

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE LA CÁSCARA DE BANANO COMO MATERIAL
DE EMPAQUE EN UN SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN PARA
TRATAR AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL LAVADO Y
TINTURADO DE JEANS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA AMBIENTAL**

PAOLA VANESSA JURADO CHORA

paojurado95@gmail.com

GUISELA MARIBEL SUNTAXI CANTUÑA

guiselasuntaxi@gmail.com

DIRECTOR: Ph.D ANA LUCÍA BALAREZO AGUILAR

ana.balarezo@epn.edu.ec

CODIRECTOR: M.Sc. NATHALIA TERESA VALENCIA BONILLA

nathalia.valencia@epn.edu.ec

Quito, mayo 2020

DECLARACIÓN

Nosotras Paola Vanessa Jurado Chora y Guisela Maribel Suntaxi Cantuña, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

**PAOLA VANESSA JURADO
CHORA**

**GUISELA MARIBEL SUNTAXI
CANTUÑA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Paola Vanessa Jurado Chora y Guisela Maribel Suntaxi Cantuña, bajo nuestra supervisión.

**Ph.D ANA LUCÍA BALAREZO
AGUILAR
DIRECTOR DEL PROYECTO**

**M.Sc. NATHALIA TERESA
VALENCIA BONILLA
CODIRECTOR DEL PROYECTO**

AGRADECIMIENTOS

Dios, que mediante sus oraciones nunca me ha dejado sola.

A mi madre, por su amor incondicional mientras estuvimos juntas, por enseñarme a luchar por los sueños, a pesar de tener miles de problemas, siempre mantener una sonrisa, por su lucha con su enfermedad y lo duro que fue separarnos, te agradezco tanta madre mía. A mi padre, que con su amor, apoyo y consejos me ayudado a llegar hasta donde estoy, que a pesar de mis errores nunca me ha dejado de apoyar y sentirse orgulloso de mi. A mi segunda madre, por acogerme como una hija más, por enseñarme a cocinar, a ser segura de mis decisiones y estar en mis alegrías y tristezas. A mis hermanos, por los momentos compartidos, aventuras, travesuras, bailes y complicidad. Los amo querida familia.

A mi abuelita Blanca que ha sido un ángel conmigo, con su dulzura y manera de enfrentar los problemas, por ser como una madre para mí y por las vacaciones en el campo juntas que las llevo guardadas en mi corazón. A mi abuelito Custodio, que, con sus coplas, cantos y bailes, hacen que los carnavales sean únicos. A mi abuelita Sara, su ejemplo de mujer trabajadora y luchadora. A mi abuelito Galo por su alegría y cariño siempre. Y a mis abuelitos Carmen y Carlos que están en el cielo.

A mis compañeros sunti y cache, por ser mis amigos, porque a pesar de estar con bolita, me supieron dar ánimos, en un momento llegue a pensar que mi sueño terminaría, pero no gracias por su apoyo y consejos. Los quiero.

A Guis, Andres, Majo, Gianni, Ally, Zari, Kevin y Bladi, por ser mis compañeros de carrera, giras, novatadas, bailes, gracias por todo y que cada uno siga cumpliendo sus sueños, que nunca dejemos de estemos en contacto. Les deseo lo mejor del mundo.

A la Doc. Ana Lucía Balarezo y la Ing. Nathalia Valencia, por su tiempo, guía y conocimientos durante esta investigación, que han sido un pilar fundamental para nosotras en esta etapa.

Finalmente agradecer a la lavandería “Color & Denim”, por ser una empresa que nunca nos puso peros, para poder realizar cada semana el muestreo, gracias a cada uno de los que conforman esta lavandería, por siempre recibirnos con una sonrisa y estar dispuestos ayudarnos. Muchas gracias.

*PAOLA ***

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la valentía y fortaleza para sobrellevar aquellos momentos difíciles de la vida. La fe y esperanza en Él han sido la clave perfecta para ir tras mis sueños y no decaer.

A mi mami y mi papi, Marlene y Edmundo, son los mejores padres que la vida me pudo dar. Gracias a sus enseñanzas, amor y apoyo incondicional, supieron motivarme a ser cada día mejor persona. Con su esfuerzo diario me dieron la mejor enseñanza para toda la vida: “Con trabajo diario, humilde y sincero se puede cumplir metas”. Gracias por todo lo que han hecho y harán por mí y mi hermano.

A mi ñaño, Edison, somos tan distintos pero tan iguales a la vez, gracias porque has sido un apoyo grande no solo en mi carrera universitaria, sino también en aquellos momentos difíciles.

A mi mamita Luisa y mi mamita Tere, abuelitas muy importantes para mi educación y mi vida, por sus consejos y apoyo en todo momento. Mi mamita Tere, fuiste y serás mi mejor ejemplo de humildad.

A Cristian, por tantas risas, viajes y apoyo incondicional, por llegar a mi vida a demostrarme el respeto, cariño y amor sincero que se puede sentir por alguien. Gracias por confiar en mí, por entenderme y apoyarme en cada sueño loco que quiero cumplir, pero sobre todo, gracias por ser un pilar importante en esta tesis, a la que has acogido como tuya.

A “Juris” y “K_che”, por ser mis compañeros y amigos en este sueño que emprendimos hace años atrás, hoy lo logramos y lograremos muchas cosas más. No olviden que los sueños de niños se cumplirán con esfuerzo y paciencia porque nosotros somos capaces ^_^.

A mis amigos de universidad, Pao, Cache, Dani, Kevin, Negro, Bladi, Ally, Gianni, Majo, Paúl, por tantas giras, salidas, festejos y anécdotas que terminaban en risas, llantos, peleas, reconciliaciones o molestadas, cada uno tenemos nuestras personalidades y eso es lo que hace especial a nuestro grupo. “Conitos” muchos éxitos en cada etapa que emprendan, Diosito me los bendiga muchísimo y siempre para adelante, los quiero mucho.

A la Doc. Ana Lucía Balarezo y la Inge Nathalia Valencia, por confiar en nosotras y apoyarnos con sus conocimientos. Mil gracias por estar dispuestas siempre a ayudarnos con paciencia y dedicación. Extiendo mi gratitud a la Escuela Politécnica Nacional y a sus profesores, por permitirme lograr uno más de mis sueños, gracias por los conocimientos brindados durante estos años de vida universitaria.

Finalmente, agradezco de manera especial al personal de la Lavandería “Color & Denim”, gracias por siempre estar prestos a brindarnos información y apoyo en cada muestreo. Mil gracias.

GUISS

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a un ángel muy especial que está en el cielo, mi madre Rosario, muchas veces no entendí el porque te fuiste tan pronto de mi lado, pero fue ese sentimiento el que me ha hecho luchar cada día y seguir mis sueños y felicidad.

A mi padre Alfonso, a mi segunda madre Marisol, y mis hermanos Alex, Yessy y nicol y mis abuelitos, con mucho amor y cariño para ustedes por confiar en mí. A mi mejor amigo cachetes por sus conocimientos, apoyo y consejos compartidos.

A mi hijo Eydán por ser el mejor regalo que Dios me ha dado, mi inspiración, apoyo y compañero durante este trabajo. Te amo hijo mío.

Gracias por formar parte de mi vida, de este logro y por muchos más.

*PAOLA ***

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado principalmente a mis padres, Marlene y Edmundo, por motivarme a cumplir mis sueños, con su amor y apoyo, lo logré, lo logramos y lo seguiremos logrando. Espero se sientan orgullosos de mí.

Mami, eres una mujer muy valiente y luchadora, nunca cambies esa sonrisa que me motiva a seguir adelante, aquí estaré siempre para apoyarte, recuerda que ninguna enfermedad podrá vencerte, porque Dios te hizo una guerrera: “al cáncer lo vencemos todos” nunca lo olvides. Siéntete feliz porque el mejor ejemplo de amor verdadero, paciencia, perseverancia, valentía y humildad ya me lo has inculcado. Esas cualidades serán mi mejor arma para cumplir mis sueños.

Papi, la vida te puso pruebas difíciles y nos puso momentos muy duros, a veces cuesta entender como la vida te puede cambiar en un segundo, pero finalmente entendimos que todo pasa por algo. Te admiro por soportar muchas cosas y por aferrarte a la vida. Sigues aquí con nosotros y eso fue, es y será un motivo suficiente para cumplir la promesa que un día te dije.

Esto también va dedicado a ti, mamita Tere, aunque ya no estés físicamente, tu recuerdo perdurará por siempre. Tu legado de humildad, sinceridad, apoyo y amor se seguirá transmitiendo. Un abrazo gigante de aquí hasta el cielo.

“Paso a paso” lo logramos. Gracias por todo.

GUISS

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA.....	VII
CONTENIDO.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
ÍNDICE DE ANEXOS	XVII
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS.....	XVIII
RESUMEN	XX
ABSTRACT	XXI
PRESENTACIÓN	XXII
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.4 ALCANCE.....	6
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 INDUSTRIA DEL JEAN	7
2.1.1 PROCESO DE LAVADO Y TINTURADO DE TELA JEAN	8
2.1.2 AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE LAVADO Y TINTURADO DE TELA JEAN	12
2.1.3 PROBLEMÁTICA.....	13
2.1.4 TRATAMIENTOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES.....	14
2.2 BIOFILTRACIÓN	16
2.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	18

2.2.2	MATERIALES FILTRANTES.....	19
2.2.3	CÁSCARA DE BANANO.....	21
2.3	NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE.....	22
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....		23
3.1	ACONDICIONAMIENTO DE LA CÁSCARA DE BANANO.....	23
3.1.1	RECOLECCIÓN Y SELECCIÓN.....	23
3.1.2	LIMPIEZA.....	24
3.1.3	SECADO.....	24
3.1.4	MOLIDO Y TAMIZADO.....	25
3.2	CHARACTERIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE BANANO.....	25
3.2.1	PARÁMETROS FÍSICOS.....	25
3.2.2	PARÁMETROS QUÍMICOS.....	26
3.2.3	PARÁMETROS MORFOLÓGICOS.....	26
3.3	CHARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.....	26
3.3.1	PUNTO DE MUESTREO.....	26
3.3.2	PARÁMETROS DE CHARACTERIZACIÓN.....	27
3.4	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN.....	29
3.4.1	MATERIALES.....	29
3.4.2	DIMENSIONAMIENTO DE LOS BIOFILTROS.....	29
3.4.2.1	ÁREA SUPERFICIAL.....	30
3.4.2.2	VOLUMEN.....	30
3.4.2.3	CAUDAL.....	30
3.4.3	CONSTRUCCION DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.....	32
3.5	PUESTA EN MARCHA DE LOS BIOFILTROS.....	32
3.5.1	PRUEBAS PRELIMINARES.....	32
3.5.1.1	PRUEBAS DE VACIADO.....	33
3.5.1.2	POROSIDAD IN SITU DE LOS BIOFILTROS.....	33
3.5.1.3	VOLUMEN DE ESPACIOS VACÍOS EN LOS BIOFILTROS.....	33
3.5.1.4	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO.....	34
3.5.2	ALIMENTACION DEL SISTEMA.....	35
3.6	ACONDICIONAMIENTO Y MONITOREO DE LOS BIOFILTROS.....	35
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		39

4.1	ACONDICIONAMIENTO DE LA CÁSCARA DE BANANO	39
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL BIOFILTRANTE	39
4.2.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	39
4.2.2	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	40
4.2.3	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS	42
4.3	CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL.....	44
4.4	CARACTERÍSTICAS FÍSICO – MECÁNICAS DE LOS BIOFILTROS.....	45
4.5	COMPACTACIÓN DEL LECHO FILTRANTE.....	47
4.6	EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BIOFILTRACIÓN	49
4.6.1	ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	49
4.6.1.1	POTENCIAL HIDRÓGENO	49
4.6.1.2	TEMPERATURA	50
4.6.1.3	CONDUCTIVIDAD	51
4.6.1.4	TURBIDEZ	52
4.6.2	ANÁLISIS DE LA REMOCIÓN DE DQO Y COLOR.....	54
4.6.2.1	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	54
4.6.2.2	COLOR	61
4.7	DETERMINACIÓN DEL BIOFILTRO MÁS EFICIENTE SEGÚN EL TAMAÑO DE PARTÍCULA Y ALTURA DEL LECHO FILTRANTE	69
4.8	GRADO DE CUMPLIMIENTO CON LA NORMATIVA AMBIENTAL	70
4.9	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE REMOCIÓN DE DQO Y COLOR CON OTROS DATOS QUE EMPLEAN OTRO TIPO DE MATERIAL.....	72
	CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
5.1	CONCLUSIONES	74
5.2	RECOMENDACIONES.....	76
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
	ANEXOS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 ESTRUCTURA EL TEJIDO DEL DENIM Y SUS TIPOS DE SARGA UTILIZADAS	7
FIGURA 2.2 MECANISMO DE REDUCCIÓN DE LA MOLÉCULA DE ÍNDIGO SINTÉTICO	8
FIGURA 2.3 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA LAVANDERÍA “COLOR & DENIM”	9
FIGURA 2.4 RECEPCIÓN DE TELAS EN LA LAVANDERÍA “COLOR & DENIM”	10
FIGURA 2.5 REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN	18
FIGURA 2.6 CÁSCARAS DE BANANO RESIDUALES DE LA INDUSTRIA ALIMENTICIA	21
FIGURA 3.1 RECOLECCIÓN DE BANANOS DE DESECHO DEL MERCADO MAYORISTA	23
FIGURA 3.2 SELECCIÓN DE CÁSCARAS DE BANANO AMARILLAS	23
FIGURA 3.3 LIMPIEZA DE LAS CÁSCARAS DE BANANO	24
FIGURA 3.4 SECADO DE LAS CÁSCARAS DE BANANO EN EL HORNO HERMÉTICO	24
FIGURA 3.5 TAMAÑOS DE PARTÍCULA DEL MATERIAL BIOFILTRANTE ACONDICIONADO	25
FIGURA 3.6 PUNTO DE MUESTREO	27
FIGURA 3.7 CONEXIONES EN EL TANQUE DE ALIMENTACIÓN	32
FIGURA 3.8 CURVA TEÓRICA DEL VOLUMEN DE ESPACIOS VACÍOS CONTRA EL CAUDAL	34
FIGURA 3.9 AGUA RESIDUAL PRE-FILTRADA PARA EL RETIRO DE HILOS Y PELUSAS	35
FIGURA 3.10 MEZCLA DE CÁSCARAS DE BANANO CON PIEDRA PÓMEZ	38
FIGURA 3.11 SISTEMAS DE BIOFILTRACIÓN EXPERIMENTALES	38
FIGURA 4.1 IMÁGENES SEM DEL MATERIAL BIOFILTRANTE	43
FIGURA 4.2 ALTURA DEL LECHO FILTRANTE	47

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1 PUNTO DE CARGA CERO DEL MATERIAL BIOFILTRANTE (MUSA PARADISIACA)	41
GRÁFICO 4.2 COMPORTAMIENTO DEL PH EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN	49
GRÁFICO 4.3 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN	51
GRÁFICO 4.4 COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN	52
GRÁFICO 4.5 COMPORTAMIENTO DE LA TURBIDEZ EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN	53
GRÁFICO 4.6 CONCENTRACIÓN DE LA DQO EN EL AFLUENTE POR SEMANA DE MUESTREO	54
GRÁFICO 4.7 REMOCIÓN DE DQO A LO LARGO DEL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN EN LOS REACTORES CON ALTURA DE MEDIO FILTRANTE DE 0,40 M	55
GRÁFICO 4.8 REMOCIÓN DE DQO A LO LARGO DEL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN EN LOS REACTORES CON ALTURA DE MEDIO FILTRANTE DE 0,50 M	57
GRÁFICO 4.9 REMOCIÓN DE DQO A LO LARGO DEL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN EN LOS REACTORES CON ALTURA DE MEDIO FILTRANTE DE 0,60 M	59
GRÁFICO 4.10 VALORES DE COLOR DEL AFLUENTE DURANTE EL PERÍODO EXPERIMENTAL	62
GRÁFICO 4.11 REMOCIÓN DE COLOR A LO LARGO DEL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN EN LOS REACTORES CON ALTURA DE MEDIO FILTRANTE DE 0,40 M	63
GRÁFICO 4.12 REMOCIÓN DE COLOR A LO LARGO DEL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN EN LOS REACTORES CON ALTURA DE MEDIO BIOFILTRANTE DE 0,50 M	66

GRÁFICO 4.13 REMOCIÓN DE COLOR A LO LARGO DEL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN EN LOS REACTORES CON ALTURA DE MEDIO FILTRANTE DE 0,60 M	67
--	----

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 TRATAMIENTOS APLICADOS A EFLUENTES TEXTILES	16
TABLA 2.2 LÍMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE	22
TABLA 3.1 MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CÁSCARA DE BANANO	25
TABLA 3.2 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL	28
TABLA 3.3 DIMENSIONES Y PARÁMETROS DE LOS BIOFILTROS	31
TABLA 3.4 PARÁMETROS DE MONITOREO	36
TABLA 3.5 SIMBOLOGÍA PARA CADA BIOFILTRO MONITOREADO EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN	37
TABLA 4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MATERIAL BIOFILTRANTE	39
TABLA 4.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL	44
TABLA 4.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICO – MECÁNICAS DE LOS BIOFILTROS DURANTE LA FASE INICIAL	46
TABLA 4.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICO – MECÁNICAS DE LOS BIOFILTROS DURANTE LA FASE MODIFICADA	46
TABLA 4.5 COMPACTACIÓN DEL LECHO AL FINALIZAR CADA FASE	48
TABLA 4.6 PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE DQO EN LOS REACTORES CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,40 M	57
TABLA 4.7 PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE DQO EN LOS REACTORES CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,50 M	59
TABLA 4.8 PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE DQO EN LOS REACTORES CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,60 M	61
TABLA 4.9 PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE COLOR EN LOS REACTORES CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,40 M	64
TABLA 4.10 PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE COLOR EN LOS REACTORES CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,50 M	66
TABLA 4.11 PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE COLOR EN LOS REACTORES CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,60 M	69

TABLA 4.12 RESUMEN DE LAS EFICIENCIAS ALCANZADAS POR LOS BIOFILTROS	70
TABLA 4.13 COMPARACIÓN DEL BIOFILTRO MÁS EFICIENTE CON LA NORMATIVA AMBIENTAL VIGENTE	71
TABLA 4.14 COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS CON OTROS MATERIALES	72

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO N° 1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA CÁSCARA DE BANANO	92
ANEXO N° 2 CARACTERIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE BANANO	94
ANEXO N° 3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO – MECÁNICA DE LOS BIOFILTROS	98
ANEXO N° 4 RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL Y OPERACIÓN DE LOS BIOFILTROS	109

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

AITE	Asociación de Industrias textiles del Ecuador
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
MAE	Ministerio del Ambiente
ONU	Organización de las Naciones Unidas
SENPLADES	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SST	Sólidos Suspendidos Totales
ST	Sólidos Totales
pH	Potencial Hidrógeno
Unit Pt-Co	Unidades Platino - Cobalto
SEM	Microscopia Electrónica de Barrido (por sus siglas en inglés)
PCC	Punto de Carga Cero
LEMSUR	Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas
FICA	Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental
EPN	Escuela Politécnica Nacional
ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales (por sus siglas en inglés)
INIAP	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias
DMQ	Distrito Metropolitano de Quito
LANUM	Laboratorio de Nuevos Materiales
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
LDIA	Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental
APHA	Asociación Americana de Salud Pública (por sus siglas en inglés)
PET	Polietileno Tereftalato
CIERHI	Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos

PVC

Policloruro de vinilo

NTU

Unidad de Turbidez Nefelométrica (por sus siglas en inglés)

RESUMEN

El presente trabajo evalúa la cáscara de banano (*Musa paradisiaca*) como material de empaque en un sistema de biofiltración a escala de laboratorio, para el tratamiento de aguas residuales provenientes del lavado y tinturado de jeans, mediante la remoción de DQO y color aparente.

