

# DISEÑO DE UN MODELO EXPERIMENTAL DE FILTRO PERCOLADOR UTILIZANDO ESTOPA DE COCO COMO MEDIO FILTRANTE, PARA LA REDUCCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO TOTAL DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PROCEDENTES DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO AURORA II “ING. ARTURO PAZOS SOSA”

Juan Carlos Hernández Canales<sup>1</sup>  
Guatemala

## RESUMEN

Se realizó el diseño hidráulico de un modelo experimental de filtro percolador utilizando estopa de coco como medio filtrante. Se obtuvieron las siguientes características fisicoquímicas de la estopa de coco: absorción 164,42%, densidad 0,22 g/cm<sup>3</sup>, área superficial específica 50 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, humedad 11,87%, materia seca total 88,13%, extracto etéreo 0,33%, fibra cruda 45,83%, proteína cruda 2,15%, ceniza 5,63%, extracto libre de nitrógeno 46,06% y potencial de hidrógeno 5,01 unidades. Se utilizaron las ecuaciones de Eckenfelder y Bruce & Merkens para el cálculo de los parámetros de diseño los cuales fueron: caudal 1,21 m<sup>3</sup>/d, tiempo de retención 45 s, velocidad de filtración 4,59 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, carga hidráulica vertical 2,29 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>d, carga hidráulica superficial 0,046 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, carga contaminante 0,2178 kg DBO<sub>5</sub>/d, carga orgánica vertical 0,4122 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>d y carga orgánica superficial 0,0082 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>d. La evaluación del modelo experimental respecto a Nitrógeno y Fósforo total fue: 41 mg/l en la entrada y 27 mg/l en la salida, con 33% de eficiencia en Nitrógeno total, 11,0 mg/l en la entrada y 13,1 mg/l en la salida, con una eficiencia negativa de 24% en Fósforo total (-24%).

## PALABRAS CLAVE

Diseño, construcción, evaluación, nitrógeno total, fósforo total, estopa de coco, caracterización fisicoquímica, eficiencia.

**ABSTRACT.** The hydraulic design of an experimental model of trickling filter was made using coir pith as filtering medium. The following physico-chemical characteristics of Coir were found: absorption 164.42%, density 0.22 g/cm<sup>3</sup>, specific surface area 50 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, moisture 11.87%, total dry matter 88.13%, ether extract 0.33%, crude fiber 45.83%, crude protein 2.15%, ash 5.63%, nitrogen free extract 46.06% and potential hydrogen units of 5.01. For calculated the design parameters were used Eckenfelder and Bruce & Merkens' equations, the result of this were: flow 1.21 m<sup>3</sup>/d, retention time 45 s, filtration rate 4.59 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, vertical hydraulic load 2.29 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>d, hydraulic surface 0.046 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, pollutant load 0.2178 kg BOD<sub>5</sub>/d, vertical organic load 0.4122 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>d and organic surface load 0.0082 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>d. The evaluation of the experimental model regarding nitrogen and total phosphorus was 41 mg/l at the entrance to 27 mg/l at output, with 33% efficiency in total Nitrogen, 11.0 mg/l at the entrance to 13.1 mg/l in the output, with an efficiency of 24% negative total Phosphorus (-24%).

**Keywords:** Design, construction, evaluation, total nitrogen, total phosphorus, coir pith, physicochemical characterization, efficiency.

## INTRODUCCIÓN

El diseño hidráulico del modelo experimental de filtro percolador se realizó con base a las ecuaciones de Eckenfelder y Bruce & Merkens. Dichas ecuaciones se aplican para el diseño hidráulico y biológico de filtros percoladores que utilicen cualquier tipo de medios filtrante de origen orgánico como la estopa de coco. Para dicho diseño se utilizó estopa de coco con un mes de secado, la cual fue comparada con una muestra de estopa con ocho meses de secado ya existente y se obtuvieron características fisicoquímicas similares.

Las características físicas de la estopa se obtuvieron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se realizó la prueba de absorción, densidad y área superficial específica. Las características químicas de la estopa de coco se obtuvieron en el Laboratorio de Bromatología de la Unidad de Alimentación Animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la

Universidad de San Carlos de Guatemala. Se realizó la prueba de Bromato 7 y se determinó la humedad, materia seca total, extracto etéreo, fibra cruda, ceniza, extracto libre de nitrógeno y potencial de hidrógeno.

