in the treatment of wastewater of Wastewater Treatment Plant of USAC, which responds to a good performance in the efficiency of removal of organic matter; but it is important to the study of the kinetic coefficients to determine design parameters for this type of units.

The characterization of residual water from domestic, as the biochemical oxygen demand (BOD_5) and the chemical oxygen demand (COD) are the main parameters to be evaluated. This study uses the equation of Eckenfelder, whose model considered the kinetic coefficients of: (n) and (K); and according to the methodology it is solved using COD and BOD_5 data in the laboratory by graphical method.

According to the results of the filters trickling manages to remove the 89.70% of organic matter, considering that the filter medium is stone maze of sizes 2 1/2 ", 3"and 3 1/2"respectively in each filter. The characteristic of organic and hydraulic load are low load, and the average temperature of 25 ° C. The kinesthetic certain coefficients are: $n = 0.673$; $K = 0.0294 \text{ m}^{0.673} \cdot \text{day}^{-0.673}$.

Key words: Filter percolator, Kinetic coefficients, Organic matter, Wastewater Treatment.

Introducción

Este artículo contiene antecedentes de las investigaciones realizadas por diferentes autores desde el año 1948 al 2010, sobre ecuaciones experimentales de coeficientes cinéticos para diferentes medios de soporte en filtros percoladores, en las cuales se ha utilizado el modelo matemático propuesto por Eckenfelder (1963).

La investigación que generó este artículo fue desarrollada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala – USAC, Campus Central; la cual cuenta con filtro percoladores de multietapas como tratamiento secundario.

Entre los principales resultados del artículo se pueden citar la determinación de los coeficientes cinéticos (K y n) para filtros percoladores multietapas con medio de soporte de piedra volcánica, lo cual se expresa en la siguiente ecuación de correlación de $y = 0.6731x - 3.5266$, con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.9846$. Así mismo, se determinaron la *carga hidráulica* y *carga orgánica* de los filtros percoladores con valores de $4.27 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{día}$ y $0.17 \text{ kg}/\text{m}^3.\text{día}$, respectivamente.

Antecedentes

En nuestros países, el objetivo principal del tratamiento de las aguas residuales es la remoción de los contaminantes y así mejorar sus propiedades, para que estas puedan cumplir con los requerimientos de las normas de vertimientos de aguas residuales a un cuerpo receptor. De esta manera se pretende disminuir el impacto sobre el ambiente y la salud de las personas.

Es fundamental antes de proceder al diseño preliminar o definitivo de una planta de tratamiento de aguas residuales, conocer la cantidad y la calidad a tratar, y luego en base a esta información se proyectan las unidades de tratamiento que se le dará para cumplir principalmente dos aspectos:

El efluente de la planta de tratamiento de agua residual sea igual o mejor de la ECA (estándares de calidad de agua) del río o cuerpo receptor en todo el horizonte del proyecto.

Los límites máximos permisibles se tomaran como referencia, solamente cuando los valores de la ECA

del río son muy altos, es decir son mayores que los valores de los límites máximos permisibles.

Modelos matemáticos para el diseño de filtros percoladores fueron propuestos por varios autores, todos ellos tratando de considerar la cinética de reacciones dados en el sistema biológico de la biopelícula adherida en la superficie fija.

Para el diseño de filtros percoladores existen diferentes ecuaciones propuestas, a través de los años, por diferentes autores. Veltz (1948), Rankin (1955), Schulze (1960), Eckenfelder (1963), Galler y Gotas (1964) Bruce y Merkens (1973), Kinkannon y Stover (1982) y otras (Romero, 2010).

Una importante alternativa para el tratamiento de las aguas residuales es el proceso biológico, el cual supone la remoción de contaminantes principalmente sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas, mediante la actividad biológica. Dicha actividad se aprovecha para remover Nitrógeno y Fósforo del Agua Residual. (Romero Rojas, 2010).

El año 1972, bajo la dirección del Ing. Arturo Pazos Sosa, profesor de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS, se emprendió en buscar soluciones al tratamiento del agua residual doméstica, entre ellas mediante el uso de filtros percoladores. (Oakley 2011/ Cruz, 1990)

La Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos – ERIS, ha utilizado las instalaciones de la Planta de Tratamiento Aurora II “Ing., Arturo Pazos”, tanto para actividades académicas, de extensión y de investigación; lo cual ha producido una gran variedad de investigaciones relacionadas al uso de filtros percoladores como tratamiento secundarios de aguas residuales hasta la fecha.