Inicialmente, se caracterizó el material biofiltrante acondicionado y el agua residual. Seguidamente, se construyeron seis biofiltros, variando dos tamaños de partícula (2,00 y 4,75 mm) y tres alturas de lecho filtrante (0,40; 0,50 y 0,60 m), estos fueron alimentados continuamente a gravedad, con carga hidráulica superficial de 0,55 m³.m⁻².día⁻¹. Se realizaron monitoreos semanales del afluente y efluentes, para determinar la eficiencia de remoción de los parámetros operacionales y dos veces por semana, los parámetros de control del sistema. Transcurridos 45 y 66 días de operación, se evidenció compactación del lecho, optando por adicionar piedra pómez al material de empaque, en relación 3:1.

La operación del sistema se llevó a cabo por un período de 126 días, observando que el biofiltro de mayor tamaño de partícula y altura de lecho filtrante, mostró la mayor remoción tanto en DQO como en color aparente, 30,05 ± 1,51% y 21,80 ± 0,84%, respectivamente. Respecto a sólidos suspendidos totales y sólidos totales, las remociones fueron del 71,23% y 27,40 %. Sin embargo, solamente estos dos últimos valores, cumplen con los límites permitidos de la normativa ambiental vigente. Finalmente, el biofiltro de menor tamaño de partícula y altura presentó menor eficiencia de remoción para DQO y color aparente.

Palabras claves: Biofiltro, DQO (demanda química de oxígeno), color, *Musa paradisiaca*, índigo.

ABSTRACT

This work evaluates the banana peel (*Musa paradisiaca*) as packaging material in a laboratory scale biofiltration system, for the treatment of waste water from the washing and dyeing of jeans, by removing COD and apparent color.

Initially, the conditioned biofilter material and waste water were characterized. Then, six biofilters were built, varying two particle sizes (2,00 and 4,75 mm) and three filter bed heights (0,40; 0,50 and 0,60 m); these were continuously fed to gravity, with a surface hydraulic load of $0,55 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Weekly monitoring of tributary and effluents were carried out, to determine the removal efficiency of the operational parameters and twice a week the control parameters of the system. After 45 and 66 days of operation, compaction of the bed was evidente, opting to add pumice stone to the packaging material, in relation 3:1.

The operation of the system was carried out for a period of 126 days, observing that the biofilter with the largest particle size and filter bed height, showed the highest removal in both COD and apparent color, $30,05 \pm 1,51\%$ and $21,80 \pm 0,84\%$, respectively. Regarding total suspended solids and total solids, the removals were 71,23% and 27,40%. However, only these last two values comply the permitted limits of current environmental regulations. At last the biofilter with smallest particle size and height lower, presented the lowest removal efficiency for COD and apparent color.

Keywords: Biofilters, COD (Chemical Oxygen Demand), color, *Musa paradisiaca*, indigo.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo de titulación evalúa la cáscara de banano como material biofiltrante para tratar efluentes provenientes del lavado y tinturado de jeans, mediante la remoción de color y DQO.

El estudio consta de cinco capítulos descritos a continuación:

El **Capítulo 1 “Introducción”**, aborda los antecedentes, la justificación, el objetivo general, los objetivos específicos y el alcance propuestos para el desarrollo de esta investigación.

El **Capítulo 2 “Marco teórico”**, describe las características de la industria del jean, haciendo énfasis en el proceso de lavado, la problemática del agua residual generada por esta industria, además los tratamientos convencionales y no convencionales aplicables. Por otra parte, presenta el principio de funcionamiento de la biofiltración, una descripción de los materiales filtrantes comunes, haciendo hincapié en la cáscara de banano. Finalmente, se muestra la normativa vigente para descargas de aguas residuales a cuerpos de agua dulce.

El **Capítulo 3 “Metodología”**, detalla los procedimientos para el acondicionamiento y caracterización de la cáscara de banano y el agua residual. Se presentan los parámetros de diseño y construcción de los sistemas de biofiltración, así como su caracterización físico – mecánica, parámetros y frecuencia de monitoreo para su evaluación.

El **Capítulo 4 “Resultados y discusión”**, presenta la caracterización de la cáscara de banano y del agua residual. Además, se analiza el comportamiento de cada reactor respecto a las pérdidas de altura del lecho filtrante, su caracterización físico – mecánica y las eficiencias alcanzadas en la remoción de DQO y color aparente, en función del tamaño de partícula y altura del lecho, tanto de la fase inicial como de la fase modificada. También se determina el biofiltro más eficiente y se compara con otros materiales biofiltrantes, utilizados en el tratamiento de aguas residuales

de lavadoras de jeans. Por último, se verifica el grado de cumplimiento, de la calidad del efluente del biofiltro más eficiente, con la normativa ambiental vigente.

El **Capítulo 5 “Conclusiones y recomendaciones”**, recopila los resultados obtenidos acorde a los objetivos planteados en el plan del proyecto y presenta las recomendaciones para estudios posteriores respecto al tema investigado.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La industria textil ecuatoriana remonta sus inicios a la época colonial, específicamente a finales del siglo XVI, donde se fabricaban tejidos con lana de oveja. Sin embargo, no es hasta principios del siglo XX, donde aparecen los primeros procesamientos del algodón, siendo la década de los 50s cuando se fortalece su uso (AITE, 2018). Hoy en día, la producción textil proviene de todo tipo de fibras, sean naturales como lana, algodón y seda o artificiales como poliéster, nylon y todo tipo de acrílicos (Ordoñez, 2015).

En Ecuador, la variedad del sector textil ha permitido que se fabriquen un sin número de productos, como hilos, telas o prendas de vestir y tejidos para el hogar. Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2010), el sector textil es el segundo en demanda de mano de obra, después del alimenticio, bebidas y tabacos (AITE, 2018).

Con el tiempo, diversas empresas se han dedicado a la actividad textil, Imbabura, Tungurahua, Azuay, Guayas y Pichincha, son las provincias más destacadas con alto número de ventas, empleo y empresas, a su vez, los cantones más importantes por su presencia son Quito, Guayaquil, Ambato, Cuenca y Antonio Ante (Ordoñez, 2015).

Dentro de la provincia de Tungurahua, se encuentra Pelileo, un cantón netamente textil, donde al menos el 60% de los habitantes laboran, directa e indirectamente, en la elaboración de prendas de vestir, especialmente en tela Denim o comúnmente conocida como “jean” (Novoa, 2016). Según la Asociación de Fabricantes y Comerciantes “La Feria del Jean 2017”, se estima que existen cerca de 1000 talleres de confección entre grandes, medianos y pequeños, producen aproximadamente un millón de prendas al mes, con un ingreso aproximado de USD 10 millones anuales (Moreta, 2017).

El desarrollo de la industria de confecciones de jeans en la provincia de Tungurahua, ha venido generando un crecimiento en el sector de las lavanderías y tintorerías, pues tan solo en Pelileo existen 53 establecimientos dedicados específicamente al lavado y tinturado de tela Denim (Barrera, 2015). Sin embargo, esta actividad tiene un alto impacto ambiental negativo, pues la mayoría descarga sus efluentes líquidos directamente al ambiente siendo pocos los establecimientos que cuentan con los permisos otorgados por el Ministerio del Ambiente (MAE) (El Telégrafo, 2015).

A nivel mundial, la producción textil es la segunda actividad que más contamina seguida del petróleo, por ello la industria de la moda es catalogada como una emergencia para la naturaleza (ONU, 2018). La problemática de la industria del jean radica, tanto en la cantidad excesiva de agua que se emplea para el lavado y teñido como por el colorante índigo utilizado, tinte de difícil degradación y altamente recalcitrante (Ruiz, 2011). La problemática ambiental empeora cuando los efluentes generados del proceso textil, sin tratamiento alguno, son vertidos directamente a cuerpos hídricos, causando reducción del oxígeno disuelto y consecuente mortalidad de especies acuáticas.

Los efluentes textiles se caracterizan por registrar valores altos de color (3000 - 4500 unit Pt-Co), DQO (800-1600 mg/L), pH (9-11) y ST (6000-7000 mg/L) (Kuhad, Sood, Tripathi, Singh & Wad, 2004), que están sobre los límites máximos permitidos en la Normativa Ecuatoriana. Por esta razón, es necesario implementar tratamientos de depuración, cuya aplicación sea factible en pequeñas y medianas empresas ubicadas a lo largo del país, debido a que los tratamientos convencionales limitan su implementación por los costos elevados de operación y mantenimiento (Sosa, 2015).

La biofiltración surge como una alternativa no convencional para el tratamiento de efluentes, es sencilla de operar, los costos de inversión son bajos y reduce a una quinta parte las dimensiones de una planta convencional. Los biofiltros están rellenos de materiales orgánicos e inorgánicos dando soporte al crecimiento microbiano, que degradan a los contaminantes (Vigueras et al., 2013).

La presente investigación tiene como finalidad evaluar la viabilidad del uso de la cáscara de banano en un sistema de biofiltración a escala de laboratorio, para remover DQO y color de efluentes provenientes del lavado y tinturado de jeans, variando el tamaño de partícula y altura del lecho filtrante. Esta información abre un campo de estudio enfocado al reciclaje de residuos para el tratamiento de aguas residuales y puede constituir una base para estudios posteriores o para la aplicabilidad de este tipo de tecnología, a nivel de pequeñas y medianas industrias textiles.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, Ecuador tiene graves problemas de contaminación de cuerpos hídricos debido a los vertimientos de aguas residuales domiciliarias, industriales, agrícolas y la disposición final de residuos sólidos, agroquímicos y nutrientes (SENPLADES, 2017).

Dentro del ámbito industrial, el sector textil dedicado a la confección de jeans, es caracterizado como uno de los mayores generadores de aguas residuales que desencadenan una problemática ambiental puesto que estos efluentes contienen pH variados, metales pesados, niveles altos de DBO, DQO, color, turbiedad, sólidos suspendidos y temperatura (Coronel & Tenesaca, 2013). Dicha agua residual con elevada carga contaminante, en muchas ocasiones, es desfogada sin ningún tratamiento previo, en alcantarillados o directamente en acequias y canales de riego (EL UNIVERSO, 2009).

Como consecuencia, los cuerpos de agua del país presentan niveles preocupantes de contaminación, especialmente en parámetros como DQO y color, principales signos contaminantes que se evidencian en estos efluentes debido a que no cumplen con lo permitido en la Normativa Ecuatoriana vigente (Buelna, Garzón & Moeller, 2011).

Para tratar este tipo de agua residual existen procesos físicos, químicos y biológicos, que en su mayoría resultan altamente costosos para un gran número de pequeñas industrias, por ello nace la idea de aplicar la biofiltración como una

opción económica y ambientalmente aceptable para el tratamiento de este tipo de efluentes (Van deer Zee & Villaverde, 2005).

La biofiltración es un proceso biológico que descompone contaminantes presentes en aguas residuales mediante microorganismos fijados a un medio poroso (Srivastava & Majumder, 2008).

Actualmente, la biofiltración utiliza una amplia gama de nuevos materiales orgánicos que sustituyen a los usados en los medios granulares tradicionales, optimizando así su eficiencia en comparación a otras alternativas de tratamiento (Arango, 2004).

En relación al material biofiltrante propuesto en el presente estudio, se conoce que las investigaciones realizadas por Gamarra (2014) y Castro (2015) describen a la cáscara de banano (*Musa paradisiaca*) como un material con alto potencial en procesos de bioadsorción para la retención de metales pesados debido a su estructura molecular.

También Aucancela (2018) y Palma, Contreras, Urra & Martínez (2011), en sus estudios han empleado cáscaras de banano como medio bioadsorbente para la retención de contaminantes en aguas residuales sintéticas. Aucancela (2018) reporta eficiencias de remoción promedio de color de 65,15%, y DQO 63,39% empleando aguas residuales sintéticas con valores de color de hasta 5000 unit Pt-Co, por su parte Palma et al. (2011) evidencian en su estudio realizado en aguas sintéticas provenientes de procesos de teñido, la posibilidad de utilizar la cáscara de banano como material prometedor en el avance de una estrategia de biorremediación global de aguas residuales que contienen compuestos peligrosos, como los colorantes y metales pesados.

La presente investigación empleará cáscaras de banano, como material de empaque en un sistema de biofiltración para tratar aguas residuales crudas provenientes del lavado y tinturado de tela jeans, además, al ser la cáscara de banano un desecho común en nuestro medio, se propone su recolección desde el Mercado Mayorista de Quito como una alternativa para la gestión de los desechos producidos en sus instalaciones.

También se preparará y caracterizará el material de empaque empleado a fin de conocer sus propiedades físicas, químicas y morfológicas, las mismas que aportarán a futuras investigaciones en donde se requiera del uso de cáscaras de banano.

La metodología a utilizarse se basa en la construcción de seis biofiltros a escala de laboratorio, variando el tamaño de partícula y altura del lecho filtrante con el fin de determinar la viabilidad de su uso mediante la comprobación y comparación de las eficiencias de remoción que se podrían alcanzar al variar estos parámetros. La evaluación de los parámetros físicos y químicos del afluente y efluente seguirán los lineamientos determinaos en la normativa vigente y en métodos estandarizados.

La determinación del tamaño de partícula y altura de lecho filtrante más eficiente para el tratamiento de este tipo de efluentes, podrán contribuir al diseño e implementación de nuevos sistemas de tratamientos de agua no convencionales, que beneficien a pequeñas empresas asentadas en áreas rurales y urbanas del país, debido a los bajos costos de operación y mantenimiento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la cáscara de banano como material de empaque en un sistema de biofiltración a escala de laboratorio, para tratar aguas residuales provenientes del lavado y tinturado de jeans, comparando los porcentajes de remoción de DQO y color obtenidos.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la cáscara de banano mediante ensayos analíticos e instrumentales para determinar las propiedades físicas, químicas y morfológicas del material base.
- Caracterizar el agua residual proveniente de la lavadora de jeans “Color & Denim”, mediante análisis físicos y químicos, para determinar su carga contaminante inicial.

- Determinar el porcentaje de remoción de DQO y color del agua residual, mediante pruebas de monitoreo en cada uno de los biofiltros con diferentes tamaños de partícula y alturas del lecho, con la finalidad de evaluar la eficiencia del sistema de biofiltración.

1.4 ALCANCE

La presente investigación consiste en evaluar la cáscara de banano en la remoción de color y DQO de aguas residuales provenientes del lavado y tinturado de jeans, mediante un sistema de biofiltración de flujo continuo descendente a escala de laboratorio.

El proyecto se llevará a cabo en seis biofiltros construidos a nivel de laboratorio, utilizando como variación dos tamaños de partícula y tres alturas de lecho filtrante, aportando condiciones necesarias que faciliten la remoción de contaminantes por medio de procesos biológicos. El biofiltro que presenta mejores resultados se determinará a través de monitoreos periódicos de color y DQO en el efluente.

Se considera este medio de soporte debido a que es un residuo fácilmente disponible en el país y cuya utilización permitirá dar una buena disposición final.

Finalmente, la información obtenida será útil para próximos estudios debido a la falta de antecedentes sobre el uso de este residuo para el tratamiento biológico de aguas residuales, especialmente, de efluentes textiles.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

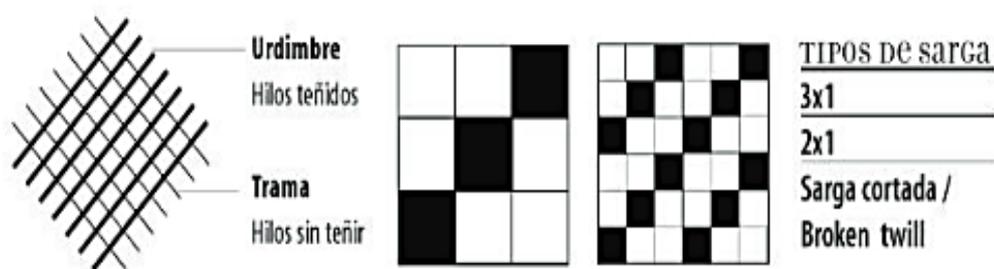
2.1 INDUSTRIA DEL JEAN

El jean se origina a mediados del año 1500, partiendo de una tela de algodón sargado, cuyo nombre originario es “Denim”, debido a que inició su fabricación en la ciudad francesa de Nimes donde la tela era distinguida como “Serge de Nimes” (Chávez, 2017). La típica coloración azul usada en el jean, es generada por una tintura sintética denominada añil o índigo, desarrollada por primera vez en el año 1880 por Adolf Von Baeyer (Vega, 2017).

El término “Blue jean” o “Jean” cobra popularidad en 1960, debido a que este término se deriva de la palabra “genoese” o “genes”, que hace alusión a los pantalones robustos usados por los mercaderes o marineros Genoveses. Ya para el siglo XX, el jean cobra popularidad por su estilo diferente y único (Clariant, 2012).

El Denim es un tejido conformado por hilos de urdimbre teñidos e hilos de trama sin tinturar (Miettinen, 2007). De la fase de tejeduría, se obtienen “telas crudas” denominadas así por su rigidez y tacto áspero, debido a la introducción de implementos que dan resistencia y elasticidad a la tela (Saulquin, 2004). La Figura 2.1 muestra la tejeduría del Denim y los tipos de sarga utilizadas.

Figura 2.1 Estructura el tejido del Denim y sus tipos de sarga utilizadas

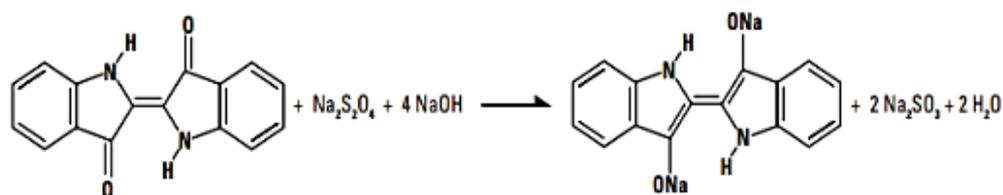


FUENTE: Saulquin, 2004.

El color azul característico del Denim proviene del colorante azul índigo, ya sea en su forma natural o sintética. Actualmente, por la demanda en la industria textil se

utiliza el índigo sintético, el cual para ser disuelto en agua necesita ser reducido a leuco Índigo, con ditionito sódico, como se muestra en la Figura 2.2. Una vez que el colorante se ha fijado en la tela, viene la exposición a un oxidante (aire) donde la tela se torna de color azul (Saura & Galindo, 2015).

Figura 2.2 Mecanismo de reducción de la molécula de índigo sintético



FUENTE: Clariant, 2012.

