

# Análisis comparativo de modelos cinéticos para filtro biológico sin recirculación con medio de soporte en *Luffa Cylindrica* para el tratamiento de aguas residuales combinadas \*

Comparative analysis of kinetic models for a biological filter without recirculation with support means in *Luffa Cylindrica* for treating (domestic and livestock) combined wastewater \*.

Las programadoras de televisão e la exposição al riesgo locativo en grabaciones exteriores \*

Sindy Yohana Castillo Ruiz \*\*  
Diana Carolina Rubiano Castro \*\*\*  
Juan Pablo Rodríguez Miranda \*\*\*\*

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Fecha de recepción del artículo: 4 de julio de 2016

Fecha de aceptación del artículo: 1 de Diciembre de 2016

DOI: <http://dx.doi.org/10.22335/rlct.v7i3.398>

\*Artículo de investigación resultado de un proyecto de investigación Potabilización del agua, Desarrollado en el grupo de investigación: AQUAFORMAT, Financiado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.

\*\* Ingeniera ambiental, Tecnóloga en Saneamiento Ambiental. Filiación: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: [Castillosindy80@gmail.com](mailto:Castillosindy80@gmail.com) Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6523-2935>

\*\*\* Tecnóloga en Saneamiento Ambiental. Filiación: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Correo electrónico: [Diana.rubiano@atento.com](mailto:Diana.rubiano@atento.com) Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6352-4977>

\*\*\*\* Doctor en Ingeniería, Ingeniero Sanitario y Ambiental. Magister en Ingeniería Ambiental, Magister en Gestión y Evaluación Ambiental. Filiación: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: [jprodriguez@udistrital.edu.co](mailto:jprodriguez@udistrital.edu.co). Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3761-8221>

## Resumen

El presente artículo considera un análisis de los diferentes modelos cinéticos para la estabilización de la materia orgánica en un filtro biológico con lecho en *Luffa cylindrica*, en donde el modelo que más influyó en la cinética con el modelo matemático expuesto por Velz estableció un promedio la constante cinética de 0,116 (d-1). En cuanto a la remoción de la materia orgánica, se obtuvieron resultados de eficiencia en donde se alcanzaron valores entre 85%, 76%, 55%.

**Palabras clave:** Filtro biológico, DQO, agua residual, Luffa cilíndrica, eficiencia.

### Abstract

This paper considers an analysis of the different kinetic models for the stabilization of organic matter in a biological filter bed in Luffa cylindrica, where the model that influenced the kinetics with the mathematical model presented by Velz established an average constant kinetics 0.116 (d-1). As for the removal of organic matter, which results in efficiency values from 85%, 76%, 55% were achieved they were obtained.

**Keywords:** biofilter, COD, wastewater, Luffa cylindrica, efficiency.

### Resumo

Este artigo considera uma análise dos diferentes modelos cinéticos para a estabilização da matéria orgânica em um leito de filtro biológico em Luffa cylindrica, onde o modelo que influenciou a cinética com o modelo matemático apresentado por Velz estabeleceu uma cinética constante média 0.116 (d-1). Quanto à remoção de matéria orgânica, que resulta em valores de eficiência de 85%, 76%, 55% foram alcançados, eles foram obtidos.

**Palavras-chave:** biofiltro, DQO, águas residuais, Luffa cilíndrica, eficiência.

### Introducción

Las primeras preocupaciones por la contaminación de las aguas, surgieron en la revolución industrial, este hecho tan importante en nuestra historia dejó ciertos impactos negativos en el tema ambiental, dado que se estimuló el crecimiento de las ciudades y a su vez la inequívoca costumbre de arrojar el agua residual a los ríos cercanos, convirtiéndolos en pozos negros, y en aquel entonces el agua potable se tomaba de los mismos ríos ya contaminados, por ende surgieron epidemias como infecciones gastrointestinales, fiebre tifoidea, cólera, entre otros, difíciles de controlar; de ahí la importancia de realizar un correcto tratamiento al agua residual

de acuerdo con sus características químicas y biológicas antes de ser vertida.

