



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos -ERIS-
Maestría en Ingeniería Sanitaria

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN 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 PROCEDENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
AURORA II “ING. ARTURO PAZOS SOSA”**

Ing. Juan Carlos Hernández Canales

Asesorado por Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos

Guatemala, noviembre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN 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 PROCEDENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
AURORA II “ING. ARTURO PAZOS SOSA”**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS -ERIS-

POR EL INGENIERO CIVIL

JUAN CARLOS HERNÁNDEZ CANALES

ASESORADO POR EL DR. ADÁN ERNESTO POCASANGRE COLLAZOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE)
EN INGENIERÍA SANITARIA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

EXAMINADOR	Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Joram Gil Latoj

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN 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 PROCEDENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
AURORA II “ING. ARTURO PAZOS SOSA”**

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), en marzo de 2011.

Atentamente,



Ing. Juan Carlos Hernández Canales

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS

Como fuente de sabiduría y conocimiento. Por permitirme culminar esta nueva meta.

MIS PADRES

Juan Francisco Hernández Márquez y Sandra Iris Canales de Hernández, por apoyarme incondicionalmente en mi formación académica.

MIS HERMANOS

Elvira Andrea Hernández Canales, Iris Iveth Hernández Canales, Inmar Francisco Hernández Canales, que esta nueva meta sea un símbolo de perseverancia y dedicación a sus estudios.

MIS COMPAÑEROS (AS)

Rocío Vásquez Ruballos, Ileana Pierri Palma, Anabela Díaz Ponce, Enrique Godínez, Walter Arreaza, Edgar Clara, Luis Castro, Edy Nimatuj, Norman Sigui, David Aguilar, Edgar Lemus, Ramón López, Vilma Caballero, Roberto Moscozo, Paulina Maldonado, Pablo Saravia, Rommel Raudales, Marvin Gradiz y Oscar Ramírez. Por todo lo vivido durante la maestría, Gracias compañeros.

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA Y LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS

Como alma mater y fuente del conocimiento. Por formar profesionales de alto rendimiento para que sean competitivos a nivel centroamericano.

AGRADECIMIENTOS A:

Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, por ser parte de este estudio especial como asesor y coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria.

M. Sc. Ing. Zenón Much Santos, por su valiosa colaboración y apoyo en la elaboración de la presente investigación.

M. Sc. Ing. Pedro Saravia Celis, M. Sc. Ing. Julián Duarte, M. Sc. Ing. Joram Gil, M. Sc. Ing. Juan José Sandoval, M. Sc. Ing. Félix Aguilar, M. Sc. Ing. Elfego Orozco y Dra. Malvina de León. Catedráticos de la ERIS, por ser parte de la formación académica superior.

Bibliotecóloga Dora María Cardoza Meza, por su generosa amabilidad y por proporcionar el material didáctico para la elaboración del presente estudio.

Sra. Frida Frizeida Faggioly Zepeda y Sra. Janeth Granados, secretarias de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.

Sr. Adolfo Dubón, auxiliar del Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina". Por su valiosa colaboración en los ensayos de las muestras, toma de datos y discusión de resultados.

Sr. Tereso Pérez Bor, operador de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales "Ing. Arturo Pazos", por su colaboración en el montaje del modelo experimental y en la toma de muestras.

Guatemala 22 de noviembre del 2012

Ing. Pedro Saravia Celis
Director
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetable Ingeniero:

Le saludo cordialmente deseándole éxitos en sus labores diarias, por medio de la presente hago constar que la tesis titulada: **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN 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 PROCEDENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO AURORA II "ING. ARTURO PAZOS SOSA"**, elaborada por el ingeniero Juan Carlos Hernández Canales, estudiante de la maestría en Ingeniería Sanitaria, fue revisada en los aspectos de **forma y estilo** por mi persona en la cual se supervisó que las correcciones sugeridas fueran incluidas y determinando que cumple con los estándares necesarios para su publicación con respecto a los aspectos anteriormente señalados. Sin otro particular me suscribo de usted,

Atentamente,

Rosa Amelia González Domínguez
LICENCIADA EN LETRAS
Colegiada No. 5214



Licda. Rosa Amelia González
Licenciada en Letras
Colegiada No. 5,284

Guatemala, 26 de noviembre de 2012

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

Respetuosamente les comunico que he revisado, en mi calidad de Asesor y Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el documento de Estudio Especial II titulado:

**“DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION DE UN
MODELO EXPERIMENTAL DE FILTRO PERCOLADOR
UTILIZANDO ESTOPA DE COCO COMO MEDIO FILTRANTE,
PARA LA REDUCCION DE NITROGENO Y FOSFORO TOTAL
DE LAS AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE LA
PLANTA DE TRATAMIENTO AURORA II “ING. ARTURO
PAZOS SOSA”**

Presentado por el estudiante de la maestría mencionada,

Ingeniero Civil Juan Carlos Hernández Canales

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio.

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de ustedes.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hidráulicos
ERIS

Edificio ERIS
Area de Prefabricados
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86212, 86213 y 86239
(502) 2418 9140

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hidráulicos
ERIS

Edificio ERIS
Area de Prefabricados
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86212, 86213 y 86239
(502) 2418 9140

El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, MSc. Ing. Zenón Much Santos y MSc. Ing. Joram Gil Laroj, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria, Dr. Ing Adán Ernesto Pocasangre Collazos, y la revisión de lingüística efectuada por la Licenciada en Letras Rosa Amelia González, colegida Numero 5,284; del trabajo del estudiante: Ingeniero Civil Juan Carlos Hernández Canales, Titulado:

“DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION DE UN MODELO EXPERIMENTAL DE FILTRO PERCOLADOR UTILIZANDO ESTOPA DE COCO COMO MEDIO FILTRANTE, PARA LA REDUCCION DE NITROGENO Y FOSFORO TOTAL DE LAS AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO AURORA II “ING. ARTURO PAZOS SOSA”

En representación de la comisión de admisión y otorgamiento de grado, procede a la autorización del mismo.

Guatemala, 28 de noviembre del 2012

IMPRIMASE

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS/HIPÓTESIS.....	XXI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXIII
JUSTIFICACIÓN.....	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
ANTECEDENTES.....	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Nitrógeno	1
1.2. Fósforo.....	3
1.3. Filtración biológica y filtro percolador.....	5
1.3.1. Filtro de baja carga	7
1.3.2. Filtro de alta carga	7
1.4. El fruto del cocotero.....	9
1.5. La estopa del coco.....	12
1.5.1. Hemicelulosa	13
1.5.2. Celulosa.....	13
1.5.3. Lignina	14
1.5.4. Pectina.....	15
1.5.5. Características físicas de las fibras.....	17
1.5.6. Características químicas de las fibras.....	21

2.	METODOLOGÍA	23
2.1.	Enfoque	23
2.2.	Diseño	23
2.3.	Alcances.....	24
2.4.	Limitaciones	24
2.5.	Parámetros de control	25
2.5.1.	Métodos de análisis	26
2.6.	Características fisicoquímicas de la estopa.....	27
2.6.1.	Métodos de análisis	28
2.7.	Recolección de los datos.....	29
2.7.1.	Tipo de muestreo	29
2.7.2.	Puntos de muestreo.....	29
2.7.3.	Período de maduración	29
2.7.4.	Período de muestreo	30
2.7.5.	Tamaño de la muestra.....	30
2.8.	Proceso de análisis de datos y prueba de hipótesis.....	32
3.	DISEÑO	33
3.1.	VARIABLES del modelo experimental.....	33
3.2.	Caracterización fisicoquímica de la estopa	34
3.3.	Bases de cálculo	36
3.3.1.	Modelo de Eckenfelder	38
3.3.2.	Modelo de Bruce & Merkens	41
3.4.	Diseño hidráulico del modelo experimental	43
4.	CONSTRUCCIÓN.....	51
4.1.	Descripción de la planta piloto.....	51
4.1.1.	Localización y ubicación	52
4.2.	Ubicación del modelo experimental dentro del proceso	53

4.3.	Montaje del modelo experimental	54
4.3.1.	Sistema de recolección	54
4.3.2.	Cuerpo del filtro.....	55
4.3.3.	Sistema de distribución	56
5.	EVALUACIÓN Y RESULTADOS.....	57
5.1.	Nitrógeno total	58
5.2.	Fósforo total.....	59
5.3.	Demanda bioquímica de oxígeno	60
5.4.	Demanda química de oxígeno	61
5.5.	Índice de biodegradabilidad	62
5.6.	Color aparente	63
5.7.	Sólidos sedimentables	64
5.8.	Potencial de hidrógeno	65
5.9.	Temperatura	66
6.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	67
6.1.	Nitrógeno total	68
6.2.	Fósforo total.....	70
6.3.	Demanda bioquímica de oxígeno	72
6.4.	Demanda química de oxígeno	74
6.5.	Índice de biodegradabilidad	76
6.6.	Color aparente	78
6.7.	Sólidos sedimentables	80
6.8.	Potencial de hidrógeno	82
6.9.	Temperatura	84

CONCLUSIONES..... 89
RECOMENDACIONES 91
BIBLIOGRAFÍA..... 93
APÉNDICES..... 99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	El ciclo del nitrógeno	2
2.	El ciclo del fósforo	4
3.	Esquema de la película biológica en un filtro percolador	6
4.	Clasificación botánica del cocotero (<i>Cocos nucifera</i> L.)	10
5.	Foto-ilustración de la germinación del coco	12
6.	Fibra de coco a nivel molecular	16
7.	Fibra de coco en el mesocarpo (estopa)	16
8.	Fibra de coco extraída y preparada para la caracterización	17
9.	Determinación de la longitud de las fibras de coco	17
10.	Determinación del diámetro de las fibras de coco	18
11.	Vista al microscopio de una fibra de coco, dirección longitudinal	19
12.	Vista al microscopio de una fibra de coco, dirección transversal	20
13.	Vista el microscopio de una microfibrilla	20
14.	Resultados de la caracterización química de fibras y polvo de estopa de coco (<i>coir pith</i>)	22
15.	Muestras representativas en recipiente de un galón	30
16.	Proceso de análisis de datos y prueba de hipótesis	32
17.	Muestras de estopa a diferentes tiempos de secado	35
18.	Recirculación en un filtro percolador	38
19.	Localización y ubicación de la planta piloto	52
20.	Ubicación del modelo experimental dentro del proceso	53
21.	Sistema de recolección y evacuación de agua filtrada	54
22.	Montaje final del modelo experimental	55

23.	Sistema de distribución de agua sedimentada	56
24.	Nitrógeno total.....	69
25.	Eficiencia en nitrógeno total.....	69
26.	Fósforo total.....	71
27.	Eficiencia en fósforo total.....	71
28.	Demanda bioquímica de oxígeno	73
29.	Eficiencia en demanda bioquímica de oxígeno.....	73
30.	Demanda química de oxígeno	75
31.	Eficiencia en demanda química de oxígeno	75
32.	Índice de biodegradabilidad.....	77
33.	Eficiencia en índice de biodegradabilidad.....	77
34.	Color aparente	79
35.	Eficiencia en color aparente.....	79
36.	Sólidos sedimentables.....	81
37.	Eficiencia en sólidos sedimentables	81
38.	Potencial de hidrógeno	83
39.	Eficiencia en potencial de hidrógeno	83
40.	Temperatura	85
41.	Eficiencia en temperatura	85

TABLAS

I.	Características principales de los filtros percoladores	8
II.	Características físicas de las fibras en la estopa del coco	19
III.	Características químicas de las fibras en la estopa de coco.....	21
IV.	Parámetros de control.....	25
V.	Métodos de análisis para los parámetros de control	26
VI.	Características fisicoquímicas de la estopa	27
VII.	Métodos para la caracterización física de la estopa.....	28
VIII.	Métodos para la caracterización química de la estopa	28
IX.	Variables del modelo experimental	33
X.	Caracterización física de la estopa	34
XI.	Caracterización química de la estopa	35
XII.	Valores iniciales en el diseño del modelo experimental	43
XIII.	Parámetros de diseño hidráulico del modelo experimental.....	49
XIV.	Nitrógeno total.....	58
XV.	Fósforo total	59
XVI.	Demanda bioquímica de oxígeno	60
XVII.	Demanda química de oxígeno	61
XVIII.	Índice de biodegradabilidad	62
XIX.	Color aparente	63
XX.	Sólidos sedimentables	64
XXI.	Potencial de hidrógeno	65
XXII.	Temperatura	66
XXIII.	Límites máximos permisibles para descargas de aguas residuales a cuerpos receptores	86

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
S	Área superficial específica del medio filtrante, m^2/m^3
CHS	Carga hidráulica superficial, m^3/m^2d
CHV	Carga hidráulica vertical, m^3/m^3d
q	Carga hidráulica volumétrica, sin incluir recirculación, m^3/m^3d
CO	Carga orgánica o carga contaminante, DBO_5/d
COS	Carga orgánica superficial $kg\ DBO_5/m^2\ d$
COV	Carga orgánica vertical, $kg\ DBO_5/m^3\ d$
Q	Caudal afluente, sin incluir recirculación, m^3/d
K_T	Constante de tratabilidad, a la temperatura T, m/d
a, b	Constantes empíricas, generalmente iguales a la unidad
Sa	DBO_5 del afluente al filtro, incluyendo recirculación, mg/L
Se	DBO_5 del efluente sedimentado del filtro, mg/L
ρ	Densidad
EE	Extracto etéreo
ELN	Extracto libre de nitrógeno
FC	Fibra cruda
MST	Materia seca total
T	Temperatura del agua residual, en $^{\circ}C$
t	Tiempo de contacto, d
%Abs	Porcentaje de absorción de agua
%H	Porcentaje de humedad
D	Profundidad del filtro, m

GLOSARIO

- Biodescomposición** En Biología, el término descomposición refiere a la reducción del cuerpo de un organismo vivo a formas más simples de materia. El proceso es esencial para reciclar materia finita que se encuentra en un bioma. Aunque no hay dos organismos que se descompongan de la misma manera, todos sufren las mismas etapas secuenciales de descomposición. La ciencia que estudia la descomposición es generalmente referida a la Tafonomía que viene de la palabra griega *taphos*, que significa entierro.
- Ciliata** Los cilióforos o ciliados, constituyen un filo del reino protistas. Su nombre científico *Ciliophora* procede de las raíces griegas *κυλίζ*, *kilis*, que significa párpado o pestaña, y *φορός*, *foros*, portador, aludiendo a su recubrimiento de cilios. Los ciliados son uno de los grupos más importantes de protistas, comunes en casi todos los lugares donde hay agua: lagos, charcas, océanos y suelos.
- Endocarpo** En Botánica, el endocarpio o endocarpo es la capa más interior del pericarpio, es decir la parte del fruto que rodea a las semillas.

- Endosperma** Es el tejido nutricional formado en el saco embrionario de las plantas con semilla; está conformado por células muy apretadas y gránulos de almidón incrustados en una matriz, gran parte de éste es proteína.
- Exocarpo** El epicarpio es la parte del pericarpio que suele proteger al resto del fruto del exterior. El epicarpio forma la epidermis protectora del fruto que, a menudo, contiene glándulas con esencias y pigmentos. En muchas frutas se llama comúnmente piel.
- Hemicelulosa** Son heteropolisacáridos (polisacárido compuesto por más de un tipo de monómero), formado por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, y éste a su vez formados por un solo tipo de monosacáridos unidos por enlaces β (1 - 4).
- Hipercolesterolemia** Es la presencia de niveles elevados del colesterol en la sangre. No puede considerarse una patología sino un desajuste metabólico que puede ser secundario a muchas enfermedades y puede contribuir a muchas formas de enfermedad, especialmente cardiovascular. Está estrechamente vinculado a los términos hiperlipidemia (los niveles elevados de lípidos) y hiperlipoproteinemia (los niveles elevados de lipoproteínas).

- Interconvertibles** Es un proceso en el que dos sustancias son convertidas en otra sustancia, a menudo como resultado de la química o de la actividad física.
- Mesocarpo** En Botánica, el mesocarpo es la capa intermedia del pericarpo, es la parte de la fruta que se consume normalmente y es resultado de la transformación de la pared ovárica de la flor, por lo que habitualmente envuelve al endocarpo que a su vez envuelve a las semillas.
- Metabolismo** Es el conjunto de reacciones bioquímicas y procesos fisicoquímicos que ocurren en una célula y en el organismo. Estos complejos procesos interrelacionados son la base de la vida a escala molecular, y permiten las diversas actividades de las células: crecer, reproducirse, mantener sus estructuras y responder a estímulos. La metabolización es el proceso por el cual el organismo consigue que sustancias activas se transformen en no activas.
- Metahemoglobinemia** Es una enfermedad caracterizada por la presencia de un nivel anormalmente alto de metahemoglobina (Met-Hb) en la sangre. La metahemoglobina es una forma oxidada de la hemoglobina que tiene una mayor afinidad para el oxígeno lo que reduce la habilidad para liberarlo en los diferentes tejidos que la forma normal de la hemoglobina.

Nitrosaminas

Son compuestos químicos cuya estructura química es $R_1N(-R_2)-N=O$, algunas de las cuales son carcinógenas. Son compuestos orgánicos que generalmente se originan debido a la reacción de una amina secundaria con nitritos en un medio muy ácido (por ejemplo, dentro del estómago). Son productos carcinogénicos (inductores de tumores cancerígenos) y habitualmente son la causa del cáncer de esófago.

Ortofosfatos

Los fosfatos más avanzados son los ortofosfatos (Con el prefijo de "orto" se suelen denominar los ácidos más hidratados). Contienen el anión PO_4^{3-} . Los ortofosfatos se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza, sobre todo en forma de apatita y forman parte esencial de dientes y huesos.

Orogénico

La orogénesis, es la formación o rejuvenecimiento de montañas y cordilleras causada por la deformación compresiva de regiones más o menos extensas de litosfera continental. Se produce un engrosamiento cortical y los materiales sufren diversas deformaciones tectónicas de carácter compresivo.

Polifosfatos

Son las sales del ácido fosfórico que se obtiene a partir del calentamiento alcalino de la roca fosfórica. Entre los fosfatos más empleados están los fosfatos simples (ortofosfatos), monofosfatos, difosfatos y polifosfatos. Se conocen clásicamente el ácido ortofósforico H_3PO_4 , el ácido metafosfórico HPO_3 , que deriva del precedente por eliminación de una molécula de agua y el ácido pirofosfórico $H_4P_2O_7$, obtenido por condensación de dos moléculas de ácido ortofosfórico con eliminación de una molécula de agua.

Hexosa

Son monosacáridos (formados de biomoléculas compuestas por carbono, hidrógeno y oxígeno) formados por una cadena de seis átomos de carbono. Su fórmula general es $C_6H_{12}O_6$. Su principal función es producir energía. Un gramo de cualquier hexosa produce unas 4 kilocalorías de energía. Las más importantes desde el punto de vista biológico son: glucosa, galactosa y fructosa.

Urónico

Son largas cadenas lineales de azúcares complejos, muchos de ellos unidos a proteínas formando proteoglicanos. Están situadas en la superficie de las células y en la matriz extracelular, a la que aportan viscosidad. Intervienen en la formación de los huesos, cartílagos, tendones, córnea, piel y tejido conectivo.

RESUMEN

El presente estudio especial evalúa el rendimiento de un modelo experimental de filtro percolador utilizando estopa de coco como medio filtrante, según los niveles de reducción de nitrógeno y fósforo total del agua residual de origen doméstico. Asimismo, se determinó la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, índice de biodegradabilidad, color aparente, sólidos sedimentables, potencial de hidrógeno y temperatura, antes y después de la filtración.

Para comprobar la hipótesis se utilizó el enfoque cuantitativo, ya que fue necesaria la recolección de datos con base al muestreo y el análisis de los mismos. El diseño de la investigación fue del tipo experimental y longitudinal, porque se llevó a cabo la manipulación de variables independientes de manera controlada y se analizaron determinadas variables a través del tiempo en puntos y períodos específicos.

Las características físicas se determinaron con las pruebas estandarizadas en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería, USAC. Las características químicas se obtuvieron según la prueba de Bromato 7, en el Laboratorio de Bromatología de la Unidad de Alimentación Animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, USAC. Se obtuvieron las siguientes características fisicoquímicas de la estopa de un mes de secado:

- Absorción 164,42%
- Densidad 0,22 g/cm³
- Área superficial específica 50 m²/m³
- 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%
- Potencial de hidrógeno 5,01 unidades

El diseño hidráulico del modelo experimental se realizó con base en las ecuaciones de Eckenfelder y Bruce & Merkens. Se determinaron los siguientes parámetros por medio de las ecuaciones anteriores:

- Caudal 1,21 m³/d
- Tiempo de retención 45 s
- Velocidad de filtración 4,59 m³/m²d
- Carga hidráulica vertical 2,29 m³/m³d
- Carga hidráulica superficial 0,046 m³/m²d
- Carga contaminante 0,2178 kg DBO₅/d
- Carga orgánica vertical 0,4122 kg DBO₅/m³d
- Carga orgánica superficial 0,0082 kg DBO₅/m²d

La construcción y montaje del modelo experimental se llevó a cabo en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales “Ing. Arturo Pazos”, en fase de tratamiento secundario después del canal sedimentador primario. Se construyó con base en los parámetros de diseño hidráulico, 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.