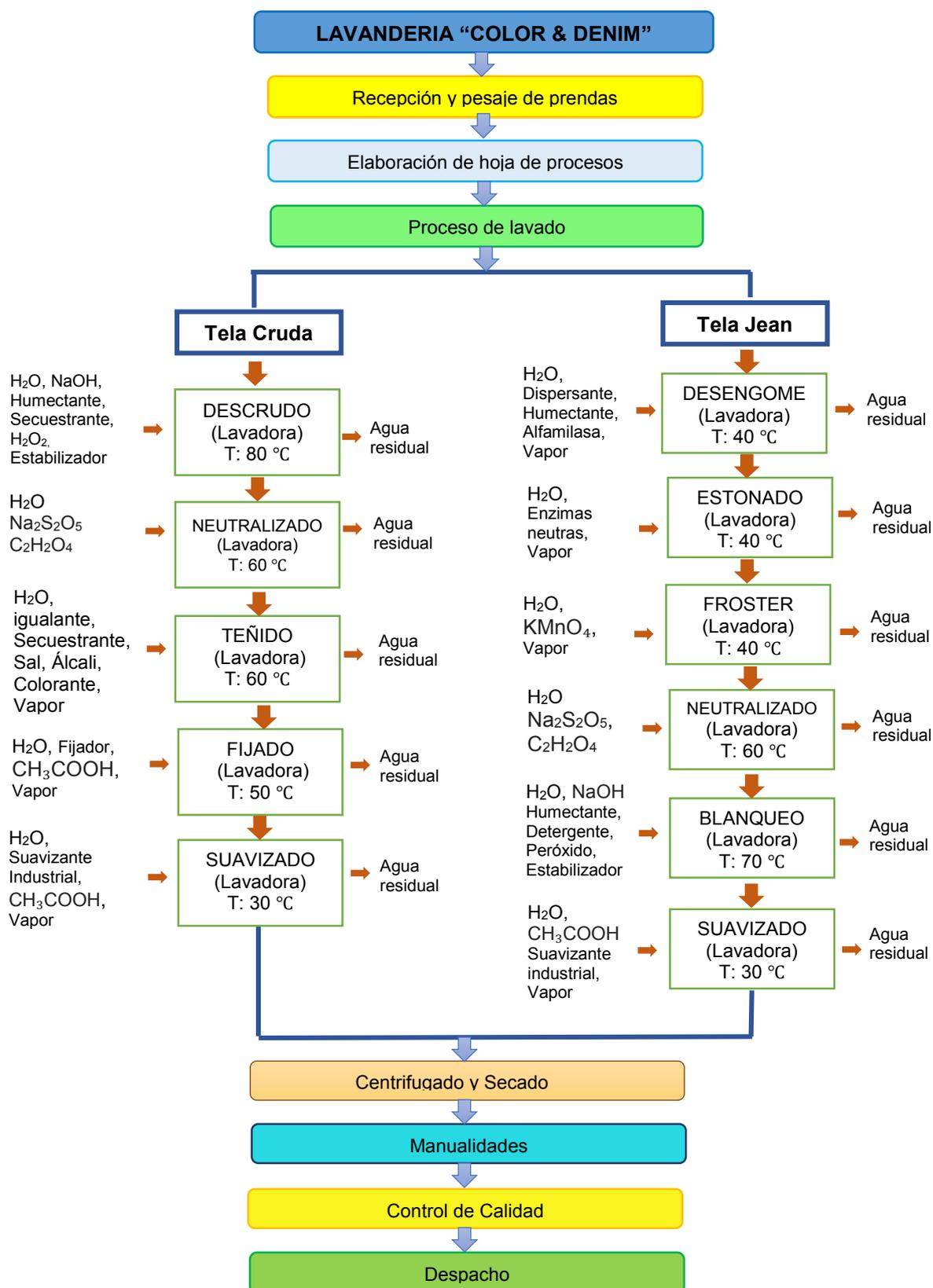
Los colorantes índigos sintéticos son de tipo azo, usualmente considerados como xenobióticos y recalcitrantes a la biodegradación. Actualmente, el 70% de tintes utilizados en la industria textil, corresponden a este grupo (Padmavathy, Sandhya & Swaminathan, 2003).

La principal ventaja del Denim es la factibilidad de reducir el tono a través de procesos de lavado, pero la desventaja es el alto consumo de agua con alta carga contaminante, un meticuloso control de pH, concentración de índigo y temperatura (Roshan, 2012).

2.1.1 PROCESO DE LAVADO Y TINTURADO DE TELA JEAN

La lavandería “Color & Denim”, localizada en la ciudad de Quito, fue la empresa escogida para la presente investigación. Esta empresa se dedica al lavado y tinturado de jeans, con una capacidad productiva de 1500 kg de prendas por día. La actividad productiva empieza con la admisión de piezas, seguido del llenado de la hoja de requerimientos del cliente y finalizando con el lavado y acabado final para su despacho. Se necesitan de distintas etapas para llegar al producto final, por ello cada pieza tiene sus condiciones propias de lavado. La Figura 2.3 representa el proceso de manufactura de la empresa abarcando todas las posibles etapas por la que puede pasar una prenda.

Figura 2.3 Diagrama de flujo de la lavandería “Color & Denim”



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

PASO 1: Recepción y pesaje

Es la primera etapa del proceso productivo de la empresa, consiste en la inspección de las prendas para la posterior elaboración de la hoja de procesos, que detalla las especificaciones requeridas por el cliente. Los pedidos pueden ser en “telas crudas” o en “telas jeans”. Las telas crudas son de color blanco sujetas a tinturación, mientras que las telas jeans hacen referencia a prendas ya confeccionadas (pantalones o chaquetas) con diferentes tonalidades de color índigo, como se observa en la Figura 2.4.

Figura 2.4 Recepción de telas en la lavandería “Color & Denim”



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

PASO 2: Elaboración de hoja de procesos

En la hoja de procesos se detalla las especificaciones de lo solicitado por los clientes.

PASO 3: Proceso de lavado

- a. **Desgomado:** suele ser el primer proceso que se realiza a la prenda para un mejor acabado. Consiste en solubilizar y eliminar la goma aplicada en la hebra de la tela, mediante la aplicación de enzimas, que rompen la estructura del almidón a cadenas más pequeñas de materias solubles como: maltosa, dextrina y azúcar (Barrera, 2015). Para esta etapa se

adicionan tres productos: dispersante 1,20 g/L, humectante 1g/L y enzima alfa-amilasa 0,40 g/L, dura 15 minutos a 40°C, la cantidad de agua dependerá de la cantidad de prendas a desengomar, así para 150 prendas se utiliza cerca de 400 litros de agua.

- b. **Descrudo:** este proceso es el primero a ser realizado en una tela cruda para separar la semilla de algodón de la tela por medio de reacciones químicas, mediante: NaOH, humectante, secuestrante, H₂O₂ y estabilizador. El proceso toma aproximadamente 20 min a 80°C.
- c. **Estonado o Stone Wash:** es la pérdida de color de manera homogénea, en la superficie de la tela jean. Este proceso se reconoce por la aparición de trazados blancos cuyo contraste es el indicador del lavado (Barrera, 2015). El proceso consta de un lavado entre la prenda y enzimas neutras, que aportan un tono ambiguo a la pieza confeccionada, su pH oscila entre 4,5 a 7; dependiendo del tipo de enzima. La duración del proceso depende de la textura de la tela, entre 15 a 40 minutos a 40°C.
- d. **Froster:** es la etapa que brinda mayor desgaste del color de la prenda, es decir, se aporta con mayor aparición de trazos blancos en la superficie. Este proceso consiste en la adición de KMnO₄ durante 10 minutos a 40°C y pH cercano a 10.
- e. **Neutralizado:** este paso tiene como objetivo conservar la fuerza de la tela cruda o jean y evitar irritaciones en la piel por el exceso del agente oxidante, por ello se adiciona Na₂S₂O₅ 2 g/L y C₂H₂O₄ 1 g/L. Se realiza durante 10 minutos a de 60°C.
- f. **Teñido:** da el tono adecuado a la tela cruda dependiendo del pedido. En esta etapa ingresan auxiliares: igualante 1 g/L, secuestrante 2 g/L, sal 5 g/L, álcali 1g/L, colorante 0,066 g/L. El proceso se realiza durante 40 minutos a 60°C cuyo efluente líquido tiene un pH de 11.
- g. **Fijado:** como su nombre lo indica, este proceso permite fijar el color a la tela. Se realiza un lavado con fijador 0,5 g/L durante 10 min a 50°C, descargando un efluente líquido con pH de 5.
- h. **Blanqueo:** se realiza para dar limpieza a la prenda. En esta etapa ingresa: humectante 0,50 g/L, detergente 0,50 g/L, blanqueador 0,25 g/L,

NaOH 2 g/L, estabilizador 1 g/L y H₂O₂ 3 g/L. El lavado se realiza durante 15 minutos a 70°C.

- i. **Suavizantes:** este proceso consiste en dar a la tela una textura suave y reluciente mediante la utilización de suavizantes industriales, durante 10 minutos a 40°C. El efluente líquido tiene un pH de 5.

PASO 4: Centrifugado y secado

El centrifugado consiste en un lavado normal de la tela, con un detergente llamado “Eco Pc”, durante 30 minutos. Posteriormente, la prenda es secada en máquinas secadoras de gran capacidad durante 20 minutos.

PASO 5: Manualidades

Posterior lavado y secado, las telas son llevadas al área de manualidades para dar los acabados necesarios, dependiendo de los requerimientos del cliente.

PASO 6: Control de calidad

Antes de empacar el producto final, se realiza una inspección general para verificar el cumplimiento de procesos requeridos por el cliente.

PASO 8: Despacho

Una vez que las piezas pasaron el control de calidad, son empacadas y finalmente entregadas al cliente.

2.1.2 AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE LAVADO Y TINTURADO DE TELA JEAN

Las aguas residuales domésticas presentan contaminación orgánica e inorgánica de naturaleza y concentración semejante, por lo tanto, sus tratamientos son similares. Sin embargo, cuando se trata de efluentes industriales la situación es distinta, se debe realizar una investigación particular para cada caso, teniendo en cuenta los procesos que se emplean, con el fin de conocer las características de los efluentes tanto en calidad como cantidad y, de esta manera, plantear un

tratamiento adecuado que permita cumplir con la normativa ambiental respecto a descargas a cuerpos receptores (Romero, 2009).

Las lavadoras de jeans consumen grandes volúmenes de agua, alrededor de 64,68 L/kg de prendas procesadas (Guamán, 2014). El impacto ambiental generado por las aguas residuales es alto, tanto por volumen como por las sustancias químicas utilizadas, que pueden llegar a eliminar procesos fotosintéticos en el agua por la coloración que imparte, además de deteriorar la calidad de los cuerpos de agua y reducir la flora y fauna acuática (Quintero & Cardona, 2009).

En general, los efluentes provienen principalmente del desengomado (15%), estonado (20%), blanqueo y teñido (65%), siendo el desengome la etapa que aporta más cantidad de carga orgánica con 50% de la DBO total (Mansilla, Lizama, Gutarra & Rodríguez, 2001).

2.1.3 PROBLEMÁTICA

El total de agua utilizada en las diferentes actividades textiles depende del proceso, las fibras y el equipo empleado por la empresa. Por ejemplo, en el desengomado, se utiliza entre 2 a 3 L/prenda jean con un solo enjuague, pero para el proceso de blanqueo se utiliza el doble del volumen de agua del desengomado, entre 5 a 6 L/prenda jean.

Por otro lado, los colorantes de la industria textil son persistentes en el medio ambiente, así el promedio de vida del tinte azul índigo es de 46 años (Hao, Kim & Chang, 2000). Además se ha comprobado que algunos colorantes azo pueden ser mutagénicos y carcinogénicos, y que la degradación de los productos resultantes pueden ser tóxicos (Gavril & Hodson, 2007).

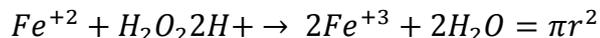
Además, los trabajadores de la industria del jean, enfrentan posible riesgo genotóxico, debido a que están expuestos a químicos: blanqueadores, ácidos y sales; al igual que problemas auditivos por el aumento de niveles sonoros en la operación de maquinaria (Cortázar, Coronel, Lozada & González, 2014).

2.1.4 TRATAMIENTOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES

Es necesario el tratamiento de los efluentes textiles por la evidencia de compuestos dañinos provenientes de la materia orgánica e inorgánica. Existen tratamientos eficientes que garantizan el control requerido por las agencias legales ambientales, pero son muy costosos. Entre ellos se puede mencionar a los siguientes:

Proceso Fenton: el tratamiento de efluentes textiles por este método oxidativo avanzado permite la destrucción de compuestos orgánicos. Actualmente, se usa para tratar una amplia variedad de compuestos orgánicos tóxicos que no son susceptibles de tratamiento biológico. Se aplica para tratar aguas residuales variadas, lodos e incluso remediación de suelos contaminados.

Resultante de la reacción del H_2O_2 con Fe^{+3} , el reactivo de Fenton aparece como una alternativa de tratamiento, porque produce radicales libres que actúan como un fuerte agente oxidante, capaz de eliminar grandes concentraciones de color y turbidez (Cardoso, 2010).



Adsorción: es un proceso bastante eficiente para pequeños volúmenes de efluente, es una técnica lenta y costosa; consiste en eliminar el tinte pasando el efluente a través de algún material adsorbente como carbón activo, gel de sílice, bauxita, resinas de intercambio iónico, derivados de celulosa, entre otros (Guarantini & Sanoni, 2011).

Membranas: el uso de membranas permite el tratamiento de grandes volúmenes de efluentes, pero los costos son altos y el mantenimiento es muy problemático debido a la dificultad de limpiar las piezas de filtros. Se basa en la separación efectiva de las moléculas de tinte de tamaños lo suficientemente grandes como para separarse del efluente (Guarantini & Sanoni, 2011).

Electrolisis: consiste en la degradación de la molécula de tinte, por medio de corrientes controladas o reactivos secundarios generados electrolíticamente, es una técnica que no es económicamente viable y, químicamente, genera metabolitos con características tóxicas (Guarantini & Sanoni, 2011).

Degradación química: está basado en la reacción oxidativa por Cl_2 . Es más eficiente y efectivo cuando se usa O_3 y no Cl_2 porque, con este último, presenta resultado insatisfactorio para algunos colorantes. El tratamiento con el O_3 ofrece la ventaja adicional de no producir iones inorgánicos. Esta técnica consiste en la eliminación del color mediante la división de las moléculas de tinte por procesos catalíticos (Guarantini & Sanoni, 2011).

Radiación ultravioleta: la radiación ultravioleta es un método bastante ventajoso, por presentar rendimientos eficientes en el tratamiento de grandes volúmenes de efluentes con efectos muy rápidos, pero es un proceso económicamente costoso (Guarantini & Sanoni, 2011).

Degradación de reacción fotoquímica: el método de degradación del color de los efluentes en base a reacciones fotoquímicas se presenta como una alternativa en la etapa de tratamiento primario de algunos tintes, porque los tintes sintéticos inicialmente tienen una alta estabilidad cuando se somete a luz visible o ultravioleta. En este método, el uso de radiación electromagnética para producir productos intermedios más reactivos, capaces de promover una degradación más rápida y eficiente, se ha utilizado para mejorar su aplicación como técnica de tratamiento de efluentes textiles (Guarantini & Sanoni, 2011).

Si bien, los tratamientos como la coagulación, la degradación química y la radiación ultravioleta, podrían ser una alternativa viable para industrias textiles a pequeña escala (IMTA & SEMARNAT, 2011), sus repercusiones medioambientales conllevan a crear entornos hostiles.

En consecuencia, para el desarrollo de la industria textil, es necesario, implementar procesos que generen un menor impacto ambiental y disminuyan los costos de producción. En este sentido la biofiltración se presenta como una alternativa no convencional que necesita espacio reducido para su implementación (IMTA & SEMARNAT, 2011).

La Tabla 2.1 resume las ventajas y desventajas de tratamientos aplicados a efluentes textiles.

Tabla 2.1 Tratamientos aplicados a efluentes textiles

Autores	Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
(Marmagne, Coste & Jacquart, 1996) (Mishra & Bajpai, 2005) (Góngora & Zapata, 2016)	Coagulación y Floculación	Formación de partículas mediante la adición de coagulante o floculantes (cal, FeSO ₄ , FeCl ₃ , etc.)	Tecnología no tóxica, menor tiempo para decantar y operación simple. Remociones de color de 71,40% utilizando un polímero natural mucilago de <i>Plantago psyllium</i>	Alta generación de lodos y costo de equipos.
(Arango, 2004) (Góngora & Zapata, 2016)	Electro-coagulación	Utiliza corriente eléctrica para dar origen a diversas reacciones químicas que rompen enlaces de los contaminantes presentes.	Equipos fáciles de operar. Menor generación de lodos más compactos.	No es eficiente en la remoción de DBO soluble. Mayor gasto en el uso de electricidad.
(Solís et al., 2013)	Sedimentación	Separación sólido-líquido	Eficiencias mayores al 50% en remoción de color y DQO (depende el tipo de lavado)	Formación de lodos
(Galarza, 2017)	Carbón activado	Remoción por adsorción	Eficiencias de 66% DQO, 53% DBO y 31% color	Muy costoso
(Toapanta, 2018)	Filtración	Retención de sólidos por la acción de un medio filtrante	Eficiencias de DQO 74,47%, DBO5 74,43% y Color 51,72% utilizando grava	Saturación superficial del material filtrante

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

2.2 BIOFILTRACIÓN

Los primeros indicios del uso de los sistemas de biofiltración se dan en el año de 1923, donde se intentó remover H₂S de plantas de tratamiento de aguas residuales, a través del crecimiento de microorganismos responsables de la degradación de

los gases, a partir de ese momento esta tecnología se utilizó para la degradación de compuestos odoríferos o que generan olores desagradables, como el H₂S (Van Groenestijn & Hesselink, 1993; INECC, 2007).

La biofiltración es una tecnología simple, que emplea materiales biodegradables o medios granulares, como lecho de contacto para depurar aguas residuales procedentes de diversas actividades humanas. Actualmente, se ha ubicado como una biotecnología cada vez más utilizada, al no requerir nutrientes, floculantes, coagulantes, u otro tipo de aditivo. (Paredes, 2016).

En el lecho filtrante se llevan a cabo procesos físicos, químicos y microbiológicos, promovidos por las bajas tasas de filtración y la consecuente formación de una biopelícula adherida a la superficie del material filtrante (Arango, 2004), siendo responsable en la remoción y/o retención de agentes patógenos y contaminantes del agua (Chávez et al., 2011).

Con el fin de reducir costos en las plantas de tratamiento, se realizan investigaciones dirigidas a nuevos materiales orgánicos como lechos filtrantes, por su versatilidad, frente a otras alternativas (Eugenio, 2017). Es así, que la biofiltración se considera una tecnología sostenible por su eficiencia de remoción, facilidad de construcción, bajo costo de operación y mantenimiento (Pacheco, 2015).

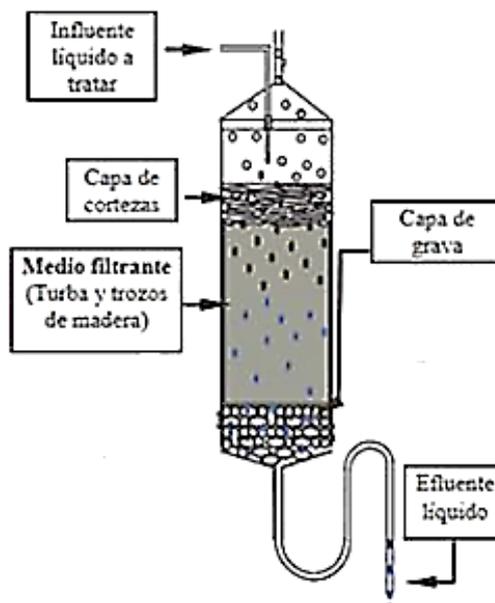
Dos investigaciones que se pueden mencionar, son la realizada por Paredes (2016) donde empleó turba, con remociones de 79,69% para DQO, 75,33% para DBO₅ y 57,33% para SST; y la realizada por Quilligana (2018), quién utilizó bagazo de caña logrando remociones de DBO₅ 87,10%, DQO 89,35% y color 84,51%.

El diseño de los biofiltros depende de varios factores, entre ellos la altura, si el sistema es cerrado o abierto, o si consta de uno o varios lechos de soporte (Paredes, 2016).

De manera general, un biofiltro consta de tres capas: a) capa inferior con un material de soporte que impida el paso del material filtrante; b) lecho filtrante donde se lleva a cabo la degradación de contaminantes por parte de los microorganismos; c) capa

superior que permite la distribución homogénea del agua residual a tratar. La Figura 2.5 representa a un sistema de biofiltración con sus principales componentes.

Figura 2.5 Representación de un sistema de biofiltración



FUENTE: Garzón, 2005.

2.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Según Sosa, Viguera & Holguín (2014), el sistema de biofiltración se compone de dos fases:

- *Fase sólida:* es el medio de soporte que permite el desarrollo de una población bacteriana en la interfase agua - material de soporte.
- *Fase líquida:* es el agua residual a tratar.