Los datos del presente artículo son resultados del estudio: “Estudio de coeficientes cinéticos de filtros percoladores por etapas, con medio filtrante de piedra volcánica”, elaborado por el Ing. Zenobio Huamaní Galindo, con el acompañamiento del Ing. Adán Pocasangre Collazos como asesor del mismo.

Descripción del área de estudio

Las aguas residuales generadas en la Universidad de San Carlos de Guatemala, por sus diferentes usos internos, se puede clasificar como agua residual doméstica, con un caudal promedio de 5.0 l/s . Por lo

que estas aguas residuales deben ser tratadas previo a su vertimiento al cuerpo receptor; según investigaciones realizadas se ha determinado que la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC cumple, con los requerimientos de calidad de vertimiento según el Acuerdo Gubernativo 236 - 2006.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, se encuentra localizada en la Ciudad Universitaria ubicada en la Zona 12 de la Ciudad de Guatemala. Al norte, este y sur colinda con los predios de la Ciudad Universitaria y al oeste, con la colonia El Carmen y una quebrada de por medio, que se origina a inmediaciones de la Ciudad Universitaria.

La siguiente es la localización geográfica de la planta de tratamiento de la USAC.

Longitud: 90°33'34.50" O, Latitud: 14°34'42.71" N y Altitud: 1457 m.s.n.m

La planta de tratamiento posee las siguientes unidades de procesos de tratamiento:

Caja de ingreso, rejilla separadora, canal desarenador, sedimentador primario, filtros percoladores de tres etapas en serie, sedimentador secundario, digestor de lodos y patio de secado de lodos.

Metodología

La investigación consistió en la determinación de los coeficientes cinéticos de filtros percoladores por medio de la eficiencia de los parámetros más representativos de remoción de materia orgánica como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Los filtros biológicos llamados también como filtros percoladores pertenecen a este tipo de reactores de crecimiento en soporte fijo o asistido. El filtro percolador es un relleno cubierto de limo biológico a través del cual se percola en forma descendente a través del relleno y el efluente se recoge en el fondo.

La eliminación de la DBO carbonosa, la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica se consigue biológicamente por la acción de una gran variedad de microorganismos, principalmente bacterias. Estos microorganismos, utilizan la materia orgánica para convertirla en tejido

celular, biomasa, que debe ser removido del efluente y formación de gases. La actividad bioquímica y reproducción de los microorganismos importantes para el tratamiento biológico del agua residual, están afectados por una fuente de carbono, energía, necesidades nutricionales y la naturaleza del metabolismo (Metcalf & Eddy, 1997)

Los microorganismos que utilizan la materia orgánica como fuente de carbono celular para la formación de tejido celular se denominan heterótrofos y los que utilizan el dióxido de carbono se llaman autótrofos. Todo microorganismo necesita de una fuente de energía, una de carbono y elementos inorgánicos o nutrientes para poder reproducirse y crecer. La materia orgánica y el dióxido de carbono son de las principales fuentes de carbono que utilizan los microorganismos.

En la subcapa anaerobia, la degradación tiene lugar con formación de ácidos orgánicos, CH₄ y H₂S. En los filtros percoladores la materia orgánica y coloidal se separa mediante oxidación aerobia, biosorción, coagulación y descomposición anaerobia; así, no existe disminución de la carga orgánica por filtración mecánica.