En los municipios de Colombia alrededor del 30% cuentan con tratamiento de aguas residuales y en promedio solo se tratan el 29% del volumen de aguas vertidas. La contaminación del río Bogotá por los vertimientos de aguas residuales de los municipios ha sido un problema a resolver; aunque se han desarrollado diversas alternativas de saneamiento que han implicado grandes inversiones con resultados poco visibles, y la contaminación por carga orgánica, el Distrito Capital aportó, en el 2002, 158.000 Ton/año, equivalentes al 84% del total en la Cuenca en su gran mayoría por el vertimiento de aguas residuales y de las curtiembres según Conpes 3320, 2004 (Daza, 2009).

Los indicadores de la calidad del agua del río muestran que éste se encuentra en buen estado en su nacimiento, con un valor de DBO5 inferior a 2mg/L, oxígeno disuelto superior a 6mg/L y una carga orgánica de apenas 0.1 toneladas de oxígeno disuelto por día (Daza, 2009), pero que a medida que aparecen los asentamientos humanos y las actividades productivas se va degradando, razón por la cual se han utilizado diversos sistemas convencionales de depuración de aguas, y en el afán de tener alternativas de depuración que sean efectivas en la remoción de contaminantes, se ha considerado el estudio de los humedales, filtros biológicos, los lodos activados y los estanques de oxidación; los cuales han sido utilizados por la humanidad debido a sus propiedades, para el tratamiento de aguas residuales.

En la búsqueda de soluciones a este conflicto, se construyó y operó la Planta Piloto de Agua Residual de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con la cual se está evaluando el mejor método para el tratamiento del agua residual de la quebrada Mi Padre Jesús, entre humedales, reactores biológicos y filtros percoladores o biológicos; siendo estos últimos el sistema convencional a utilizar, dado que reúne las características para la obtención del resultado:

Sistemas convencionales de depuración de aguas de libre elección del medio filtrante (material como

medio de soporte la fibra natural Luffa Cilíndrica) Alta demanda de luz solar, ventilación natural, remociones de DQO entre 80% y 90%, no es necesaria la recirculación de lodos.

Eliminación de depósitos del fondo por medio del filtro. Para llevar a cabo el estudio se realizó la operación y evaluación del filtro, el cual dispuso como material filtrante la Luffa cilíndrica de origen natural. El experimento estableció la implementación de esta opción como material alternativo, (considerado para uso de belleza y medicinal, nunca como medio filtrante).

El filtro se ubicó en un cuerpo natural contaminado por aguas residuales combinadas correspondientes a la quebrada (río pequeño) "mi Padre Jesús", cuerpo de agua en estudio en la ciudad de Bogotá, y con varias fincas aledañas, lo que permite contaminación y problemas de salud pública como: malos olores, propagación de plagas y vectores (ratas, zancudos, moscas, mosquitos, entre otros), persistentes en la zona afectando la población universitaria, incluyendo malestar en zonas de la universidad como lo es la cafetería puesto que en repetidas ocasiones se han encontrado algunos de estos problemas al interior de ella. Los resultados obtenidos reportan la oportunidad que se tiene de implementar este sistema como opción para el tratamiento de agua; no solo de pequeñas fuentes sino a gran escala.

Durante el proceso de experimentación se dimensionó y construyó un filtro biológico sin recirculación con un medio de soporte Luffa Cilíndrica.

El sistema se alimenta de agua residual combinada (doméstica y pecuaria) de la Quebrada Mi Padre Jesús que recibe los vertimientos de actividades agrícolas, domésticas y porcícola a diario en grandes cantidades (Figura 1), la cual es transportada en tubería de 2 pulgadas a un tanque de 500 L el cual tiene la función de homogenizar caudales y cargas de contaminantes; se distribuye mediante una tubería de 1/2 pulgada en PVC, el agua residual cruda llega al FP (Figura 1), y allí se hace la medición de caudal de entrada y de parámetros in situ. En el FP, se instaló 141 rodajas de L. cilíndrica con 3cm de grosor por rodaja y un área superficial total de 141,1 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, usado como medio de soporte en la filtración.