El sistema de biofiltración inicia con una fase de acondicionamiento del medio filtrante limpio a bajas tasas de aplicación del agua residual, para proporcionar la adaptación microbial al sistema (García, 2007). La biopelícula formada entre el agua residual y el medio filtrante, bajo condiciones apropiadas de humedad, temperatura y O_2 , tiene un espesor de 0,10 mm y 2,00 mm (Sosa et al., 2014).

En un biofiltro los efluentes residuales son depurados por cuatro procesos en conjunto: (1) infiltración lenta y pasiva (0,02 a 0,50 mL/día), en el que se disminuyen sólidos (Buelna et al., 2011); (2) adsorción, absorción e intercambio iónico de

contaminantes (Couillard, 1994); (3) biodegradación realizada por los microorganismos (generalmente reducción de DBO_5 , P y N); y (4) desinfección o eliminación microbial patógena (Sosa et al., 2014).

2.2.2 MATERIALES FILTRANTES

El material filtrante ocupa entre el 50% a 70% de la altura total del biofiltro y sirve de soporte sólido para el desarrollo de microorganismos, logrando una capa de biomasa gruesa que se encarga en degradar contaminantes presentes en las aguas residuales mediante procesos físicos y químicos (Torres, Rodríguez & Uribe, 2003).

Según las investigaciones realizadas por Torres et al. (2003) los propósitos importantes del medio de soporte son:

- Desarrollar el contacto entre el agua residual y la microbiota que se encuentran en el reactor.
- Permitir un flujo más uniforme en el biofiltro.
- Facilitar la acumulación de biomasa.
- Prevenir el arrastre de los sólidos fuera del biofiltro.

De la elección del material de empaque dependerá la calidad final del agua residual a tratar y su tiempo de estabilidad operacional. Los requisitos ideales del medio de soporte son:

- Ser estructuralmente resistente para lograr un soporte sólido y duradero, que proporcione una degradación más lenta del medio filtrante (Romero, 2009), ya que una deficiente relación lignina/celulosa puede influir en la velocidad de descomposición del material vegetal (Escobar, Monsalve, Forero & Medina, 2010).
- Ser biológica y químicamente inerte para impedir reacciones entre el lecho y los microorganismos (Torres et al., 2003).
- Tener superficie específica y porosidad alta, que permita la adherencia de microorganismos y evitar problemas de compactación. El rango óptimo de porosidad para la elección de un material filtrante, está entre el 40 y el 80% (Arana, 2010).

- Permitir el rápido desarrollo de microorganismos a fin de disminuir el tiempo de arranque del biofiltro (Torres et al., 2003).
- Estar disponible a bajo costo para que su aplicación sea económica y factible (Torres et al., 2003).
- Tener buena capacidad de retención de líquidos para el crecimiento de microorganismos, el rango óptimo es considerado entre 40 – 60% (Sosa et al., 2014).
- Tener pH óptimo para el desarrollo de la actividad microbiana, generalmente entre 6 a 8 (Arana, 2010).

Es esencial la caracterización inicial del material biofiltrante para determinar su aplicabilidad o no, en el tratamiento de diferentes aguas residuales. Actualmente, existen mejores técnicas que permiten caracterizar a los diferentes materiales, algunas de ellas son:

- *Microscopía electrónica de barrido (SEM)*: es una técnica que proporciona la morfología superficial, porosidad, estructura cristalina y composición química de muestras sólidas (Clavijo, 2013).

- *Carga superficial mediante el punto de carga cero (PCC)*: esta caracterización es importante para procesos de adsorción. El PCC es el pH donde la carga neta de las partículas sobre la superficie del material adsorbente es neutra (Franks & Meagher, 2003). Con su determinación se conoce la distribución de cargas globales sobre la superficie del material, para retener contaminantes de naturaleza aniónica o catiónica, como colorantes y metales (Amaringo & Hormaza, 2013).

Un ejemplo de aplicación del PCC como parte de la caracterización de un material adsorbente, es la investigación realizada por Amaringo & Hormaza (2013), donde utilizó cascarilla de arroz (CA) con PCC = 5,40, a partir de este valor concluyó que la CA remueve eficientemente el colorante catiónico RB46 a pH superiores al PCC, por el contrario, la remoción de colorante aniónico R40 se ve favorecida a pH menores al PCC, específicamente en medio ácido con pH = 2 obteniendo eficiencias del 73%.

A pesar de demostrarse la importancia de la determinación del PCC, existe un número limitado de investigaciones que describen la ventaja del pH óptimo en que debe realizarse los procesos de adsorción para lograr remociones eficientes.

2.2.3 CÁSCARA DE BANANO

El banano (*Musa paradisiaca*), perteneciente a la familia Musaceae, es uno de los principales productos cultivados en Ecuador, fácil de almacenar y transportar (Elbehri et al., 2015). Ecuador es el mayor exportador de banano según la Asociación de Exportadores de Banano del Ecuador (AEBE), en 2018, se exportó 344 millones de cajas de banano, un aumento equivalente al 6%, comparado al 2017 (Hurtado, 2019).

El principal subproducto del procesamiento industrial del banano es su cáscara (Figura 2.6), que equivale al 35% - 40% del fruto, resultando en un residuo que se puede aprovechar (Melo, Torres-Grisales, Sema & Torres-Valenzuela, 2015). La cáscara de banano es rica en fibra dietética, proteínas, aminoácidos esenciales, ácidos grasos poliinsaturados y potasio (Blasco & Gómez, 2014), además está compuesta principalmente por celulosa (10,50%), hemicelulosa (14%) y lignina (17%) (Castro, 2015).

Debido a sus propiedades, se han realizado diversas investigaciones utilizando la cáscara de banano, Castro (2015) lo utilizó para la bioadsorción de metales pesados y Reddy et al. (2003) lo utilizaron para la obtención de enzimas ligninolíticas y celulolíticas con distintas clases de hongos.

Figura 2.6 Cáscaras de banano residuales de la industria alimenticia



FUENTE: Castro, 2015.

2.3 **NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE**

El Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), Anexo I: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua, decreta los límites permisibles para la descarga en cuerpos de agua dulce, como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	250
Color real	Color real	Unidades de color	Inapreciable en dilución 1/20
Potencial Hidrógeno	pH	-	5-9
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	100
Sólidos totales	ST	mg/L	1600
Temperatura	-	°C	<35

FUENTE: Anexo I del Libro VI del TULSMA, Anexo I: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes del Recurso Agua, 2017.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA CÁSCARA DE BANANO

3.1.1 RECOLECCIÓN Y SELECCIÓN

La cáscara de banano utilizada en el presente estudio fue obtenida de bananos de desechos recolectados en el Mercado Mayorista ubicado al sur del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), como se muestra en la Figura 3.1.

Se recolectaron durante tres días, cerca de 300 Kg de bananos de desecho, de los cuales se seleccionaron solo aquellas cáscaras amarillas, como se indica en la Figura 3.2.

Figura 3.1 Recolección de bananos de desecho del Mercado Mayorista



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Figura 3.2 Selección de cáscaras de banano amarillas



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

3.1.2 LIMPIEZA

Las cáscaras fueron lavadas con agua destilada a 50 °C y agitación por 30 minutos (Figura 3.3) para retirar impurezas y/o restos de pulpa, según lo descrito por Castro (2015).

Figura 3.3 Limpieza de las cáscaras de banano



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

3.1.3 SECADO

Basándose en la metodología propuesta por Annadurai, Juang & Lee (2002), se procedió a secar las cáscaras de banano durante 24 horas a una temperatura de 110 °C en un horno hermético (Figura 3.4), ubicado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental (FICA) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), en la ciudad de Quito.

Figura 3.4 Secado de las cáscaras de banano en el horno hermético



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

3.1.4 MOLIDO Y TAMIZADO

Las cáscaras secas fueron trituradas en un molino casero y tamizadas en la serie de tamices: 3/4", 1/2", 3/8", No. 4, No. 10, No. 18 y No. 35, de este modo se logró determinar dos granulometrías con mayor retención en los tamices No. 10 y No. 04, correspondientes a tamaños de partícula de 2,00 mm y 4,75 mm, siendo estas las granulometrías utilizadas para la investigación, como se visualiza en la Figura 3.5.

Figura 3.5 Tamaños de partícula del material biofiltrante acondicionado



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE BANANO

3.2.1 PARÁMETROS FÍSICOS

El material biofiltrante (cáscara de banano acondicionada) fue caracterizado físicamente mediante la determinación de humedad, densidad aparente, porosidad y tasa de infiltración, los métodos utilizados para su determinación se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Métodos para la caracterización física de la cáscara de banano

PARÁMETRO	MÉTODO
Contenido de humedad	ASTM D 2216-10
Densidad aparente	Coronel, 2017.
Porosidad	Sangucho & Rodríguez, 2018.
Tasa de infiltración	Sangucho & Rodríguez, 2018.

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

3.2.2 PARÁMETROS QUÍMICOS

El material biofiltrante fue caracterizado químicamente mediante la determinación de pH, carga superficial y contenido de lignina/celulosa.

La determinación de pH se basó en la norma ASTM D 4972-1 y la carga superficial se determinó por medio del PCC, siguiendo la metodología descrita por Nezamzadeh & Kabiri (2013).

El contenido de lignina y celulosa se determinó mediante el método de Van Soest, el cual consiste en establecer la fibra detergente ácida (FDA) y lignina, a través de los métodos detallados en MO-LSAIA-02.02 y MO-LSAIA-02.03, respectivamente. Para este análisis, se envió la muestra acondicionada al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Estación Experimental Santa Catalina, ubicada en el sector de Cutuglagua en el DMQ.

3.2.3 PARÁMETROS MORFOLÓGICOS

La caracterización morfológica del material biofiltrante se realizó en un microscopio electrónico de barrido (SEM, por Scanning Electron Microscope) ubicado en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

3.3.1 PUNTO DE MUESTREO

Las muestras de agua residual utilizadas para la presente investigación, fueron recolectadas de la lavandería “Color & Denim”, dedicada al tinturado de telas crudas y lavado de prendas jeans, ubicada en la parroquia Pomasqui, cantón Quito, provincia Pichincha.

Al no existir una piscina común que recolecte los efluentes de los diferentes procesos de manufactura, se optó por muestrear el efluente del proceso de estonado, debido a que es el paso básico con mayor demanda dentro de la empresa.

El muestreo del efluente tuvo una duración de 4 meses (de agosto a noviembre del 2019), con una frecuencia de una vez por semana y un volumen de 150 L, siguiendo las técnicas y precauciones de manejo, conservación y transporte, descritas en la NTE INEN 2169:2013.

La Figura 3.6 a, indica el punto de muestreo en el equipo de estonado y la Figura 3.6 b, el tanque de recolección del agua residual.

Figura 3.6 Punto de muestreo



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

3.3.2 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN

La caracterización del efluente se basó en parámetros físicos, químicos y biológicos llevados a cabo en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA) de la EPN.

Los parámetros y métodos utilizados para la caracterización del efluente se mencionan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Parámetros de caracterización del agua residual

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO	EQUIPO
Potencial Hidrógeno	-	Multiparámetro de campo	Medidor Multiparámetro modelo Oakton
Temperatura	°C		
Sólidos Totales	mg/L	APHA 2540B	Estufa Binder Mufla Desecador
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	APHA 2540D	Equipo de filtración al vacío Estufa Binder Desecador
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	APHA 2540C	Equipo de filtración al vacío Estufa Binder Mufla Desecador
Color real	Pt-Co	APHA 2120D	Equipo de filtración al vacío Espectrofotómetro HACH DR2700
Color aparente	Pt-Co	APHA 2120C	Espectrofotómetro HACH DR2700
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	APHA 5220D	Digestor HACH Espectrofotómetro HACH DR2700
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	APHA 5210B	Botellas ámbar para DBO Equipo manométrico para medición de DBO, OxyTop, Incubadora WTW

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

3.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN

Se diseñaron y construyeron seis biofiltros a escala de laboratorio, con el fin de evaluar a la cáscara de banano (*Musa paradisiaca*) como material de empaque para el tratamiento del efluente recolectado en la empresa “Color & Denim”.

Los biofiltros fueron contruidos, combinando tres alturas de lecho y dos tamaños de partícula del material biofiltrante, e instalados en el Laboratorio Docente de Hidráulica de la FICA de la EPN.

3.4.1 MATERIALES

El material de construcción de los reactores o biofiltros fue plástico de botellas PET de 1,35 litros con diámetro de 0,0816 m, sujetos en una estructura de madera.

El material de soporte del lecho fue grava de 3/8” (9,50 mm) empaclado al 11% de la altura del lecho filtrante, según lo recomendado por Garzón et al. (2003). Adicional, el material de distribución del caudal fue viruta de acrílico retenida en el Tamiz de 1/2”, colocada en la parte superior de cada biofiltro con una altura de 5 cm, este material fue obtenido del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI), ubicado en la EPN. Para asegurar que el material de soporte no se pierda, se taparon las bases de los biofiltros con las tapas de las botellas PET con un orificio en el centro.

Finalmente, para el diseño de los sistemas de distribución del agua residual a los reactores, se emplearon tanques plásticos de 60 L de capacidad y para recibir los efluentes tratados se emplearon recipientes de 4 L de capacidad ubicados a nivel del suelo.

3.4.2 DIMENSIONAMIENTO DE LOS BIOFILTROS

A partir de las alturas del lecho filtrante, el área superficial del reactor y la carga hidráulica de 0,55 [m³/m².día] recomendada por Sosa (2015), se calculó el volumen de cada uno de los biofiltros y el caudal a distribuirse constantemente durante toda la etapa experimental.

3.4.2.1 ÁREA SUPERFICIAL

El área superficial del biofiltro se calculó con la ecuación 3.1:

$$A = \frac{\pi.\phi^2}{4} \quad (3.1)$$

Donde:

A= área superficial, m².

Ø²= diámetro del biofiltro (envase PET), m.

3.4.2.2 VOLUMEN

El volumen del biofiltro se calculó con la ecuación 3.2:

$$V = A.H \quad (3.2)$$

Donde:

V= volumen del biofiltro, m³.

A= área superficial, m².

H= altura total, m.

3.4.2.3 CAUDAL

El caudal a suministrarse se calculó con la ecuación 3.3:

$$Q = CH.A \quad (3.3)$$

Donde:

Q= caudal, m³/día.

CH = carga hidráulica, m³/m².día.

A= área superficial, m².

La Tabla 3.3 recopila las dimensiones del diseño y los componentes de operación de los reactores.

Tabla 3.3 Dimensiones y parámetros de los biofiltros

BIOFILTROS	1P	1G	2P	2G	3P	3G
Diámetro del envase PET [m]	0,0816	0,0816	0,0816	0,0816	0,0816	0,0816
Carga hidráulica [m ³ /m ² .día]	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Tamaño de partícula del material biofiltrante [m]	0,002	0,00475	0,002	0,00475	0,002	0,00475
Altura del lecho filtrante (cáscara de banano) [m]	0,40	0,40	0,50	0,50	0,60	0,60
Altura del material de soporte (grava) [m]	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07
Altura del material de distribución (viruta de acrílico) [m]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Altura total [m]	0,50	0,50	0,61	0,61	0,72	0,72
Área superficial [m ²]	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052
Volumen del biofiltro [m ³]	0,0026	0,0026	0,0032	0,0032	0,0037	0,0037

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

3.4.3 CONSTRUCCION DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

Las aguas residuales alimentaron a los seis biofiltros, mediante goteo, desde tres tanques de distribución ubicados, a una cota superior a los reactores, en un andamio a una altura de 1,70 m.

Cada biofiltro se construyó con cinco botellas PET recicladas, unidas con silicona industrial transparente, y colocadas de forma vertical en una estructura de madera de 1,50 x 1,40 m. Los biofiltros vacíos se llenaron con agua durante 24 horas para evidenciar posibles fugas en las uniones de las botellas.

El tanque de alimentación fue conectado a una llave de paso de bola de 1/2", esta a su vez fue adaptada a una T de 1/2", seguido por el acople de dos jeringas de 20 mL que se ajustaron a un equipo de venoclisis. Toda esta conexión se realizó a una altura de 20 cm desde la base de los tanques de distribución, como se visualiza en la Figura 3.7.

Figura 3.7 Conexiones en el tanque de alimentación



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Además, se unieron embudos a tubos PVC de 1/2" para ser colocados por encima de los biofiltros y facilitar que las mangueras del equipo de venoclisis estuvieran firmes y el caudal de entrada sea a la misma distancia en todos los biofiltros.

3.5 PUESTA EN MARCHA DE LOS BIOFILTROS

3.5.1 PRUEBAS PRELIMINARES

Una vez empaquetados los biofiltros con grava (material de soporte), cáscaras de banano (material biofiltrante) y viruta de acrílico (material de distribución), estos

fueron sometidos a ensayos preliminares para determinar sus características a partir de pruebas de vaciado, siguiendo la metodología descrita por Garzón, Lessard & Buelna (2003) y detallada por Alatorre (2007).

Mediante las pruebas de vaciado, se pudo calcular el volumen de espacios vacíos y el volumen real en tratamiento, datos necesarios para la determinación de la porosidad in situ y el tiempo de retención hidráulico teórico de los biofiltros.

3.5.1.1 PRUEBAS DE VACIADO

Este ensayo permitió calcular el contenido de agua en el lecho filtrante mediante el llenado del reactor con agua, para su posterior drenado y medición del volumen acumulado a ciertos períodos de tiempo durante 24 horas. Esta prueba se realizó por triplicado.

3.5.1.2 POROSIDAD IN SITU DE LOS BIOFILTROS

Para determinar el volumen correspondiente a la porosidad in situ, se adicionó el volumen de agua acumulado al finalizar las pruebas de vaciado, al volumen de agua contenido en el lecho filtrante.

Se tomó en consideración el volumen acumulado en la tercera prueba de vaciado, con el fin de obtener datos más representativos teniendo en cuenta la posible compactación del lecho.

Para determinar el volumen de agua contenido en el medio filtrante, se tomó en cuenta a la humedad del material al finalizar la tercera prueba de vaciado, para ello se tomó muestras en la parte media y alta del lecho. El procesamiento de datos con mayor detalle se evidencia en el Anexo 3.

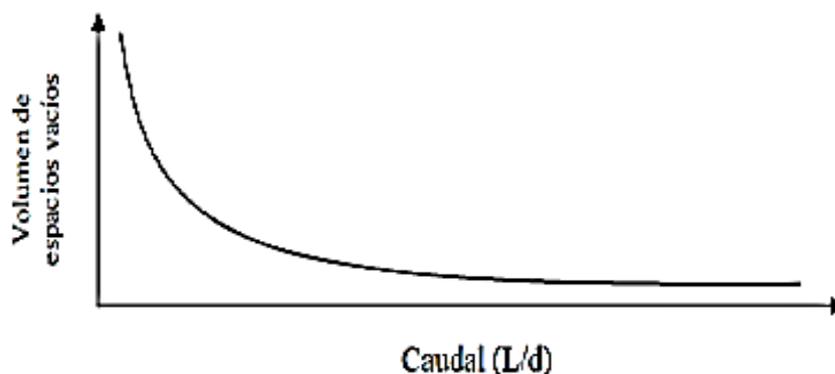
3.5.1.3 VOLUMEN DE ESPACIOS VACÍOS EN LOS BIOFILTROS

Se utilizó el volumen de agua recolectado en cada lapso de tiempo de la tercera prueba de vaciado, para calcular el caudal de salida mediante la ecuación 3.4.

$$Q = \frac{\Delta \text{Volmen acumulado}}{\Delta \text{tiempo}} \quad (3.4)$$

Con la elaboración de la curva teórica del volumen de agua acumulado vs. caudal (Figura 3.8), se obtuvo la ecuación de la curva de cada reactor, en donde se reemplazó el caudal de alimentación (2 mL/min) para obtener el volumen de espacios vacíos para este caudal.