Los valores iniciales en el diseño del modelo experimental fueron: DBO<sub>5</sub> y DQO del afluente y efluente, temperatura, eficiencia, energía utilizada, tipo de tratamiento, medio filtrante, tipo de flujo, forma del filtro y material de construcción. Los parámetros de diseño hidráulico del modelo experimental fueron: constante de tratabilidad, carga hidráulica volumétrica, caudal, tiempo de contacto, velocidad de filtración, carga hidráulica vertical, carga hidráulica superficial, carga orgánica o contaminante, carga orgánica vertical y carga orgánica superficial.

## METODOLOGÍA

### Caracterización fisicoquímica de la estopa

La fibra cortada de la estopa de coco o bonote varía entre 15 y 35 cm, mucho menor que los promedios de 110 cm en el caso del henequén y 140 cm para el sisal familia del henequén. Las fibras de la estopa de coco tienen una capacidad de estiramiento de 29,04%, con un módulo de rigidez de 1,8924 dinas/cm<sup>2</sup>. Después de 4 meses de inmersión, el bonote pierde solamente 35 – 45% de su resistencia. Se afirma que su flotabilidad extrema y su resistencia a la acción de bacterias y agua salada son únicas. (Quiñónez, 2006)

Tabla I. Caracterización física de la estopa

Descripción de la muestra	Muestra 1		Muestra 2	
	Estopa de coco de 8 meses de secado		Estopa de coco de 1 mes de secado	
Absorción promedio	200,35%		164,42%	
Densidad promedio	0,208 g/cm <sup>3</sup>		0,222 g/cm <sup>3</sup>	
Área superficial específica	50 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. Caracterización química de la estopa

Descripción de la muestra	Muestra 1		Muestra 2	
	Estopa de coco de 8 meses de secado		Estopa de coco de 1 mes de secado	
	Seca	Como alimento	Seca	Como alimento
Base				
Humedad promedio	12,40%	---	11,87%	---
Materia seca total	87,60%	---	88,13%	---
Extracto Etéreo	0,43%	0,38%	0,33%	0,29%
Fibra cruda	31,75%	27,81%	45,83%	40,39%
Proteína cruda	2,15%	1,89%	2,15%	1,90%
Ceniza	8,33%	7,30%	5,63%	4,96%
Extracto libre de nitrógeno	57,34%	---	46,06%	---
Potencial de hidrógeno	5,10	---	5,01	---

Fuente: elaboración propia, con base en el informe de resultados de análisis, formulario Bromato 7. Laboratorio de Bromatología, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, USAC, marzo de 2012.

### Variables del modelo experimental

En la tabla III se indican las variables que se consideraron en el diseño del modelo experimental de filtro percolador.

Tabla III. Variables del modelo experimental

No.	Variable	Unidad de medida
1	<b>Características físicas de la estopa</b>	
	Absorción	%
	Densidad	g/cm <sup>3</sup>
2	<b>Características químicas de la estopa</b>	
	Materia seca total	%
	Extracto Etéreo	%
	Fibra cruda	%
	Ceniza	%
	Extracto libre de nitrógeno	%
3	<b>Características del agua residual</b>	
	DBO <sub>5</sub>	mg/l
	DQO	mg/l
	Carga contaminante	kg DBO <sub>5</sub> /d
	Temperatura	°C
4	<b>Características hidráulicas del modelo</b>	
	Carga hidráulica volumétrica	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> d
	Caudal	m <sup>3</sup> /d
	Tiempo de retención	s
	Velocidad de filtración	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d
	Carga hidráulica vertical	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d
	Carga hidráulica superficial	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d
	Carga orgánica vertical	kg DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> d
Carga orgánica superficial	kg DBO <sub>5</sub> /m <sup>2</sup> d	

Fuente: elaboración propia.