La evaluación se realizó durante los meses de junio a octubre de 2012, obteniendo muestras representativas antes y después de la filtración. Se determinó la concentración de los parámetros de control mencionados anteriormente y se calculó la eficiencia para cada parámetro.

En el análisis de resultados se obtuvieron las siguientes eficiencias:

- Nitrógeno total 33%
- Fósforo total -24%
- Demanda bioquímica de oxígeno -16%
- Demanda química de oxígeno -3%
- Índice de biodegradabilidad -12%
- Color aparente -3%
- Sólidos sedimentables -277%
- Potencial de hidrógeno -5%
- Temperatura 2%

Este comportamiento demuestra que la estopa de coco no es eficiente como medio filtrante en el proceso de filtración biológica.

OBJETIVOS

General

Evaluar el rendimiento de un modelo experimental de filtro percolador utilizando estopa de coco como medio filtrante, según los niveles de reducción de nitrógeno y fósforo total del agua residual de origen doméstico.

Específicos

1. Determinar las características fisicoquímicas de la estopa de coco.
2. Establecer los parámetros de diseño hidráulico del modelo experimental.
3. Construir el modelo experimental según los parámetros de diseño hidráulico.
4. Determinar la concentración de nitrógeno total, fósforo total, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, índice de biodegradabilidad, color aparente, sólidos sedimentables, potencial de hidrógeno y temperatura en el agua residual; antes y después de la filtración.
5. Comparar los resultados del efluente con los límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptos del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

HIPÓTESIS

Es posible utilizar la estopa de coco como medio filtrante en un modelo experimental de filtro percolador, para la reducción de nitrógeno y fósforo total del agua residual de origen doméstico; para que cumpla los requisitos del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los nutrientes presentes en el agua residual son la principal causa de la eutrofización de los cuerpos receptores, por lo tanto, es necesario implementar sistemas de tratamiento biológicos que remuevan el nitrógeno y fósforo de manera eficiente y a bajo costo. Por lo que se establece la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo contribuye la estopa de coco en la filtración biológica como medio filtrante para la reducción de nitrógeno y fósforo total de las aguas residuales de origen doméstico?

La estopa de coco es un material de orgien orgánico, de fácil transporte y económico; que puede utilizarse en la filtración biológica para la reducción de nutrientes por su alto contenido de fibra cruda y materia seca. Asimismo, para cumplir los requisitos establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 sobre: las descargas, reuso de aguas residuales y disposición de lodos.

El contenido excesivo de nitrógeno y fósforo en las descargas de aguas residuales, conlleva al envejecimiento de los cuerpos receptores; tal es el caso del río Villalobos que desemboca en el lago de Amatitlán, y es uno de los principales desagües de aguas residuales domésticas, industriales y agroindustriales del área metropolitana de la Ciudad de Guatemala. Cada año miles metros cúbicos de aguas residuales y 500 000 toneladas de sedimentos ingresan al lago; esta situación ha resultado en altos niveles de contaminación y el aumento de fósforo total que ha contribuido al crecimiento de fitoplancton, principalmente cianobacterias (algas verde azules).

JUSTIFICACIÓN

Las investigaciones realizadas por el Fondo para el Desarrollo Científico y Tecnológico (FODECYT) y el Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII-USAC), demuestran que la estopa de coco es capaz de retener agua hasta un 200% de su peso inicial, dependiendo del tiempo de secado. Posee densidades que varían entre 0,20 – 0,70 g/cm³; y en cada coco se pueden generar 125 gramos de fibra y 250 gramos de polvo de coco.

La estopa de coco puede ser utilizada como medio filtrante para la reducción de nitrógeno y fósforo total en un modelo experimental de filtro percolador, por ser un material que contiene fibras con alta resistencia al desgaste, elevada área superficial, es liviano, de bajo costo económico y de gran abundancia en Guatemala.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio especial tiene como objetivo general evaluar el rendimiento de un modelo experimental de filtro percolador, utilizando estopa de coco como medio filtrante, según los niveles de reducción de nitrógeno y fósforo total del agua residual de origen doméstico.

Para cumplir el objetivo general de la investigación fue necesario realizar lo siguiente: determinar las características fisicoquímicas de la estopa de coco, establecer los parámetros de diseño hidráulico del modelo experimental, construir el modelo experimental según los parámetros de diseño hidráulico, determinar la concentración de nitrógeno total, fósforo total, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, índice de biodegradabilidad, color aparente, sólidos sedimentables, potencial de hidrógeno y temperatura; antes y después de la filtración y por último, comparar los resultados del efluente con los límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

El trabajo de investigación se divide en seis partes: marco teórico, metodología, diseño, construcción, evaluación y resultados, análisis y discusión de resultados. Para estructurar cada uno de los capítulos fue necesaria la revisión bibliográfica de textos, investigaciones, estudios especiales, trabajos de graduación, artículos científicos, manuales de laboratorio y asesoría profesional.

En el capítulo de diseño se muestran las variables del modelo experimental, caracterización fisicoquímica de la estopa, bases de cálculo y diseño hidráulico del modelo experimental. El objetivo de este capítulo es establecer los parámetros de diseño hidráulico del modelo experimental de filtro percolador propuesto.

En la fase de construcción se realiza la descripción de la planta piloto, ubicación del modelo experimental dentro del proceso y montaje del modelo experimental. Este capítulo describe el método constructivo que se llevó a cabo para el montaje final del modelo experimental, incluyendo el cuerpo del filtro, el sistema de distribución de agua sedimentada y el sistema de recolección de agua filtrada.

La evaluación y el análisis de los resultados son los capítulos finales de la investigación. Se presentan las tablas y gráficas de los parámetros de control analizados para realizar el análisis y discusión de los mismos. También se hace la comparación con los límites máximos permisibles para descargas de aguas residuales a cuerpos receptores del Acuerdo Gubernativo 236–2006.

Las limitaciones encontradas en el proceso de investigación fueron: el origen orgánico de la estopa de coco, la aceleración del proceso de descomposición natural de la estopa, la época de secado de la estopa, aumento de la precipitación en la planta piloto y escasa bibliografía relacionada a la filtración biológica utilizando medios orgánicos.

ANTECEDENTES

La Agencia Alemana para la Cooperación Técnica (GTZ), y el Programa de Desarrollo Económico Sostenible de Centroamérica, realizaron un informe sobre los diferentes usos y demandas que tiene el coco en las siguientes disciplinas: industria, ganadería, agricultura, construcción, artesanía, alimentación, medicina y jardinería.

El ingeniero civil Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, realizó la evaluación experimental de matrices fibroreforzadas con desecho del fruto del coco (*Cocos nucifera* L.) y de paneles para construcción de vivienda económica (Sistema constructivo de matriz fibroreforzada PANCOCO) en Guatemala. Como proyecto de investigación apoyado por el FODECYT y el CII-USAC.

En la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) se realizaron los siguientes estudios especiales relacionados al tema de investigación:

- (a) Implementación de material de desecho PET como elemento filtrante en filtros biológicos, por el Ing. Jimmy Obdulio Cáceres, Guatemala. 2010.
- (b) Implementación del material denominado ripio clasificado de concreto como material filtrante en filtros percoladores en la planta piloto “Ing. Arturo Pazos Sosa”, por el Ing. Alex Manuel López Ramírez, Guatemala, 2010.
- (c) Aplicación de un filtro doméstico con piedra pómez para remoción de flúor en el agua de consumo humano en la cabecera municipal de Malacatancito Huehuetenango, por el Ing. David Alfonso Trinidad Figueroa, Guatemala, 2005.

MARCO TEÓRICO

1.1. Nitrógeno

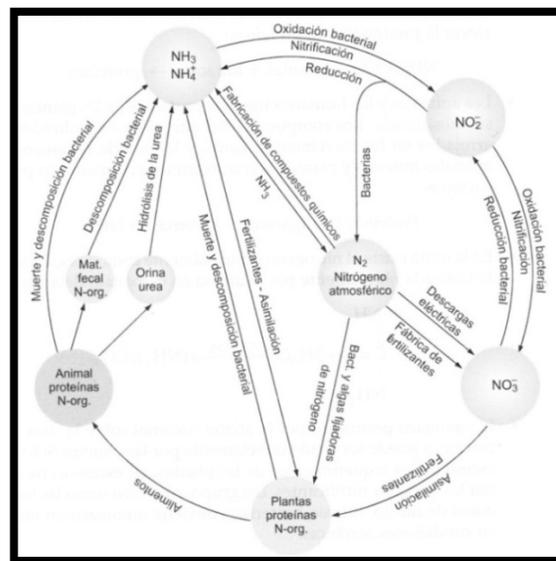
Nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas, las formas de interés en aguas residuales son las de nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno de nitritos y nitratos. Todos son formas interconvertibles bioquímicamente y componentes del ciclo del nitrógeno. Se denomina NTK nitrógeno total Kjeldhal, al nitrógeno orgánico más el nitrógeno amoniacal. Los datos de nitrógeno son necesarios para evaluar la tratabilidad de las aguas residuales por tratamientos biológicos; un agua residual con contenido insuficiente de nitrógeno puede requerir la adición de nitrógeno para su adecuada biodescomposición. [19]

En otros casos, cuando se exige control de eutrofización de las fuentes receptores, la remoción de nitrógeno, en el agua residual, puede ser condición de tratamiento. Como se observa en la figura 1, la forma predominante del nitrógeno en las aguas residuales domésticas frescas es el nitrógeno orgánico; las bacterias rápidamente descomponen el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal y, si el medio es aerobio, en nitritos y nitratos. El predominio de los nitratos indica que el residuo se ha estabilizado con respecto a su demanda de oxígeno. Los nitratos, sin embargo, pueden ser utilizados por las algas y otros organismos acuáticos para formar proteínas y, por ello, puede necesitarse la remoción del nitrógeno para prevenir dichos crecimientos. [19]

En aguas residuales domésticas la concentración de nitrógeno total puede ser de 30 a 100 mg/L; la de nitrógeno amoniacal de 5 a 20 mg/L; la de nitritos y nitratos menores de 1 mg/L. En aguas residuales tratadas la concentración de nitratos puede ser del orden de 30 mg/L-N. La presencia de nitrógeno amoniacal en exceso de 1 600 mg/L se considera inhibitoria para muchos microorganismos existentes en el proceso de lodos activados. [19]

Los cambios de valencia efectuados por las bacterias pueden ser positivos o negativos, según si las condiciones son aeróbicas o anaeróbicas. Las formas de mayor interés, en este caso, son: nitrógeno amoniacal, nitrógeno de nitritos, nitrógeno de nitratos y nitrógeno orgánico. Las relaciones existentes entre las distintas formas de los compuestos del nitrógeno y los cambios que pueden ocurrir en la naturaleza están ilustradas en el diagrama del ciclo del nitrógeno, a continuación en la figura 1: [19]

Figura 1. El ciclo del nitrógeno



Fuente: ROMERO, Jairo. Calidad del agua. p. 135.

1.2. Fósforo

El fósforo es esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Debido a los crecimientos indeseables de algas que ocurren en aguas superficiales, existe mucho interés en removerlo de las aguas residuales. En aguas residuales domésticas el contenido de fósforo oscila entre 6 y 20 mg/L; las formas usuales son los ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos. Los ortofosfatos, por ejemplo: PO_4^{-3} , HPO_4^{-} , $\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$, H_3PO_4 , son aptos para el metabolismo biológico. [19]

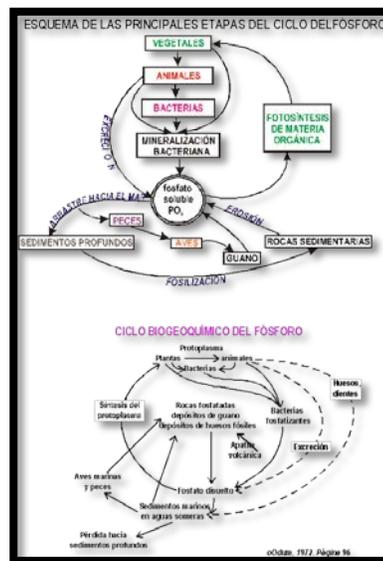
Los polifosfatos, fosfatos deshidratados molecularmente, se hidrolizan lentamente y reversion a las formas de ortofosfatos. El fósforo orgánico es, por lo regular, de importancia secundaria en la mayor parte de las aguas residuales domésticas, pero puede ser vital en residuos industriales y en lodos de aguas residuales. Los ortofosfatos se determinan colorimétricamente con molibdato de amonio y tanto los polifosfatos como el fósforo orgánico son convertidos en ortofosfatos para su determinación. En general, se recomienda para el tratamiento biológico una relación $\text{DBO}_5/\text{N}/\text{P} = 100/5/1$. [19]

Teniendo en cuenta la importancia del fósforo como nutriente, su determinación es necesaria en estudios de contaminación de ríos, lagos y embalses, así como en los procesos químicos y biológicos de purificación y tratamiento de aguas residuales. La descarga de 1 g de fósforo en un lago puede producir la formación de más de 100 g de biomasa (materia orgánica), la cual puede representar una DBO_5 de 150 g de oxígeno para su oxidación aeróbica completa, además de los problemas de eutrofización y crecimientos de fitoplancton. [19]

En general, en aguas naturales la concentración de fósforo es baja, de 0,01 a 1 mg/L-P; en aguas residuales domésticas varía normalmente entre 1 y 15 mg/L-P; en aguas de drenaje agrícola oscila entre 0,05 y 1 mg/L-P y en aguas superficiales de lagos varía entre 0,01 y 0,04 mg/L-P. Una composición típica, en cuanto a las formas de fósforo, en un agua residual doméstica puede ser: ortofosfatos 5 mg/L-P; tripolifosfatos 3 mg/L-P; pirofosfatos 1 mg/L-P; y fosfato orgánico menor de 1 mg/L-P. [22]

Todas las formas del fósforo pueden existir en solución verdadera o como material suspendido. Los polifosfatos se usan como llenantes de detergentes y en tratamiento de aguas para prevenir la precipitación de CaCO_3 en soluciones sobresaturadas. En el agua tienden a hidrolizarse en ortofosfatos, los cuales son un nutriente importante de organismos fotosintéticos en fuentes receptoras. [22]

Figura 2. El ciclo del fósforo



Fuente: ODUM, Eugene. Ecología. p. 96.

1.3. Filtración biológica y filtro percolador

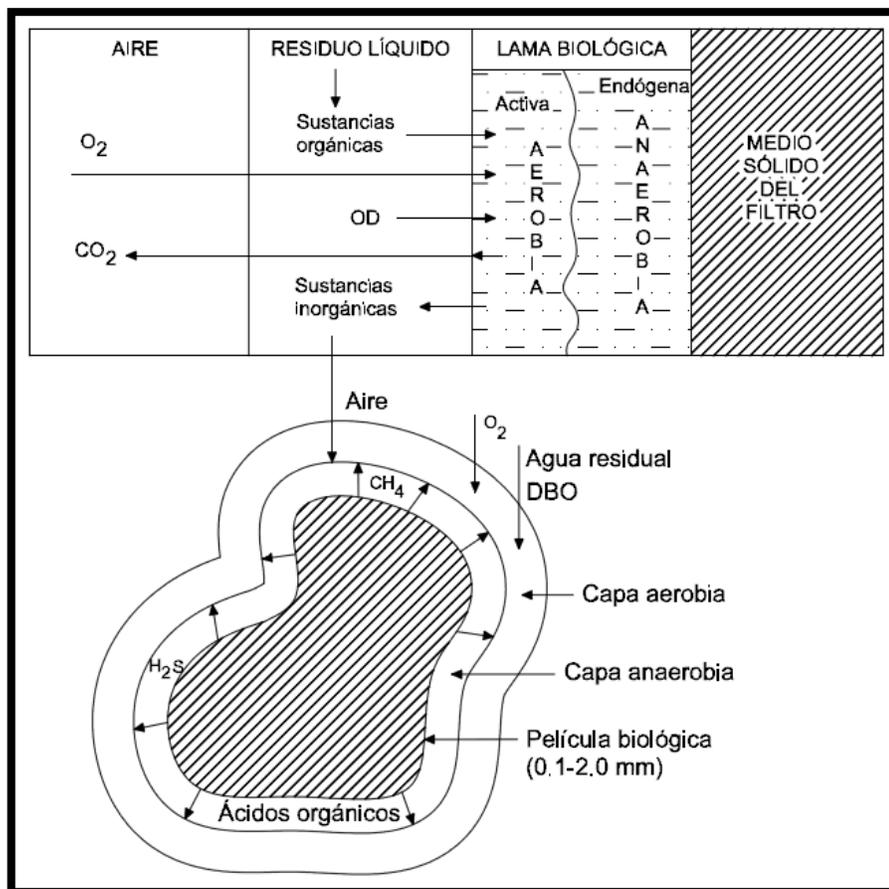
El material orgánico presente en el agua residual es adsorbido y descompuesto por la biomasa adherida al medio filtrante; en la porción interior, cerca de la superficie del medio, predominan condiciones anaerobias; en la parte externa, condiciones aerobias. A medida que la película biológica aumenta de espesor, la materia orgánica adsorbida es utilizada por los microorganismos aerobios de la parte externa. Como resultado de esto, los microorganismos de la parte interna no disponen de suficiente sustrato y entran en crecimiento endógeno. [19]

En dicha fase pierden su capacidad de adherencia al medio, son arrastrados por la acción del lavado de agua residual, se desprende la película biológica y se inicia el crecimiento de una nueva lama de microorganismos. Este fenómeno de pérdida o desprendimiento de la biomasa es función, principalmente, de la carga orgánica y de la carga hidráulica sobre el filtro. [19]

La comunidad biológica presente en un filtro se compone principalmente de protistas, incluyendo bacterias facultativas, aerobias y anaerobias, hongos, algas y protozoos. Suelen también encontrarse algunos animales superiores como gusanos, larvas de insectos y caracoles. Los microorganismos predominantes en el filtro percolador son las bacterias facultativas, acompañadas de las bacterias anaerobias y aerobias, descomponen la materia orgánica del agua residual; los hongos son los causantes de la estabilización del agua residual, pero su contribución es importante solo a un pH bajo o con ciertas aguas residuales industriales. [19]

Las algas crecen únicamente en las capas superiores del filtro a donde llega la luz solar, por esta razón las algas no toman parte directa en la degradación de residuos, pero durante el día añaden oxígeno al agua residual que se está filtrando. Desde el punto de vista operacional, las algas pueden causar el taponamiento de la superficie del filtro por lo que se consideran un estorbo. De los protozoos que se encuentran en el filtro, predominan los del grupo ciliata, cuya función no es estabilizar el agua residual, sino controlar la población bacteriana. [19]

Figura 3. Esquema de la película biológica en un filtro percolador



Fuente: ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales. p. 556.

1.3.1. Filtro de baja carga

Es un dispositivo relativamente sencillo y de funcionamiento seguro, que produce una cantidad estable de efluente, sin perjuicio de que el efluente sea de naturaleza cambiante. Predomina en él una gran población de bacterias nitrificantes, por lo que el efluente es pobre en amoníaco y rico en nitritos y nitratos. La pérdida de carga a través del filtro puede ser 1,5 – 3 m, lo que puede ser un impedimento si el terreno es demasiado plano para permitir la circulación por gravedad. [9]

Con una pendiente favorable, la posibilidad de utilizar la circulación por gravedad es una ventaja. Sin embargo, los filtros de este tipo también tienen algunos inconvenientes. Los olores son un problema frecuente, especialmente si el agua residual es poco reciente o séptica o si el clima es cálido. Los filtros no deberán colocarse en donde los olores puedan causar problemas. Las moscas (*Psychoda*) se desarrollarán en los filtros, a menos que se tomen medidas de precaución para su control. [9]

1.3.2. Filtro de alta carga

La recirculación del efluente final o efluente del filtro permite la aplicación de mayores cargas orgánicas. La recirculación del efluente desde el clarificador del filtro percolador permite que este tipo de filtro alcance la misma eficiencia de eliminación que los filtros normales o de baja carga. La recirculación del efluente alrededor del filtro da como resultado el retorno de organismos viables. Se ha observado que este método de operación mejora, con frecuencia, la eficiencia del tratamiento. La recirculación evita la obstrucción del filtro y reduce los problemas derivados del olor y las moscas. [9]

Los filtros de alta carga suelen utilizar medios constituidos por piedras o materiales plásticos. Estos filtros suelen ser circulares y funcionan con caudal continuo. En el tratamiento de aguas residuales industriales se ha recomendado carga hidráulica mayor de $29 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$, para impedir la generación de moscas de filtros (*Psychoda*), y se han empleado torres biológicas, como pretratamiento para concentraciones muy altas de DBO_5 y remociones de 50 a 80%, con cargas hidráulicas y orgánicas mayores de $230 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ y $8 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3\text{d}$. [9]

Tabla I. **Características principales de los filtros percoladores**

Características	Tasa baja o estándar	Tasa intermedia	Tasa alta	Torres biológicas	Desbaste
Carga hidráulica $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$ $\text{m}^3/\text{m}^3\text{d}$	1 – 4 0,5 – 2,5	4 – 9* --	9 – 37* --	14 – 240* --	57 – 171 * --
Carga orgánica Kg $\text{DBO}_5/\text{m}^3\text{d}$	0,08 – 0,32	0,24 – 0,48+	0,32 – 1,8+	$\leq 4,8+$	$> 2+$
Profundidad, m	1,5 – 3,0	1,0 – 2,5	0,9 – 2,5	≤ 12	0,9 – 6
Medio	Piedra, escoria	Piedra, escoria	Piedra, escoria sintético	Sintético	Piedra o sintético
Relación de Circulación	0	0,5 – 2	0,5 – 4,0	1 – 4	0
Dosificación	Intermitente	Continua	Continua	Continua	Continua
Moscas de filtros	Muchas	Pocas	Pocas	Pocas	Pocas
Requerimientos de potencia, W/m^3	2 – 4	2 – 8	6 – 10	10 – 20	--
Calidad del efluente	Nitrificado	Nitrificación parcial	No nitrificado	Nitrificación baja	No nitrificado
% de remoción de DBO_5	80 – 85	50 – 70	40 – 80	65 – 85	40 – 85
* Incluye recirculación + Excluye recirculación * Con cargas menores de $0,08 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3\text{d}$ y $T > 20 \text{ }^\circ\text{C}$ se puede lograr una nitrificación $> 80\%$ * Con cargas menores de $0,1 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3\text{d}$ se logran efluentes con $\text{DBO}_5 < 20 \text{ mg/L}$ y $\text{SS} < 30 \text{ mg/L}$					

Fuente: ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales. p. 560.