Figura 3.8 Curva teórica del volumen de espacios vacíos contra el caudal



FUENTE: Garzón et al., 2003.

3.5.1.4 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

Por diferencia entre el volumen de espacios vacíos determinado con la ecuación de la curva de cada reactor y el volumen total de agua contenido en el medio filtrante, se obtiene el volumen real de agua residual en tratamiento que en conjunto con el caudal utilizado (2 mL/min), es posible determinar el tiempo de retención hidráulico, mediante la ecuación 3.5:

$$TRH = \frac{V_t}{Q} \quad (3.5)$$

Donde:

TRH = Tiempo de retención hidráulico, día.

V_t = Volumen real del agua residual en tratamiento (volumen correspondiente a la porosidad in situ – volumen de espacios vacíos que se obtiene de la ecuación de la curva elaborada).

Q = Caudal, L/día.

3.5.2 ALIMENTACION DEL SISTEMA

El agua residual se almacenó en los tres tanques de distribución, con 50 L cada uno, cada tanque alimentó a dos biofiltros. El afluente previo a ser alimentado a los reactores, fue filtrado en un colador casero para retirar hilos y pelusas (Figura 3.9), que pudieran interferir en el proceso.

Figura 3.9 Agua residual pre-filtrada para el retiro de hilos y pelusas



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Los seis biofiltros fueron alimentados por goteo a flujo descendente constante de 2 mL.min⁻¹. La regulación del caudal se llevó a cabo con reguladores de flujo usados en equipos de venoclisis y el control del mismo, se realizó con una probeta de 10 mL y un cronómetro.

3.6 ACONDICIONAMIENTO Y MONITOREO DE LOS BIOFILTROS

Con el fin de que los microorganismos tengan un crecimiento acelerado y se adapten a las características operacionales del sistema, se elevó la temperatura del afluente a 24°C durante la segunda semana, mediante el uso de termostatos colocados en el interior de los tanques de distribución, dado que a temperaturas entre 20 °C y 25 °C, la actividad microbiana se optimiza (Varila & Díaz, 2008).

Para el monitoreo de los biofiltros, se realizó mediciones de parámetros operacionales y de control, tanto del afluente como del efluente. La frecuencia de muestreo se puede evidenciar en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Parámetros de monitoreo

PARÁMETRO	MÉTODO	EQUIPO UTILIZADO	TIPO	PERIODICIDAD
Potencial Hidrógeno	Multiparámetro de campo	Medidor Multiparámetro modelo Oakton	Control	Dos veces por semana
Temperatura				
Conductividad				
Turbiedad	APHA 2130B	Turbidímetro HACH 2100 P		
Demanda Química de Oxígeno	APHA 5220D	Digestor HACH Espectrofotómetro HACH DR2700	Operacional	Semanal
Color aparente	APHA 2120C	Espectrofotómetro HACH DR2700		

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Para el análisis del comportamiento de los biofiltros, se elaboraron gráficas de los parámetros monitoreados, teniendo en cuenta la simbología que se encuentra en la Tabla 3.5. Vale mencionar que los datos de la segunda semana no se indican en las gráficas mencionadas, pues las condiciones iniciales con las que trabajan los biofiltros no son las mismas al resto de la experimentación por el aumento de la temperatura en el afluente, considerando esta semana como una etapa de acondicionamiento para el crecimiento de la biomasa.

Además, se realizaron mediciones de la altura del lecho filtrante a lo largo del período operacional, con el fin de obtener resultados de compactación, para ello se adhirió una cinta métrica en cada biofiltro.

Tabla 3.5 Simbología para cada biofiltro monitoreado en el período de experimentación

A.R	Agua residual o afluente
1P	Biofiltro empacado con tamaño de partícula de 2,00 mm y altura de lecho filtrante de 0,40 m.
1G	Biofiltro empacado con tamaño de partícula de 4,75 mm y altura de lecho filtrante de 0,40 m.
2P	Biofiltro empacado con tamaño de partícula de 2,00 mm y altura de lecho filtrante de 0,50 m.
2G	Biofiltro empacado con tamaño de partícula de 4,75 mm y altura de lecho filtrante de 0,50 m.
3P	Biofiltro empacado con tamaño de partícula de 2,00 mm y altura de lecho filtrante de 0,60 m.
3G	Biofiltro empacado con tamaño de partícula de 4,75 mm y altura de lecho filtrante de 0,60 m.

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

El monitoreo se llevó a cabo por 126 días, no obstante, a los 45 días, 1G y 3P, colapsaron por problemas de compactación del lecho filtrante, lo que ocasionó fallas en su funcionamiento, al igual que 1P, 2P, 2G y 3G, a los 66 días.

Debido a que los biofiltros presentan pérdidas de altura del lecho filtrante por la compactación producida, se busca incorporar un material económico y viable de lenta degradación que proporcione soporte y porosidad al medio como lo establece Buelna, Garzón & Moeller (2012). Se recomienda incorporar materiales inorgánicos en filtros empacados con materiales orgánicos, cuyo potencial de compactación sea alto (Etcharren, 2005).

Por tal motivo, se seleccionó a la piedra pómez como material inorgánico adicional al material biofiltrante. La misma de cáscara de banano usada inicialmente, se mezcló con la piedra pómez, en relación 3:1 (v/v) (Figura 3.10), según lo descrito por Eugenio (2017). La piedra pómez fue tamizada a un tamaño de 3/8", ya que granulometrías menores a 1 mm disminuyen la aireación (Juárez, 2014).

Figura 3.10 Mezcla de cáscaras de banana con piedra pómez

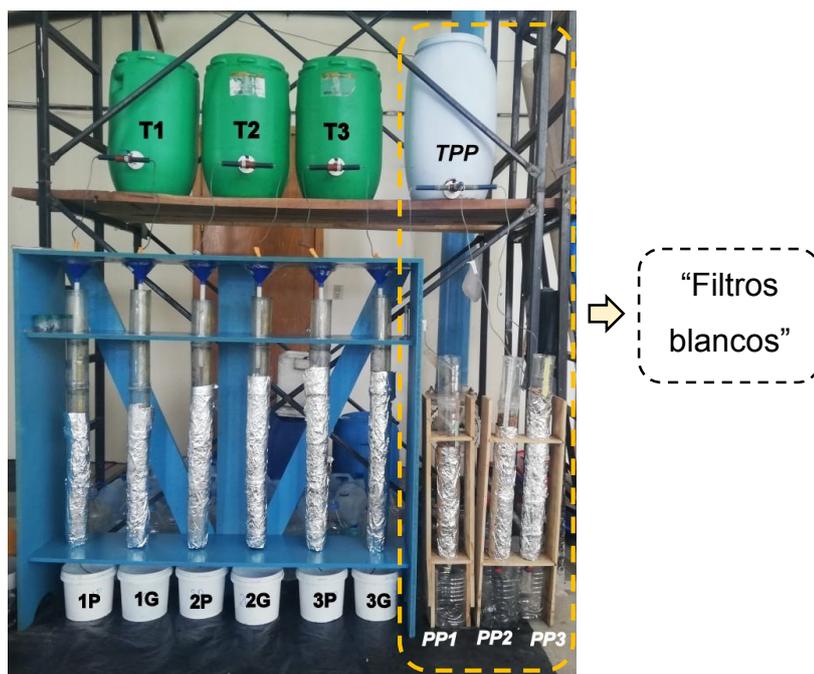


Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Adicionalmente, se construyeron tres filtros empacados con la cantidad de piedra pómez usada para las alturas de 0,40 m (PP1), 0,50 m (PP2) y 0,60 m (PP3), a fin de poder comparar las eficiencias con los rectores empacados con cáscara de banana y piedra pómez. Los tres filtros se denominaron “filtros blancos” y fueron alimentados con 70 L semanales de agua residual recolectada en un tanque común.

Tanto en la fase inicial como en la fase modificada, los biofiltros operaron con la misma carga hidráulica y altura de lecho filtrante. La Figura 3.11 muestra los sistemas de biofiltración instalados en el laboratorio.

Figura 3.11 Sistemas de biofiltración experimentales



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA CÁSCARA DE BANANO

Las cáscaras de banano recolectadas, inicialmente fueron lavadas, secadas, trituradas y tamizadas. Del secado, resulta que el material biofiltrante pierde el 76,85% de la humedad inicial y del proceso de tamizado, las granulometrías con mayor porcentaje de retención, fueron correspondientes a los tamaños de partícula de 2,00 mm y 4,75 mm, con 38,80% y 40,30% de retención, respectivamente. El análisis granulométrico se muestra en el Anexo 1.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL BIOFILTRANTE

Los procedimientos seguidos y datos registrados en el laboratorio para la determinación de la caracterización física, química y morfológica del material biofiltrante, para los dos tamaños de partícula investigados, se detallan en el Anexo 2.1 y los resultados se resumen a continuación.

4.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

La tabla 4.1 muestra los resultados de los parámetros físicos para los dos tamaños de partícula empleados.

Tabla 4.1 Caracterización física del material biofiltrante

Parámetros	Tamaño de partícula del material biofiltrante [mm]	
	2,00	4,75
<i>Contenido de humedad [%]</i>	53,14	53,32
<i>Densidad aparente [g/mL]</i>	0,30	0,23
<i>Porosidad [%]</i>	56,64	60,75
<i>Tasa de infiltración [mL/min.cm²]</i>	1,64	2,25

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

La cáscara de banano (*Musa paradisiaca*) inicialmente contiene 86,44% de humedad, valor que concuerda con el 89,10% determinado por Granda (2009). Posterior al secado, la humedad se reduce a 6,43%, pero previo a su empaquetado y siguiendo la recomendación de Garzón (2001), cada tamaño de partícula del material biofiltrante acondicionado se humedeció a 53,14% y 53,32%, con el fin de lograr la humedad óptima (40% – 60%) para el crecimiento de la comunidad microbiana (Sosa et al., 2014).

La densidad aparente del material biofiltrante es 0,30 g/mL y 0,23 g/mL, para los dos tamaños de partícula investigados, valores afines a otros materiales filtrantes que se encuentran en el rango 0,12 - 0,50 g/mL, como la turba, material utilizado en estudios similares (Paredes, 2016).

La porosidad registrada para el material biofiltrante, en los dos diferentes tamaños de partícula estudiados, es superior al 50%, valores que se encuentran dentro del rango fijado como recomendable para biofiltración (40% - 80%), lo que permite la adhesión de microorganismos y reduce la acumulación de sedimentos (Torres et al., 2003).

Según Carlos, Munive, Mallma & Orihuela (2014) la tasa de infiltración depende de la textura, estructura, contenido de humedad, densidad aparente y porosidad del material biofiltrante. Para el material biofiltrante, menor tasa de infiltración se aprecia en el tamaño de partícula de 2,00 mm, debido a su menor cantidad de poros y mayor densidad aparente, y viceversa.

De acuerdo a las propiedades físicas, se puede decir que el material biofiltrante cumple con los rangos estipulados en bibliografía, para ser utilizado como material biofiltrante óptimo.

4.2.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

- **Potencial Hidrógeno**

El pH del material estudiado, en promedio para los dos tamaños de partícula es 6,13; el cual está dentro del valor de pH óptimo (6 - 8) para el desarrollo de la actividad microbiana (Arana, 2010).

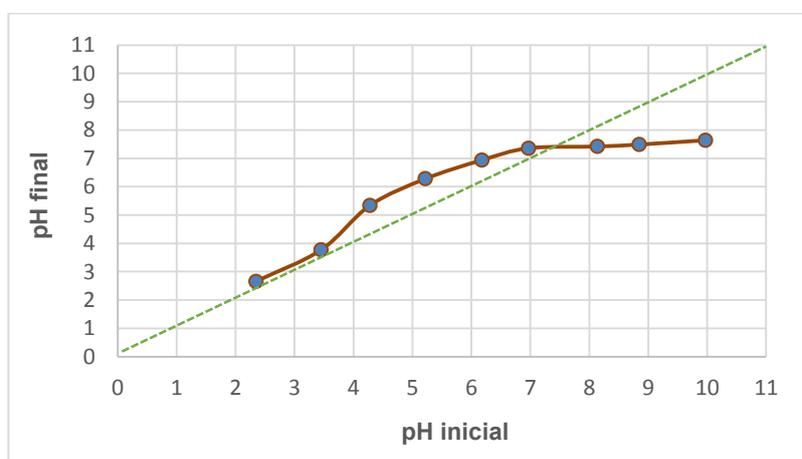
Adicionalmente, este valor concuerda con lo reportado por Ciro, Montoya & Millán (2005) y Quiceno, Giraldo & Villamizar (2014), quienes indican que el pH de la cáscara de banano oscila de 7 a 5, disminuyendo durante el proceso de maduración por la participación del ácido málico presente en el material.

- **Carga superficial a través del PCC**

El Gráfico 4.1 muestra el PCC obtenido para el material biofiltrante que resulta ser 7,41, ligeramente básico. Es decir, a este pH, la carga del material es neutra, por lo tanto, a valores menores a este punto, la carga superficial es positiva y se favorece la adsorción de aniones, por el contrario, a pH mayores la carga superficial es negativa y se beneficia la adsorción de cationes (Rodríguez, Flores, Rangel, Cubillán & Argotte, 2015).

El colorante índigo, característico de la industria del jean, es de tipo aniónico (Amaringo & Hormaza, 2013), por ende, su remoción se ve favorecida a pH ácidos lejanos al PCC.

Gráfico 4.1 Punto de carga cero del material biofiltrante (*Musa paradisiaca*)



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

El agua residual usada en este trabajo, tiene un pH promedio de 6,47; valor menor al PCC del material biofiltrante, por consiguiente, se considera que en procesos de adsorción, la remoción de colorante índigo se ve favorecida ante este comportamiento, a pesar de ello, el pH cercano al PCC, puede ser un factor que no permite mayor remoción del contaminante.

- **Lignina y celulosa**

El Anexo 2.2 detalla el informe dado por la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP, donde se reporta 28,22% de lignina y 25,52% de celulosa para el material biofiltrante, valores que están dentro de los rangos comúnmente encontrados para materiales lignocelulósicos, lignina 5-30% y celulosa 15-60% (Dalzell, Biddlestone, Gray & Thurairajan, 1991).

Para biofiltración, Garzón, Moeller, Buelna & Tremblay (2006) recomiendan una relación lignina/celulosa entre 0,7 y 1,0, para materiales con mayor duración por su degradación más lenta.

Valores semejantes se evidencian a partir de estudios similares descritos por Buelna et al. (2012), como el caso del Tabachín (0,70), Jacaranda (0,66), fibra de coco (0,98) y caña de azúcar (0,61), materiales con porosidad óptima y resistentes a compactación.

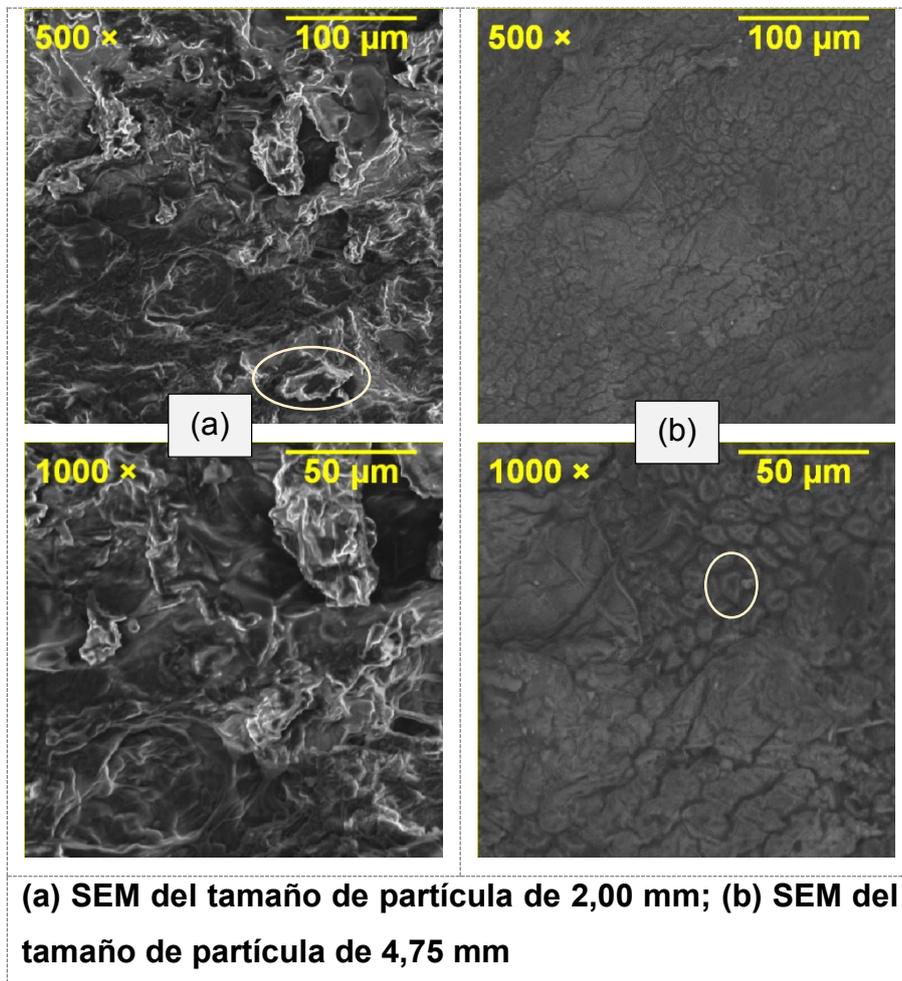
Para el caso de la cáscara de banano, se obtiene una relación de lignina/celulosa de 1,10, cercano a los valores reportados por Garzón et al. (2006). Esta relación pudo haber influido en la velocidad de descomposición del material que contribuyó a la compactación del lecho en los dos tamaños de partícula investigados, ya que según Arana (2010) en biofiltros empacados con materiales orgánicos, se pueden producir pérdidas de altura del lecho filtrante relacionadas a los procesos naturales de degradación del material.

4.2.3 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

La Figura 4.1 presenta las imágenes SEM para cada tamaño de partícula del material biofiltrante, con magnificación de 500 x y 1000 x. El tamaño de partícula de 2,00 mm (Figura 4.1 a), muestra una estructura rugosa, de forma laminar y completamente irregular con pocos poros, en su mayoría destruidos. Por su parte, el tamaño de partícula de 4,75 mm (Figura 4.1 b) evidencia homogeneidad en su estructura porosa, con más cavidades en comparación al tamaño de 2,00 mm. Esta estructura superficial tiene similitud con otros materiales biofiltrantes, como el bagazo de caña (Toapanta, 2017) o la tusa maíz con tamaños de partícula de 2,36

y 4,50 mm, cuya estructura rugosa e irregular hace posible la formación de la biopelícula en diferentes partes de este material (Torres & Gaibor, 2015).

Figura 4.1 Imágenes SEM del material biofiltrante



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Dada la morfología mostrada, se puede considerar al material como óptimo para biofiltración debido a la porosidad evidenciada en el tamaño de partícula de 4,75 mm. No obstante, para el caso de la granulometría de 2,00 mm, la biofiltración puede verse no favorecida, ya que los poros que se evidencian son muy irregulares, por ende la porosidad se reduce y aumenta la retención de agua en el lecho (Pacheco & Ramírez, 2017). Este escenario puede ocasionar pérdidas de altura del material o generar un lixiviado que lave los nutrientes necesarios para las reacciones microbianas (Arana, 2010).

4.3 CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL

La Tabla 4.2, presenta las características físicas, químicas y biológicas del agua residual del proceso de estonado de la lavandería “Color & Denim”.