### Modelo de Bruce & Merkens

Los autores mencionados desarrollaron, en 1973, la ecuación 1, para el diseño de filtros percoladores:

$$S_e = s_a e^{-K_T S^a q^{-b}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En filtros percoladores con recirculación, la DBO<sub>5</sub> del afluente al filtro se calcula por la ecuación 2.

$$S_a = \frac{S_0 + R S_e}{1 + R} \quad (\text{Ecuación 2})$$

La relación de recirculación se expresa según la ecuación 3

$$R = \frac{Q_R}{Q} \quad (\text{Ecuación 3})$$

El valor de  $K_T$  se puede calcular por la ecuación 4, o por la ecuación 5, para aguas residuales típicas. En general,  $K_T$  varía entre 0,06 y 0,12 m/d, con un valor representativo de 0,1 m/d a 20 °C.

$$K_T = 0,1(1,08)^{T-20} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$K_T = 0,037(1,08)^{T-15} \quad (\text{Ecuación 5})$$

La carga hidráulica volumétrica se expresa según la ecuación 6:

$$q = \frac{Q}{V} \quad (\text{Ecuación 6})$$

De la ecuación 1, para  $a = b = 1,0$ , se obtiene la ecuación 7.

$$q = \frac{K_T S}{\ln(S_a/S_e)} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Reemplazando la ecuación 6 en la ecuación 7, se obtiene la ecuación 8.

$$V = \frac{Q \ln(S_a/S_e)}{K_T S} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

Se = DBO<sub>5</sub> del efluente sedimentado del filtro, mg/l

Sa = DBO<sub>5</sub> del afluente al filtro, incluyendo recirculación, mg/l

So = DBO<sub>5</sub> del afluente, sin recirculación, o efluente primario, mg/l

R = relación de recirculación

Q<sub>R</sub> = caudal de recirculación, m<sup>3</sup>/d

Q = caudal afluente, sin incluir recirculación, m<sup>3</sup>/d

K<sub>T</sub> = constante de tratabilidad, a la temperatura T, generalmente en m/d

T = temperatura del agua residual, en °C

S = área superficial específica del medio filtrante, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

q = carga hidráulica volumétrica, sin incluir recirculación, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>d

V = volumen del filtro, m<sup>3</sup>

a, b = constantes empíricas, generalmente iguales a la unidad

El valor del índice de biodegradabilidad es mayor a 0,40, por lo tanto el agua residual es tratable por medio biológico. Se utilizó el Modelo de Bruce & Merkens con los siguientes valores iniciales:

$$S_e = 35 \text{ mg/l}$$

$$S_a = 180 \text{ mg/l}$$

$$S = 50 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$D = 2 \text{ m}$$

$$a \text{ y } b = 1,0$$

$$\text{Volumen del filtro} = V = \pi r^2 h$$

$$\pi(0,29 \text{ m}^2)(2 \text{ m}) = 0,52842 \text{ m}^3$$

$$\text{Área superficial del medio} = S * V \\ (50 \text{ m}^2/\text{m}^3)(0,52842 \text{ m}^3) = 26,421 \text{ m}^2$$

Con los datos anteriores, se calcula la carga hidráulica "q" en m/d y el caudal de tratamiento máximo en el afluente "Q" en m<sup>3</sup>/d. Se utilizó el modelo de Bruce & Merkens porque se ajusta a cualquier tipo de medio filtrante, incluyendo materiales no convencionales como la estopa de coco.

De la ecuación 1, se tiene:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-K_T S^a q^{-b}} \\ \frac{35 \text{ mg/l}}{180 \text{ mg/l}} = e^{-K_T S^a q^{-1}} \\ \ln \frac{35}{180} = \frac{-K_T (50 \text{ m}^2/\text{m}^3)}{q} \\ \frac{-1.637609}{-50} = \frac{K_T}{q} \\ q = \frac{K_T}{0,0327522}$$

Según la ecuación 5, se encuentra K<sub>T</sub>

$$K_T = 0,037(1,08)^{T-15} \\ K_T = 0,037(1,08)^{24.2-15} \\ K_T = 0,075 \text{ m/d}$$

Sustituyendo K<sub>T</sub> en la ecuación anterior, se obtiene q:

$$q = \frac{0,075 \text{ m/d}}{0,0327522} \\ q = 2,29 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

De la ecuación 6, se obtiene el caudal Q:

$$q = \frac{Q}{V} \\ Q = qV \\ Q = (2,29 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d})(0,52842 \text{ m}^3) \\ Q = 1,21 \text{ m}^3/\text{d}$$

## DISEÑO HIDRÁULICO DEL MODELO EXPERIMENTAL

En la tabla IV se muestran los valores iniciales que se utilizaron para el diseño hidráulico del modelo experimental de filtro percolador.