El Filtro biológico, fue un reactor en policloruro de vinilo (PVC) de 1,80 mts de largo con un diámetro de 6 pulgadas, en donde se incorporaron las rodajas de Luffa cilíndrica; este reactor cuenta con una ventana en acrílico por donde se puede observar el proceso del sistema y adicionalmente tener control del sistema con respecto a la saturación y limpieza (Latini, 2011). (figura 1).

**Materiales y métodos**

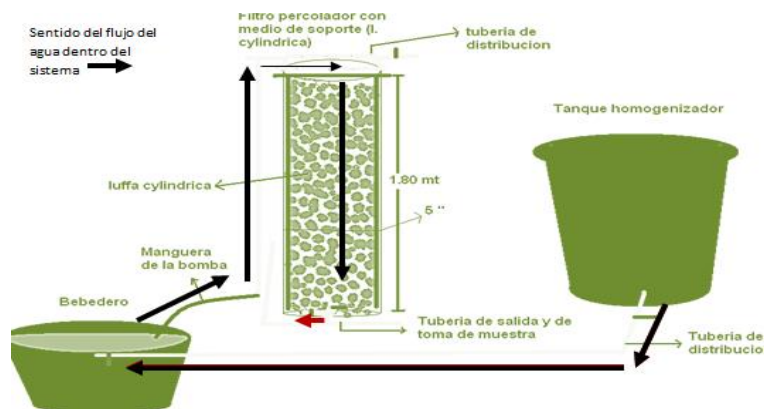


Figura 1. Montaje del filtro Biológico o Percolador.

Contó con una base en metal en donde se acopla el tubo de policloruro de vinilo. Además, con tubería

de distribución en la parte superior por donde ingresa el agua de manera intermitente. Después de

atravesar el filtro, el agua se encuentra con una tubería final, que cuenta con dos salidas: agua después del tratamiento la cual regresa nuevamente a la quebrada y por la otra se emplea para la toma de muestras. El agua residual tratada en el sistema fue descargada en la parte intermedia de la Quebrada (Riachuelo) lugar donde se encontraba ubicado el sistema.

**Parámetros de calidad del agua**

Las tomas de muestras in situ, tales como: pH, conductividad, OD, temperatura y SDT fue realizadas con una frecuencia diaria durante las 20 semanas de operación del sistema (4 enero – 21 de mayo de 2010). (Tabla 1)

Tabla 1. Parámetros Evaluados.

Parámetros	Unidad	Método
Temperatura.	°C	Electrodo.
Oxígeno disuelto	mg/L	Oxímetro con electrodo selectivo de membrana.
Sólidos disueltos totales	mg/L	Electrodo específico en estado solido
Conductividad	µS/cm	Conductímetro con electrodo específico o selectivo en estado sólido.
pH	Unidad es	Potenciómetro con electrodo combinado de vidrio.
Caudal	L/S	Calibración. Volumétrico
DQO	mg/L	Titulométrico de reflujo cerrado

Fuente: Autores

El muestreo consistió en la toma de muestras simples a la entrada y salida del sistema utilizando recipientes de plástico de 250 ml, los datos se tomaban al instante dentro de la planta piloto con la ayuda de los equipos multiparámetros lo que permitió recoger información primaria para desarrollar el estudio de los datos recolectados y tener un seguimiento del comportamiento del FP. El

parámetro de DQO se evaluó tres veces por semana con toma de muestras puntuales.

Filtro Biológico en planta piloto.

Teniendo en cuenta el sistema de filtración se reporta en la tabla 6 la comparación de las características de un filtro de tasa intermedia informada en la tabla 1 y el filtro en estudio, siendo estos aspectos los que llevaron a escogerlo: no es necesario la recirculación, la profundidad del filtro es de 1.8 m., el desprendimiento del agua se realizó de manera intermitente (goteo), la carga hidráulica corresponde dentro de las características, para el estudio es de 7.28 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>-dia).