1.4. El fruto del cocotero

El cocotero se encuentra distribuido en todas las regiones tropicales, es una de las plantas que proporciona una mayor diversidad de productos, pues es una fuente de alimento, bebida y de abrigo, se dice que es la planta a la que se le conocen más aplicaciones y puede ser una de las más aprovechadas por el hombre. [14]

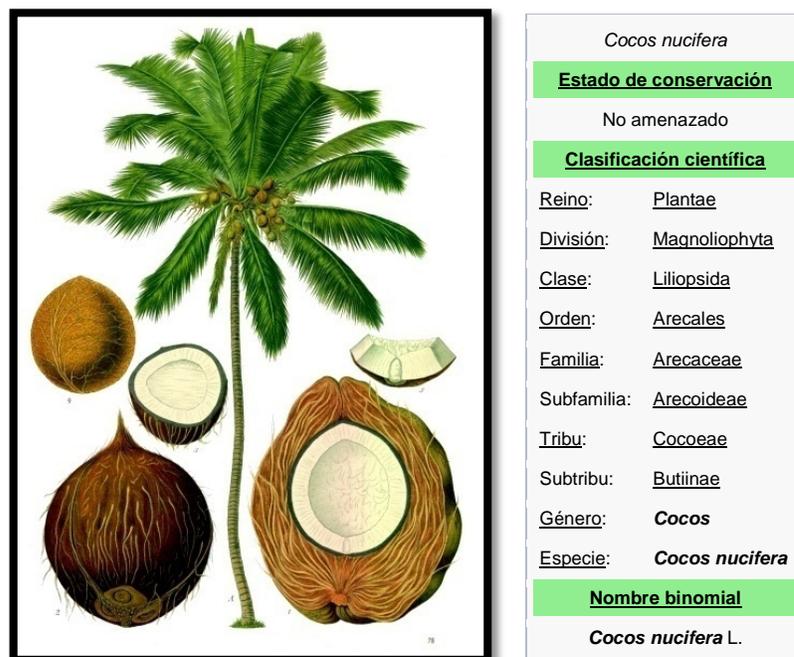
Coco es comúnmente llamado al fruto del árbol cocotero, de la familia de las palmáceas, especie *cocos nucifera*; el árbol tiene un tronco cilíndrico de 30 – 45 centímetros de diámetro aproximadamente y dependiendo de la especie hasta 30 metros de altura, marcado por anillos que señalan la posición de las hojas que ha ido perdiendo. En el extremo superior se encuentran las hojas curvadas en forma de arco que llegan a tener de 3 a 4,5 metros de longitud. El fruto cuelga en racimos de 10 a 20 unidades y en cada árbol puede haber, dependiendo de la época unos 10 racimos. [14]

El coco maduro es de forma ovoidal, de unos 30 centímetros de longitud y puede llegar a pesar hasta 2,5 kilogramos, está revestido de una cáscara fibrosa (exocarpo) de 4 o 5 centímetros de espesor que envuelve una cáscara dura (endocarpo) de 5 milímetros de espesor; parte del exocarpo es una capa intermedia (mesocarpo) que recubre el endocarpo y dentro de este último está una pulpa blanca oleaginosa (endosperma) conteniendo en su cavidad central un líquido dulce conocido como agua de coco (cotiledón) de aproximadamente 300 gramos, que se encuentra encerrado en el interior hueco del fruto. [14]

La composición nutritiva del coco varía a medida que éste madura. Destaca su aporte de grasas, principalmente saturadas (88,6 % del total) que lo convierten en un fruto muy calórico. Aporta una baja cantidad de hidratos de carbono y proteínas. Muy rico en sales que participan en la mineralización de los huesos (magnesio, fósforo y calcio). [14]

En cuanto a otros nutrientes destaca su aporte de fibra, que contribuye a regular la motilidad intestinal, entre otras funciones. El consumo excesivo de alimentos ricos en grasas saturadas provoca un aumento de los niveles de colesterol en sangre (hipercolesterolemia). Sin embargo, si se consume en pequeñas cantidades no plantea ningún inconveniente para la salud, es más, enriquece la alimentación en sustancias nutritivas. [14]

Figura 4. **Clasificación botánica del cocotero (*Cocos nucifera* L.)**



Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 33.

Una vez abierto el coco es necesario colocarlo en la nevera, en recipiente con agua para evitar que se deseque y altere. Existen diferentes formas de consumir las partes del coco: [14]

- Pulpa madura: se puede consumir cruda, entera o rallada; o bien asada, formando parte de diversas preparaciones culinarias.
- Pulpa gelatinosa: se obtiene de los cocos aún verdes. Se come con una cuchara, una vez abierto el coco. Contiene los mismos nutrientes que el coco maduro pero en menor concentración.
- Agua de coco: es el líquido que se encuentra en su interior, tanto más abundante cuanto más verde está el coco. Ideal para calmar la sed.
- Leche de coco: refrescante y nutritiva, se obtiene exprimiendo la pulpa del coco una vez triturada. Se toma como refresco o se añade a batidos de frutas u otros platos.
- Preparación de alimentos: el coco constituye un ingrediente básico en la cocina exótica y en el curry asiático, suaviza el sabor de las guindillas. En Guatemala, los platos de tapado preparados por la cultura afrocaribeña en el municipio de Livingston, del departamento de Izabal, son exquisitos y famosos.
- El aceite de coco: utilizado en la elaboración de productos de bollería industrial y margarinas por su bajo costo y buen resultado. El pan de coco de la cultura afrocaribeña de Guatemala, es muy sabroso y bien conocido.
- La fibra de coco: utilizada en diferentes aplicaciones como alfombras, cordelería, asientos para vehículos, etc. También se ha utilizado en Brasil para reforzar matrices con agentes aglomerantes.
- Las leches y natas (cremas) de coco: son los productos preparados a partir de una cantidad considerable de endosperma de coco (almendra de coco) fresco de la palma de coco (*Cocos nucifera* L.), separado, entero, desintegrado, macerado o desmenuzado. [14]

1.5. La estopa del coco

La cáscara del fruto del coco (mesocarpo) también llamada estopa o bonote da una fibra muy importante que puede ser utilizada tanto en la industria como en la construcción. Es una fibra multicelular con un alto grado de rigidez y dureza debido a sus componentes. Entre sus principales características se pueden mencionar las siguientes: la baja conductividad al calor, la resistencia al impacto, a las bacterias y al agua, también la durabilidad y resiliencia, lo cual hacen de esta fibra, el material indicado para trabajos de aislamiento térmico y acústico. [14]

Cada coco puede generar 125 gramos de fibras y con la extracción de esas fibras de la cáscara, se producen además unos 250 gramos de polvo de coco. Las fibras de coco, son fundamentalmente desechos de la industria alimenticia de productos de coco. La fibra a nivel celular se compone principalmente de hemicelulosa, celulosa, lignina y pectina, los cuales se detallan a continuación: [14]

Figura 5. Foto-ilustración de la germinación del coco



Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 34.

1.5.1. Hemicelulosa

Es un heteropolisacárido (polisacárido compuesto por más de un tipo de monómero), formado, en este caso por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, a su vez formado por un solo tipo de monosacáridos unidos por enlaces, que forman una cadena lineal ramificada. Entre estos monosacáridos destacan la glucosa, la galactosa o la fructosa. Forma parte de las paredes de las diferentes células de los tejidos del vegetal, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace de pectina. La hemicelulosa se caracteriza por ser una molécula con ramificaciones, como lo es el ácido urónico, capaz de unirse a las otras moléculas mediante enlaces que constituyen la pared rígida que protege a la célula de la presión ejercida sobre ésta por el resto de las células que la rodean. [14]

1.5.2. Celulosa

Es un homopolisacárido (es decir, compuesto de un único tipo de monómero) rígido, insoluble, que contiene desde varios cientos hasta varios miles de unidades de glucosa. La celulosa corresponde a la biomolécula más abundante de la biomasa terrestre. La celulosa se forma por la unión de moléculas de glucosa mediante enlaces glucosídicos. Es una hexosa que por hidrólisis da glucosa. La celulosa es una larga cadena polimérica de peso molecular variable. La celulosa tiene una estructura lineal o fibrosa, en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, haciéndolas impenetrables al agua, lo que hace que sea insoluble en agua, y originando fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales. [14]

La celulosa es la sustancia que más frecuentemente se encuentra en la pared de las células vegetales, y fue descubierta en 1838. La celulosa es la biomolécula más abundante de los seres vivos. La celulosa constituye la materia prima del papel y de los tejidos de fibras naturales. [14]

1.5.3. Lignina

Es un grupo de compuestos químicos usados en las paredes celulares de las plantas para crear madera. La palabra lignina proviene del término latino *lignum*, que significa madera; así, a las plantas que contienen gran cantidad de lignina se las denomina leñosas. La lignina está formada por la extracción irreversible del agua de los azúcares, creando compuestos aromáticos. Se caracteriza por ser un complejo aromático (no carbohidrato) del que existen muchos polímeros estructurales (ligninas). Resulta conveniente utilizar el término lignina en un sentido colectivo para señalar la fracción lignina de la fibra. [14]

Después de los polisacáridos, la lignina es el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal. Es importante destacar que es la única fibra no polisacárido que se conoce. Este componente de la madera realiza múltiples funciones que son esenciales para la vida de las plantas. Por ejemplo, posee un importante papel en el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos. Proporciona rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión entre las células de la madera, creando un material que es notablemente resistente a los impactos, compresiones y flexiones. Realmente, los tejidos lignificados resisten el ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular. [14]

La molécula de lignina es una molécula, con un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes. El acoplamiento aleatorio de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo, característico de la lignina. La lignina es el polímero natural más complejo en relación a su estructura y heterogeneidad. Por esta razón no es posible describir una estructura definida de la lignina; sin embargo, se han propuesto numerosos modelos que representan su estructura. [14]

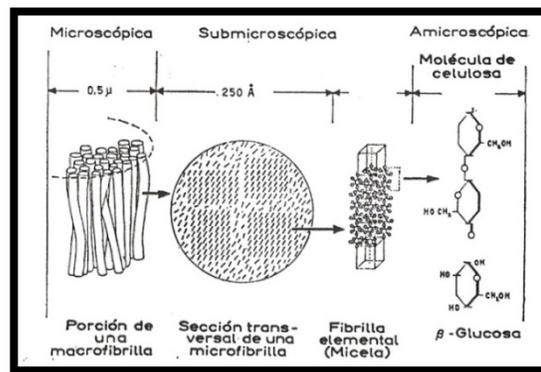
1.5.4. Pectina

Son una mezcla de polímeros ácidos y neutros muy ramificados, constituyen el 30% del peso seco de la pared celular primaria de células vegetales. En presencia de agua forman geles. Determinan la porosidad de la pared, y por tanto el grado de disponibilidad de los sustratos de los enzimas implicados en las modificaciones de la misma. Las pectinas también proporcionan superficies cargadas que regulan el pH y el balance iónico. [14]

Los conocimientos más recientes sobre la estructura de la pared celular han sido obtenidos gracias a los detallados análisis químicos, y trabajos con el microscopio electrónico. Las moléculas de celulosa están formadas por largas cadenas de moléculas de glucosa que van asociadas paralelamente a otras formando microfibrillas en la pared celular. Las moléculas de celulosa en la microfibrilla están unidas lateralmente por enlaces químicos débiles y por los extremos mediante enlaces covalentes primarios. Cada microfibrilla contiene unas 2 000 moléculas de celulosa, con un diámetro de 100 a 250 angstrom (0.1 milimicras) y una longitud de varias micras. [14]

Las moléculas de celulosa en el interior de la microfibrilla están más íntimamente unidas en unas regiones que en otras. Los estudios revelan que estas regiones de alta asociación (llamadas micelas) son de 50 a 60 angstrom de ancho, las microfibrillas están asociadas, a su vez, en macrofibrillas (éstas pueden tener por encima de las 400 microfibrillas), que pueden verse con el microscopio óptico, como lo demuestra la figura 6. [14]

Figura 6. **Fibra de coco a nivel molecular**



Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 38.

Figura 7. **Fibra de coco en el mesocarpo (estopa)**



Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 38.

1.5.5. Características físicas de las fibras

Los parámetros físicos que describen de mejor manera a una fibra son: longitud, diámetro, esbeltez y absorción. [14]

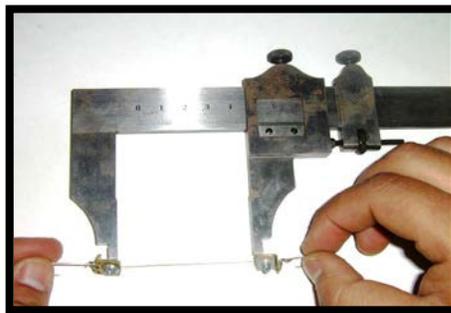
Figura 8. **Fibra de coco extraída y preparada para la caracterización**



Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 43.

Para obtener la medida de longitud en las fibras se utiliza un instrumento de medición (vernier), como se muestra en la figura 9. [14]

Figura 9. **Determinación de la longitud de las fibras de coco**



Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 43.

Para el diámetro se utiliza un micrómetro, el cual es capaz de realizar lecturas de hasta 0,01 milímetros. Para más información se utilizan tres o más lecturas del diámetro, a ambos extremos de la fibra y al centro. [14]

Figura 10. **Determinación del diámetro de las fibras de coco**



Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 44.

Para el ensayo de absorción se sugiere el siguiente procedimiento:

- a. Tomar tres grupos o manojos de fibras representativas de todo el conjunto disponible.
- b. Compactar dichas fibras para colocarlas en un recipiente.
- c. Pesar cada una de las muestras, así como su tara respectiva, en donde permanecerán durante los tiempos estipulados.
- d. Los tiempos que se establecieron para dichos ensayos fueron: 1, 2, 5, 10, 20, 30 y 60 minutos, también 24, 48 y 72 horas.
- e. Por último, llenar el recipiente con agua hasta que la fibra quede completamente sumergida y luego de esperar los tiempos mencionados anteriormente se procede a pesar las muestras, no sin antes secar la fibra por medio de una toalla, para que no tenga exceso de agua superficial y que esta agua aumente el peso. [14]

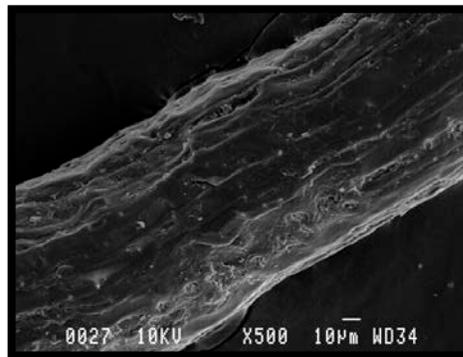
En el Laboratorio de Investigaciones de Polímeros y Otros Compuestos de la Escuela Politécnica de la Universidad de Montreal en Canadá (L'ecole Polytechnique: CREPEC Montreal Canadá), se obtienen fotografías por medio de un microscopio electrónico SEM de marca JOEL, tipo JSM-840 (microscope a balayage, scanning microscope) de la fibra de coco de Guatemala. [14]

Tabla II. **Características físicas de las fibras en la estopa del coco**

Característica	Unidades
Diámetro	0,25 mm
Densidad aparente	0,638 g/cm ³
Densidad real	1,14 g/cm ³
Absorción de agua	155 %
Resistencia a la tracción	300 MPa
Elongación a la ruptura	18 %
Módulo de elasticidad	22,5 GPa
pH	5
Conductividad eléctrica	2,15 mS/cm

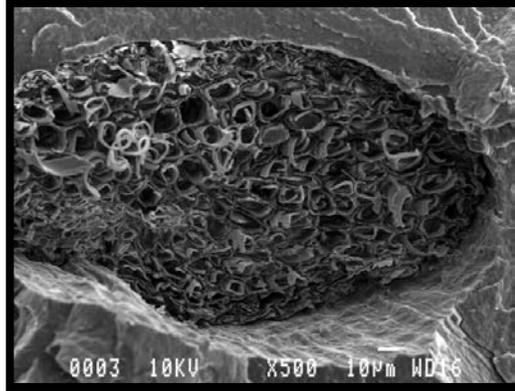
Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 36.

Figura 11. **Vista al microscopio de una fibra de coco, dirección longitudinal**



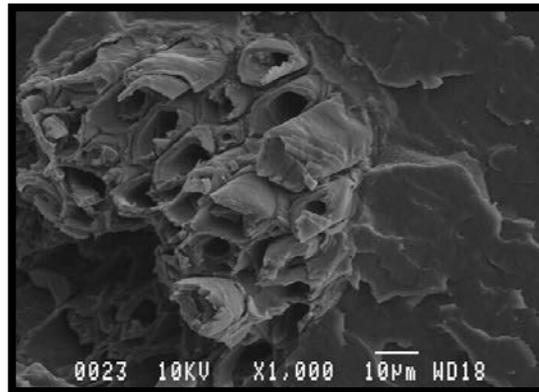
Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 49.

Figura 12. **Vista al microscopio de una fibra de coco, dirección transversal**



Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 49.

Figura 13. **Vista al microscopio de una microfibrilla**



Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 49.

1.5.6. Características químicas de las fibras

Las características químicas de las fibras se obtienen según la prueba de Bromato 7, 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. [14]

Otro producto que también fue analizado químicamente fue el polvo que se obtiene al momento de extraer la fibra de la estopa de coco, el cual también tiene sus propias características. [14]

Tabla III. **Características químicas de las fibras en la estopa del coco**

Característica	Unidades
Fibra de coco seco	
Fibra ácido detergente	45,60%
Fibra neutro detergente	80,72%
Lignina	26,43%
Polvo de coco seco	
Agua	11,05%
Materia seca	88,05%
Extracto Etéreo	0,27%
Fibra cruda	44,55%
Proteína	1,53%
Cenizas	26,09%
Extracto libre de nitrógeno	27,50%

Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 50.

Figura 14. Resultados de la caracterización química de fibras y polvo de estopa de coco (coir pith)



BROMATOLOGÍA
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO

Carretera Antón Matamoros - Salina Cruz
C.P. 70700, Oaxaca, México
Tel: 52-961-244-3550 Ext. 1337
E-mail: bromatologia@bromatologia.com

FORMULARIO BROMATO 7
INFORME DE RESULTADO DE ANÁLISIS

Solicitado por: **FRANCISCO JAVIER QUINÓNEZ** Dirección: **18av. 4-98, zona 8, Mixco** No. **072**

Fecha de entrega de la muestra: **02-03-2007** Fecha de realización: **DFL 36-02 AL 02-03-2007**

Reg	Descripción de la muestra	BASE	Agua %	M.S. %	E.L. %	F.C. %	Proteína Cruda %	Cenizas %	E.L.N. %	Calcio %	Fósforo %	F.A.D. %	F.N.D. %	Lignina %	Dig. Pepsina %	K.O.H. %	Dig. %	EB
113	FIBRA DE COCO	SECA										45.50	80.72	26.43				
114	POLVO DE COCO	COMO ALIMENTO																
		SECA	11.95	88.05	0.27	44.55	1.53	26.09	27.56									
		COMO ALIMENTO			0.24	39.23	1.35	22.87	24.27									
		SECA																
		COMO ALIMENTO																
		SECA																
		COMO ALIMENTO																

OBSERVACIONES:
Debido a que los resultados fueron calculados en base materia seca total y base fresca. Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe, para mayor información comunicarse al teléfono 2475-45-52

T.L. Fabris A. Moya
Laboratorista

L.C. Ángel Rodenas
Jefe Laboratorio de Bromatología

Fuente: QUINÓNEZ, Francisco. Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas. p. 50.

2. METODOLOGÍA

2.1. Enfoque

Para comprobar la hipótesis se utilizó el enfoque cuantitativo ya que fue necesaria la recolección de datos, la medición numérica y el análisis de los mismos. Se establecieron patrones de comportamiento y se probaron teorías. No fue posible eludir pasos y se siguió un orden riguroso.