Tabla 4.2 Caracterización del agua residual

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR	
		Mínimo	Máximo
Potencial Hidrógeno	-	5,65	7,98
Temperatura	°C	16,43	19,63
Sólidos Totales	mg/L	896	5056
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	188	643
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	651	4376
Color Real	Pt-Co	1920	17750
Color Aparente	Pt-Co	2230	32600
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	769	8780

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

La composición del efluente industrial de la empresa “Color & Denim” fue variable durante el tiempo de experimentación, los valores son elevados en términos de DQO, color, ST y SST, parámetros que sobrepasan los valores permitidos para descargas a cuerpos de agua dulce, hasta 35 veces la DQO, 3 en ST y 6 en SST, así la DQO es 25 veces mayor al encontrado en aguas residuales municipales (Castro, 2015).

Estos parámetros son característicos de las aguas residuales textiles, puesto a que en su proceso de manufactura se utilizan reactivos de diversa composición química, desde compuestos inorgánicos a polímeros y productos orgánicos (Robinson, McMullan, Marchant & Nigam, 2001).

Los valores elevados de color real y aparente, se asocian al colorante índigo que no se fija en las fibras, lo que aporta la coloración azul característica de este

efluente, que además contiene sustancias orgánicas, causantes del alto nivel de DBO_5 y DQO (Romero, 2002).

La mayoría de sólidos totales en el agua residual, corresponde a los sólidos disueltos que representan un 87% y el 13% restante corresponde a los sólidos suspendidos que se atribuyen a pelusas e hilos sobrantes durante el proceso de lavado de las prendas.

Adicionalmente, para una DQO de 8240 mg/L se tiene una DBO_5 de 2100 mg/L, con base en estos valores, la relación DBO_5/DQO para este efluente textil es de 0,26; valor que caracteriza al agua residual como biodegradable a través de tratamientos biológicos según Martínez (2010).

4.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICO – MECÁNICAS DE LOS BIOFILTROS

Durante las pruebas de vaciado realizadas, se observó que los efluentes presentaron cierta coloración debido a la presencia de pigmentos naturales como los carotenos y xantofilas presentes en las cáscaras de banano (García, 2014), además del lavado de ácidos húmicos y fúlvicos característicos en materiales orgánicos. No obstante, esta situación no representa un impedimento para su descarga a cuerpos de agua receptores, puesto que son compuestos naturales y no dañinos (Garzón et al., 2006).

Finalizado las pruebas preliminares, se observa que la porosidad en los biofiltros está dentro del rango establecido como óptimo para biofiltración (40 a 80%), evidenciándose mayor porcentaje en la fase modificada, debido a la adición de la piedra pómez que aporta en promedio 10,64% de porosidad a los biofiltros, ayudando a minimizar la posibilidad de taponamientos.

De manera general se aprecia que el material con tamaño de partícula de 2,00 mm tiene menor volumen de espacios vacíos y porosidad, lo que implica mayor posibilidad de colmatación del material por el aumento de las áreas propensas a compactación. Sin embargo, entre 1P y 1G, el que tiene menor porosidad y volumen

de espacios vacíos es 1G, lo que justifica su compactación en un período de tiempo menor a 1P.

Las Tablas 4.3 y 4.4, muestran las características físico – mecánicas de los biofiltros en la fase inicial y en la fase modificada. Además, el procesamiento de datos realizados para estos resultados, se muestran en el Anexo 3.

Tabla 4.3 Características físico – mecánicas de los biofiltros durante la fase inicial

CARACTERÍSTICAS	BIOFILTROS					
	Cáscara de banana					
	1P	1G	2P	2G	3P	3G
Porosidad [%]	49,29	48,30	51,17	51,97	52,76	52,87
Volumen de espacios vacíos [L]	0,49	0,52	0,74	0,90	0,99	1,06
Tiempo de retención hidráulica [Días]	0,27	0,25	0,31	0,27	0,33	0,32

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla 4.4 Características físico – mecánicas de los biofiltros durante la fase modificada

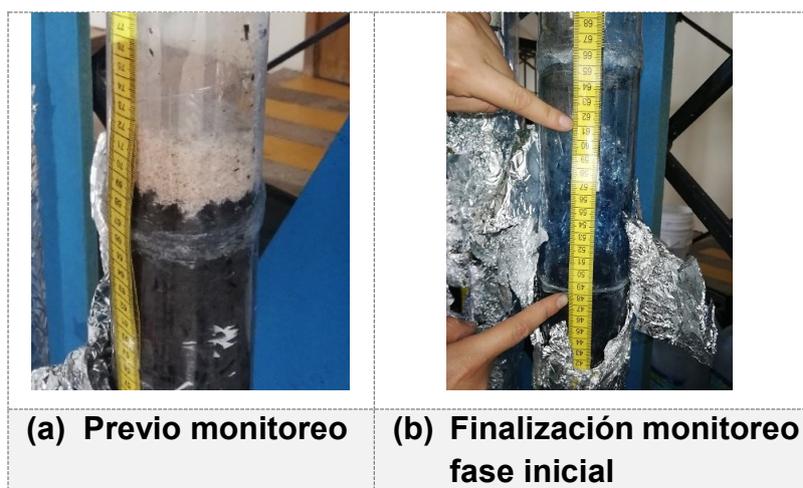
CARACTERÍSTICAS	BIOFILTROS					
	Cáscara de banana + piedra pómez					
	1P	1G	2P	2G	3P	3G
Porosidad [%]	59,18	59,86	61,29	61,32	63,06	65,46
Volumen de espacios vacíos [L]	0,54	0,58	0,82	0,87	1,12	1,23
Tiempo de retención hidráulica [Días]	0,35	0,34	0,39	0,37	0,43	0,43

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

4.5 COMPACTACIÓN DEL LECHO FILTRANTE

Los resultados hacen referencia a la diferencia de altura del lecho filtrante al iniciar y finalizar su período operacional, considerando la capa de viruta de acrílico, por la complejidad para reconocer la separación entre capas con coloración similar entre ellas (Figura 4.2).

Figura 4.2 Altura del lecho filtrante



TOMADA POR: Jurado & Suntaxi, 2019.

Durante la fase inicial, a los 30 y 33 días, correspondientes a la semana 5, en 3P y 1G, se empieza a evidenciar problemas de taponamientos por compactación del lecho filtrante y acumulación de agua residual en la parte superior, esta situación se repite nuevamente a los 40 y 45 días (semana 6), tiempo en que los reactores llegan a colapsar dificultando el paso del agua residual a través del medio de empaque, por consiguiente, se da por terminada la fase inicial, con pérdidas de altura del lecho filtrante de 8 cm en 1G y 13 cm en 3P, y acumulación de líquido de hasta 7 y 6 cm, respectivamente.

En el resto de biofiltros, se visualiza un comportamiento similar a los 40 días (semana 6) en 1P y 3G, y 47 días (semana 7) en 2P y 2G, llegando a colapsar a los 66 días, con pérdidas de altura de 9 cm en 1P, 12 cm en 2P, 10 cm en 2G y 12 cm en 3G, y acumulación de líquido en 10 cm para 1P y 7 cm para 2P.

Al finalizar la fase modificada, los biofiltros también presentan pérdidas de altura del lecho filtrante, pese a ello, los valores son menores respecto a la fase inicial,

teniendo en cuenta que el tiempo de funcionamiento en mezcla con piedra pómez duplica la etapa inicial, sin llegar a colapsarse. Por lo tanto, se justifica la utilización de un medio inorgánico asequible, como es la piedra pómez, para aportar soporte y porosidad a este tipo de materiales orgánicos.

La compactación evidenciada en los biofiltros puede atribuirse a los tamaños de partícula empleados en la investigación, que en conjunto con la velocidad de degradación del medio biofiltrante, conllevó a la compactación del lecho filtrante, disminuyendo su porosidad y complicando el paso del líquido por el lecho (Medina, 2012). Esta situación se asemeja a otros estudios realizados con residuo de mora como medio biofiltrante, donde se evidencian problemas de compactación atribuibles al tamaño de partícula del material (Lara, 2017; Eugenio, 2017).

Es importante resaltar que la degradación del material biofiltrante está en función de su granulometría, a menor tamaño las partículas tienden a degradarse más rápido (Medina, 2012), por tal razón, se justifica el mayor grado de compactación en los reactores con tamaño de partícula de 2,00 mm. Los datos de compactación en los biofiltros se recopilan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Compactación del lecho al finalizar cada fase

BIOFILTROS	Altura inicial (cm)	FASE INICIAL (cáscara de banano)			FASE MODIFICADA (cáscara de banano + piedra pómez)		
		Pérdida de altura (cm)	Grado de compactación (%)	Tiempo de funcionamiento (días)	Pérdida de altura (cm)	Grado de compactación (%)	Tiempo de funcionamiento (días)
1P	50	9	18,0	66	4	8,0	60
1G	50	8	16,0	45	2	4,0	81
2P	61	12	19,7	66	5	8,2	60
2G	61	10	16,4	66	4	6,6	60
3P	72	13	18,1	45	8	11,1	81
3G	72	12	16,7	66	7	9,7	60

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

4.6 EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BIOFILTRACIÓN

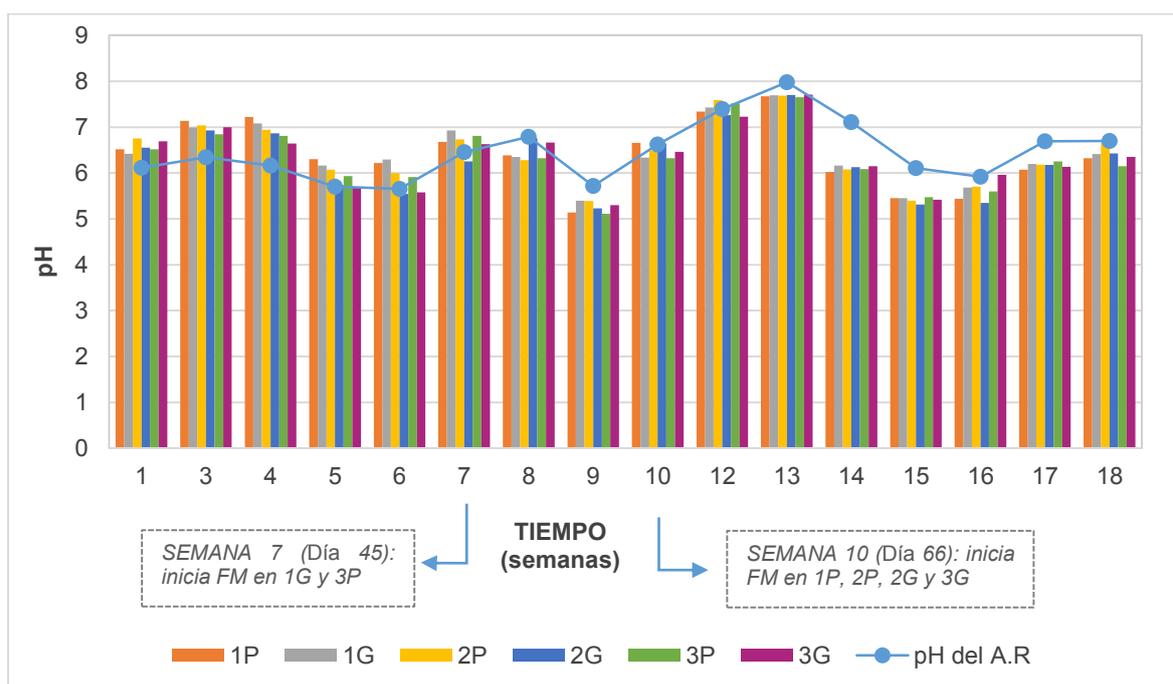
4.6.1 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

4.6.1.1 POTENCIAL HIDRÓGENO

Durante el período experimental, el pH del afluente oscila entre 5,65 y 7,98; con un promedio de 6,47; valor que se encuentran dentro del pH óptimo (6 a 8) para el crecimiento de la biopelícula.

Respecto al pH de los efluentes, varían de 5,11 a 7,71, con promedio de $6,38 \pm 0,69$; valores que cumplen con el rango permisible (5-9) en la normativa ambiental aplicable. El comportamiento del pH en los biofiltros a lo largo del período de experimentación se puede visualizar en el Gráfico 4.2.

Gráfico 4.2 Comportamiento del pH en el período de experimentación



FM = fase modificada

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Se aprecia que las 4 primeras semanas de funcionamiento, existe un aumento promedio de 0,62 unidades respecto al pH inicial, situación que puede darse por la presencia de pectina, que contiene galactosa, arabinosa, glucosa y xilosa

(Cabarcas, Guerra & Henao, 2012), compuestos solubles del material que podrían neutralizar la ligera acidez con la que cuenta el agua residual (Gamarra, 2014).

Posterior a esta conducta, existen fluctuaciones en el comportamiento del pH, donde a partir de la semana 8, los valores de pH disminuyen respecto al afluente en 0,43 unidades promedio. Según Granda (2009), en su estudio realizado con cáscara de banano, atribuye el descenso de pH a la degradación fúngica del material, al igual que Romero, Ayala & Lapo (2015), quienes indican que la presencia de hongos modifica el pH del medio para su crecimiento.

Del monitoreo de los filtros blancos, resulta que el pH de los efluentes tiende a permanecer igual o mayor al afluente con apenas 0,11 unidades, resultado esperado por la neutralidad que posee la piedra pómez, pH = 7,30 (Mayorga & Carrera, 2015).

De lo expuesto, se puede decir que la adición de piedra pómez, no altera prácticamente en nada el pH del agua residual, por consiguiente, las variaciones presentadas durante la fase modificada se asocian al comportamiento de la cáscara de banano.

4.6.1.2 TEMPERATURA

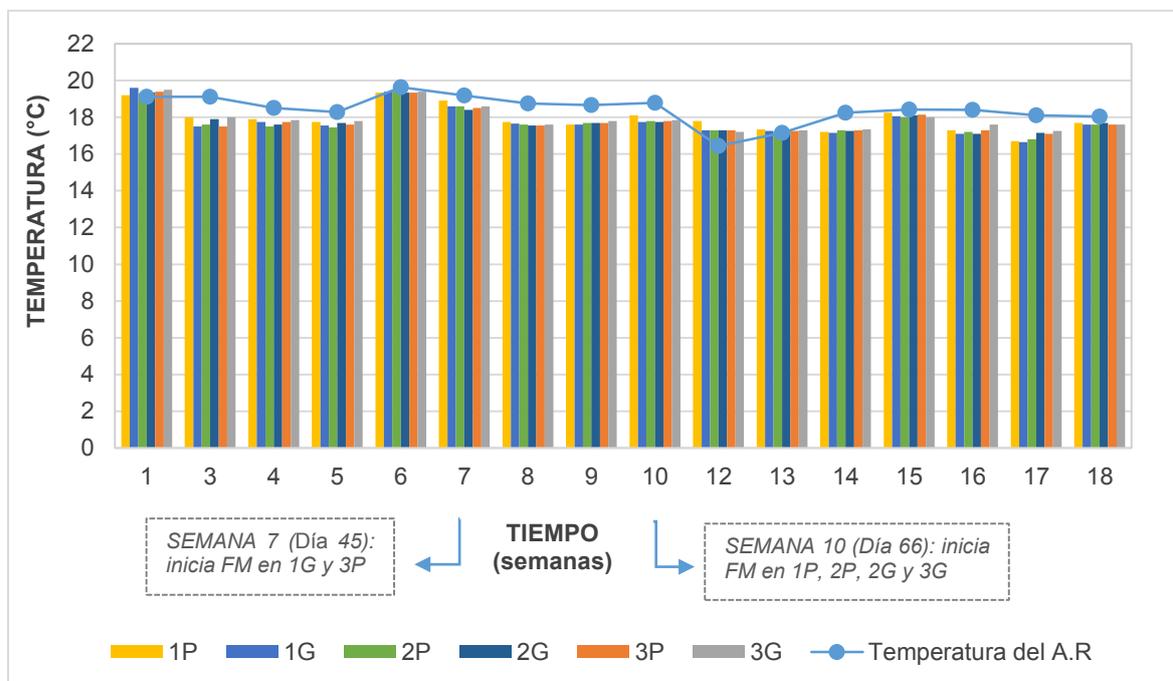
Las mediciones de temperatura de los biofiltros a lo largo del período operacional, estuvieron sujetas a las variaciones ambientales del área de experimentación, como se muestran en el Gráfico 4.3.

Se observa que la temperatura del agua residual oscila entre 16,43°C y 19,63°C, valores dentro del rango óptimo para procesos de depuración biológica (12°C - 38°C) según lo descrito por Trapote (2016).

Respecto a los efluentes, la temperatura disminuye en promedio de 0,82 °C respecto al afluente, a excepción de los días 7, 42, 84 y 91, correspondientes a las semanas 1, 6, 12 y 13, respectivamente, en donde la temperatura es igual o ligeramente mayor con 0,44°C, este comportamiento puede deberse a la condiciones ambientales presentes al momento de realizar las mediciones.

En general, el comportamiento de este parámetro no es variable entre afluente y efluentes en todos los biofiltros, pues la variación es mínima.

Gráfico 4.3 Comportamiento de la temperatura en el período de experimentación



FM = fase modificada

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

4.6.1.3 CONDUCTIVIDAD

El comportamiento de la conductividad en los biofiltros a lo largo del período operacional se presenta en el Gráfico 4.4, donde se puede observar que la conductividad del afluente fluctúa entre 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1476 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un promedio de 713 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Durante la fase inicial, en 81% de ocasiones la conductividad de los efluentes de los seis biofiltros aumentan $10,99 \pm 2,00\%$ respecto a la inicial, siendo más evidente este comportamiento durante la primera semana de operación, se asume que esto se debe al lavado de la cáscara de banano que contiene compuestos salinos solubles relacionados con el Na y K (Gamarra, 2014).

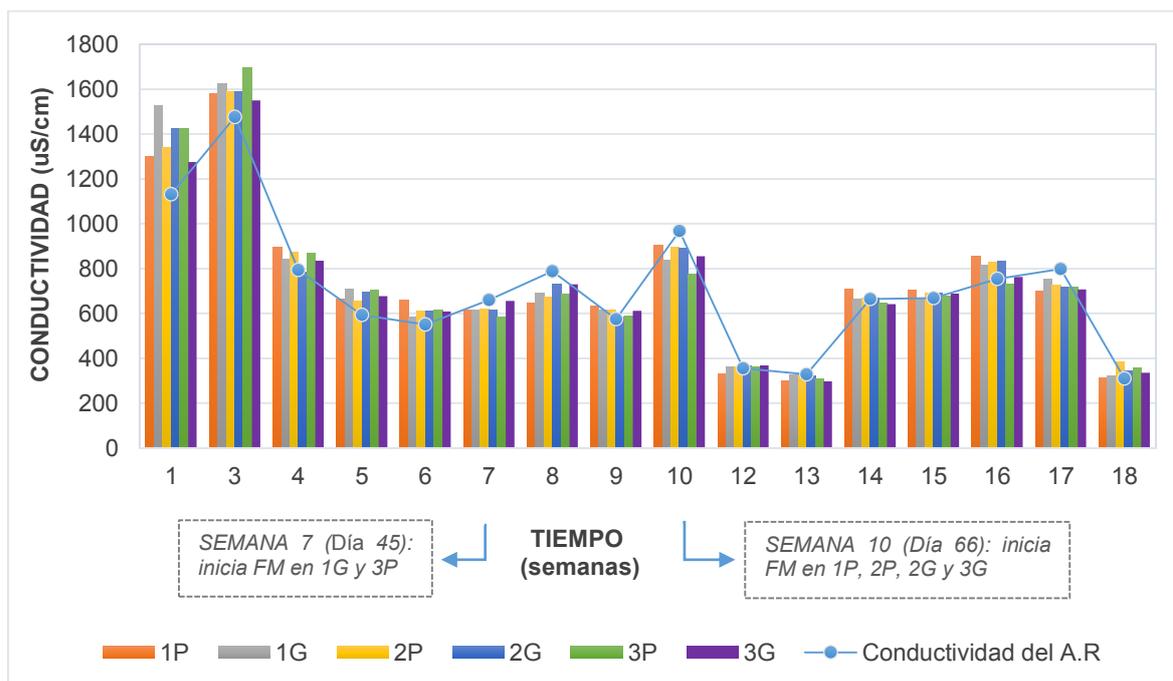
En la fase modificada, el comportamiento tiende a ser similar, los efluentes superan la conductividad inicial en 53% ocasiones, con un aumento de $4,87 \pm 1,25\%$, que

puede relacionarse con un ligero incremento de la degradación del material que se descompone en iones cargados positiva o negativamente (Torres & Gaibor, 2015).