La carga orgánica corresponde a 1,24 kg  $\frac{dia}{m^3}$  de la DQO para este estudio, aparentemente es mayor al referencial que varía entre 0.2 - 0.5 kg. dia/m<sup>3</sup> de la DBO<sub>5</sub> (tabla 2); sin embargo en diferentes tipos de aguas residuales es posible establecer una relación en donde los valores de la DQO suelen ser mayores con respecto a la DBO<sub>5</sub> (doble), dado que la carga volumétrica es superior en el filtro por la existencia de carga orgánica alta debido a las descargas generadas en el cuerpo de agua receptor, el cual es significativo para el sistema biológico adherido en el medio filtrante para la remoción de la materia orgánica; las aguas residuales no tratadas generalmente presentan un alto contenido de materia orgánica, además de compuestos inorgánicos oxidables.

Estos compuestos orgánicos e inorgánicos consumen directa o indirectamente el oxígeno disponible presente. Se define la DBO<sub>5</sub> como el monto de oxígeno consumido por microorganismos para oxidar biológicamente la materia orgánica y la DQO es el monto de oxígeno requerido para la oxidación química de los constituyentes orgánicos e inorgánicos de un agua.

Dado que la acción del oxidante afecta a toda la materia oxidable, el valor de la DQO es mayor que el de la DBO<sub>5</sub>; los compuestos se oxidan en mayor proporción por vía química que por vía biológica, por tanto el valor reportado estaría dentro del valor referencial. La eficiencia de remoción de DQO está entre 50-70 %. Con respecto a los aspectos citados, se nombra el paso a paso para la ejecución de las

ecuaciones de la carga orgánica e hidráulica, esta carga orgánica se determinó de la siguiente forma:

La carga orgánica

$$C.O = \frac{W}{V} \text{ Reemplazando, } C.O. = \frac{Q \times C}{V}, \quad (1)$$

Donde Q: Caudal del sistema (L/min), C: concentración DQO (mg/L) V: Volumen del empaquetado m<sup>3</sup>. La carga orgánica se determinó con el caudal que presentó la mayor participación en el sistema que fue 0.1 l/min y el volumen que ocupa la *Luffa cylindrica* en el filtro, de la siguiente manera: Para el día No 1 (6 enero) la carga orgánica es de 0.415 kg\*día/m<sup>3</sup>, este procedimiento se realizó a diario para los 60 días que se reporta el parámetro de DQO, el cual dio un promedio de 1,24 kg\*día/m<sup>3</sup>.

Con respecto a la carga hidráulica, afecta la remoción de contaminantes si es tan baja que no moja todo el lecho, es decir, si no se alcanza la tasa mínima de remojo, este estudio cumplió con lo establecido para esta carga hidráulica mejorando así el proceso de remoción de materia orgánica; para la carga hidráulica se usó la misma metodología de la carga orgánica en lo que respecta al caudal, de la siguiente forma:

$$C.H. = \frac{Q}{A}$$

$$C.H. = \frac{(0.144m^3.dia)}{0.019m^2} = C.H. = 7.60 m^3.dia/m^2. \quad (2)$$

Como se indicó, el caudal es el mismo en la carga orgánica e hidráulica teniendo en cuenta el área, se determinó la carga hidráulica, el cual al compararla con las especificaciones citadas en el RAS 2000 se acopla dentro de rango expuesto (Tabla 2).

Tabla 2. Características del filtro biológico

Características	Tasa Intermedia	Filtro
Medio Filtrante	Roca Escoria	Fibra Natural
Carga Hidráulica m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> -d)	3.7 – 9.4	7.28

Carga Orgánica kgDBO <sub>5</sub> (m <sup>3</sup> -d)	0.2 – 0.5	1,24
Profundidad. M	1.8 – 2.4	1.8
Tasa de Recirculación	0 – 1	0
%Eficiencia de Remoción de DBO <sub>5</sub>	50 – 70	50 – 70
Efluente	Parcialmente Nitrificado	No Aplica
Desprendimiento	Intermitente	Intermitente