Figura 1: Esquema de la planta tratamiento de aguas residuales, USAC

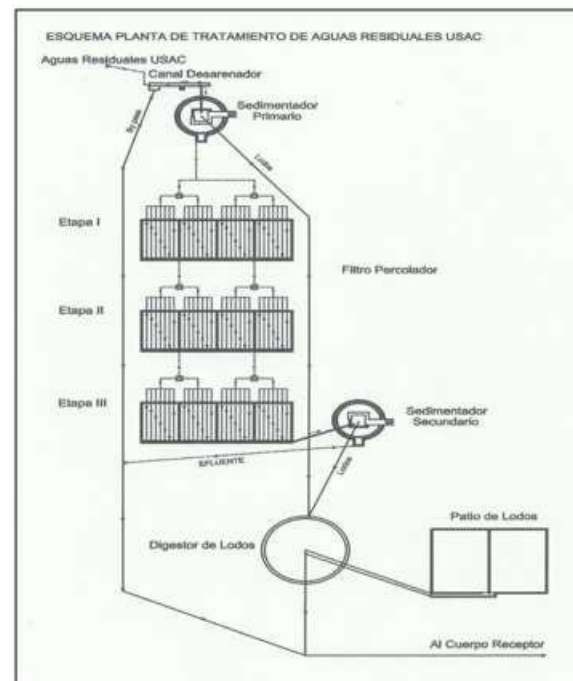
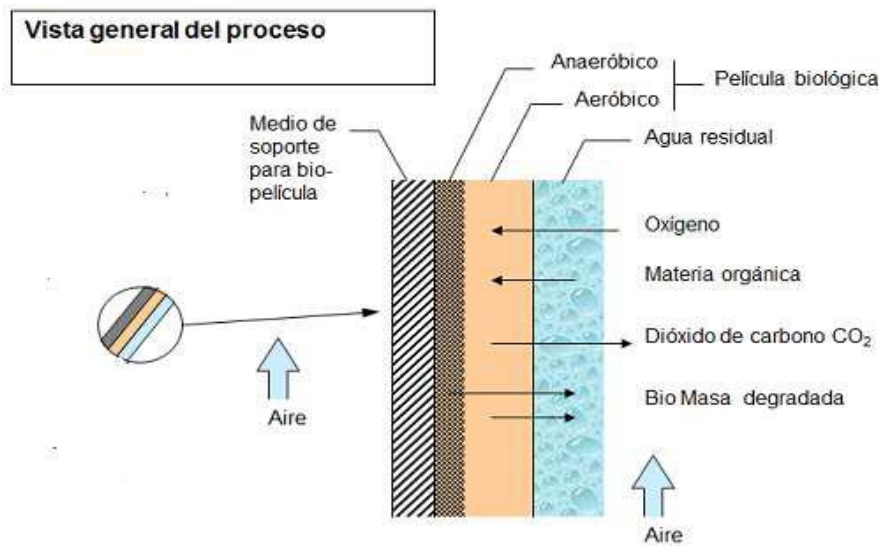


Figura 2: de la Esquema biopelícula en la superficie fija en un filtro biológico



Los microorganismos generalmente construyen y viven en conglomerados o comunidades celulares conocidas como biopelículas.

La estructura química y la fisiología de las biopelículas varían de acuerdo con la naturaleza de las especies que la conforman y del medio ambiente donde se encuentra. Sin embargo los organismos que la conforman deben competir por el espacio y los nutrientes dentro de la biopelícula.

Una biopelícula está formada por pequeños conglomerados celulares sumergidos en una red de polímeros producidos por las mismas células. En la biopelícula las variables relevantes de la remoción de carga orgánica se pueden obtener analizando la difusión molecular del sustrato dentro de la biopelícula, la carga orgánica, que es digerida en la biopelícula está en relación directa con el coeficiente de difusión efectiva (que incluye la transferencia por difusión molecular y convectiva). (Lara & Mazzoco, 2008)

El comportamiento de los perfiles de oxígeno y sustratos dentro de la biopelícula determina la existencia de varias capas con ambientes distintos, en las que se producen por ende distintos tipos de reacciones. (Tejero & Esteban, 2012)

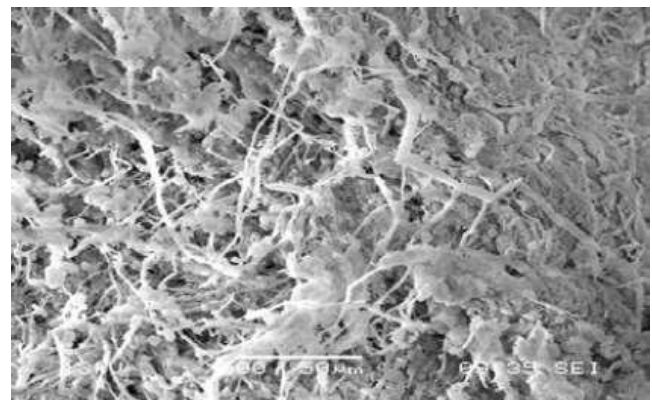


Figura 3: Fotografía de una biopelícula, obtenida mediante microscopía electrónica de barrido. Aumento 500x. (González & López, 2008)

El modelo matemático para el diseño de filtros percoladores dado por Eckenfelder (1963), es una ecuación empírica:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-c S t} \quad (1.1)$$