Se calcula el índice de biodegradabilidad del afluente con los datos anteriores:

$$IB = \frac{DBO_5}{DQO} = \frac{180 \text{ mg/l}}{365 \text{ mg/l}} = 0,50$$

Tabla IV. Valores iniciales en el diseño del modelo experimental

Característica	Dimensión y/o unidades
DBO <sub>5</sub> afluente	180 mg/l (promedio)
DQO afluente	365 mg/l (promedio)
Temperatura	24,2 °C (promedio)
Eficiencia estimada	80%
DBO <sub>5</sub> efluente (esperada)	35 mg/l
DQO efluente (esperada)	75 mg/l
Caudal de tratamiento máximo	¿¿?
Energía utilizada	Gravedad
Tratamiento	Filtración biológica
Medio filtrante	Estopa de coco
Tipo de flujo	Vertical
Forma del filtro	Circular
Diámetro	58 centímetros
Altura	2 metros
Área superficial específica del medio S	50 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> (promedio)
Fluido de contacto	Efluente sedimentador primario
Material de construcción	Metal y concreto

Fuente: elaboración propia.

Se toma el tiempo de contacto o tiempo de retención descrita por Velz, Shulze, Howland, Sinkoff y otro, así:

$$t = \frac{CD}{q^n}$$

Donde:

C = constante de permeabilidad de la estopa de coco  $k = 6 \times 10^{-4}$

$$t = \frac{(6 \times 10^{-4})(2 \text{ m})}{(2,29)^1}$$

$$t = 0,000524 \text{ d}$$

$$t = 45,2 \text{ s} = 45 \text{ segundos}$$

La velocidad de filtración se calcula utilizando la carga hidráulica volumétrica  $q$  y el espesor del medio filtrante, de la siguiente forma:

$$v = q * h$$

$$v = (2,293 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d})(2 \text{ m})$$

$$v = 4,59 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$$

Carga hidráulica vertical

$$\text{CHV} = \frac{Q}{v}$$

$$\text{CHV} = \frac{1,21 \text{ m}^3/\text{d}}{0,52842 \text{ m}^3}$$

$$\text{CHV} = 2,29 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

Carga hidráulica superficial

$$\text{CHS} = \frac{Q}{A_s}$$

$$\text{CHS} = \frac{1,21 \text{ m}^3/\text{d}}{26,421 \text{ m}^2}$$

$$\text{CHS} = 0,046 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$$

Carga orgánica o carga contaminante

$$\text{CO} = \text{DBO}_5 * Q$$

$$\text{CO} = \left(180 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ kg}}{1000000 \text{ mg}}\right) (1,21 \frac{\text{m}^3}{\text{d}})$$

$$\text{CO} = 0,2178 \text{ kg DBO}_5/\text{d}$$

Carga orgánica vertical

$$\text{COV} = \frac{\text{CO}}{v}$$

$$\text{COV} = \frac{0,2178 \text{ kg DBO}_5/\text{d}}{0,52842 \text{ m}^3}$$

$$\text{COV} = 0,4122 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3\text{d}$$

Carga orgánica superficial

$$\text{COS} = \frac{\text{CO}}{A_s}$$

$$\text{COS} = \frac{0,2178 \text{ kg DBO}_5/\text{d}}{26,421 \text{ m}^2}$$

$$\text{COS} = 0,0082 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^2\text{d}$$