Fuente: Ras 2000. Sección II, Título E, Autor 2011

### Resultados y discusión

El comportamiento con respecto a la eficiencia del filtro (Figura 2) fue bastante irregular, sin embargo el hecho de que los resultados no sean homogéneos no significa que no se haya generado remoción en el sistema, en la gráfica mencionada se aprecian más los puntos bajos en cuanto a la remoción, no obstante se aprecian puntos que sobrepasan el 50% de remoción específicamente el día 2 con 56%, día 11 con 79%, día 25 con 54%, día 29 con 56%, día 44 con 54%, día 45 con 68%, día 47 con 52%, día 50 con 51%, día 55 con 50%, con respecto a esto se observa picos de remoción muy altos; llegando al máximo de 85% el día 13 fue solo un día que alcanzo esta remoción sin embargo, el hecho de haber llegado a esta remoción así no sea constante demuestra que el filtro en operación constante, sin inconvenientes de operación e implementando un sistema de tratamiento primario completo se puede generar esta remoción no solo en un punto si no a lo largo del tratamiento; aparte, se debe tener en cuenta el origen del agua a tratar, dado que está bastante comprometida, se puede comprobar con la carga orgánica del agua residual cruda que aunque está dentro de lo establecido por el RAS es bastante alta (1,24 Kg/m<sup>3</sup> día) debido a esto es difícil generar una remoción sobre el 80% continuo, claro está, que para las características del sistema en estudio donde se demostró que se trata de un filtro de tasa intermedia expresa que la mayoría de sus datos de eficiencia se encuentran en un rango muy cercano al establecido por el RAS (50% – 70 %) dando un resultado para este estudio de 40% cercano a este valor teórico del RAS

específicamente los días 2 con 56%, día 9 con 44%, día 11 con 79%, día 13 con 85%, día 18 con 36%, día 25 con 54%, día 28 con 36%, día 29 con 56%, día 39 con 36%, día 40 con 31%, día 44 con 54%, día 45 con 68%, día 47 con 52%, día 50 con 51%, día 51

con 48%, día 52 con 39% día 55 con 50%, día 60 con 39%, estos datos son muy representativos aunque no es exactamente lo indicado en el RAS su valor es muy cercano, indicando una remoción aceptable.

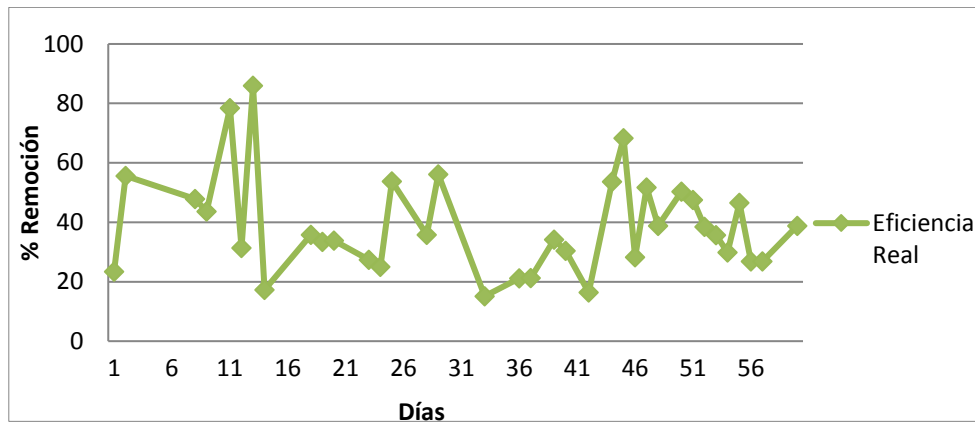


Figura 2. Eficiencia del sistema. Fuente: Autores

No obstante se reporta una muy ligera estabilización a partir del día 44 donde la dispersión aunque sigue estando presente no es tan significativa como los días anteriores, hay una reducción en el rango, donde ya no es tan brusco el cambio de los datos en estos últimos 20 días, se puede atribuir esta leve mejoría a la adaptación del

sistema al tratamiento dado al tiempo que llevaba el sistema en operación (5 meses) tiempo corto pero adecuado para que los microorganismos inicien a adaptarse a la materia orgánica (Metkall 1996).