Dónde: S_e = concentración de sustrato soluble del efluente, mg/L.
 S_a = concentración de sustrato soluble del afluente, mg/L.
 c = constante de remoción, m/d
 S = área superficial específica del medio, m^2/m^3
 t = tiempo de contacto, d

Eckenfelder toma el tiempo de contacto, o tiempo de retención en el filtro biológico, igual que Velz, Shulse, Howland, Sinkoff y otros así:

$$t = \frac{C Z}{q^n} \quad (1.2)$$

Donde: Z = profundidad del filtro, m
 q = carga hidráulica superficial, m/d
 C y n = constante que caracteriza el medio filtrante y cuyos dependen de las unidades utilizadas para cuantificar tiempo.

Reemplazando la ecuación (1.2 en la 1.1) resulta:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-K Z / q^n} \quad (1.3)$$

Donde: S_e = concentración de sustrato soluble del efluente, mg/L.

S_a = concentración de sustrato soluble del afluente, mg/L.
 K = constante cinética de remoción, m^n/d^n ; este parámetro considera el área superficial específica del medio filtrante (m^2/m^3).
 Z = Profundidad del medio filtrante (m)
 q = carga superficial ($m^3/m^2 \cdot día$)

El procedimiento de los cálculos realizados para la determinación de los coeficientes cinéticos del estudio, considera los siguientes pasos:

- Se elabora el cuadro de sustrato remanente ($S_a/S_e \cdot 100$).
- Calcular los valores de $\ln(S_a/S_e \cdot 100)$ para cada profundidad (Z); este cálculo se hace para cada muestreo.
- Se grafica en el eje de abscisa la profundidad (Z) expresado en m, y en el eje ordenada $\ln(S_a/S_e \cdot 100)$. En esta grafica se obtiene las curvas respectivas para cada muestreo, y se determina

las pendientes respectivas; el pendiente: $m = (-K S Z / q^n)$

- Se calcula $\ln(m)$ y también $\ln(q)$, siendo (q) la carga superficial.
- Se grafica $\ln(m)$ versus $\ln(q)$, cuya pendiente es igual a la pendiente (n) de la ecuación de Eckenfelder; y también en este gráfico, para $q = 1.00$, se puede obtener en el gráfico el valor de K .

Resultados

Los análisis físicos químicos realizados para fines del estudio se realizaron con muestras de tipo compuesto, así también la cantidad de muestras fue determinada según la metodología que propone Standard Methods, en la cual se utilizan curvas de confianza establecidas. A continuación, se muestran los cuadros y gráficos de los resultados obtenidos en el laboratorio; las muestras fueron tomadas en la entrada y salida de los filtros percoladores.

Los resultados principalmente de la demanda bioquímica de oxígeno que expresa el sustrato en la muestra, en las unidades de entrada a la planta y en el sedimentador primario fue con una desviación estándar mayores que los de las salidas de los filtros percoladores; esto indica que los filtros percoladores no son sensibles a los cambios en la carga orgánica e hidráulica que puede tener en operación, es decir su sensibilidad es alta.

Los resultados del efluente del filtro percolador III, si cumple con los límites máximos permisibles dados por el Acuerdo Gobernativo 236 – 2006.

En la tabla 1, se pueden observar las características de las aguas residuales de entrada a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, de los parámetros más representativos como DBO_5 , DQO , Sólidos Sedimentables y Suspendidos, Temperatura y Potencial de Hidrogeno. Así como en la figura 5 se presenta la correlación de los coeficientes cinéticos K y n , con una ecuación de correlación de $y = 0.6731x - 3.5266$, con un

$$R^2 = 0.9846.$$

Con el modelo matemático, dado por Eckenfelder y con los coeficientes calculados, se realizaron los cálculos de sustrato remanente en función a la profundidad del filtro para cada tasa de filtración que se utilizó en el estudio. Obteniendo resultados consistentes para el diseño de filtros percoladores con medio filtrante de piedra

volcánica. Los resultados se pueden apreciar gráficamente en la figura 4.

Para finalizar se recopilan las diferentes ecuaciones y sus autores en la tabla 2.