2.2. Diseño

- Experimental: porque se llevó a cabo la manipulación de variables independientes de manera controlada, para analizar las consecuencias de tal manipulación sobre una o más variables dependientes.
- Longitudinal: porque se analizaron determinadas variables a través del tiempo, se recolectaron datos en puntos y períodos específicos para hacer inferencias respecto al cambio, sus determinantes y consecuencias.

2.3. Alcances

Los alcances en la investigación fueron: exploratorios, descriptivos y correlacionales. Debido a que se investigó un tema poco estudiado, se definieron variables y se cuantificó la relación entre ellas. También se hizo la revisión de la literatura para tener la perspectiva del estudio. A continuación se presentan los alcances que se obtuvieron en la investigación:

- Determinar las características fisicoquímicas de la estopa de coco.
- Establecer los parámetros de diseño hidráulico para el modelo experimental.
- Construir el modelo experimental según los parámetros hidráulicos
- Comparar los resultados obtenidos con el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

2.4. Limitaciones

Éstas surgieron en el desarrollo de la investigación, debido a que cada etapa precede a la siguiente sin posibilidad de eludir algún paso. A continuación se presentan las limitaciones que se observaron en la investigación:

- La estopa de coco es de origen orgánico.
- Aceleración del proceso de descomposición de la estopa.
- El secado de la estopa debe hacerse en época seca.
- Aumento de la precipitación en la planta piloto.
- Escasa bibliografía relacionada a la filtración biológica con medios orgánicos.

2.5. Parámetros de control

Para cumplir los objetivos del presente estudio especial, fue necesaria la selección de los parámetros de control para determinar la eficiencia del modelo experimental de filtro percolador. En la tabla IV se presentan los parámetros de control en orden de importancia.

Tabla IV. **Parámetros de control**

No.	Parámetro	Unidad de medida
1	Nitrógeno total	mg/L
2	Fósforo total	mg/L
3	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L
4	Demanda química de oxígeno	mg/L
5	Índice de biodegradabilidad	adimensional
6	Color aparente	UC
7	Sólidos sedimentables	cm ³ /L
8	Potencial de hidrógeno	unidades
9	Temperatura	°C

Fuente: elaboración propia.

El nitrógeno y fósforo total evalúan la eficiencia de reducción en nutrientes, la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno miden el contenido de materia orgánica. El color aparente y los sólidos sedimentables indican la biodescomposición de la estopa; el potencial de hidrógeno y la temperatura son indicadores que muestran las condiciones del medio para el crecimiento bacteriano.

2.5.1. Métodos de análisis

En la tabla V se muestran los métodos de análisis para determinar los parámetros de control establecidos anteriormente.

Tabla V. **Métodos de análisis para los parámetros de control**

No.	Parámetro	Método	Intervalo de medida
1	Nitrógeno total	Merck: Fotométrico, DMP Spectroquant® Hach: Persulfato en solución de ácido de Nitrógeno total	10 – 150 mg/L N 10 – 150 mg/L N
2	Fósforo total	Hach: Molibdovanadato con digestión de ácido persulfato, HR	0 – 100 mg/L PO ₄ ³⁻
3	Demanda bioquímica de oxígeno	Winkler: Almohadillas amortiguadoras de nutrientes	Según factor de dilución
4	Demanda química de oxígeno	Hach: Dicromato potásico en solución de digestión HR	20 – 1500 mg/L
5	Índice de biodegradabilidad	Relación DBO ₅ /DQO	DBO ₅ /DQO < 0.2 Poco biodegradable 0.20 ≤ DBO ₅ /DQO ≤ 0.40 Biodegradable DBO ₅ /DQO > 0.40 Muy biodegradable
6	Color aparente	Merck: Espectrofotómetro SQ118, celda cuadrada de cuarzo	0 – 70 UC
7	Sólidos sedimentables	Conos Imhoff	0 – 1000 cm ³ /L
8	Potencial de hidrógeno	Potenciómetro inoLab	0 – 10 unidades
9	Temperatura	Termómetro de mercurio	0 – 100 °C

Fuente: elaboración propia.

2.6. Características fisicoquímicas de la estopa

La caracterización se realizó para conocer las propiedades físicas y químicas de la estopa de coco. Estas características se utilizaron para el diseño hidráulico del modelo experimental. En la tabla VI se presentan las características fisicoquímicas de la estopa que fueron determinadas.

Tabla VI. **Características fisicoquímicas de la estopa**

No.	Característica	Unidad de medida
1	Absorción	%
2	Densidad	g/cm ³
3	Área superficial específica	m ² /m ³
4	Humedad promedio	%
5	Materia seca total	%
6	Extracto Etéreo	%
7	Fibra cruda	%
8	Proteína cruda	%
9	Ceniza	%
10	Extracto libre de nitrógeno	%
11	Potencial de hidrógeno	unidades

Fuente: elaboración propia.

Las características físicas se determinaron con las pruebas estandarizadas en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería, USAC. Las características químicas se obtuvieron según la prueba de Bromato 7, en el Laboratorio de Bromatología de la Unidad de Alimentación Animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, USAC.

2.6.1. Métodos de análisis

En las tablas VII y VIII se muestran los métodos de análisis para determinar las características fisicoquímicas de la estopa de coco mencionadas anteriormente.

Tabla VII. **Métodos para la caracterización físicas de la estopa**

Prueba	Método de referencia	Unidades	Rango
Absorción	AASHTO 265 ASTM D2216-10	%	--
Densidad	ASTM D7263-09	g/cm ³	--
Área superficial específica	---	m ² /m ³	--

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Métodos para la caracterización química de la estopa**

Prueba	Método de referencia	Unidades	Rango
Materia seca	AOAC: 930.15	%	85 a 100
	AOAC: 925.04	%	20 a 85
Proteína cruda	AOAC: 976.05 Tecator: Manual del Kjeltex Auto 1030 Analyzer	%	1 a 300
Fibra cruda	Tecator: Manual de 1010/1021 Fibertec System 1 AOAC: 962.09 Bateman	%	1 a 60
Extracto etéreo	Bateman 9.110	%	0 a 100
Cenizas	AOAC: 942.05	%	0 a 100
Extracto libre de nitrógeno	Bateman: 10.200	%	0 a 100

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.

2.7. Recolección de los datos

La recolección de los datos se realizó en cinco pasos que son: tipo de muestreo, puntos de muestreo, período de maduración, período de muestreo y tamaño de la muestra.

2.7.1. Tipo de muestreo

Una vez definidos los parámetros de control para la evaluación del modelo experimental de filtro percolador, se seleccionó el tipo de muestra recolectada. Dichas muestras fueron del tipo instantáneas, las cuales fueron almacenadas en dos recipientes plásticos de un galón.

2.7.2. Puntos de muestreo

Los puntos de muestreo fueron el afluente (entrada) y el efluente (salida) al modelo experimental de filtro percolador. En cada punto de muestreo se tomó la fecha y hora de recolección. Las muestras se transportaron en una hielera para conservar las propiedades físicas, químicas y biológicas hasta el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos ubicado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

2.7.3. Período de maduración

El período de maduración se estableció en 30 días desde el montaje de la unidad hasta la toma de la primera muestra. Este tiempo se basa en la curva de crecimiento bacteriano que se divide en las siguientes fases: adaptación, exponencial, estacionaria y muerte celular.

Figura 15. **Muestras representativas en recipiente de un galón**



Fuente: Planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II. Agosto 2012.

2.7.4. Período de muestreo

El período de muestreo del sistema se estimó en función de la vida útil de la estopa de coco, que comprende de 4 a 6 meses. Durante este período se estimó que es posible recolectar una muestra por semana, haciendo en total 24 muestras válidas para cada punto de muestreo.

2.7.5. Tamaño de la muestra

Para determinar el tamaño de la muestra, cuando los valores de la población no se conocen, se recomienda el uso de la siguiente fórmula:

$$n = \frac{n'}{1 + n'/N}$$

Donde:

n = tamaño de la muestra

$n' = \frac{S^2}{\sigma^2}$ = tamaño provisional de la muestra = varianza de la muestra/varianza de la población

S^2 = varianza de la muestra, la cual podrá determinarse en términos de probabilidad como $S^2 = p(1 - p)$

σ^2 = varianza de la población respecto a determinadas variables = $(se)^2$ = varianza poblacional

se = error estándar que está dado por la diferencia entre $\mu - \bar{X}$ = media poblacional y media muestral

$(se)^2$ = error estándar al cuadrado, que servirá para determinar σ^2

N = población

$N = 24$ muestras

$p = 95\%$, probabilidad estimada en el intervalo de confianza

$se = 5\%$, error esperado entre la media poblacional y la media muestral

Por lo que se tiene:

$$\sigma^2 = (se)^2 = (0,05)^2 = 0,0025$$

$$S^2 = p(1 - p) = 0,95(1 - 0,95) = 0,0475$$

$$n' = \frac{S^2}{\sigma^2} = \frac{0,0475}{0,0025} = 19$$

$$n = \frac{n'}{1 + n'/N} = \frac{19}{1 + 19/24} = 10,60 = 11 \text{ muestras}$$

Se consideró tomar 11 muestras de las 24 posibles, para que los datos sean representativos. Por lo tanto, se determinaron los parámetros de control a 11 muestras del afluente y 11 muestras del efluente al filtro percolador, para un total de 22 muestras estadísticamente representativas.

2.8. Proceso de análisis de datos y prueba de hipótesis

El proceso cuantitativo, parte de una idea, que va acotándose y, una vez delimitada se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o perspectiva teórica. De las preguntas se establecen tanto hipótesis como la determinación de variables; se desarrolla un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas, y se establece una serie de conclusiones respecto de la hipótesis. [7]

En la figura 16 se muestra el proceso de análisis de datos y prueba de hipótesis que se realizó durante la investigación.

Figura 16. Proceso de análisis de datos y prueba de hipótesis



Fuente: SAMPIERI, Roberto. Metodología de la investigación. p. 23.

3. DISEÑO

3.1. Variables del modelo experimental

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

Tabla IX. Variables del modelo experimental

No.	Variable	Unidad de medida
1	Características físicas de la estopa	
	a. Absorción	%
	b. Densidad	g/cm ³
	c. Área superficial	m ² /m ³
2	Características químicas de la estopa	
	a. Materia seca total	%
	b. Extracto Etéreo	%
	c. Fibra cruda	%
	d. Ceniza	%
	e. Extracto libre de nitrógeno	%
	f. Potencial de hidrógeno	unidades
3	Características del agua residual	
	a. DBO ₅	mg/L
	b. DQO	mg/L
	c. Carga contaminante	kg DBO ₅ /d
	d. Temperatura	°C
	e. Constante de tratabilidad	m/d
4	Características hidráulicas del modelo	
	a. Carga hidráulica volumétrica	m ³ /m ³ d
	b. Caudal	m ³ /d
	c. Tiempo de retención	s
	d. Velocidad de filtración	m ³ /m ² d
	e. Carga hidráulica vertical	m ³ /m ³ d
	f. Carga hidráulica superficial	m ³ /m ² d
	g. Carga orgánica vertical	kg DBO ₅ /m ³ d
	h. Carga orgánica superficial	kg DBO ₅ /m ² d

Fuente: elaboración propia.

3.2. Caracterización fisicoquímica de la estopa

La fibra cortada de 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. La fibra de bonote tiene una capacidad de estiramiento de 29,04%, con un módulo de rigidez de 1,8924 dinas/cm². 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. [14]

Las características físicas de la estopa de coco 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 a dos muestras de estopa de coco, una de ocho meses y otra de un mes de secado.

Tabla X. **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 ³	0,222 g/cm ³
Área superficial específica	50 m ² /m ³	

Fuente: elaboración propia.

En la figura 17 se observan las muestras de estopa de coco a diferentes tiempos de secado, las muestra corresponde a: No. 1 ocho meses y No. 2 un mes. Ambas muestras fueron escogidas aleatoriamente del material disponible.

Figura 17. **Muestras de estopa a diferente tiempo de secado**



Fuente: elaboración propia.

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 a dos muestras de estopa de coco, una de ocho meses y otra de un mes de secado.

Tabla XI. **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	
Base	Seca	Como alimento	Seca	Como alimento
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.

3.3. Bases de cálculo

Para un filtro percolador, sin recirculación, suponiendo modelo de flujo en pistón y tasa de remoción de DBO₅, según una ley de primer orden, se tiene: [19]

$$\frac{dS}{dt} = -cS \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

S = concentración de sustrato, generalmente mg/L de DBO₅ soluble

c = constante de remoción de sustrato, base natural, d⁻¹

t = tiempo de contacto, d

De la ecuación 1 se obtiene las ecuaciones 2 y 3

$$\int_{S_a}^{S_e} \frac{dS}{S} = -c \int_0^t dt \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-ct} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

S_e = DBO₅ soluble del efluente del filtro, mg/L

S_a = DBO₅ soluble del afluente al filtro, mg/L

Para filtros percoladores con recirculación, es decir, cuando la DBO₅ del caudal afluente Q es diluida con un caudal recirculado Q_R, se tiene: [19]

$$QS_o + Q_R S_e = (Q + Q_R) S_a \quad (\text{Ecuación 4})$$

Llamando R, la relación de recirculación:

$$R = \frac{Q_R}{Q} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Entonces:

$$S_o + RS_e = (1 + R)S_a \quad (\text{Ecuación 6})$$

Por tanto,

$$S_a = \frac{S_o + RS_e}{1 + R} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

S_o = DBO₅ soluble del agua residual, sin incluir recirculación, mg/L

S_a = DBO₅ soluble del afluente al filtro, mg/L

En la ecuación anterior se observa que cuando no hay recirculación:

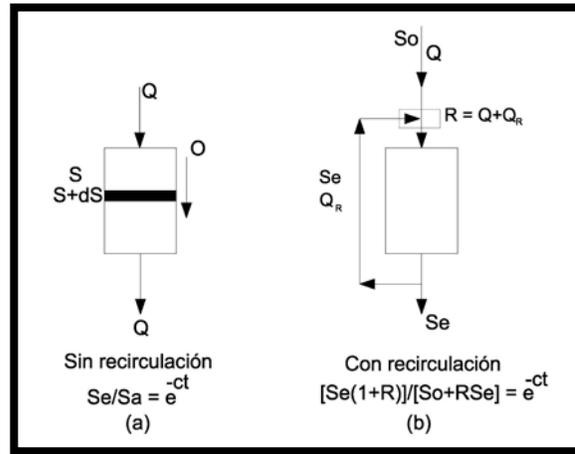
$$R = 0 \text{ y } S_a = S_o$$

Reemplazando la ecuación 7 en la ecuación 3 se obtiene la ecuación 8

$$\frac{S_e(1+R)}{S_o + RS_e} = e^{-ct} \quad (\text{Ecuación 8})$$

En algunos casos, el uso de cargas hidráulicas grandes con recirculaciones grandes da como resultado, en la práctica, eficiencias menores de remoción de DBO₅. Sin embargo, en la mayoría de los casos se considera que la recirculación es benéfica e incrementa la eficiencia del proceso. [19]

Figura 18. Recirculación en un filtro percolador



Fuente: ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales. p. 562.

3.3.1. Modelo de Eckenfelder

Eckenfelder modifica la ecuación 3, así:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-cSt} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

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 percolador, como lo hacen Velz, Shulze, Howland, Sinkoff y otro, así: [19]

$$t = \frac{CD}{q^n} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

D = profundidad del filtro, m

q = carga hidráulica, m/d

C, n = constantes que caracterizan el medio y cuyos valores dependen de las unidades utilizadas para cuantificar t

Reemplazando la ecuación 10 en la ecuación 9, se tiene:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-KSD/q^n} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

K = cC = constante modificada de remoción de sustrato, base natural (m/d)ⁿ

En la ecuación 11, K tiene unidades de m/d para n = 1 y C es adimensional. Sin embargo, los valores de K son función de las unidades usadas para expresar las diferentes variables y del valor de n. La ecuación anterior es la ecuación recomendada por Eckenfelder para predecir la remoción de materia orgánica en filtro percolador. La ecuación 11 también se acostumbra expresarla así: [19]

$$\frac{S_e}{S_a} = 10^{-kSD/q^n} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

k = Constante modificada de remoción de sustrato, base decimal (m/d)ⁿ

Para filtros percoladores, con recirculación, de las ecuaciones 7 y 11 se despeja directamente la carga hidráulica superficial requerida q , para una DBO_5 específica del efluente S_e y una DBO_5 afluente del agua residual S_o , con un medio de soporte de crecimiento de superficie específica S y profundidad D . [19]

$$q = \left[\frac{KSD}{\ln \left[\frac{1+R(S_e/S_o)}{(1+R)(S_e/S_o)} \right]} \right]^{1/n} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Para filtros percoladores sin recirculación, de la ecuación 13 se obtiene la ecuación 14

$$q = \left[\frac{KSD}{\ln [S_o/S_e]} \right]^{1/n} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Para tener en cuenta el efecto de la temperatura sobre el valor de K , se puede usar la ecuación clásica de Arrhenius, ecuación 15

$$K_T = K_{20} \theta^{T-20} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

K_T = constante de remoción a la temperatura T

K_{20} = constante de remoción a 20 °C

T = temperatura del agua

θ = coeficiente de temperatura

$\theta = 1,035$ para filtros percoladores. Otros autores consideran $\theta = 1,0$ para temperaturas mayores de 10 °C, o sea que no sería necesario hacer la corrección por temperatura.

Cuando con la ecuación 11 no se encuentra correlaciones experimentales apropiadas, Eckenfelder recomienda usar el modelo expresado por las ecuaciones 16 y 17, con el cambio correspondiente en las unidades de expresión de K y k: $(m/d)^n$ (mg/L). [19]

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-KSD/q^n S_a} \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$\frac{S_e}{S_a} = 10^{-kSD/q^n S_a} \quad (\text{Ecuación 17})$$

3.3.2. Modelo de Bruce & Merkens

Los autores mencionados desarrollaron, en 1973, la ecuación 18, para el diseño de filtros percoladores:

$$S_e = s_a e^{-K_T S_a q^{-b}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

En filtros percoladores con recirculación, la DBO_5 del afluente al filtro se calcula por la ecuación 19.

$$S_a = \frac{S_o + RS_e}{1+R} \quad (\text{Ecuación 19})$$

La relación de recirculación se expresa según la ecuación 20

$$R = \frac{Q_R}{Q} \quad (\text{Ecuación 20})$$

El valor de K_T se puede calcular por la ecuación 21, o por la ecuación 22, 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. [19]

$$K_T = 0,1(1,08)^{T-20} \quad \text{(Ecuación 21)}$$

$$K_T = 0,037(1,08)^{T-15} \quad \text{(Ecuación 22)}$$

La carga hidráulica volumétrica se expresa según la ecuación 23:

$$q = \frac{Q}{V} \quad \text{(Ecuación 23)}$$

De la ecuación 18, para $a = b = 1,0$, se obtiene la ecuación 24.

$$q = \frac{K_T S}{\ln(S_a/S_e)} \quad \text{(Ecuación 24)}$$

Reemplazando la ecuación 23 en la ecuación 24, se obtiene la ecuación 25.

$$V = \frac{Q \ln(S_a/S_e)}{K_T S} \quad \text{(Ecuación 25)}$$

Donde:

S_e = DBO₅ del efluente sedimentado del filtro, mg/L

S_a = DBO₅ del afluente al filtro, incluyendo recirculación, mg/L

S_o = DBO₅ del afluente, sin recirculación, o efluente primario, mg/L

R = relación de recirculación

Q_R = caudal de recirculación, m³/d

Q = caudal afluente, sin incluir recirculación, m³/d

K_T = 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^2/m^3

q = carga hidráulica volumétrica, sin incluir recirculación, m^3/m^3d

V = volumen del filtro, m^3

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

3.4. Diseño hidráulico del modelo experimental

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

Tabla XII. Valores iniciales en el diseño del modelo experimental

Característica	Dimensión y/o unidades
DBO ₅ afluente	180 mg/L (promedio)
DQO afluente	365 mg/L (promedio)
Temperatura	24,2 °C (promedio)
Eficiencia estimada	80%
DBO ₅ efluente (esperada)	35 mg/L
DQO efluente (esperada)	75 mg/L
Caudal de tratamiento máximo "Q"	¿¿??
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^2/m^3 (promedio)
Fluido de contacto	Efluente sedimentador primario
Material de construcción	Metal y concreto

Fuente: elaboración propia.

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

$$IB = \text{DBO}_5 / \text{DQO} = 180 \text{ mg/L} / 365 \text{ mg/L} = 0,50$$

El valor del índice de biodegradabilidad es mayor a 0,40, por lo tanto el agua residual es tratable por medio biológico.