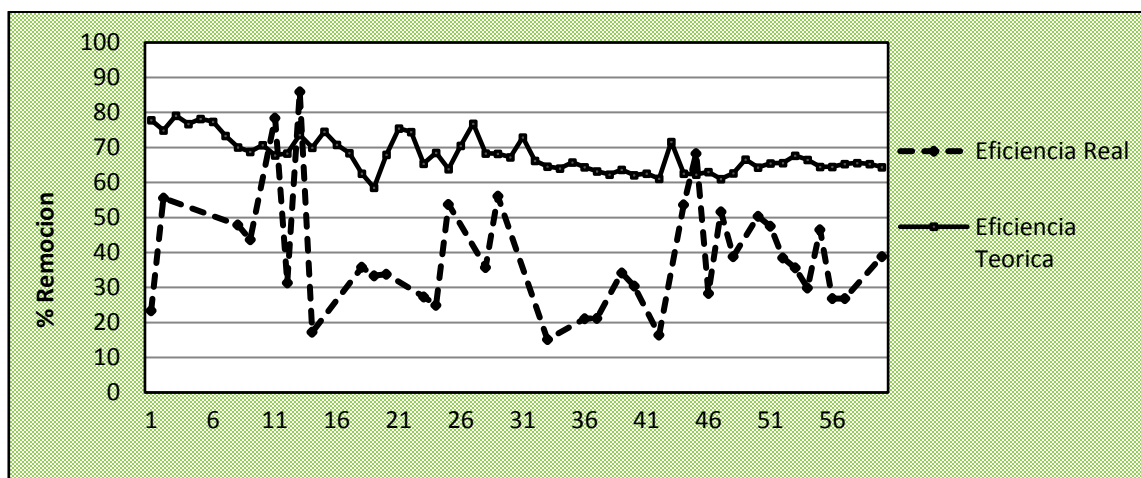


Figura 3. Eficiencia teórica y calculada del sistema. Fuente: Autores

Las eficiencias teóricas calculadas con el modelo de NRC y las eficiencias calculadas mostraron valores bastante diferentes lo que demostró un margen de error significativo para el proceso del filtro biológico del proyecto.

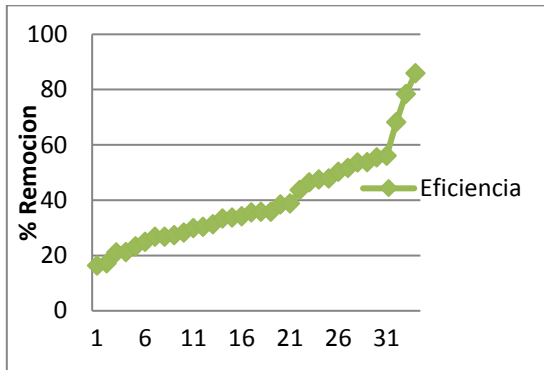


Figura 4. Eficiencia en orden ascendente

El filtro biológico manifestó una eficiencia lo suficientemente aceptable. Se aclara para tener en

cuenta que la operación se realizó durante 6 meses, pero el análisis de la DQO para hallar el porcentaje de remoción se realizó durante 10 días en cada mes, se observa con respecto a esto que los días 2, 11, 13, 25, 29, 47 y 50 de la figura 3, se presentaron eficiencias aceptables con resultados; 55.55%, 78.45%, 85.95%, 53.79%, 56.09% 68.29%, 51.68 y 50.33, pero en otros días fue mínima.

Estos datos ordenados se nombran con el fin de demostrar que el sistema si alcanzó remociones altas, se aclara que el comportamiento del filtro con los datos obtenidos y sin ordenar no es constante, sin embargo, el filtro pudo llegar en algunos momentos a una remoción aceptable es representativo porque aunque son pocos datos que alcanzan a superar el 50%, se generó remoción y es aceptable, se demuestra que el sistema con sus resultados ordenados tiende a la remoción de DQO (Figura 4); dando cumplimiento no parcial con lo mencionado en la normativa colombiana donde indica una remoción entre el 50% y 70%.