A pesar de ello, en el restante 47% de ocasiones, se evidencian remociones de $8,58 \pm 2,56\%$ 1P; $7,87 \pm 5,12\%$ 1G; $6,18 \pm 3,74\%$ 2P; $6,65 \pm 4,11\%$ 2G; $9,46 \pm 6,05\%$ 3P y $9,01 \pm 3,78\%$ 3G. Es importante resaltar que existen variaciones en el comportamiento de la conductividad de los efluentes, por tal motivo las remociones que se alcanzan durante la fase modificada no tienen una tendencia estable.

Finalmente, del monitoreo de los filtros blancos, se obtienen remociones promedio de apenas 2,81%, por consiguiente, se asume que la piedra pómez no influye mayormente en la remoción de este parámetro durante la fase modificada.

Gráfico 4.4 Comportamiento de la conductividad en el período de experimentación

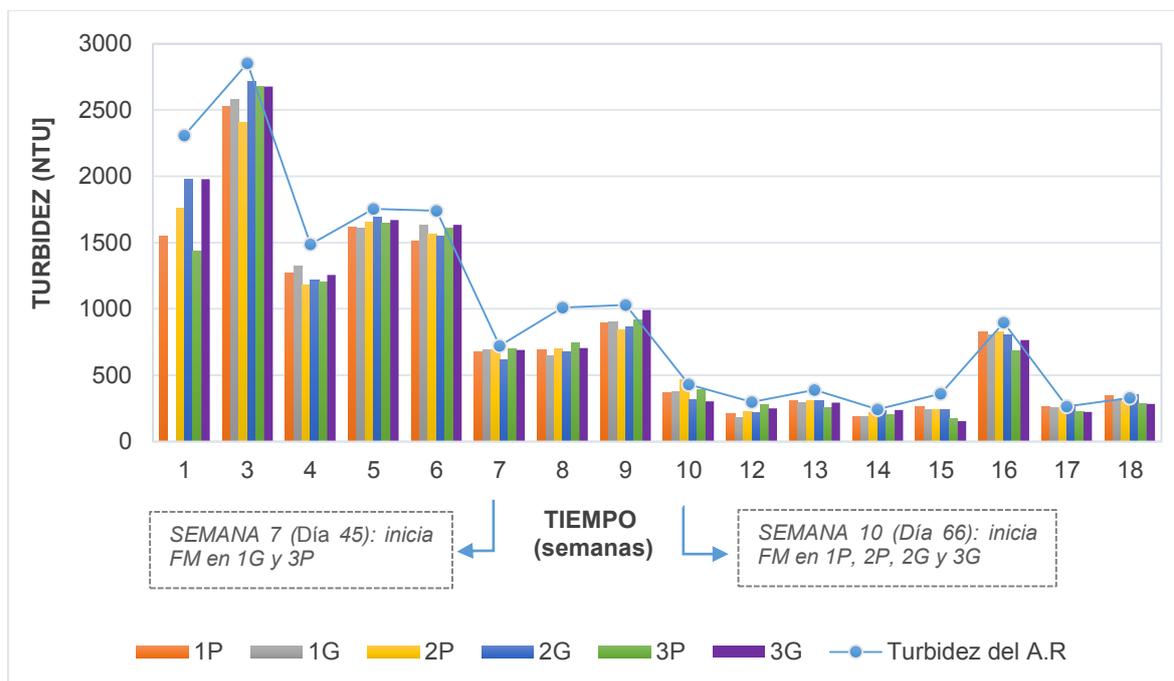


FM = fase modificada

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

4.6.1.4 TURBIDEZ

La conducta de la turbidez en los biofiltros se evidencia en el Gráfico 4.5, donde se observa que los valores del afluente a lo largo del período experimental oscilan entre 243,33 NTU y 2852,50 NTU, con un promedio de 1007,15 NTU.

Gráfico 4.5 Comportamiento de la turbidez en el período de experimentación

FM = fase modificada

Elaborado por: Jurado & Suintaxi, 2019.

Respecto a los efluentes, se observa que la primera semana de operación, los biofiltros remueven en promedio 24,56% la turbidez del afluente, a partir de este punto las remociones varían alcanzando eficiencias promedio de 13,91% en 1P; 8,72% 1G; 15,09% 2P; 14,47% 2G; 9,75% 3P y 10,17% 3G, hasta finalizar la fase inicial.

Con la adición de piedra pómez, las eficiencias aumentan logrando remociones promedio de 17,71%, 18,81%, 15,67%, 20,67%, 19,04% y 21,86%, respectivamente. Al final del período de monitoreo, los biofiltros que presentaron mejor remoción fueron 3G y 2G; y la menor remoción se evidenció en 2P.

Los biofiltros aumentan su capacidad de remoción entre fases, obteniendo mayores eficiencias durante la fase modificada, este comportamiento efectivamente puede atribuirse a la adición de la piedra pómez, ya que del monitoreo de los filtros blancos, resulta que el material puede disminuir hasta el 14% la turbidez del afluente.

Los aumentos esporádicos de la turbiedad en los efluentes, en la semana 10 en 2P (día 66), semana 17 en 2G (días 115 y 119) y semana 18 en 1P y 2G (día 126), puede atribuirse al desprendimiento de la biopelícula y/o la descomposición del material orgánico, lo que aporta mayor cantidad de sólidos al efluente (Garzón & Buelna, 2011).

Con base en los resultados, se asume que los reactores retienen material suspendido del afluente, arrojando mejores resultados durante la fase modificada, por ende, la piedra pómez no solo brinda soporte y porosidad al material biofiltrante, sino que también ayuda a la remoción de este parámetro.

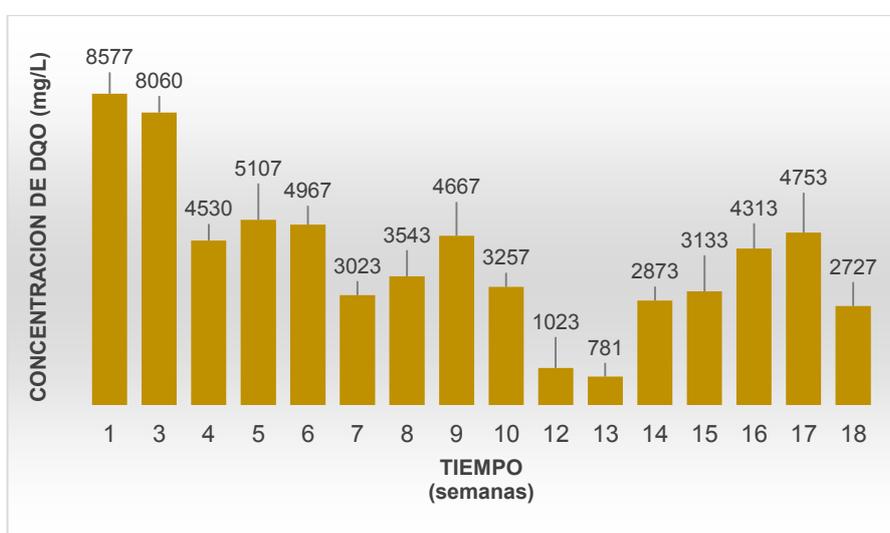
4.6.2 ANÁLISIS DE LA REMOCIÓN DE DQO Y COLOR

Las eficiencias de DQO y color aparente logradas en cada biofiltro, a lo largo de la etapa experimental, se representan con porcentajes de remoción en los siguientes gráficos donde se considera una diferencia de 3% para la determinación del período de estabilización de la biopelícula.

4.6.2.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

El Gráfico 4.6 presenta las variaciones en las concentraciones de DQO de los afluentes empleados durante la etapa experimental, los cuales difieren de 781 mg/L a 8577 mg/L.

Gráfico 4.6 Concentración de la DQO en el afluente por semana de muestreo



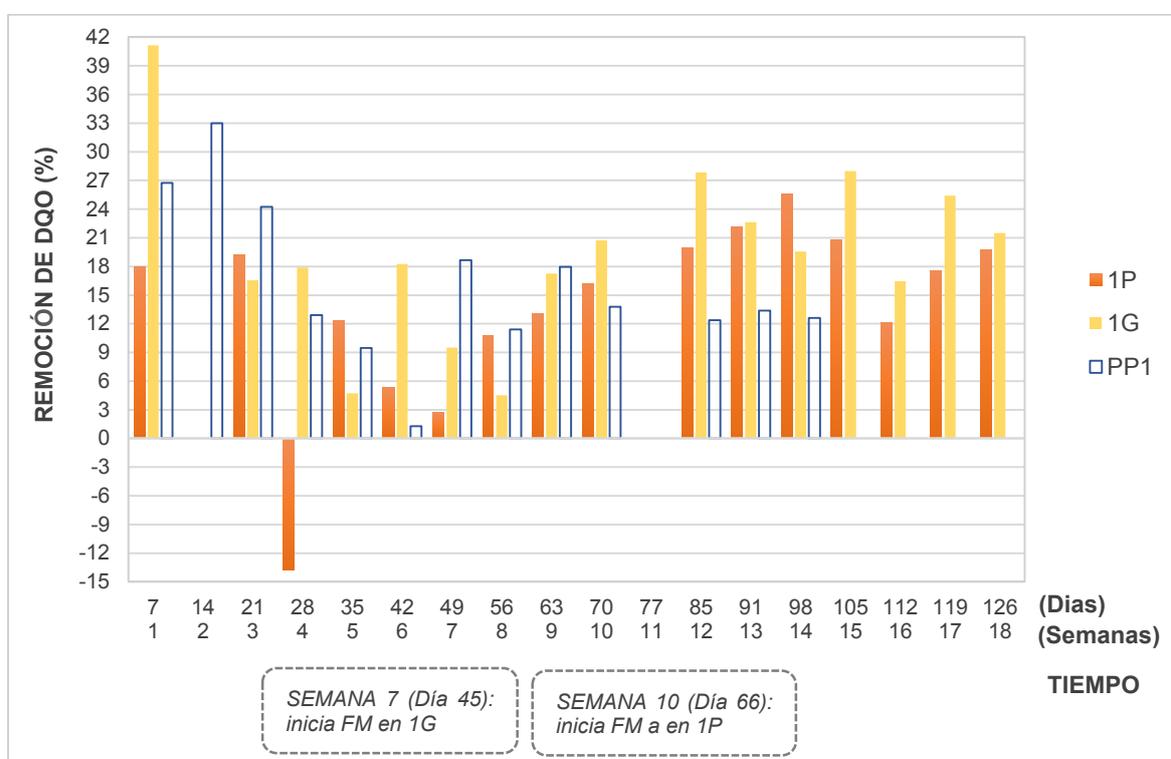
Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

El comportamiento de la remoción de DQO según las alturas del lecho filtrante, se muestran a continuación.

- **REMOCIÓN DE DQO EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,40 M**

El comportamiento de los porcentajes de remoción de DQO en 1P y 1G, se muestra en el Gráfico 4.7.

Gráfico 4.7 Remoción de DQO a lo largo del período de experimentación en los reactores con altura de medio filtrante de 0,40 m



PP1 = filtro blanco para altura de 0,40 m; FM = fase modificada

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Se puede observar que a lo largo del período experimental, los biofiltros tienden a disminuir la DQO de los afluentes, incluso desde la primera semana de monitoreo.

El valor negativo evidenciado en la semana 4 en 1P, puede atribuirse al lavado de del material, ya que en sistemas de biofiltración se presenta un período inicial de lavado que dura aproximadamente de 3 a 4 semanas, en donde la concentración de los ácidos húmicos de materiales orgánicos es alta y al ser lavados, aumentan

la concentración de salida de algunos parámetros como la DQO (Garzón et al., 2006).

Durante la fase inicial, 1P presenta remociones que oscilan entre 2,71 – 19,24%, y 1G entre 4,71 - 41,16%, alcanzando los máximos valores a la tercera y primera semana, respectivamente. No obstante, las eficiencias son muy variables, incluso a la semana 5 en 1G y semana 6 en 1P, se aprecia que las eficiencias decrecen notablemente respecto a la semana anterior, lo que puede atribuirse a las fallas en el funcionamiento del sistema por la compactación ocasionada a la fecha, que evidentemente afecta al desarrollo de los microorganismos.

Respecto a la fase modificada, se visualiza que los biofiltros logran mejores remociones de DQO en comparación con la fase inicial. Las eficiencias alcanzadas por 1P, desde la semana 10 a la 14, ascienden de 16,16% a 25,62%, pero a partir de la semana 15 en adelante, los valores nuevamente empiezan a variar entre 12,10 - 20,75%. Para el caso de 1G, el comportamiento es similar, de la semana 7 a las 12, las eficiencias tienden aumentar de 4,53% a 27,84%, pero a semana siguiente, esta tendencia nuevamente varía en un rango de 16,44 – 28,00%.

En la semana 16, tanto en 1P como 1G, se tiene la particularidad de que las eficiencias decrecen visiblemente en comparación a la semana anterior, situación que puede asociarse a fallas en la alimentación del sistema ocurrido 2 días antes del monitoreo de los biofiltros.

Del análisis realizado, se puede decir que la piedra pómez aporta cierta porosidad y soporte al material biofiltrante. Si bien, este material ayudó a obtener eficiencias un tanto mayores a la fase inicial, los valores no son constantes debido a que la biopelícula formada es muy sensible ante cambios en el funcionamiento del sistema.

La Tabla 4.6 presenta los porcentajes mínimo, máximo y promedios de remoción de DQO alcanzados durante cada fase. Las eficiencias promedio alcanzadas a lo largo de la fase modificada, al compararlas con las eficiencias de remoción de DQO logrado por PP1 (13,04%), se considera que la remoción que aporta la cáscara de banana en 1P y 1G, es de apenas 6,21% y 6,37%, respectivamente.

Tabla 4.6 Porcentajes de remoción de DQO en los reactores con altura de lecho filtrante de 0,40 m

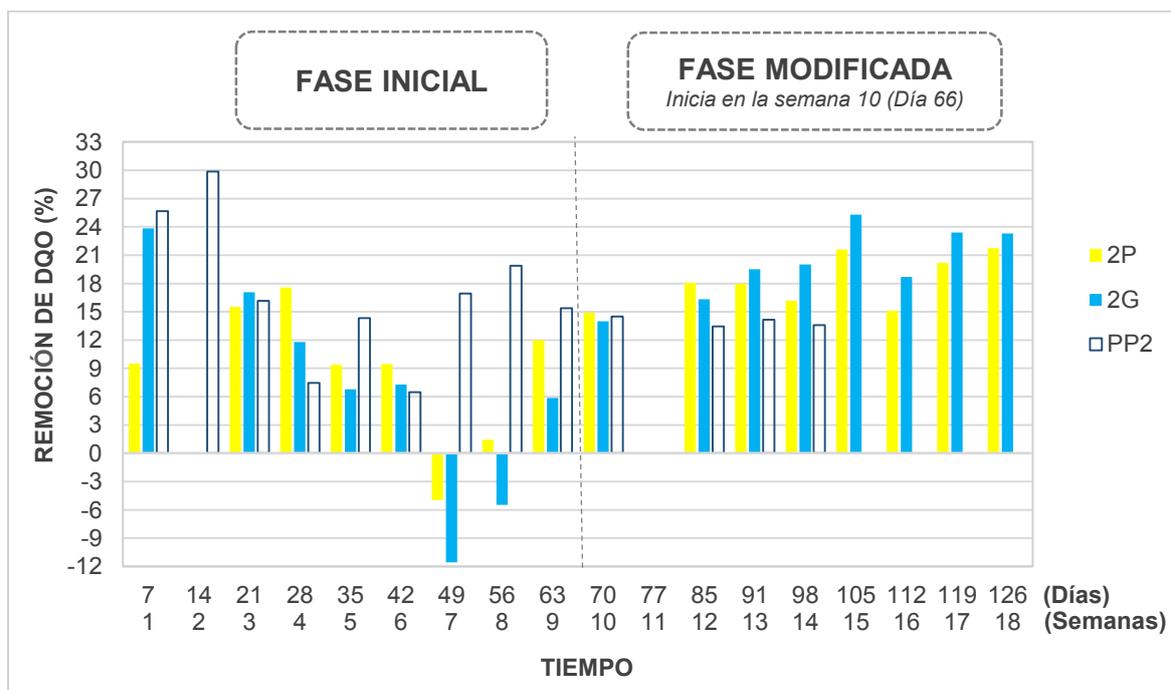
BIOFILTRO	FASE INICIAL		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
1P	2,71	19,24	11,62 ± 6,05
1G	4,71	41,16	14,35 ± 6,47
BIOFILTRO	FASE MODIFICADA		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
1P	12,10	25,62	19,24 ± 4,06
1G	4,53	28,00	19,40 ± 7,28

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

- **REMOCIÓN DE DQO EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,50 M**

El Gráfico 4.8 muestra el comportamiento de los porcentajes de remoción de DQO en 2P y 2G, durante el período experimental.

Gráfico 4.8 Remoción de DQO a lo largo del período de experimentación en los reactores con altura de medio filtrante de 0,50 m



PP2= filtro blanco para altura de 0,50 m.

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Se puede visualizar que 2P y 2G en la fase inicial, presentan remociones de DQO que oscilan entre 1,44 - 17,59% en 2P y 5,88 - 23,86% en 2G. Sin embargo, también presentan valores negativos que pueden atribuirse a la compactación del lecho filtrante presentado a la semana 7.

Es notable que el taponamiento de los biofiltros alteraron el crecimiento de la biopelícula, dando como resultado efluentes con mayor concentración de DQO respecto al afluente, situación diferente a lo sucedido en 1P y 1G, donde las eficiencias disminuyeron pero no presentaron valores negativos.

Durante la fase modificada, los biofiltros tienden a aumentar las eficiencias alcanzadas durante la fase inicial. Desde la semana 10 a la 14, 2P logra remociones que varían de 14,89 - 18,10% y 2G de 13,98 - 20,00%, alcanzando la estabilidad a partir de la semana 15, con remociones de DQO de $21,18 \pm 0,87\%$ y $24,00 \pm 1,14\%$, a excepción de la semana 16 donde las eficiencias decrecen alrededor de 6,60%, debido a la mayor carga hidráulica de alimentación.

La semana posterior a este comportamiento, las eficiencias nuevamente empiezan a aumentar hasta llegar a remociones similares a la semana 15, por lo tanto, se considera que los biofiltros analizados requieren de una semana de estabilización para nuevamente alcanzar porcentajes constantes de remoción.

La Tabla 4.7 presenta la remoción de DQO mínimos, máximos y promedios alcanzados por 2P y 2G, tanto en la etapa inicial como en la modificada (a partir del día 105, semana 15).

Con base en los valores obtenidos del monitoreo de PP2, la piedra pómez consigue remover 13,92% la DQO del afluente, a partir de 70 días de operación. Al comparar este valor, con las eficiencias alcanzadas por 2P y 2G al llegar a la estabilización, el 7,25% y 10,08% son eficiencias atribuibles a la cáscara de banano acondicionada.