- Modelo de Bruce & Merkens

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, calcular la carga hidráulica “q” en m/d y el caudal de tratamiento máximo en el afluente “Q” en m³/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 17, se tiene:

$$S_e = s_a e^{-K_T S^a q^{-b}}$$

$$\frac{35 \text{ mg/L}}{180 \text{ mg/L}} = e^{-K_T S q^{-1}}$$

$$\ln \frac{35}{180} = \frac{-K_T (50 \text{ m}^2/\text{m}^3)}{q}$$

$$\frac{-1.637609}{-50} = \frac{K_T}{q}$$

$$q = \frac{K_T}{0,0327522}$$

Según la ecuación 21, se encuentra K_T

$$K_T = 0,037(1,08)^{T-15}$$

$$K_T = 0,037(1,08)^{24.2-15}$$

$$K_T = 0,075 \text{ m/d}$$

Sustituyendo K_T 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 22, se obtiene el caudal Q:

$$q = \frac{Q}{V}$$

$$Q = qV$$

$$Q = \left(2,29 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d} \right) (0,52842 \text{ m}^3)$$

$$Q = 1,21 \text{ m}^3/\text{d}$$

Se toma el tiempo de contacto o tiempo de retención según la ecuación 9, descrita por Velz, Shulze, Howland, Sinkoff y otro, así:

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

Donde:

C = constante de 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

$$CO = DBO_5 * Q$$

$$CO = \left(180 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\,000\text{L}}{\text{m}^3} * \frac{1\text{kg}}{1\,000\,000\text{ mg}} \right) \left(1,21 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right)$$

$$CO = 0,2178 \text{ kg } DBO_5 / \text{d}$$

Carga orgánica vertical

$$COV = \frac{CO}{V}$$

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

$$COV = 0,4122 \text{ kg } DBO_5 / \text{m}^3 \text{d}$$

Carga orgánica superficial

$$COS = \frac{CO}{As}$$

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

$$COS = 0,0082 \text{ kg } DBO_5 / \text{m}^2 \text{d}$$

Tabla XIII. **Parámetros de diseño hidráulico del modelo experimental**

Característica	Dimensión y/o unidades
DBO ₅ afluente	180 mg/L
DQO afluente	365 mg/L
Temperatura del afluente	24,2 °C
Eficiencia esperada	80%
DBO ₅ 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 ² /m ³
Área superficial del medio	26,42 m ²
Constante de tratabilidad K _T	0,075 m/d
Carga hidráulica volumétrica q	2,29 m ³ /m ³ d
Caudal Q	1,21 m ³ /d
Tiempo de contacto t	45 s
Velocidad de filtración v	4,59 m ³ /m ² d
Carga hidráulica vertical CHV	2,29 m ³ /m ³ d
Carga hidráulica superficial CHS	0,046 m ³ /m ² d
Carga orgánica o carga contaminante CO	0,2178 kg DBO ₅ /d
Carga orgánica vertical COV	0,4122 kg DBO ₅ /m ³ d
Carga orgánica superficial COS	0,0082 kg DBO ₅ /m ² d

Fuente: elaboración propia.

4. CONSTRUCCIÓN

4.1. Descripción de la planta piloto

La planta piloto de tratamiento de aguas residuales: Ing. Arturo Pazos, ubicada en la colonia Aurora II zona 13, de la Ciudad de Guatemala; a inmediaciones del Aeropuerto Internacional La Aurora. Pertenece a la subcuenca del lago de Amatitlán, con un área de 382 km². La altitud varía desde 1 457 msnm en la parte más baja y 1 502 msnm en la parte más alta. [6]

La descarga final de la planta se realiza al río Guadroncito, afluente del río Pinula, río Molino, río Villalobos y cuya descarga final llega al lago de Amatitlán. La colonia Aurora II tiene 560 viviendas, aproximadamente, con una densidad de seis habitantes por vivienda. Tiene una población media de 3 360 habitantes que generan un caudal de agua residual de 3,5 L/s. [6]

La planta piloto cuenta con seis sistemas de tratamiento independientes que trabajan por gravedad; los cuales se mencionan a continuación:

- Sistema lagunar
- Sistema de riego, postsedimentación primaria
- Sistema RAFA, filtro percolador, estanque de jancitos
- Biodigestor clarificador
- Sistema de filtros percoladores torre
- Sistema RAFA, filtro percolador, sedimentador secundario y patio de secado de lodos (todas las unidades prefabricadas de polietileno de alta densidad)

4.1.1. Localización y ubicación

La planta piloto colinda al norte con el Observatorio Nacional, al este con el Aeropuerto Internacional La Aurora, al sur y oeste con hondonadas o barrancos. Las coordenadas geográficas del sitio son: [6]

14° 34' 36,8" de latitud norte

90° 32' 13,4" de longitud oeste

Figura 19. Localización y ubicación de la planta piloto

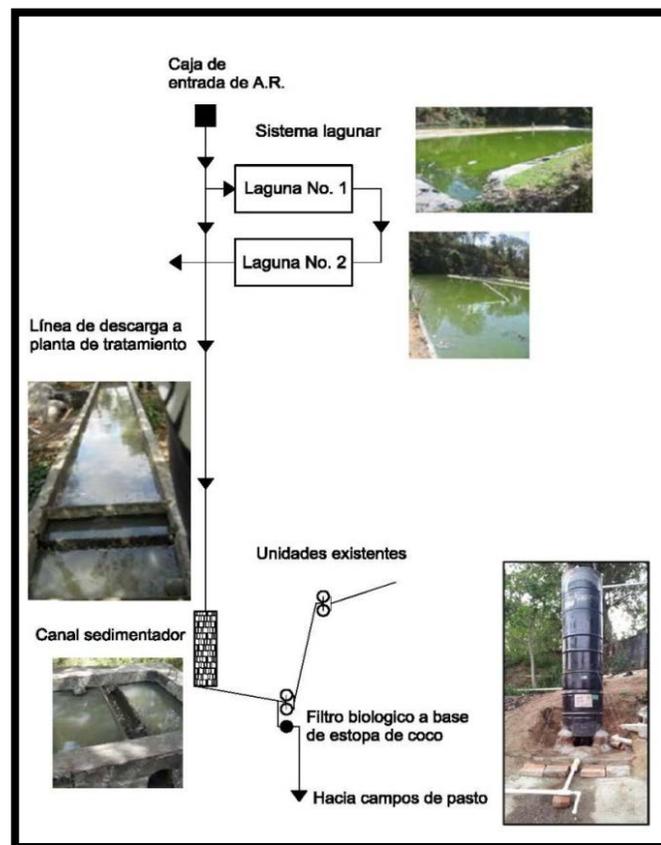


Fuente: Google Earth. Consulta: Noviembre de 2012.

4.2. Ubicación del modelo experimental dentro del proceso

El modelo experimental se ubicó en la fase de tratamiento secundario, después del canal sedimentador primario. A través de una línea de tubería PVC de 1 pulgada de diámetro, se condujo el caudal de diseño igual a $1,21 \text{ m}^3/\text{d}$. Luego del proceso de filtración es transportado hacia un campo de pastos ubicado a 5 metros del efluente. En la figura 20 se muestra la ubicación del modelo experimental dentro del proceso.

Figura 20. Ubicación del modelo experimental dentro del proceso



Fuente: Planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II. Agosto 2012.

4.3. Montaje del modelo experimental

El montaje del modelo experimental de filtro percolador se realizó en tres etapas: sistema de recolección, cuerpo del filtro y sistema de distribución. En las figuras 21, 22 y 23 se muestran los detalles en la construcción del modelo experimental en las diferentes etapas.

4.3.1. Sistema de recolección

Para la construcción del sistema de recolección, se realizó una base de concreto armado y sobre ésta una estructura de ladrillos intercalados. Esto facilitaba la circulación del aire, para la conservación de microorganismos aerobios.

El sistema tiene una pendiente del 1% para que el agua filtrada no se estanque. El efluente es conducido por una tubería de 2" y luego reducido a una tubería de 1". Para la recolección de la muestra, se instaló una tubería de ½" con su respectivo cierre.

Figura 21. Sistema de recolección y evacuación de agua filtrada



Fuente: Planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II. Agosto 2012.

4.3.2. Cuerpo del filtro

Se utilizaron toneles metálicos por ser livianos, de bajo costo y en consideración al espacio disponible en la planta piloto. Dichos toneles se unieron por medio de soldadura autógena, eliminando previamente el fondo y la tapadera de los mismos. El cuerpo del filtro tiene una altura de 2 metros, y 58 centímetros de diámetro; en el fondo se colocó una malla metálica para jardín de medio centímetro, que retendría la estopa de coco dentro de la estructura.

Figura 22. **Montaje final del modelo experimental**



Fuente: Planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II. Agosto 2012.

4.3.3. Sistema de distribución

En la figura 23 se muestra el sistema de distribución, cuyas funciones son: transportar el agua sedimentada al modelo experimental, y posteriormente distribuirla uniformemente en el mismo. Para la regulación del caudal, limpieza, mantenimiento o cambio de tubería; fue instalada una llave de paso de ½”.

Figura 23. Sistema de distribución de agua sedimentada



Fuente: Planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II. Agosto 2012.

5. EVALUACIÓN Y RESULTADOS

Durante los meses de junio a octubre de 2012 se evaluó el rendimiento del modelo experimental, según los niveles de reducción de nitrógeno y fósforo total. Asimismo, se determinó la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, índice de biodegradabilidad, color aparente, sólidos sedimentables, potencial de hidrógeno y temperatura en el agua residual, antes y después de la filtración.

La eficiencia se calculó con la siguiente expresión:

$$\text{Eficiencia}(\%) = \left[\frac{(\text{Entrada} - \text{Salida})}{\text{Entrada}} \right] * 100$$

Si los datos de salida son mayores a la entrada, se producen valores negativos en la eficiencia. Por lo tanto, el proceso de filtración del sistema no es satisfactorio.

Los resultados de las pruebas de laboratorio se presentan en las tablas XIV, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX XX, XXI y XXII, describen el comportamiento de los parámetros de control durante el tiempo de muestreo. Estas tablas muestran las características siguientes: fecha, caudal, parámetro analizado, unidad de medida, entrada, salida, eficiencia, media aritmética, valor mínimo y máximo.

5.1. Nitrógeno total

En la tabla XIV se presenta la concentración de nitrógeno total del agua residual en la entrada y salida al modelo experimental de filtro percolador. Asimismo, se muestra la fecha, caudal, parámetro de control, unidad de medida, eficiencia en porcentaje, media, valor mínimo y máximo.

Tabla XIV. Nitrógeno total

No.	Fecha	Caudal m ³ /d	Parámetro	Unidad de medida	Entrada	Salida	Eficiencia (%)
1	07/06/2012	1,21	Nitrógeno total	mg/L	44	29	34
2	14/06/2012	1,21	Nitrógeno total	mg/L	40	34	15
3	21/06/2012	1,21	Nitrógeno total	mg/L	52	39	25
4	28/06/2012	1,21	Nitrógeno total	mg/L	40	34	15
5	05/07/2012	1,21	Nitrógeno total	mg/L	45	20	56
6	12/07/2012	1,21	Nitrógeno total	mg/L	45	24	47
7	19/07/2012	1,21	Nitrógeno total	mg/L	36	22	39
8	22/08/2012	1,21	Nitrógeno total	mg/L	44	36	18
9	26/09/2012	1,21	Nitrógeno total	mg/L	47	29	38
10	03/10/2012	1,21	Nitrógeno total	mg/L	22	15	32
11	10/10/2012	1,21	Nitrógeno total	mg/L	38	20	47
Media					41	27	33
Min					22	15	15
Max					52	39	56

Fuente: elaboración propia.

5.2. Fósforo total

En la tabla XV se presenta la concentración de fósforo total del agua residual en la entrada y salida al modelo experimental de filtro percolador. Asimismo, se muestra la fecha, caudal, parámetro de control, unidad de medida, eficiencia en porcentaje, media, valor mínimo y máximo.

Tabla XV. Fósforo total

No.	Fecha	Caudal m ³ /d	Parámetro	Unidad de medida	Entrada	Salida	Eficiencia (%)
1	07/06/2012	1,21	Fósforo total	mg/L	9,9	9,3	6
2	14/06/2012	1,21	Fósforo total	mg/L	16,2	17,9	-10
3	21/06/2012	1,21	Fósforo total	mg/L	15,3	14,0	8
4	28/06/2012	1,21	Fósforo total	mg/L	16,2	17,9	-10
5	05/07/2012	1,21	Fósforo total	mg/L	3,5	5,3	-51
6	12/07/2012	1,21	Fósforo total	mg/L	7,1	8,4	-18
7	19/07/2012	1,21	Fósforo total	mg/L	9,1	11,3	-24
8	22/08/2012	1,21	Fósforo total	mg/L	9,6	13,6	-42
9	26/09/2012	1,21	Fósforo total	mg/L	14,6	18,3	-25
10	03/10/2012	1,21	Fósforo total	mg/L	9,2	13,8	-50
11	10/10/2012	1,21	Fósforo total	mg/L	10,3	14,7	-43
Media					11,0	13,1	-24
Min					3,5	5,3	-51
Max					16,2	18,3	8

Fuente: elaboración propia.

5.3. Demanda bioquímica de oxígeno

En la tabla XVI se presenta la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno del agua residual en la entrada y salida al modelo experimental de filtro percolador. Asimismo, se muestra la fecha, caudal, parámetro de control, unidad de medida, eficiencia en porcentaje, media, valor mínimo y máximo.

Tabla XVI. Demanda bioquímica de oxígeno

No.	Fecha	Caudal m ³ /d	Parámetro	Unidad de medida	Entrada	Salida	Eficiencia (%)
1	07/06/2012	1,21	DBO ₅	mg/L	197	153	22
2	14/06/2012	1,21	DBO ₅	mg/L	154	171	-11
3	21/06/2012	1,21	DBO ₅	mg/L	151	199	-32
4	28/06/2012	1,21	DBO ₅	mg/L	195	230	-18
5	05/07/2012	1,21	DBO ₅	mg/L	189	232	-23
6	12/07/2012	1,21	DBO ₅	mg/L	174	229	-32
7	19/07/2012	1,21	DBO ₅	mg/L	199	221	-11
8	22/08/2012	1,21	DBO ₅	mg/L	176	192	-9
9	26/09/2012	1,21	DBO ₅	mg/L	176	218	-24
10	03/10/2012	1,21	DBO ₅	mg/L	181	208	-15
11	10/10/2012	1,21	DBO ₅	mg/L	175	220	-26
Media					179	207	-16
Min					151	153	-32
Max					199	232	22

Fuente: elaboración propia.

5.4. Demanda química de oxígeno

En la tabla XVII se presenta la concentración de la demanda química de oxígeno del agua residual en la entrada y salida al modelo experimental de filtro percolador. Asimismo, se muestra la fecha, caudal, parámetro de control, unidad de medida, eficiencia en porcentaje, media, valor mínimo y máximo.

Tabla XVII. Demanda química de oxígeno

No.	Fecha	Caudal m³/d	Parámetro	Unidad de medida	Entrada	Salida	Eficiencia (%)
1	07/06/2012	1,21	DQO	mg/L	359	325	9
2	14/06/2012	1,21	DQO	mg/L	661	670	-1
3	21/06/2012	1,21	DQO	mg/L	330	339	-3
4	28/06/2012	1,21	DQO	mg/L	661	670	-1
5	05/07/2012	1,21	DQO	mg/L	350	382	-9
6	12/07/2012	1,21	DQO	mg/L	365	383	-5
7	19/07/2012	1,21	DQO	mg/L	278	290	-4
8	22/08/2012	1,21	DQO	mg/L	348	366	-5
9	26/09/2012	1,21	DQO	mg/L	223	235	-5
10	03/10/2012	1,21	DQO	mg/L	306	323	-6
11	10/10/2012	1,21	DQO	mg/L	355	372	-5
Media					385	396	-3
Min					223	235	-9
Max					661	670	9

Fuente: elaboración propia.

5.5. Índice de biodegradabilidad

En la tabla XVIII se presenta el índice de biodegradabilidad del agua residual en la entrada y salida al modelo experimental de filtro percolador. Asimismo, se muestra la fecha, caudal, parámetro de control, unidad de medida, eficiencia en porcentaje, media, valor mínimo y máximo.

Tabla XVIII. Índice de biodegradabilidad

No.	Fecha	Caudal m ³ /d	Parámetro	Unidad de medida	Entrada	Salida	Eficiencia (%)
1	07/06/2012	1,21	DBO ₅ /DQO	adimensional	0,55	0,47	14
2	14/06/2012	1,21	DBO ₅ /DQO	adimensional	0,23	0,26	-10
3	21/06/2012	1,21	DBO ₅ /DQO	adimensional	0,46	0,59	-28
4	28/06/2012	1,21	DBO ₅ /DQO	adimensional	0,30	0,34	-16
5	05/07/2012	1,21	DBO ₅ /DQO	adimensional	0,54	0,61	-12
6	12/07/2012	1,21	DBO ₅ /DQO	adimensional	0,48	0,60	-25
7	19/07/2012	1,21	DBO ₅ /DQO	adimensional	0,72	0,76	-6
8	22/08/2012	1,21	DBO ₅ /DQO	adimensional	0,51	0,52	-4
9	26/09/2012	1,21	DBO ₅ /DQO	adimensional	0,79	0,93	-18
10	03/10/2012	1,21	DBO ₅ /DQO	adimensional	0,59	0,64	-9
11	10/10/2012	1,21	DBO ₅ /DQO	adimensional	0,49	0,59	-20
Media					0,51	0,57	-12
Min					0,23	0,26	-28
Max					0,79	0,93	14

Fuente: elaboración propia.

5.6. Color aparente

En la tabla XIX se presenta el color aparente del agua residual en la entrada y salida al modelo experimental de filtro percolador. Asimismo, se muestra la fecha, caudal, parámetro de control, unidad de medida, eficiencia en porcentaje, media, valor mínimo y máximo.

Tabla XIX. **Color aparente**

No.	Fecha	Caudal m ³ /d	Parámetro	Unidad de medida	Entrada	Salida	Eficiencia (%)
1	07/06/2012	1.21	Color aparente	UC	180	80	56
2	14/06/2012	1.21	Color aparente	UC	250	110	56
3	21/06/2012	1.21	Color aparente	UC	410	220	46
4	28/06/2012	1.21	Color aparente	UC	450	350	22
5	05/07/2012	1.21	Color aparente	UC	520	740	-42
6	12/07/2012	1.21	Color aparente	UC	550	850	-55
7	19/07/2012	1.21	Color aparente	UC	610	970	-59
8	22/08/2012	1.21	Color aparente	UC	1093	1342	-23
9	26/09/2012	1.21	Color aparente	UC	1525	1675	-10
10	03/10/2012	1.21	Color aparente	UC	825	950	-15
11	10/10/2012	1.21	Color aparente	UC	770	840	-9
Media					653	739	-3
Min					180	80	-59
Max					1525	1675	56

Fuente: elaboración propia.

5.7. Sólidos sedimentables

En la tabla XX se presentan los sólidos sedimentables del agua residual en la entrada y salida al modelo experimental de filtro percolador. Asimismo, se muestra la fecha, caudal, parámetro de control, unidad de medida, eficiencia en porcentaje, media, valor mínimo y máximo.

Tabla XX. Sólidos sedimentables

No.	Fecha	Caudal m ³ /d	Parámetro	Unidad de medida	Entrada	Salida	Eficiencia (%)
1	07/06/2012	1,21	Sólidos sedimentables	cm ³ /L	0	0	0
2	14/06/2012	1,21	Sólidos sedimentables	cm ³ /L	5	6	-20
3	21/06/2012	1,21	Sólidos sedimentables	cm ³ /L	7	3	57
4	28/06/2012	1,21	Sólidos sedimentables	cm ³ /L	5	6	-20
5	05/07/2012	1,21	Sólidos sedimentables	cm ³ /L	1	6	-500
6	12/07/2012	1,21	Sólidos sedimentables	cm ³ /L	1	9	-800
7	19/07/2012	1,21	Sólidos sedimentables	cm ³ /L	1	10	-900
8	22/08/2012	1,21	Sólidos sedimentables	cm ³ /L	2	7	-250
9	26/09/2012	1,21	Sólidos sedimentables	cm ³ /L	3	8	-167
10	03/10/2012	1,21	Sólidos sedimentables	cm ³ /L	1	3	-200
11	10/10/2012	1,21	Sólidos sedimentables	cm ³ /L	2	7	-250
Media					3	6	-277
Min					0	0	-900
Max					7	10	57

Fuente: elaboración propia.

5.8. Potencial de hidrógeno

En la tabla XXI se presenta el potencial de hidrógeno del agua residual en la entrada y salida al modelo experimental de filtro percolador. Asimismo, se muestra la fecha, caudal, parámetro de control, unidad de medida, eficiencia en porcentaje, media, valor mínimo y máximo.

Tabla XXI. Potencial de hidrógeno

No.	Fecha	Caudal m ³ /d	Parámetro	Unidad de medida	Entrada	Salida	Eficiencia (%)
1	07/06/2012	1,21	Potencial de hidrógeno	unidades	7,16	7,44	-4
2	14/06/2012	1,21	Potencial de hidrógeno	unidades	7,20	7,36	-2
3	21/06/2012	1,21	Potencial de hidrógeno	unidades	7,12	7,40	-4
4	28/06/2012	1,21	Potencial de hidrógeno	unidades	7,20	7,36	-2
5	05/07/2012	1,21	Potencial de hidrógeno	unidades	6,98	7,23	-4
6	12/07/2012	1,21	Potencial de hidrógeno	unidades	7,10	7,40	-4
7	19/07/2012	1,21	Potencial de hidrógeno	unidades	7,03	7,36	-5
8	22/08/2012	1,21	Potencial de hidrógeno	unidades	6,84	7,33	-7
9	26/09/2012	1,21	Potencial de hidrógeno	unidades	6,73	7,38	-10
10	03/10/2012	1,21	Potencial de hidrógeno	unidades	7,35	7,50	-2
11	10/10/2012	1,21	Potencial de hidrógeno	unidades	6,77	7,41	-9
Media					7,04	7,38	-5
Min					6,73	7,23	-10
Max					7,35	7,50	-2

Fuente: elaboración propia.