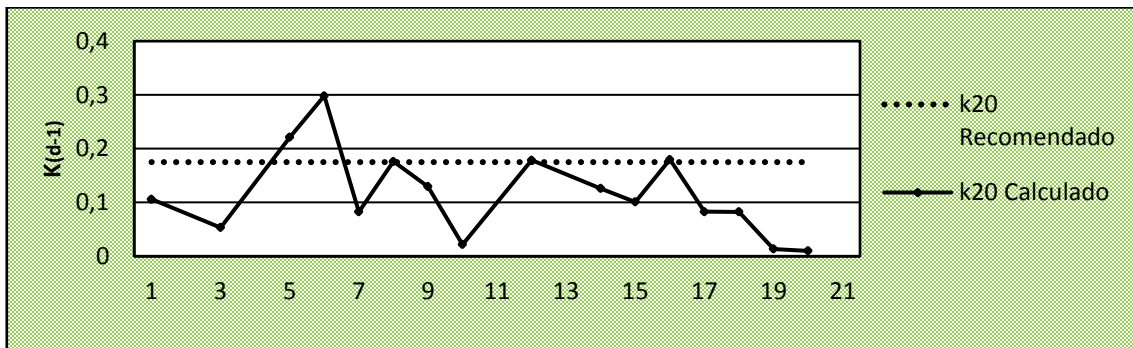


Figura 5. Modelo cinético de diseño de Velz. Fuente: Autores

Con respecto al modelo de diseño en este caso se usó el modelo de Velz (Díaz, 2003), dado que comparado con la ecuación dada por Eckenfelder, Germán y la Alemana se encontró una mayor acercamiento a la constante K teórica el cual es 0,175 (d-1) usando el modelo matemático expuesto por Velz estableció un promedio de 0,116 (d-1), esto indica que el filtro cumple con las condiciones dadas a los 20°C para el DQO, dado que si el k aumenta se considera una óptima remoción, teniendo en cuenta que Velz consideró remoción

de la materia orgánica por los microorganismos (Soares, & Czeresnia, 2011). Biology, subjectivity and alterity. [Biologia, subjetividade e alteridade] Interface: Communication, Health, Education, 15(36), 53-63; donde afirmó que la cantidad de estos es proporcional a la profundidad del lecho, por consiguiente en este aspecto se relaciona la DQO con la profundidad del filtro. Esto se puede comparar con el estudio realizado por Randall y col.

(1997) en donde usó un filtro con medio plástico de flujo vertical, con una altura de 6 m en donde la remoción fue de máximo 34% DQO y el modelo cinético de diseño que se usó fue el de Eckenfelder; se puede decir que la remoción en este estudio (filtro con medio de soporte en Luffa cilíndrica) alcanzó máximos de 86%, 71%, 66% etc. dado que se usó un filtro más bajo (1,80 mt) el cual afecta

favorablemente al tiempo de residencia hidráulica del agua en contacto con la biopelícula y así cumplir con las condiciones particulares del medio filtrante y de las aguas residuales que se deben tratar en el sistema prototipo que se trabajó.