Figura 4: Sustrato remanente calculado, utilizando los coeficientes determinados con el modelo de Eckenfelder

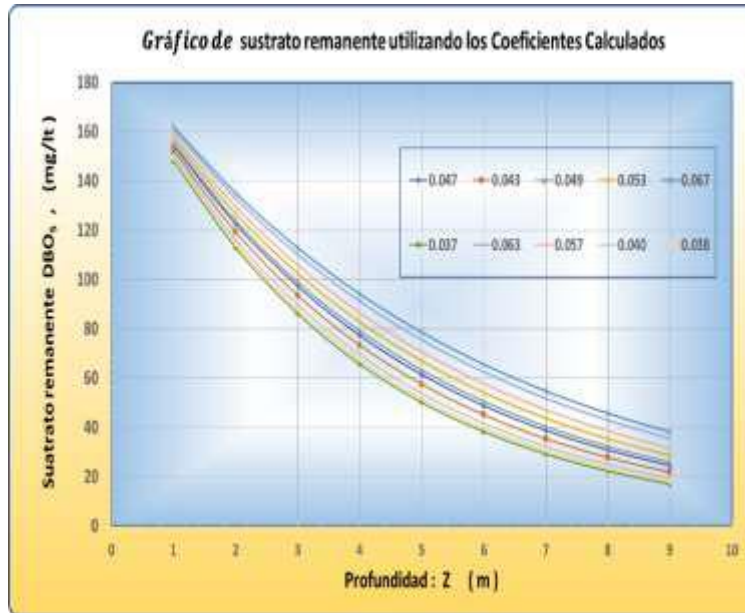


Tabla 1: Características del agua residual que ingresa a la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

Número de muestreo	Fecha de muestreo	Caudal de entrada (l/s)	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	Solidos sedimentables (cm ³ /l)	Solidos suspendidos (mg/l)	Temperatura (°C)	pH
1	12-10-2017	4.43	765.0	361.0	3.0	147.0	25.1	7.0
2	02-11-2017	4.08	535.0	343.0	3.4	265.0	24.2	7.9
3	21-02-2018	4.60	743.0	448.0	3.6	197.3	24.8	8.4
4	28-02-2018	4.97	692.0	335.0	3.4	198.7	25.1	8.4
5	07-03-2018	6.33	589.0	306.0	3.1	200.0	25.2	8.4
6	14-03-2018	3.48	837.0	472.0	3.5	116.0	24.4	8.3
7	11-04-2018	5.94	812.0	372.0	3.4	148.0	25.8	8.4

Número de muestreo	Fecha de muestreo	Caudal de entrada (l/s)	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	Sólidos sedimentables (cm ³ /l)	Sólidos suspendidos (mg/l)	Temperatura (°C)	pH
8	12-04-2018	5.38	612.0	318.0	3.2	168.0	25.6	8.6
9	18-04-2018	3.77	591.0	312.0	3.0	185.3	25.1	8.3
10	20-04-2018	3.60	622.0	347.0	3.5	153.3	24.8	8.4
	Mínimo	3.5	535.0	306.0	3.0	116.0	24.2	7.0
	Máximo	6.3	837.0	472.0	3.6	265.0	25.8	8.6
	Promedio	4.66	679.80	361.40	3.31	177.87	25.01	8.21
	Desviación estándar	0.99	104.68	56.25	0.22	41.26	0.49	0.47

Tabla 2: Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC.

Número de muestreo	Fecha de muestreo	Demanda bioquímica de oxígeno: DBO ₅ (mg/l)					
		Canal de entrada	Salida del sedimentador primario	Salida del filtro percolador 1	Salida del filtro percolador 2	Salida del filtro percolador 3	Salida de sedimentador secundario
1	12-10-2017	361	212	72	30	18	-
2	02-11-2017	343	182	60	32	19	-
3	21-02-2018	448	236	83	31	20	-
4	28-02-2018	335	184	61	35	22	-
5	07-03-2018	306	172	69	28	17	-
6	14-03-2018	472	203	83	30	18	-
7	11-04-2018	372	208	82	28	21	-
8	12-04-2018	318	186	68	28	23	-
9	18-04-2018	312	174	47	28	23	-

Número de muestreo	Fecha de muestreo	Demanda bioquímica de oxígeno: DBO5 (mg/l)					
		Canal de entrada	Salida del sedimentador primario	Salida del filtro percolador 1	Salida del filtro percolador 2	Salida del filtro percolador 3	Salida de sedimentador secundario
10	20-04-2018	347	186	50	28	19	-
	Mínimo	306	172	46.8	27.5	17.3	-
	Máximo	472.0	236.0	83.4	34.9	23.0	-
	Promedio	361	194	67	29	20	-
	Desviación estándar	56.25	20.00	13.11	2.50	2.16	-

Figura 5: Logaritmo natural de pendiente (m) igual a $\ln(k/q^n)$ vs $\ln(q)$, para determinación de K y n.