5.9. Temperatura

En la tabla XXII se presenta la temperatura del agua residual en la entrada y salida al modelo experimental de filtro percolador. Asimismo, se muestra la fecha, caudal, parámetro de control, unidad de medida, eficiencia en porcentaje, media, valor mínimo y máximo.

Tabla XXII. **Temperatura**

No.	Fecha	Caudal m ³ /d	Parámetro	Unidad de medida	Entrada	Salida	Eficiencia (%)
1	07/06/2012	1,21	Temperatura	°C	22,0	21,7	1
2	14/06/2012	1,21	Temperatura	°C	22,0	21,5	2
3	21/06/2012	1,21	Temperatura	°C	20,0	19,5	3
4	28/06/2012	1,21	Temperatura	°C	20,0	19,5	3
5	05/07/2012	1,21	Temperatura	°C	22,0	21,7	1
6	12/07/2012	1,21	Temperatura	°C	22,0	21,6	2
7	19/07/2012	1,21	Temperatura	°C	23,0	22,5	2
8	22/08/2012	1,21	Temperatura	°C	22,5	21,4	5
9	26/09/2012	1,21	Temperatura	°C	23,5	23,0	2
10	03/10/2012	1,21	Temperatura	°C	25,8	25,6	1
11	10/10/2012	1,21	Temperatura	°C	24,6	23,7	4
Media					22,5	22,0	2
Min					20,0	19,5	1
Max					25,8	25,6	5

Fuente: elaboración propia.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El nitrógeno total y la temperatura mostraron reducciones en los datos de salida. Por lo tanto, la eficiencia del modelo experimental es positiva y satisfactoria.

Los parámetros que presentaron incrementos en los datos de salida fueron: fósforo total, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, índice de biodegradabilidad, color aparente, sólidos sedimentables y potencial de hidrógeno. Por lo tanto, la eficiencia del modelo experimental es negativa y no satisfactoria.

Los resultados indican que la estopa de coco no es eficiente para la reducción de nutrientes, porque eleva el fósforo total en 24% y reduce el nitrógeno total un 33%. Este comportamiento muestra que el medio filtrante no es adecuado para el proceso de filtración biológica.

A continuación se presenta el análisis y discusión de resultados para cada uno de los parámetros de control. En las figuras 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 y 41 se muestran las gráficas de barras correspondientes a los datos de entrada, salida y la eficiencia en porcentaje del modelo experimental.

6.1. Nitrógeno total

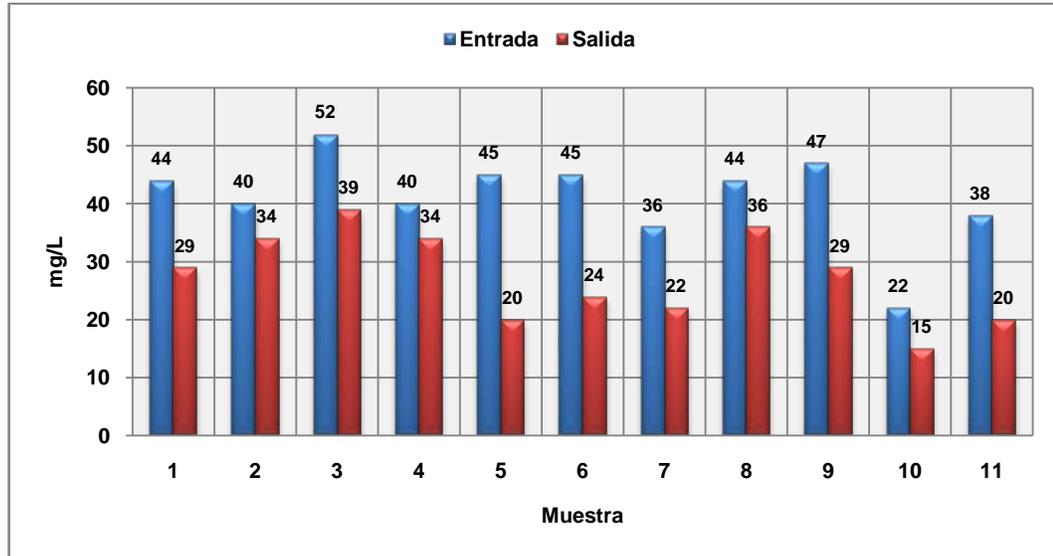
La figura 24 presenta la concentración de nitrógeno total en el agua residual de entrada y salida al modelo experimental. Se puede observar que los valores en el afluente varían entre 22 y 52 mg/L-N, y en el efluente entre 15 y 39 mg/L-N. A partir de estos datos se calcularon los valores medios iguales a 41 y 27 mg/L-N, respectivamente.

La figura 25 muestra la eficiencia en porcentaje de nitrógeno total que se obtuvo en el proceso de filtración. Dicha eficiencia varió entre 15 y 56 %, con un promedio de 33%. Estos valores indican que la estopa de coco tiene la capacidad de reducir el nitrógeno total con un 33% de efectividad.

El porcentaje de eficiencia demuestra que los microorganismos presentes en la estopa de coco, asimilan el nitrógeno amoniacal y lo incorporan a su masa celular. Por tanto, se considera que la estopa es un medio adecuado para el crecimiento de las bacterias desnitrificantes.

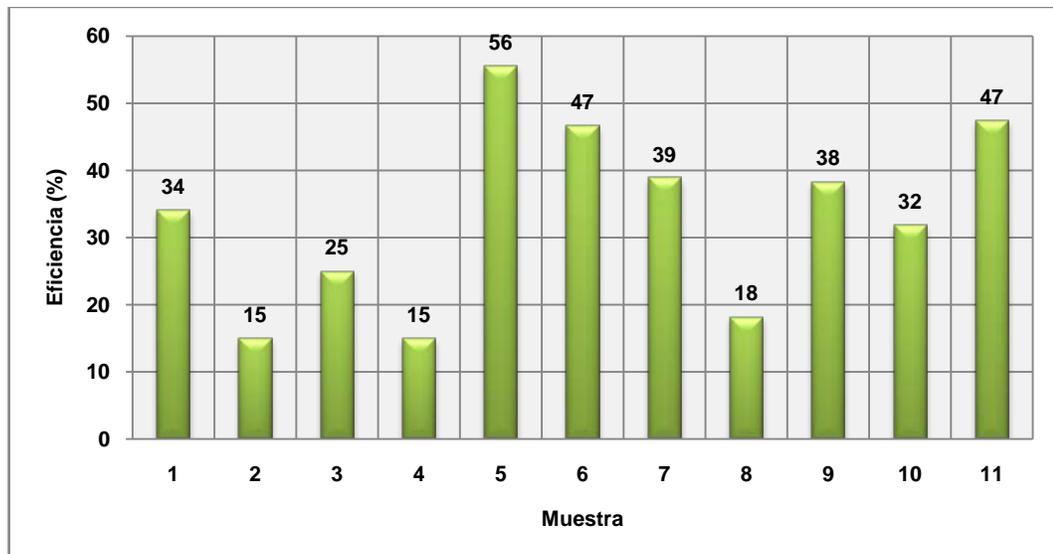
Los resultados anteriores comprueban la hipótesis planteada hasta un 50%, ya que es posible utilizar la estopa de coco como medio filtrante en un modelo experimental de filtro percolador, para la reducción de nitrógeno total de las aguas residuales de origen doméstico. El 50% restante, se comprobó con el análisis de resultados respecto al fósforo total, el cual se discute a continuación.

Figura 24. **Nitrógeno total**



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Eficiencia en nitrógeno total**



Fuente: elaboración propia.

6.2. Fósforo total

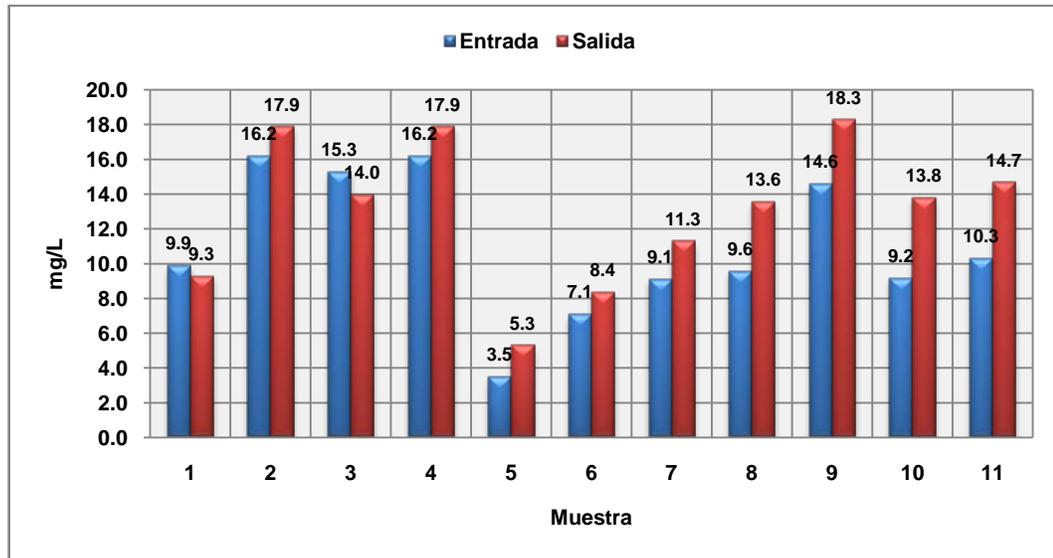
La figura 26 presenta la concentración de fósforo total en el agua residual de entrada y salida al modelo experimental. Se puede observar que los valores en el afluente varían entre 3,5 y 16,2 mg/L-P, y en el efluente entre 5,3 y 18,3 mg/L-P. A partir de estos datos se calcularon los valores medios iguales a 11,0 y 13,1 mg/L-P, respectivamente.

La figura 27 muestra la eficiencia en porcentaje de fósforo total que se obtuvo en el proceso de filtración. Dicha eficiencia varió entre -51 y 8%, con promedio de -24%. Estos valores indican que la estopa de coco no cuenta con la capacidad de reducir el fósforo del agua residual, debido a que los microorganismos presentes en ella no logran la asimilación del mismo; por el contrario lo incrementan.

El fósforo es uno de los parámetros que intervienen en el proceso de eutrofización de los cuerpos receptores y el incremento de éste no es satisfactorio para el objetivo general de la investigación. Este comportamiento se debe al proceso de descomposición de la estopa el cual llevó al desprendimiento continuo del fósforo contenido en las fibras.

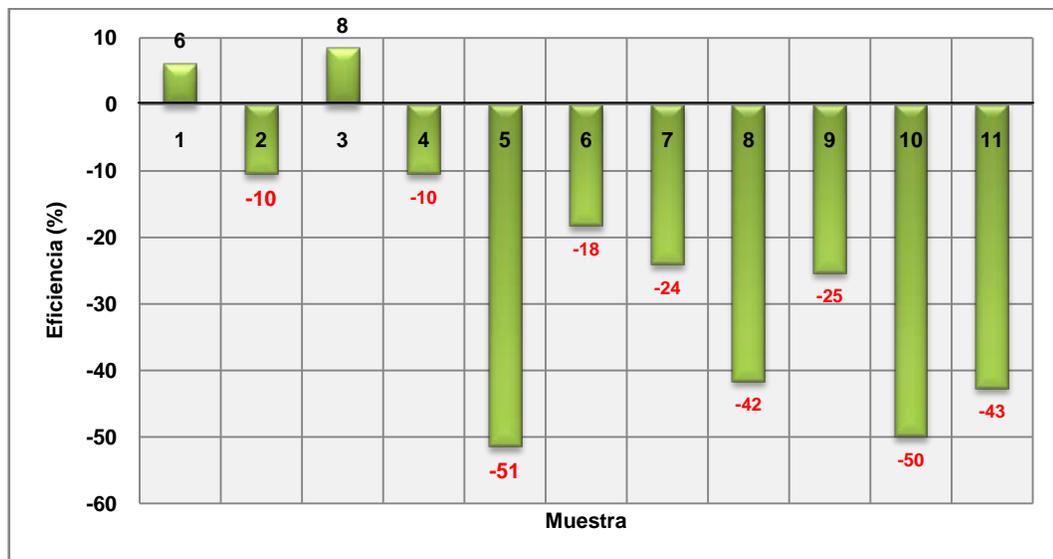
Los resultados anteriores, no comprueban la hipótesis planteada en el 50% restante, porque no es posible utilizar la estopa de coco como medio filtrante en un modelo experimental de filtro percolador, para la reducción de fósforo total de las aguas residuales de origen doméstico.

Figura 26. Fósforo total



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Eficiencia en fósforo total



Fuente: elaboración propia.

6.3. Demanda bioquímica de oxígeno

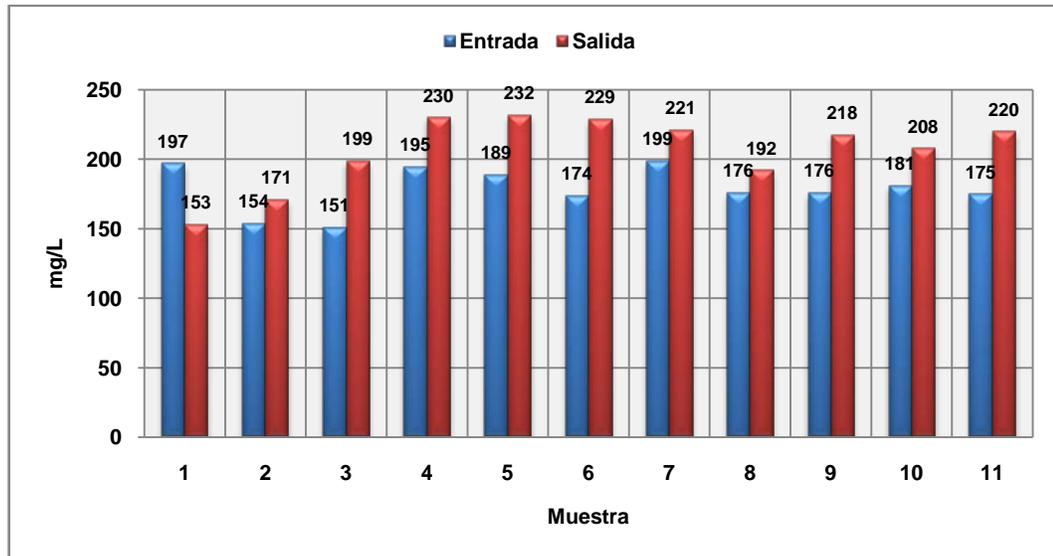
La figura 28 presenta la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el agua residual de entrada y salida al modelo experimental. Se puede observar que los valores en el afluente varían entre 151 y 199 mg/L-DBO₅, y en el efluente entre 153 y 232 mg/L-DBO₅. A partir de estos datos se calcularon los valores medios iguales a 179 y 207 mg/L-DBO₅, respectivamente.

La figura 29 muestra la eficiencia en porcentaje en demanda bioquímica de oxígeno que se obtuvo en el proceso de filtración. Dicha eficiencia varió entre -32 y 22%, con un promedio de -16%.

La demanda bioquímica de oxígeno es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser oxidada por medios biológicos. El incremento de la demanda bioquímica de oxígeno indica el grado de contaminación del agua residual, por lo tanto, se necesita mayor oxígeno para que los microorganismos puedan degradar la materia orgánica.

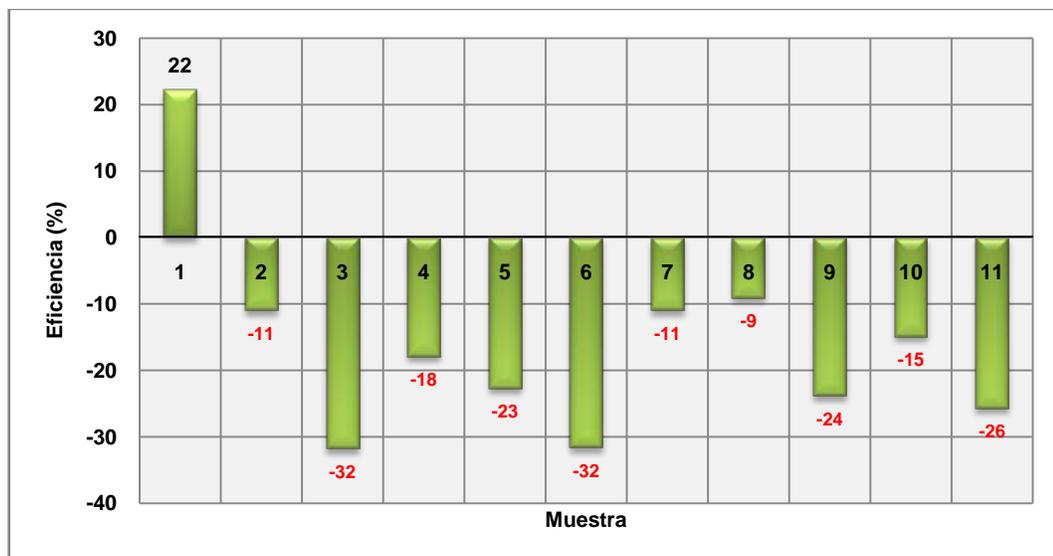
La estopa de coco incrementó los niveles de contaminación y en consecuencia la carga contaminante, porque se produjo la descomposición de la misma en contacto con el agua residual. Debido al origen orgánico de la estopa se esperó este comportamiento, el cual no es satisfactorio para la investigación, y los sólidos sedimentables son prueba de lo anterior (Ver figura 36). Por lo tanto, no es recomendable utilizar la estopa de coco para la remoción de materia orgánica presente en el agua residual.

Figura 28. Demanda bioquímica de oxígeno



Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Eficiencia en demanda bioquímica de oxígeno



Fuente: elaboración propia.

6.4. Demanda química de oxígeno

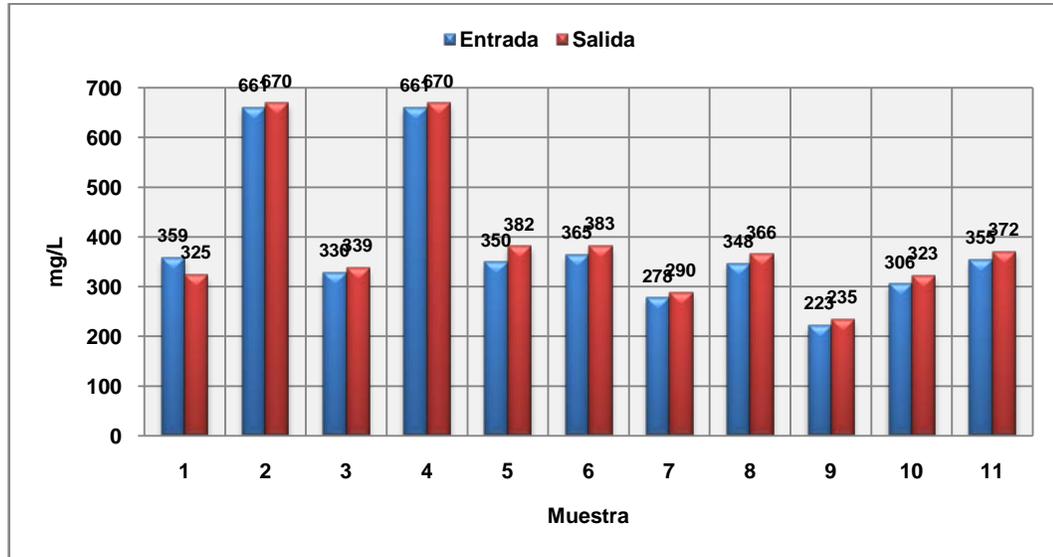
La figura 30 presenta la concentración de la demanda química de oxígeno en el agua residual de entrada y salida al modelo experimental. Se puede observar que los valores en el afluente varían entre 223 y 661 mg/L-DQO, y en el efluente entre 235 y 670 mg/L-DQO. A partir de estos datos se calcularon los valores medios iguales a 385 y 396 mg/L-DQO, respectivamente.

La figura 31 muestra la eficiencia en porcentaje en demanda química de oxígeno que se obtuvo en el proceso de filtración. Dicha eficiencia varió entre -9 y 9%, con un promedio de -3%.

La demanda química de oxígeno es un parámetro que mide la concentración de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas por medios químicos. Por tanto, el proceso de depuración de materia orgánica es ineficiente, ya que la estopa aumenta los niveles de contaminación por medio de la descomposición de la misma en contacto con el agua residual.

La demanda química de oxígeno se comporta de igual forma que la demanda bioquímica de oxígeno, en proporciones similares. Estableciendo que el proceso de filtración utilizando la estopa de coco como medio filtrante, aumenta los niveles de contaminación. Por lo tanto, no es recomendable utilizar la estopa de coco para la remoción de sustancias inorgánicas del agua residual.

Figura 30. Demanda química de oxígeno



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Eficiencia en demanda química de oxígeno



Fuente: elaboración propia.