Tabla V. Parámetros de diseño hidráulico del modelo experimental

Característica	Dimensión y/o unidades
DBO <sub>5</sub> afluente	180 mg/l
DQO afluente	365 mg/l
Temperatura del afluente	24,2 °C
Eficiencia esperada	80%
DBO <sub>5</sub> efluente (esperada)	35 mg/l
DQO efluente (esperada)	75 mg/l
Energía utilizada	Gravedad
Tratamiento	Filtración biológica
Medio filtrante	Estopa de coco
Forma del filtro	Circular
Fluidos de contacto	Efluente sedimentador primario
Material de construcción	Metal y concreto (la base)
Diámetro del filtro	58 cm
Altura del filtro	2 m
Área superficial específica del medio S	50 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Área superficial del medio	26,42 m <sup>2</sup>
Constante de tratabilidad K <sub>T</sub>	0,075 m/d
Carga hidráulica volumétrica q	2,29 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> d
Caudal Q	1,21 m <sup>3</sup> /d
Tiempo de contacto t	45 s
Velocidad de filtración v	4,59 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d
Carga hidráulica vertical CHV	2,29 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> d
Carga hidráulica superficial CHS	0,046 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d
Carga orgánica o carga contaminante CO	0,2178 kg DBO <sub>5</sub> /d
Carga orgánica vertical COV	0,4122 kg DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> d
Carga orgánica superficial COS	0,0082 kg DBO <sub>5</sub> /m <sup>2</sup> d

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

La estopa de coco que se utilizó en el modelo experimental presentó las siguientes características fisicoquímicas: absorción 164,42%, densidad 0,22 g/cm<sup>3</sup>, área superficial específica 50 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, humedad 11,87%, materia seca total 88,13%, extracto etéreo 0,33%, fibra cruda 45,83%, proteína cruda 2,15%, ceniza 5,63%, extracto libre de nitrógeno 46,06% y potencial de hidrógeno 5,01 unidades.

Los parámetros de diseño hidráulico del modelo experimental fueron: caudal 1,21 m<sup>3</sup>/d, tiempo de retención 45 s, velocidad de filtración 4,59 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, carga hidráulica vertical 2,29 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>d, carga hidráulica superficial 0,046 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d, carga contaminante 0,2178 kg DBO<sub>5</sub>/d, carga orgánica vertical 0,4122 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>d y carga orgánica superficial 0,0082 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>d.

El nitrógeno total se redujo de 41 mg/l en la entrada a 27 mg/l en la salida, con 33% de eficiencia. El fósforo total aumentó de 11,0 mg/l en la entrada a 13,1 mg/l en la salida, con -24% de eficiencia. Por lo tanto, la estopa de coco como medio filtrante no es eficiente en la reducción de nitrógeno y fósforo total del agua residual de origen doméstico.

La DBO<sub>5</sub> aumentó de 179 mg/l en la entrada a 207 mg/l en la salida, con -16 % de eficiencia. La DQO aumentó de 385 mg/l en la entrada a 396 mg/l en la salida, con -3% de eficiencia. El color aparente aumentó de 653 UC en la entrada a 739 UC en la salida, con -3% de eficiencia. Los sólidos sedimentables aumentaron de 3 cm<sup>3</sup>/l en la entrada a 6 cm<sup>3</sup>/l en la salida, con -277% de eficiencia.

La construcción y montaje del modelo experimental se realizó con base en el diseño hidráulico propuesto, con un cuerpo de 2 metros de alto y 58 centímetros de diámetro. Se instaló el sistema de distribución y recolección en los extremos del modelo experimental. El costo para el estudio del modelo experimental asciende a Q. 3 720,00, equivalente a US \$. 469,70.

## BIBLIOGRAFÍA

CÁCERES, Jimmy Obdulio. *Implementación de material de desecho PET como elemento filtrante en filtros biológicos*. Trabajo de graduación de Maestría en Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 2010. 89 p.

Guatemala, Congreso de la República. *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Acuerdo gubernativo No. 236-2006. 24 p.

METCALF & EDDY, INC. *Ingeniería de las aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. 3a ed. Vol. I. México: McGraw-Hill, 1996. 752 p.

QUIÑÓNEZ De La CRUZ, Francisco Javier. *Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas con desechos del fruto del coco (Cocos nucifera L.) y de paneles para construcción de vivienda económica (Sistema constructivo de matriz fibroreforzada PANCOCO)*. Proyecto de investigación CONCYT-FODECYT No. 075-06. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Investigaciones de Ingeniería, 2006. 140 p.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Calidad del agua*. 3a ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009. 484 p.

\_\_\_\_\_. *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. 3a ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. 1 248 p.

TCHOBANOGLOUS, George & CRITES, Ron. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: McGraw-Hill, 2000. 776 p.