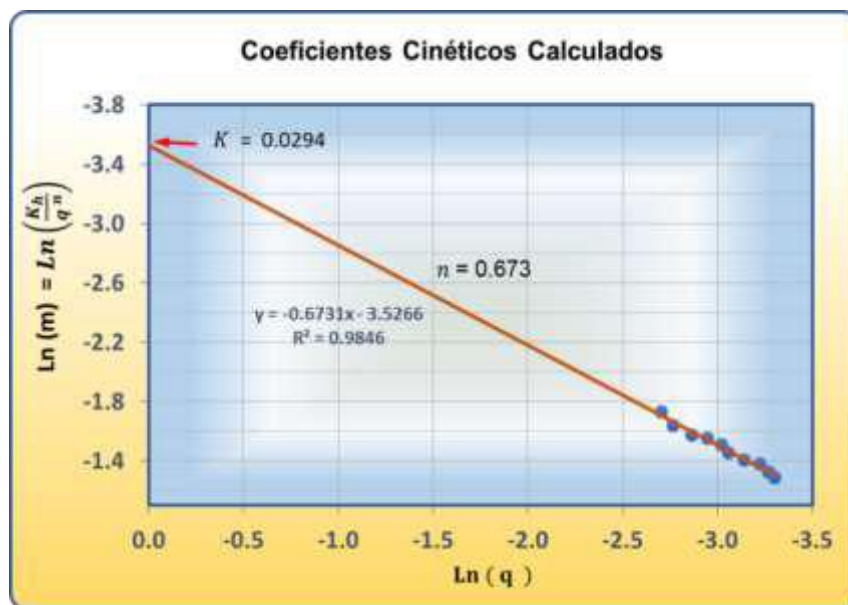


Tabla 3: Coeficientes cinéticos determinados con el modelo de Eckenfelder para agua residual doméstica

Nº	Coeficiente cinéticos determinados con el modelo de Eckenfelder: $Se = Sa * e^{\left(\frac{-k*Z}{q^n}\right)}$					
	$k = \frac{m^n}{días^n}$	n (*)	Temp. (°C)	Referencia	Autor	Año
1	$k = \frac{0.080 * m^{0.5}}{días^{0.5}}$	0.50	28	Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales	Carlos Menéndez Gutierrez	2007
2	$k = \frac{0.003 * m^{0.574}}{días^{0.574}}$	0.574	26	Evaluación de los parámetros y constantes cinéticas de un modelo experimental para el tratamiento de aguas residuales domésticas	Gonzalo Efraín Alulima Granda	2017
3	$k = \frac{0.062 * m^{0.45}}{días^{0.45}}$	0.45	23	Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño.	Jairo alberto Romero Rojas	2010
4	$k = \frac{0.08 * m^{0.55}}{días^{0.55}}$	0.55	26	Bioingeniería de aguas residuales	Alvaro Orozco Jaramillo	2014
5	$k = \frac{0.0294 * m^{0.673}}{días^{0.673}}$	0.673	25	Estudio de coeficientes cinéticos de filtros percoladores por etapas, con medio filtrante de piedra volcánica	Zenobio Huamaní Galindo	2018
(*) Adimensional						

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos por medio de los coeficientes cinéticos (K= 0.0294 y n= 0.673) calculados con el modelo de Eckenfelder, presentan una buena aproximación (con un coeficiente de correlación R²= 0.9846) para su utilización en el dimensionamiento de filtros percoladores por medios filtrantes de piedra volcánica.

Además estos resultados evidencian que se pueden obtener proyecciones confiables del sustrato resultante, por lo que pueden ser utilizados con confiabilidad.

En el análisis realizado de las características del agua residual cruda, se determinó un Índice de

Biodegradabilidad (IB) de 0.53, lo que determina que el agua residual que ingresa al sistema de tratamiento se considera como muy biodegradable, por lo que la utilización de procesos biológicos, como es el caso de los filtros percoladores como tratamiento secundario es la opción más apropiada.