6.5. Índice de biodegradabilidad

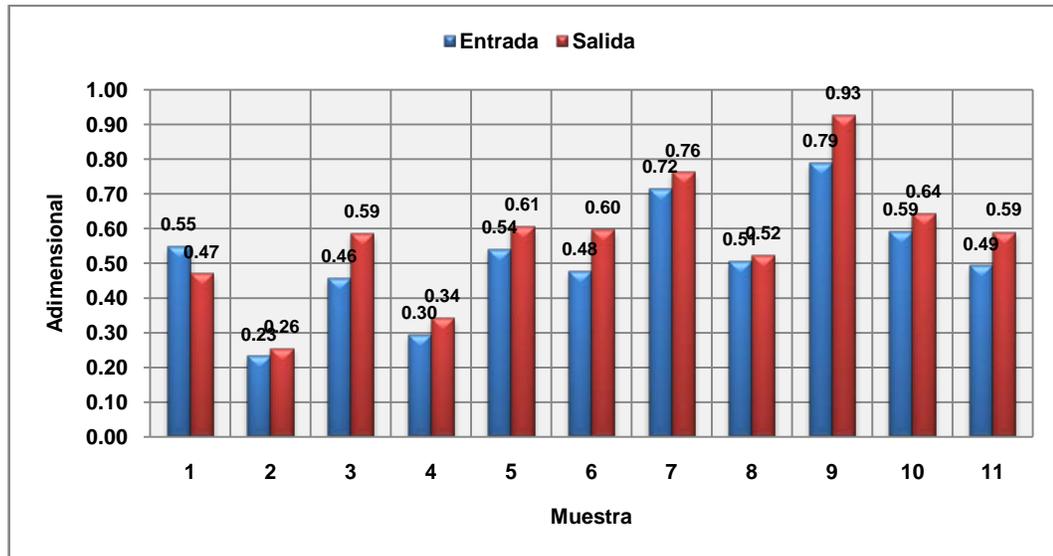
La figura 32 presenta el índice de biodegradabilidad en el agua residual de entrada y salida al modelo experimental. Se puede observar que los valores en el afluente varían entre 0,23 y 0,79, y en el efluente entre 0,26 y 0,93. A partir de estos datos se calcularon los valores medios iguales a 0,51 y 0,57, respectivamente.

La figura 33 muestra la eficiencia en porcentaje del índice de biodegradabilidad que se obtuvo en el proceso de filtración. Dicha eficiencia varió entre -28 y 14%, con un promedio de -12%.

El índice de biodegradabilidad es la relación entre el contenido de materia orgánica y las sustancias químicas susceptibles a la oxidación. A medida que aumenta o disminuye la DBO_5 y DQO, también lo hace el índice de biodegradabilidad en las mismas proporciones.

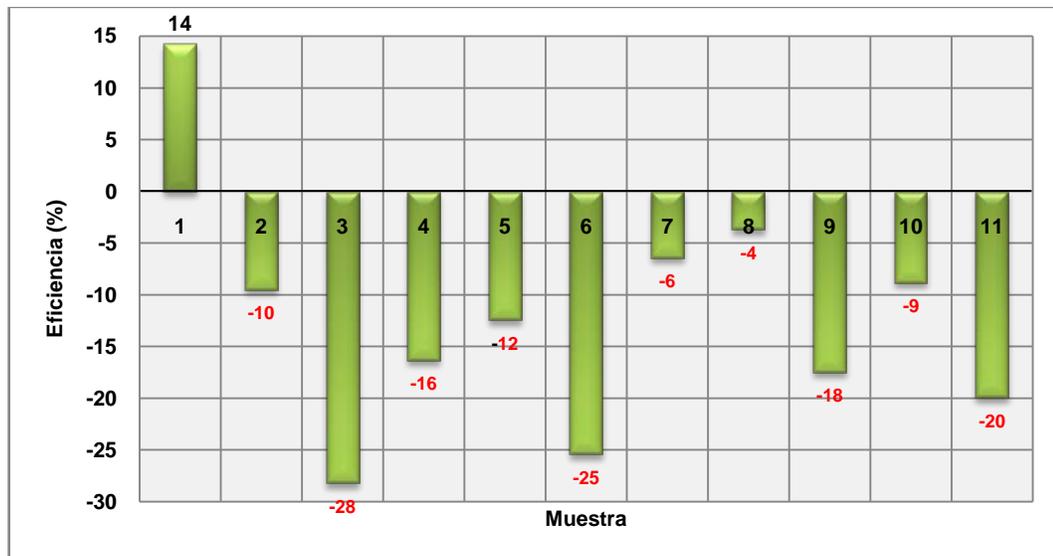
Cuando se incrementa el índice de biodegradabilidad aumenta la tratabilidad del agua residual por medios biológicos, en este caso, la estopa de coco que se utiliza en el tratamiento biológico es el causante del aumento de estos valores, provocando eficiencias negativas. Este comportamiento no es satisfactorio para la evaluación del rendimiento de la estopa como medio filtrante. Por lo tanto, no es recomendable utilizar la estopa de coco para la remoción de materia orgánica e inorgánica.

Figura 32. Índice de biodegradabilidad



Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Eficiencia en índice de biodegradabilidad



Fuente: elaboración propia.

6.6. Color aparente

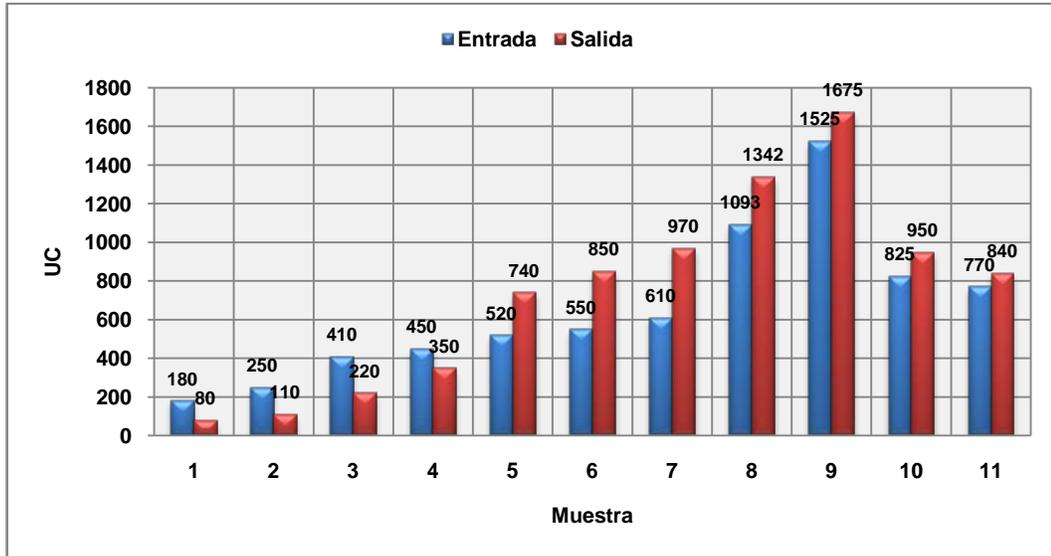
La figura 34 presenta el color aparente en el agua residual de entrada y salida al modelo experimental. Se puede observar que los valores en el afluente varían entre 180 y 1 525 UC, y en el efluente entre 80 y 1 675 UC. A partir de estos datos se calcularon los valores medios iguales a 653 y 739, respectivamente.

La figura 35 muestra la eficiencia en porcentaje en color aparente que se obtuvo en el proceso de filtración. Dicha eficiencia varió entre -59 y 56%, con un promedio de -3%.

El color aparente representa el contenido de sólidos disueltos en el agua residual, incluyendo los sólidos coloidales. El aumento de color aparente confirma la poca eficiencia de la estopa de coco para la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos y disueltos.

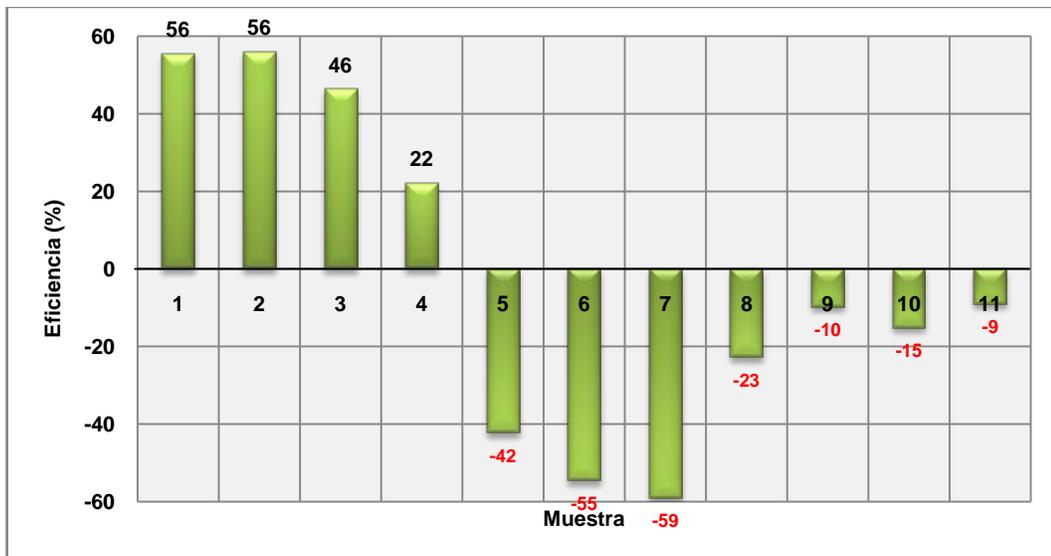
Se puede observar que hubo reducciones de color aparente en las primeras 4 muestras, pero en las posteriores se incrementó. Este comportamiento se debió a las constantes lluvias en el área, que causaron el lavado de la estopa. Pasada la época lluviosa, la estopa se recargó de impurezas y tiñó una coloración café pardo. Por lo tanto, la estopa de coco incrementa el color aparente del agua residual debido a su alto contenido de materia orgánica en descomposición. (Ver figura 15)

Figura 34. Color aparente



Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Eficiencia en color aparente



Fuente: elaboración propia.

6.7. Sólidos sedimentables

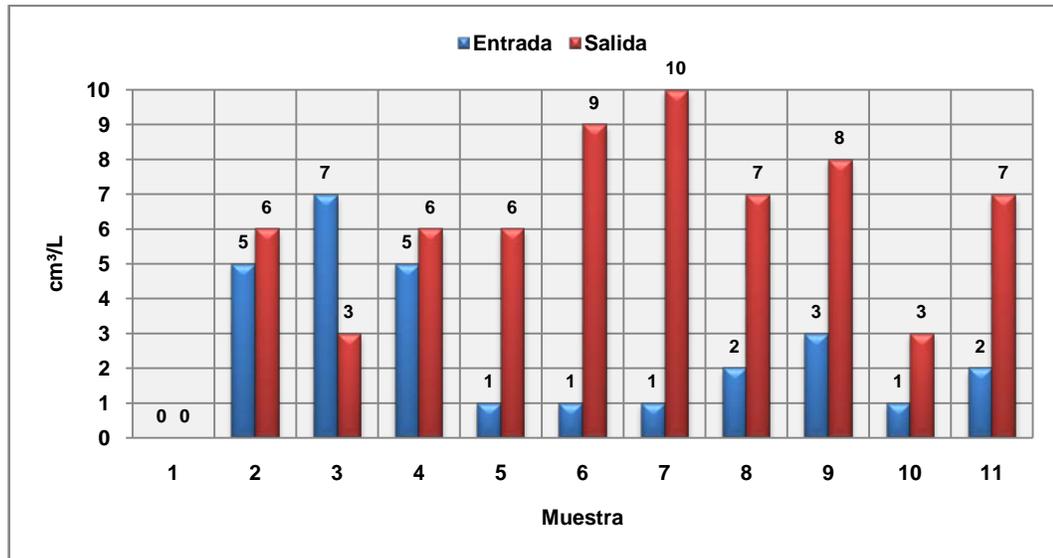
La figura 36 presenta los sólidos sedimentables en el agua residual de entrada y salida al modelo experimental. Se puede observar que los valores en el afluente varían entre 0 y 7 cm³/L, y en el efluente entre 0 y 10 cm³/L. A partir de estos datos se calcularon los valores medios iguales a 3 y 6 cm³/L, respectivamente.

La figura 37 muestra la eficiencia en porcentaje en sólidos sedimentables que se obtuvo en el proceso de filtración. Dicha eficiencia varió entre -900 y 57%, con un promedio de -277%.

Los sólidos sedimentables representan la cantidad de lodo que es posible remover por medio de sedimentación simple. El aumento de los sólidos sedimentables indica mayor cantidad de materia orgánica presente en el agua residual.

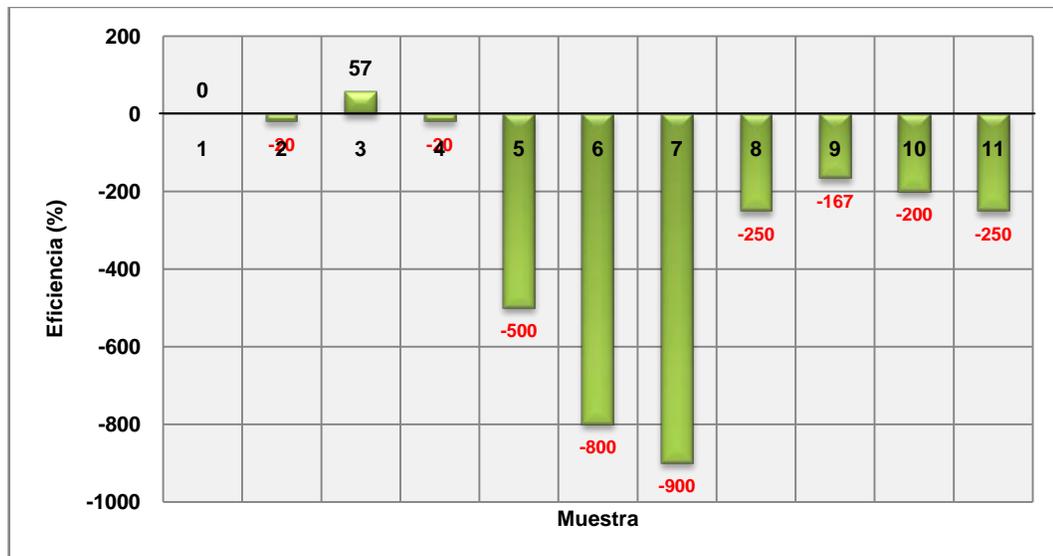
Con los datos anteriores se pudo establecer una relación directa entre la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, color aparente y sólidos sedimentables; ya que el incremento de estos parámetros confirma el aumento desmedido de materia orgánica, inorgánica, sólidos suspendidos, disueltos y coloidales en el agua residual. Por lo tanto, la estopa de coco no es una alternativa técnica en la remoción de materia orgánica, debido su origen y al proceso de descomposición que sufre en contacto con el agua residual.

Figura 36. **Sólidos sedimentables**



Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Eficiencia en sólidos sedimentables**



Fuente: elaboración propia.

6.8. Potencial de hidrógeno

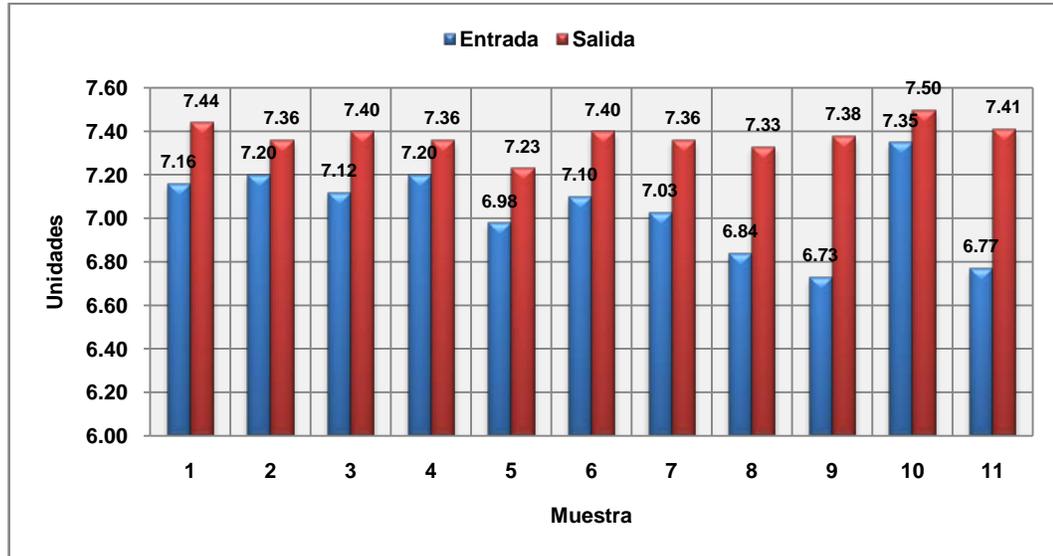
La figura 38 presenta el potencial de hidrógeno en el agua residual de entrada y salida al modelo experimental. Se puede observar que los valores en el afluente varían entre 6,73 y 7,35 unidades, y en el efluente entre 7,23 y 7,50 unidades. A partir de estos datos se calcularon los valores medios iguales a 7,04 y 7,38 unidades, respectivamente.

La figura 39 muestra la eficiencia en porcentaje en potencial de hidrógeno que se obtuvo en el proceso de filtración. Dicha eficiencia varió entre -10 y -2%, con un promedio de -5%.

El potencial de hidrógeno es una medida de acidez o alcalinidad del agua residual, e indica la concentración del ion hidrógeno en el agua. Para la eficiencia de los diferentes procesos de tratamiento el potencial de hidrógeno debe oscilar entre 6,5 y 8,5 unidades.

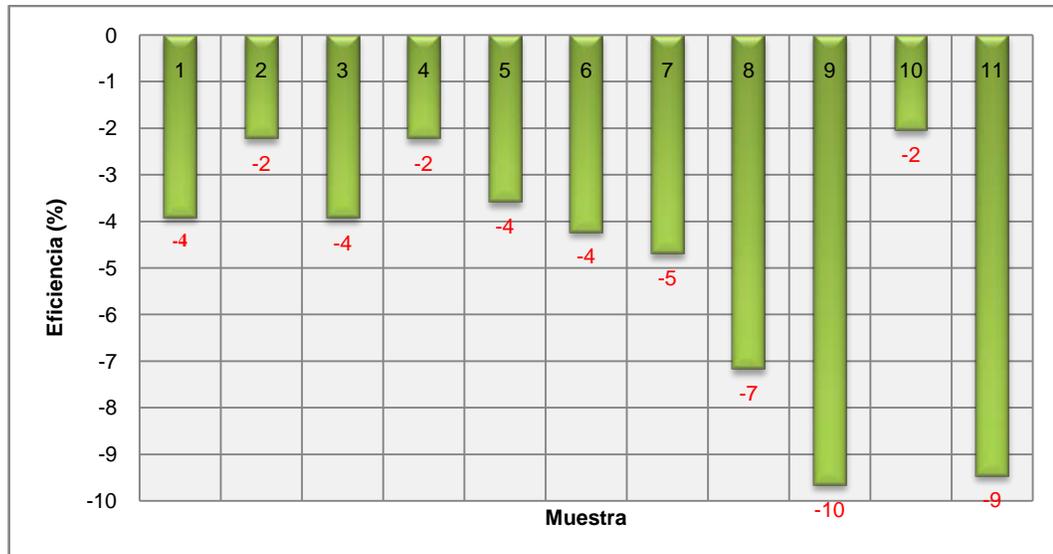
El incremento del potencial de hidrógeno en el agua residual se debe al contenido carbonatos de calcio presentes en la estopa de coco, que convierten al efluente en un medio alcalino. Los datos obtenidos se encuentran entre los valores recomendados para alcanzar la degradación de la materia orgánica y la reducción de los nutrientes de manera eficiencia.

Figura 38. **Potencial de hidrógeno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Eficiencia en potencial de hidrógeno**



Fuente: elaboración propia.

6.9. Temperatura

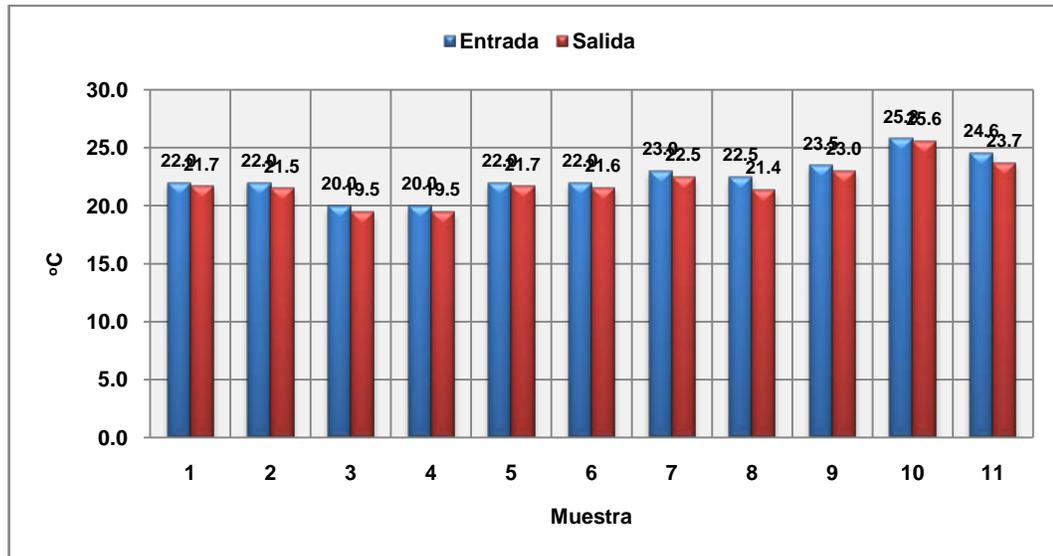
La figura 40 presenta la temperatura en el agua residual de entrada y salida al modelo experimental. Se puede observar que los valores en el afluente varían entre 20,0 y 25,8 °C, y en el efluente entre 19,5 y 25,6 °C. A partir de estos datos se calcularon los valores medios iguales a 22,5 y 22,0 °C, respectivamente.