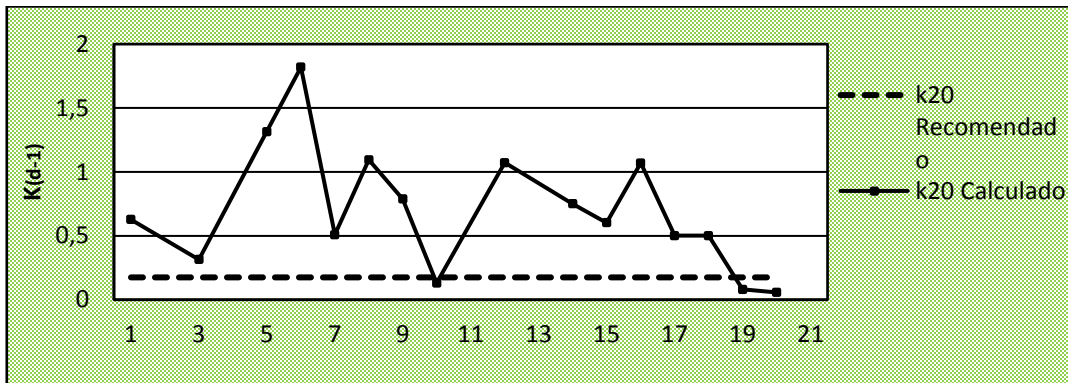


Figura 6. Modelo cinético de diseño de Germain. Fuente: Autores

Como se puede apreciar en las figuras 5 y 6 el modelo de diseño que más se acercó al K20 teórico de filtros de tasa baja es el de Velz, dado que la ecuación de Germaín arrojó como promedio para esta K20 0,702, y el dato teórico necesario para este estudio es de 0,175, con este método se excede a lo esperado, dado a que esta ecuación está dispuesta para filtros biológicos que utilizan como medio filtrante el plástico, no tiene en cuenta la profundidad del filtro y por qué no cumplió con lo establecido con r estadístico.

**Conclusiones**

El medio filtrante es una opción viable para ser utilizado en el tratamiento de aguas residuales, dado que se acerca a los valores que exige la normatividad y no cuenta con el sistema anterior de tratamiento (sedimentador) para finalizar correctamente el tratamiento. La implementación de estas fibras como medio filtrante en los sistemas de tratamiento de agua residual, no genera sobrecosto alguno, dado que este material en el mercado comercial es económico.

El medio de soporte de degradación fue constante, al incluir nuevo material al sistema se le incorpora también oxígeno, factor que favorece el crecimiento de la biopelícula adherida al sistema, generó grados favorables de remoción.

Las fibras naturales por su gran cantidad de orificios permitieron mejor circulación del agua dentro del sistema, reduce así riesgos de inundación. La remoción de carga contaminante obtenida en el desarrollo del estudio superó las expectativas, dado que el fin primario de la fibra no es remover materia orgánica, sino fines estéticos, medicinales, terapéuticos, entre otros; sin embargo se usó para el filtro siendo una fibra natural, en forma de enredadera implementándose como lecho innovador y sin antecedente alguno para este fin. El filtro fue conveniente para realizar un tratamiento primario dado que muestra resultados de eficiencia en donde se alcanzaron valores entre 85%, 76%, 55% de remoción, aunque no fueron constantes podrían llegar a serlo si la operación es continua y más extensa. Se logra cumplir con el diseño cinético del filtro indicado por Velz dado que se ajusta a las características mencionadas por este modelo entre



ellos, la temperatura, la remoción de la DQO y profundidad del filtro.

### Referencias Bibliográficas

Daza Velázquez, L. (2009). *Diseño, construcción y operación a escala de un filtro percolador sin recirculación a partir de residuos sólidos heterogéneos como medio de soporte*. Bogotá: Universidad Manuela Beltrán.

Díaz Marrero, M. (2003). Filtros biológicos sumergidos y aireados. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 14(1), 23

Latini, R. (2011). Comment: Research & development - from the clinical chemistry laboratory to the molecular biology laboratory. *Ricerca e Pratica*, 27(6), 226-227. Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com)

Metcalf & Eddy, Inc. (1996). Ingeniería de aguas residuales. *Tratamiento, vertido y reutilización*. 3(2). 125-131.

Randall A. A, Sullivan J.M., Dietz J., Randall, C.W. (1997). Pretratamiento Industrial: el rendimiento del filtro percolador y el diseño. *Diario de Ingeniería Ambiental* 123, 1072-1079

Soares, T. C., & Czeresnia, D. (2011). Biology, subjectivity and alterity. [Biologia, subjetividade e alteridade] *Interface: Communication, Health, Education*, 15(36), 53-63