Con respecto a la materia orgánica representada por la DBO₅ el valor promedio en la salida del filtro percolador en la tercera etapa (filtro III) fue de 20 mg/L, con un valor máximo de 23.0 mg/L, mínimo de 17.3 mg/L y una desviación estándar de 2.16 mg/L; lo que resulta en una remoción promedio total de 94.5%. Para el caso de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el valor promedio fue de 44.2 mg/L, valor

máximo de 51 mg/L, valor mínimo de 35 mg/L y una desviación estándar de 5.05 mg/L, lo que representa un % de remoción promedio de 93.5 %.

Como variables importantes de la investigación se determinaron la *carga orgánica*, que es la relación del flujo másico de materia orgánica por la unidad de volumen del filtro, dando un valor promedio de 0.17 kg/m³.día, lo cual lo podríamos clasificar como un filtro percolador de baja carga; así mismo la *carga hidráulica*, que es equivalente a la velocidad superficial que tiene el agua residual al pasar por el área plana del corte transversal del filtro percolador; lo cual dio un valor promedio de 4.27 m³/m².día, equivalente a un filtro percolador de carga intermedia.

Conclusiones

El caudal promedio durante el estudio de noviembre de 2017 a marzo del 2018 fue de 4.66 l/s; con carga orgánica de 361.40 mg/L de DBO₅ y el efluente que sale del filtro percolador III es de 20 mg/L de DBO₅, lográndose una eficiencia de 89.69 % de remoción solo en los filtros percoladores.

Los datos determinados en el laboratorio de los parámetros relacionados a la remoción de la materia orgánica, se utilizaron para la determinación de los coeficientes cinéticos del filtro percolador con medio filtrante de piedra volcánica, utilizando el modelo matemático de Eckenfelder. La ecuación de Eckenfelder con los coeficientes determinados (1.4) quedo de la siguiente forma:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-0.0294 * Z / q^{0.673}} \quad (1.4)$$

Donde: S_e = concentración de sustrato soluble del efluente, mg/L.
 S_a = concentración de sustrato soluble del afluente, mg/L.
 K = constante cinético de remoción, (mⁿ/dⁿ); este parámetro considera el área superficial específica del medio filtrantes (m²/m³).
 Z = Profundidad del medio filtrante (m)
 q = carga superficial (m³/m²*día)

Calculada con el modelo matemático de Eckenfelder con los coeficientes determinados, se realiza la prueba utilizando las mismas cargas orgánica e hidráulica del estudio; y estos resultados fueros muy similares a los valores obtenidos en el laboratorio. Se

puede resaltar que el filtro tiene 3 capas de medio filtrante de 0.50 m de capa superior de tipo “A” que sirve como distribuidor del flujo, luego la capa intermedia de Tipo “B” y luego otra capa de soporte de tipo “A” de 1.00 m; así mismo durante el estudio la temperatura promedio fue de 25 °C.

Agradecimientos

A la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) y al Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Doctora Alba Estela Tabarini Molina” de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos ERIS”, que hicieron posible la elaboración de esta investigación.

Información del autor

Zenobio Huamaní Galindo, Ingeniero Químico e Ingeniero Civil. Se desarrolla como: consultor independiente en Ayacucho – Perú; MSc. Ingeniería Sanitaria; en el año 2018, en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, ERIS. USAC, GUATEMALA.

Referencias

Cruz, H. (1990). Evaluación de los filtros percoladores para tratamiento de aguas negras. Guatemala: USAC.

Huamaní Galindo, Z. (2018). Estudio de coeficientes cinéticos de filtros percoladores por etapas, con medio filtrante de piedra volcánica. ERIS Guatemala.

Lara, S., & Mazzoco, R. (2008). Efecto de la carga hidráulica y orgánica sobre la remoción másica de un empaque estructurado en un filtro percolador. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 9.

Metcalf, & Eddy. (1997). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización; Tomo 1. Mexico: McGraw - Hill / Interamericana Editores.

Oakley, S. (2011). Tratamiento de aguas residuales domesticas en Centroamérica. Un manual de Experiencias, Diseño, Operación y Sostenibilidad. EUA: USAID.

Romero, J. A. (2010). Tratamiento de aguas residuales, Teoría y principios de diseño. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Tejero, J. I., & Esteban, A. L. (2012). Tecnologías de biopelícula innovadoras para la depuración de aguas residuales. Veinticinco años de

investigación del grupo de Ingeniería Ambiental
de la Universidad de Cantabria.