La figura 41 muestra la eficiencia en porcentaje en temperatura que se obtuvo en el proceso de filtración. Dicha eficiencia varió entre 1 y 5%, con un promedio de 2%.

Los cambios en la temperatura afectan la vida de los microorganismos, modifica la concentración de oxígeno disuelto y la velocidad de las reacciones químicas. La temperatura óptima del agua residual para el crecimiento de las bacterias varía entre 25 y 35 °C. Según los datos obtenidos en la investigación, la estopa de coco no incrementa la temperatura del agua residual, para llegar a los niveles óptimos de degradación de nutrientes y materia orgánica.

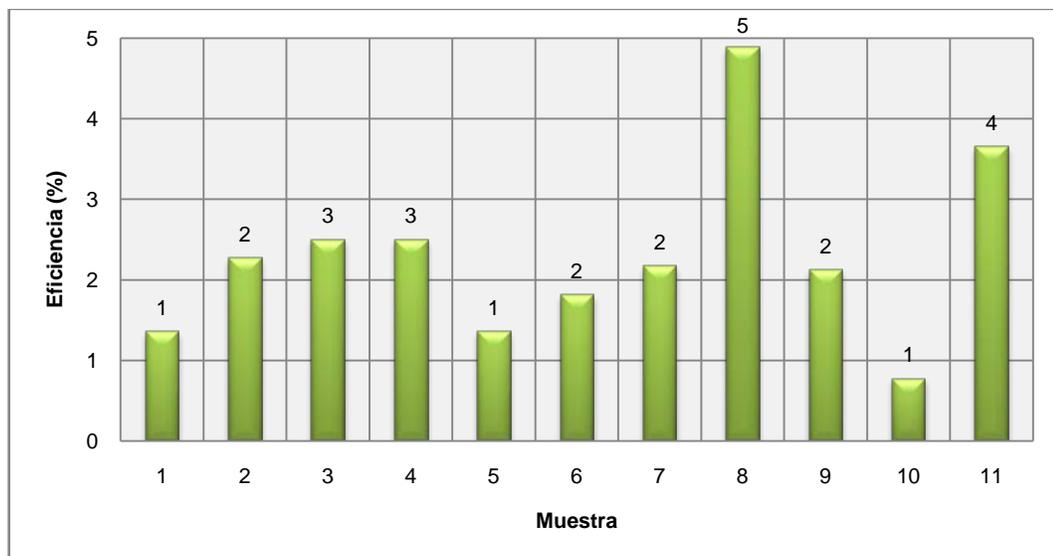
La reducción de la temperatura durante el proceso de filtración, demuestra que la estopa no contribuye a la proliferación de las bacterias que degradan la materia orgánica y los nutrientes. Este comportamiento se debe al origen orgánico de la estopa, el cual genera sedimentos, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, cambios de oxígeno disuelto e incremento de color en el agua residual.

Figura 40. Temperatura



Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Eficiencia en temperatura



Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXIII se muestran los límites máximos permisibles para descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, según el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 de la República de Guatemala.

Tabla XXIII. Límites máximos permisibles para descargas de aguas residuales a cuerpos receptores

			Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			ETAPA			
Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	°C	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	mg/L	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	mg/L	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	mg/L	1400	100	50	25	20
Fósforo total	mg/L	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Color	UC	1500	1300	1000	750	500
TCR = Temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius						
Nota: Se omitieron los valores referentes a metales pesados, ya que no forman parte de la investigación.						

Fuente: Acuerdo Gubernativo No. 236-2006, República de Guatemala.

Es importante observar, que la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno no aparecen; ya que se eligió la tabla donde fuera posible comparar los resultados obtenidos con los límites máximos permisibles para nitrógeno y fósforo total.

El nitrógeno total del efluente osciló entre 15 y 39 mg/L-N, comparando estos resultados con la tabla XXIII, se observa que se cumplen las etapas 1 y 2. El fósforo total varió entre 5 y 18 mg/L-P, el cual cumple las mismas etapas en igual condiciones que el nitrógeno total.

A pesar que los datos anteriores cumplen con los requisitos del Acuerdo Gubernativo 236-2006, éstos son similares e incluso mayores a los registrados en el afluente. Por lo tanto, se concluye que la estopa de coco no es material adecuado para la reducción de nitrógeno y fósforo total en el proceso de filtración biológica.

Respecto a la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, índice de biodegradabilidad, color aparente, sólidos sedimentables, potencial de hidrógeno y temperatura; se obtienen eficiencias negativas en el proceso de filtración biológica. Por lo tanto, la estopa de coco no es material adecuado para la reducción de éstos parámetros de control.

CONCLUSIONES

1. La hipótesis planteada en la investigación es nula, porque no es posible utilizar la estopa de coco como medio filtrante en un modelo experimental de filtro percolador para la reducción de nitrógeno y fósforo total del agua residual de origen doméstico.
2. La estopa de coco que se utilizó en el modelo experimental presentó las siguientes características fisicoquímicas: absorción 164,42%, densidad 0,22 g/cm³, área superficial específica 50 m²/m³, 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.
3. Los parámetros de diseño hidráulico del modelo experimental fueron: caudal 1,21 m³/d, tiempo de retención 45 s, velocidad de filtración 4,59 m³/m²d, carga hidráulica vertical 2,29 m³/m³d, carga hidráulica superficial 0,046 m³/m²d, carga contaminante 0,2178 kg DBO₅/d, carga orgánica vertical 0,4122 kg DBO₅/m³d y carga orgánica superficial 0,0082 kg DBO₅/m²d.
4. 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.

5. El nitrógeno total se redujo de 41 mg/L-N en la entrada a 27 mg/L-N en la salida, con 33% de eficiencia. El fósforo total aumentó de 11,0 mg/L-P en la entrada a 13,1 mg/L-P 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.

6. La DBO₅ aumentó de 179 mg/L-DBO₅ en la entrada a 207 mg/L-DBO₅ en la salida, con -16 % de eficiencia. La DQO aumentó de 385 mg/L-DQO en la entrada a 396 mg/L-DQO 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 cm³/L en la entrada a 6 cm³/L en la salida, con -277% de eficiencia.

7. Los resultados obtenidos de nitrógeno y fósforo total, cumplen con los requisitos del Acuerdo Gubernativo 236-2006. A pesar de cumplir con estos requisitos, los valores en el efluente son mayores que el afluente, por lo tanto, la estopa de coco no es eficiente para la reducción de nitrógeno y fósforo total.

RECOMENDACIONES

1. No utilizar materiales de origen orgánico como la estopa de coco en el proceso de filtración biológica, porque interfieren en el crecimiento de las bacterias que degradan la materia orgánica y los nutrientes; además incrementa el color y los sólidos sedimentables del agua residual.
2. Realizar una investigación donde se evalúe el rendimiento de la estopa de coco, para la remoción de coliformes fecales y/o metales pesados.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Water Works Association; American Public Health Association. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21a ed. EEUU: Water Environment Federation, 2002. 1 496 p.
2. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. 3a ed. Vol. I. Colombia: McGraw-Hill, 2000. 362 p.
3. BOL MENDOZA, Héctor Aníbal. *Impacto por nutrientes de las aguas residuales vertidas en la cuenca del río Dulce y lago de Izabal*. Trabajo de graduación de Licenciatura en Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, 2004. 85 p.
4. CABRERA DÍAZ, David Estuardo. *Evaluación de la relación entre las densidades poblacionales de cianobacterias (*Mycrocistis sp*, *Anabaena sp*, *Oscillatoria sp.*) y las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos: nitratos y fosfatos en el lago de Amatitlán, Guatemala durante los meses de mayo a octubre de 2009*. Trabajo de graduación de Licenciatura en Biología. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, 2011. 63 p.

5. 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.
6. 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.
7. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; et. al. *Metodología de la investigación*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 2006. 850 p.
8. LÓPEZ RAMÍREZ, Alex Manuel. *Implementación del material denominado ripio clasificado de concreto como material filtrante en filtros percoladores en la planta piloto Ing. Arturo Pazos Sosa*. 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.
9. METCALF & EDDY, INC. *Ingeniería de las aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. 3a ed. Vol. I. México: McGraw-Hill, 1996. 752 p.
10. MUCH SANTOS, Zenon. *Manual de Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria*. Material de apoyo para el laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 2012. 55 p.

11. ODUM, Eugene. *Ecología*. 3a ed. México: Interamericana, 1972. 598 p.
12. PÉREZ ESCOBAR, Milton Adolfo. *Elaboración de matrices de polímeros reciclados reforzados con fibras de la estopa de coco y determinación de sus características físicas y mecánicas*. Trabajo de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 129 p.
13. PÉREZ SOLARES, Ana Elizabeth. *Utilización con fines de riego del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad universitaria, USAC*. Trabajo de graduación de Maestría en Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 2012. 96 p.
14. QUIÑÓNEZ De La CRUZ, Francisco Javier. *Evaluación experimental de matrices fibroreforzadas con desechos del fruto del coco (Cocus 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.
15. RAMALHO, Rubens. *Tratamiento de aguas residuales*. 2a ed. Barcelona: Reverté, 1983. 705 p.

16. RAMÍREZ REGALADO, Walter. *Evaluación de un filtro percolador como tratamiento posterior al agua tratada de un reactor anaerobio de flujo ascendente*. Trabajo de graduación de Maestría en Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 1991. 125 p.
17. RAMÍREZ SÁNCHEZ, Oscar Luis. *Investigación de la eficiencia de las etapas en serie del filtro percolador de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos*. Trabajo de graduación de Maestría en Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 2012. 123 p.
18. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Calidad del agua*. 3a ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009. 484 p.
19. _____. *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. 3a ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. 1 248 p.
20. SMITH MELÉNDEZ, Eduardo Francisco. *Remoción de arsénico en el agua a nivel de laboratorio aplicando como medio filtrante óxido de hierro*. Trabajo de graduación de Maestría en Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 2007. 115 p.
21. SPIEGEL, Murray. *Estadística*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1991. 556 p.

22. TCHOBANOGLIOUS, George & CRITES, Ron. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: McGraw-Hill, 2000. 776 p.
23. TRINIDAD FIGUEROA, David Alfonso. *Aplicación de un filtro doméstico con piedra pómez para remoción de flúor en el agua de consumo humano en la cabecera municipal de Malacatancito, Huehuetenango, Guatemala*. Trabajo de graduación de Maestría en Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 2005. 60 p.
24. TURCIOS PANTALEÓN, Ariel Eliseo. *Evaluación de la calidad de las aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento Aurora II con fines de riego en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)*. Trabajo de graduación de Maestría en Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 2011. 96 p.
25. YÁNEZ COSSIO, Fabián. *Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales; borrador para discusión*. Guatemala: OPS, Programa de desarrollo tecnológico en el campo de tratamiento de aguas residuales, 1993. 70 p.
26. WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística*. México: Pearson, 2007. 816 p.

APÉNDICES

En apéndice 1 se muestran los costos para el diseño, construcción y del modelo experimental.

Apéndice 1. Costo de materiales del modelo experimental

Cantidad	Descripción	Unidad	Precio unitario	Total
2.5	Toneles metálicos (recipiente contenedor del medio filtrante)	Unidad	Q. 60,00	Q. 150,00
1	Prueba bromatológica y pH de la estopa de coco	Unidad	Q. 340,00	Q. 340,00
1	Reactivo para determinación de Fósforo total, marca HACH	Global	Q. 960,00	Q. 960,00
1	Reactivo para determinación de Nitrógeno total, marca HACH	Global	Q. 1 600,00	Q. 1,600,00
1	Transporte de los materiales para filtro percolador	Unidad	Q .300,00	Q. 300,00
1	Mano de obra para instalación	Global	Q. 200,00	Q. 300,00
1	Imprevistos	Global	Q. 200,00	Q. 200,00
COSTO DE MATERIALES DEL MODELO EXPERIMENTAL				Q. 3 750,00 \$. 473,48
El costo de los materiales varía según el lugar y época de compra US \$ 1,0 = Q. 7,92				

Fuente: elaboración propia.

El apéndice 2 muestra la comparación en el manejo de diferentes medios filtrantes, incluyendo la estopa de coco.

Apéndice 2. Comparación en el manejo de diferentes medios filtrantes

Medio filtrante	Tipo de manejo del medio filtrante	Costo de colocación
Estopa de coco	Clasificación, transporte y colocación	Q. 50,00
Ripio clasificado	Clasificación, transporte y colocación	Q. 150,00
PET	Fabricación, transporte y colocación	Q. 250,00
Piedra bola	Extracción, transporte y colocación	Q. 250,00
Roca volcánica	Extracción, transporte y colocación	Q. 350,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Porcentaje de humedad inicial de la estopa**

Tiempo de secado	8 meses		1 mes	
Espécimen	A	B	C	D
PNH	32,34	57,63	30,54	31,79
PNS	30,31	53,39	27,43	29,06
Contenido de agua	2,03	4,24	3,11	2,73
Humedad inicial (%)	6,70	7,94	11,34	9,39
Promedio	7,32		10,37	
NOMENCLATURA				
PNH = peso neto húmedo en gramos				
PNS = peso neto seco en gramos				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Porcentaje de absorción de la estopa**

Tiempo de secado	8 meses				1 mes			
Espécimen	A	B	C	D	A	B	C	D
PNH	70,91	106,41	70,05	76,52	50,20	112,00	75,37	64,93
PNS	30,94	30,78	22,34	22,36	16,16	45,14	25,77	26,19
Contenido de agua	39,97	75,63	47,71	54,16	34,04	66,86	49,60	38,74
Humedad (%)	129,19	245,71	213,56	242,22	210,64	148,12	192,47	147,92
Absorción (%)	121,87	238,39	206,24	234,90	200,28	137,75	182,11	137,55
Promedio	200,35				164,42			
NOMENCLATURA								
PNH = peso neto húmedo g								
PNS = peso neto seco g								
Absorción (%) = humedad (%) - promedio de humedad inicial (%)								

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Densidad de la estopa

Tiempo de secado	8 meses				1 mes			
Especimen	A	B	C	D	E	F	G	H
T	275,91	257,04	320,81	335,51	327,38	241,31	306,92	318,03
Wcp	458,00	458,00	458,00	458,00	458,00	458,00	458,00	458,00
Ecp	51,83	51,83	51,83	51,83	51,83	51,83	51,83	51,83
Wcps	406,17	406,17	406,17	406,17	406,17	406,17	406,17	406,17
West sat	70,91	106,41	70,05	76,52	50,20	112,00	75,37	64,93
Vd	201,17	255,54	155,41	147,18	128,99	276,86	174,62	153,07
Wsat	70,91	106,41	70,05	76,52	50,20	112,00	75,37	64,93
Wseco	35,20	35,54	26,23	26,74	18,42	51,8	30,08	30,56
Vo	35,71	35,71	35,71	35,71	35,71	35,71	35,71	35,71
Vest.	165,46	219,83	119,70	111,47	93,28	241,15	138,91	117,36
Densidad g/cm ³	0,21	0,16	0,22	0,24	0,20	0,22	0,22	0,26
Promedio	0,208				0,222			
<p>Nomenclatura</p> <p style="margin-left: 40px;">T = Peso estopa + contrapeso g, lectura de balanza cuando se coloca todo el conjunto</p> <p style="margin-left: 40px;">Wcp = Peso del contrapeso fuera del agua g</p> <p style="margin-left: 40px;">Ecp = Empuje del contrapeso en el agua g, lectura de balanza cuando se coloca solo el contrapeso</p> <p style="margin-left: 40px;">Wcps = Peso del contrapeso sumergido en el agua g, diferencia entre Wcp - Ecp</p> <p style="margin-left: 40px;">West sat = Peso de la estopa saturada g,</p> <p style="margin-left: 40px;">Vd = Volumen desplazado de la estopa y del agua contenida (saturada) cm³</p> <p style="margin-left: 40px;">Wsat = Peso saturado de la estopa g, después del ensayo</p> <p style="margin-left: 40px;">Wseco = Peso seco de la estopa g, después del horno</p> <p style="margin-left: 40px;">Vo = Volumen de agua en la estopa (saturada) = Wagua/vagua cm³ = Wsaturado - Wseco cuando v = 1g/cm³</p> <p style="margin-left: 40px;">Vest = Volumen desplazado de la estopa cm³</p> <p style="margin-left: 40px;">Densidad = W seco / Vest g/cm³</p>								

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Área superficial específica de la estopa

Muestra	W est	ρ	V est	L ₁	L ₂	A	As	As	V est	S
1	17,67	0,22	80,3180	5	10	0	50,0	0,00500	0,0000803	62,3
2	27,37	0,22	124,409	8	20	0	160,0	0,01600	0,0001244	128,6
3	42,47	0,22	193,045	4	7	58,54	86,5	0,00865	0,0001930	44,8
4	43,23	0,22	196,500	10	8	0	80,0	0,00800	0,0001965	40,7
5	42,39	0,22	192,682	7	4	52,00	80,0	0,00800	0,0001927	41,5
6	43,29	0,22	196,773	10	7	0	70,0	0,00700	0,0001968	35,6
7	63,87	0,22	290,318	7	4	40,00	68,0	0,00680	0,0002903	23,4
PROMEDIO								0,00849	0,0001820	53,8

Nota: el área superficial específica del medio es 50 m²/m³

NOMENCLATURA

W est = Peso de la estopa seca en gramos
 ρ = densidad de la estopa, g/cm³
V est = Volumen de la estopa en cm³ y m³
L₁ = longitud 1, cm
L₂ = longitud 2, cm
A = Área complementaria, cm²
As = Área superficial estimada de la estopa, cm² y m²
S = Área superficial específica de la estopa en m²/m³
Vf = Volumen del filtro, m³
V est = Volumen promedio de cada estopa, m³
As = Área superficial de cada estopa, m²
N = número de estopas por filtro = Vf / Vest
As_m = Área superficial de todo el medio = As*N, m²

Área superficial	
Vf	0,52842
V est	1,82E-04
As	8,49E-03
N	2903,303
As_m	24,7

Nota: el área superficial de todo medio es 25 m²

Fuente: elaboración propia.

Anexo. Informe de resultados de análisis químicos de la estopa



Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia
Escuela de Zootecnia
Unidad de Alimentación Animal

Elaborado por: Aura Marina de Marroquín
Autorizado por: Lic. Miguel Angel Rodenas

FORMULARIO BROMATO 7

INFORME DE RESULTADO DE ANÁLISIS



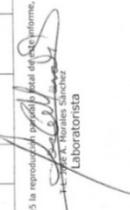
Edificio M5, 2º Nivel, Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala
Teléfono: 24188307 Teléfono: 24188307 ext. 1076
E-mail: bromato2000@yahoo.es

Solicitado por: **JUAN CARLOS HERNANDEZ** Dirección: **CIUDAD, GUATEMALA** No.060

Fecha de recibida la muestra: **22-02-2012** Fecha de realización: **DEL 28-02 AL 02-03-2012**

Reg.	Descripción de la muestra	BASE	Agua %	M.S.T. %	E.E. %	F.C. %	PROTEINA cruda %	Centizas %	E.L.N. %	Calcio %	Fósforo %	F.A.D. %	F.N.D. %	Lignina %	Dig. Proteína %	Dig. K.O.H. %	P.h.	E.B. Ncal/kg
228	ESTOPA DE COCO 8 MESES DE SECADO	SECA	12.40	87.60	0.43	31.75	2.15	8.33	57.34	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	5.10	.....
		COMO ALIMENTO	.....	.....	0.38	27.81	1.89	7.30	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
239	ESTOPA DE COCO 1 MES DE SECADO	SECA	11.87	88.13	0.33	45.63	2.15	5.63	46.05	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	5.01	.....
		COMO ALIMENTO	.....	.....	0.29	40.39	1.90	4.96	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
		SECA	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
		COMO ALIMENTO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
		SECA	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
		COMO ALIMENTO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
		SECA	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
		COMO ALIMENTO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
		SECA	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
		COMO ALIMENTO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

CONSERVACIONES: Dichos resultados fueron calculados en base materia seca total y base fresca. Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe, para mayor información comuníquese al Tel.: 24188307


 J. K. F. Flores Sánchez
 Laboratorio

TOTAL DE MUESTRAS REPORTADAS EN ESTA HOJA 2
 Lic. Miguel Angel Rodenas
 Jefe Laboratorio de Bromatología

Resultados 2012/060
 02/03/12

Fuente: Informe de resultados de análisis, formulario Bromato 7. Laboratorio de Bromatología, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, USAC, marzo de 2012.