Tabla 4.7 Porcentajes de remoción de DQO en los reactores con altura de lecho filtrante de 0,50 m

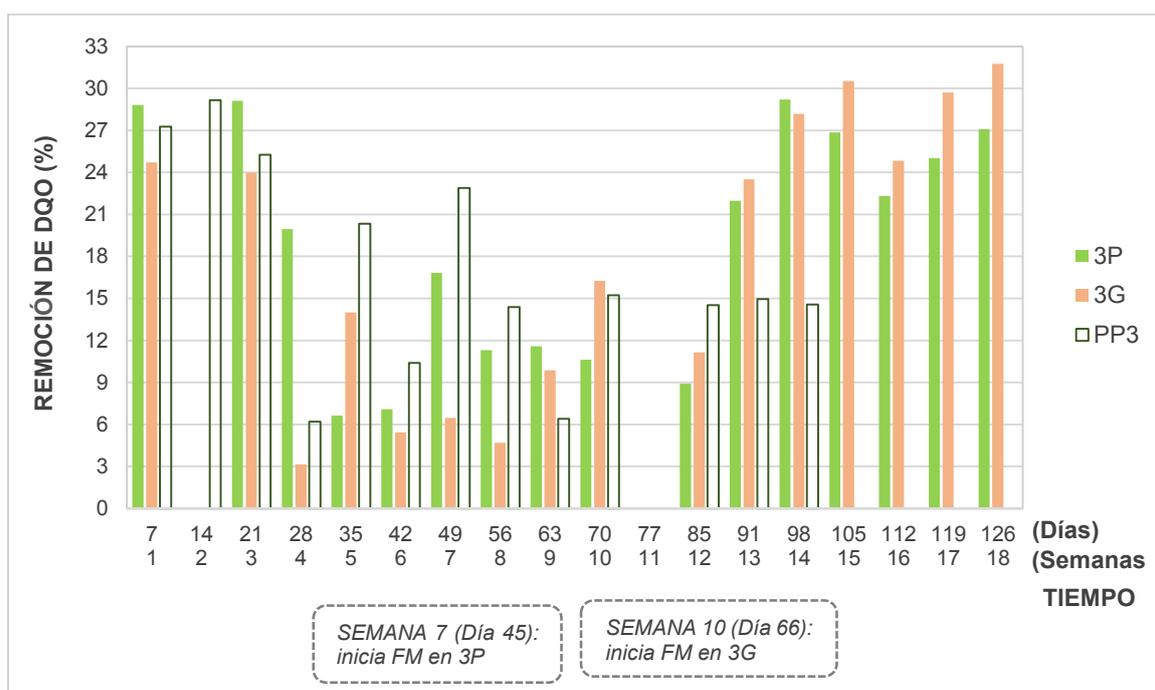
BIOFILTRO	FASE INICIAL		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
2P	1,44	17,59	10,70 ± 5,21
2G	5,88	23,86	12,11 ± 7,11
BIOFILTRO	FASE MODIFICADA		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio período de estabilización (%)
2P	14,89	21,76	21,18 ± 0,87
2G	13,98	25,31	24,00 ± 1,14

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

- **REMOCIÓN DE DQO EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,60 M**

Los porcentajes de remoción de DQO en 3P y 3G se visualizan en el Gráfico 4.9.

Gráfico 4.9 Remoción de DQO a lo largo del período de experimentación en los reactores con altura de medio filtrante de 0,60 m



PP3= filtro blanco para altura de 0,60 m; FM = fase modificada

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Se observa que tanto 3P como 3G, a lo largo de la etapa experimental, siempre alcanzan remociones positivas. Es importante resaltar que estos reactores, tienen la particularidad de ser los únicos de los seis biofiltros analizados, que no presenta eficiencias nulas durante toda la etapa de experimentación.

Durante los primeros 21 días de funcionamiento en la fase inicial, tanto 3P como 3G, logran remociones promedio de DQO de $28,96 \pm 0,20\%$ y $24,35 \pm 0,52\%$, respectivamente. A partir de ello, las eficiencias empiezan a variar lo cual puede deberse a los problemas de taponamientos evidenciados a la semana 5 y 6. Efectivamente la compactación del lecho filtrante influye negativamente al período de aclimatación en el que se encuentran los microorganismos haciendo que las eficiencias disminuyan drásticamente.

Respecto a la fase modificada, se visualiza que las eficiencias obtenidas aumentan respecto a la inicial. Desde la semana 7 hasta la 13, 3P alcanza eficiencias que varían entre 8,91 - 21,97%, por su parte, 3G desde la semana 10 a la 13 alcanza entre 11,14 - 23,50% de remoción, logrando eficiencias estables a partir de los 98 días, correspondientes a la semana 14. 3P alcanza remociones de DQO de $27,03 \pm 1,72$ y 3G de $30,05 \pm 1,51$.

En la semana 16, la eficiencia de los biofiltros, disminuye aproximadamente 4,52% en 3P y 5,71% en 3G, este escenario al igual que en los anteriores reactores, puede relacionarse al cambio en la carga hidráulica superficial de alimentación.

Posterior a este comportamiento, se observa que 3P requiere de dos semanas de estabilización para volver a tener eficiencias similares a la semana 15, a diferencia de una semana de aclimatación requerida por 3G.

La Tabla 4.8 resume los porcentajes mínimos y máximos de remoción de DQO alcanzados por 3P y 3G durante cada fase del período experimental, así como también la remoción promedio durante las fases inicial y modificada (a partir del día 98, semana 14).

Al comparar las eficiencias estables alcanzadas por 3P y 3G, con la remoción de DQO que alcanza PP3 (14,81%), se asume que el 12,22% y 15,24% son los

porcentajes de remoción aportados por el material biofiltrante y el resto es atribuible a la piedra pómez.

Tabla 4.8 Porcentajes de remoción de DQO en los reactores con altura de lecho filtrante de 0,60 m

BIOFILTRO	FASE INICIAL		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
3P	6,63	29,10	18,32 ± 11,09
3G	3,14	24,72	11,54 ± 8,60
BIOFILTRO	FASE MODIFICADA		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio período de estabilización (%)
3P	8,91	29,21	27,03 ± 1,72
3G	11,14	31,77	30,05 ± 1,51

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

De manera general, los seis biofiltros presentan mayores porcentajes de remoción de DQO durante la fase modificada, por ende la piedra pómez no solo minimiza la posibilidad de compactación del lecho filtrante, sino que también ayuda a la remoción de este parámetro.

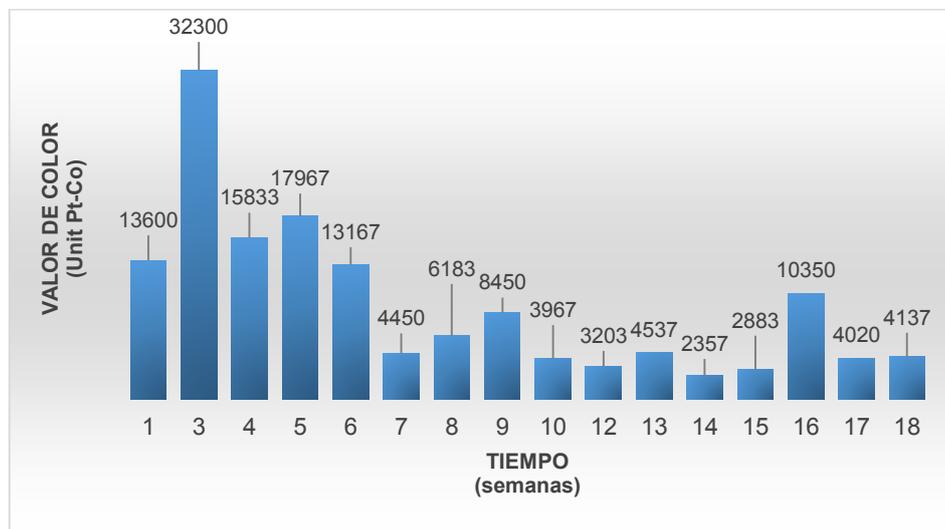
Además, el biofiltro 3G en mezcla con piedra pómez, es el que presenta mejor desempeño, por ser el único donde la cáscara de banano acondicionada aporta mayor porcentaje de remoción en comparación con la piedra pómez.

4.6.2.2 COLOR

A lo largo del período operacional, los valores de color de las agua residuales empleadas, varían notablemente entre 2357 unit Pt-Co a 32300 unit Pt-Co, debido a que durante la fase inicial, las muestras se recolectaron en una época en que la empresa tuvo mayor demanda de lavado de telas jeans teñidos con coloración alta de índigo (13167 - 32300 unit Pt-Co) y, a partir de la fase modificada, se trabaja con afluentes con valores de color en un rango más bajo (2357 - 10350 unit Pt-Co).

La variación de color aparente de los afluentes a lo largo del período experimental, se detalla en el Gráfico 4.10.

Gráfico 4.10 Valores de color del afluente durante el período experimental



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

- **REMOCIÓN DE COLOR EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,40 M**

El Gráfico 4.11 indica el comportamiento de las eficiencias de remoción de color en 1P y 1G a lo largo de la experimentación. Se visualiza que los biofiltros pueden reducir el color del afluente a la primera semana de funcionamiento, por lo que se asume que el material biofiltrante no aporta color debido a que fue lavada durante el ensayo de vaciado.

A pesar de que los biofiltros consiguen la mayor remoción de color a la primera semana en 1G y tercera en 1P, con eficiencias de 25,81% y 23,48% respectivamente, los valores no permanecen constantes a lo largo de la etapa inicial, comportamiento normal debido a que los microorganismos necesitan de un ciclo de acondicionamiento.

A la cuarta semana de funcionamiento, los reactores tiene la particularidad de trabajar con un afluente cuya coloración es aproximadamente la mitad de la semana anterior, este cambio brusco en la alimentación al sistema, puede ocasionar que

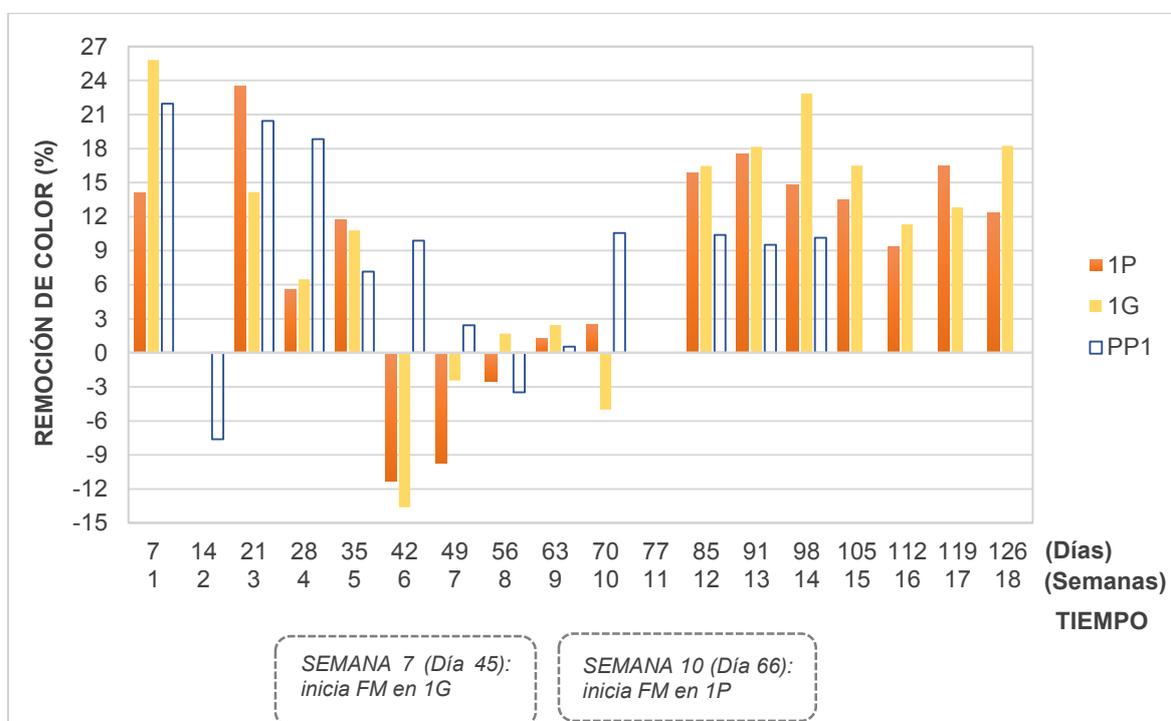
las eficiencias disminuyan, debido a que el biofilm se somete a un ambiente de estrés reduciendo su actividad metabólica (Jiménez & Villegas, 2005).

A la quinta y sexta semana, en 1G y 1P se presentan fallas en el funcionamiento del sistema por la compactación del lecho filtrante, esta situación influye negativamente en el desarrollo de los microorganismos, haciendo que las eficiencias decrezcan como se aprecia de la semana 6 a la 10.

A partir de la semana 12, los biofiltros en mezcla con piedra pómez empiezan a tener eficiencias mayores a la fase inicial, 1P alcanza remociones de $14,26 \pm 2,78\%$ y 1G de $16,62 \pm 3,80\%$.

En la semana 16, 1P y 1G evidencian un descenso notorio en sus eficiencias, lo que puede justificarse por las fallas en la alimentación del sistema en conjunto con el cambio brusco en la coloración del afluente con el que trabajaron los biofiltros durante esta semana.

Gráfico 4.11 Remoción de color a lo largo del período de experimentación en los reactores con altura de medio filtrante de 0,40 m



PP1= filtro blanco para altura de 0,40 m; FM = fase modificada

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Con base en lo expuesto, ninguno de los biofiltros con altura de lecho filtrante de 0,40 m, logra remociones estables debido a que la biopelícula formada es muy sensible a cambios en la operación del sistema.

La Tabla 4.9 presenta los porcentajes mínimos, máximos y promedios de remoción de color logrados por 1P y 1G en cada fase. Del monitoreo de PP1, resulta que la piedra pómez remueve en promedio 10,16% el color de los afluentes, a partir de 70 días de operación. Al comparar este valor con las eficiencias promedio alcanzadas por 1P y 1G en la fase modificada, se considera que el 2,63% y 6,47% de remoción es atribuible a la cáscara de banana, valores por debajo de los aportados por el material inorgánico.

Tabla 4.9 Porcentajes de remoción de color en los reactores con altura de lecho filtrante de 0,40 m

BIOFILTRO	FASE INICIAL		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
1P	1,23	23,48	11,21 ± 8,53
1G	6,48	25,81	14,30 ± 8,29
BIOFILTRO	FASE MODIFICADA		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
1P	2,50	17,47	12,79 ± 4,89
1G	1,71	22,87	16,62 ± 3,80

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

- **REMOCIÓN DE COLOR EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,50 M**

El Gráfico 4.12, indica la remoción de color en los reactores 2P y 2G, en función del tiempo. Se observa que los dos biofiltros presentan remociones positivas hasta la semana 5, incluso en la primera semana alcanzan un promedio de 23,92% de remoción.

A partir de la semana 6, las remociones son muy variables, presentándose hasta remociones nulas en la semana 6 y 7, atribuible a la compactación evidenciada en

los reactores durante esta fecha, lo que evidentemente altera el desarrollo del biofilm.

A los 70 días, 4 días después de la adición de piedra pómez, el efluente de 2P arroja valores de color mayores al afluente, posiblemente esta situación se deba al proceso de estabilización al que se somete nuevamente el biofilm al ser mezclado con el material inorgánico.

A partir de los 91 días, correspondientes a la semana 13, los biofiltros empiezan a tener remociones más estables, que oscilan de 17,13 - 20,83% en 2P y de 17,50 - 20,22% en 2G, exceptuando los valores alcanzados a los 112 días, semana 16, donde las eficiencias disminuyen aproximadamente 4,41% en ambos reactores. Esto puede deberse a la coloración mayor del afluente con el que trabajaron los reactores durante esta semana (tres veces mayor a la semana anterior), que en conjunto con la mayor carga hidráulica de alimentación, alteraron las eficiencias alcanzadas a la fecha.

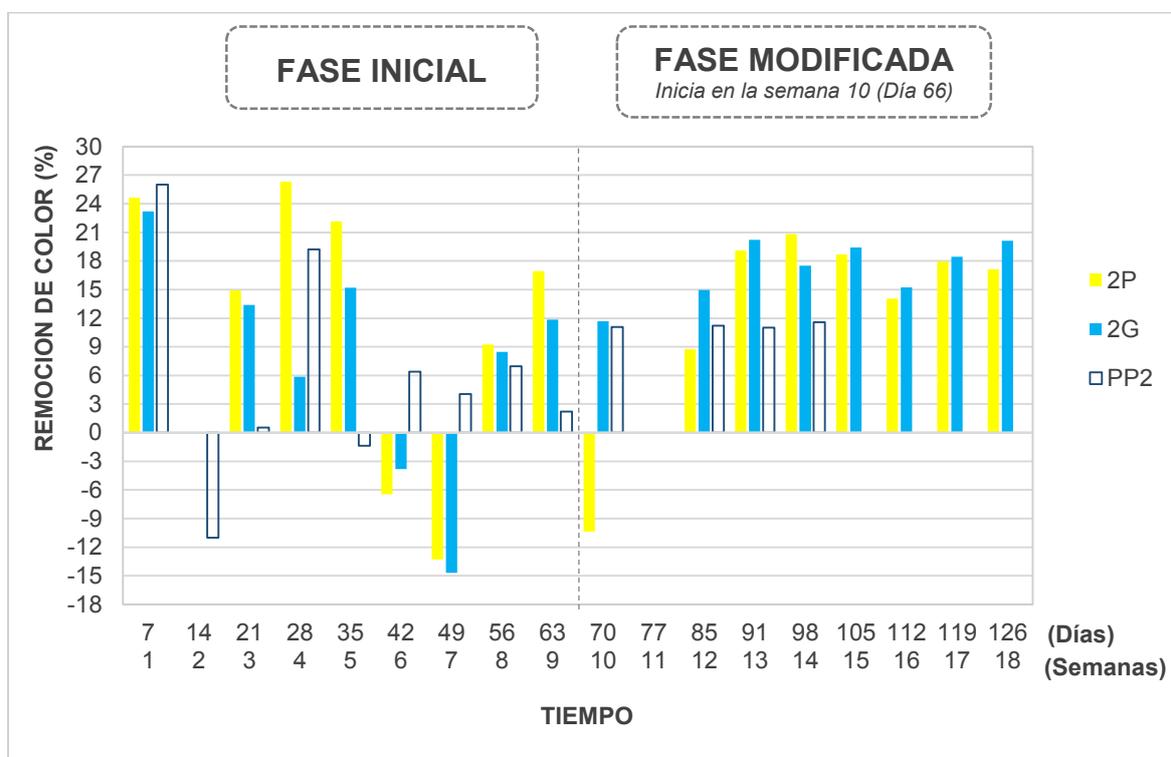
Este cambio brusco en la alimentación del sistema provoca un ligero ambiente de estrés en el biofilm, el mismo que necesita de una semana de estabilización para presentar eficiencias similares a las alcanzadas antes de esta situación.

Del análisis realizado, resulta que el reactor que presenta mejor desempeño es 2G. No obstante, la diferencia con la eficiencia lograda por 2P, es de apenas 0,40%, valor prácticamente nulo, por lo tanto, se asume que los reactores en mezcla con piedra pómez y altura de lecho filtrante de 0,50 m, presentan similares porcentajes de remoción en cuanto a color.

La Tabla 4.10 presenta los porcentajes mínimos y máximos de remoción de color en 2P y 2G, además de la remoción promedio alcanzada durante la etapa inicial y modificada (a partir del día 91, semana 13).

Al comparar las eficiencias alcanzadas por 2P y 2G una vez estabilizados, con la remoción de color que se obtiene del monitoreo de PP2 (11,23%), resulta que la diferencia de 7,51% y 7,91%, son los porcentajes de remoción que aporta la cáscara de banana acondicionada en la fase modificada.

Gráfico 4.12 Remoción de color a lo largo del período de experimentación en los reactores con altura de medio biofiltrante de 0,50 m



PP2= filtro blanco para altura de 0,50 m.

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla 4.10 Porcentajes de remoción de color en los reactores con altura de lecho filtrante de 0,50 m

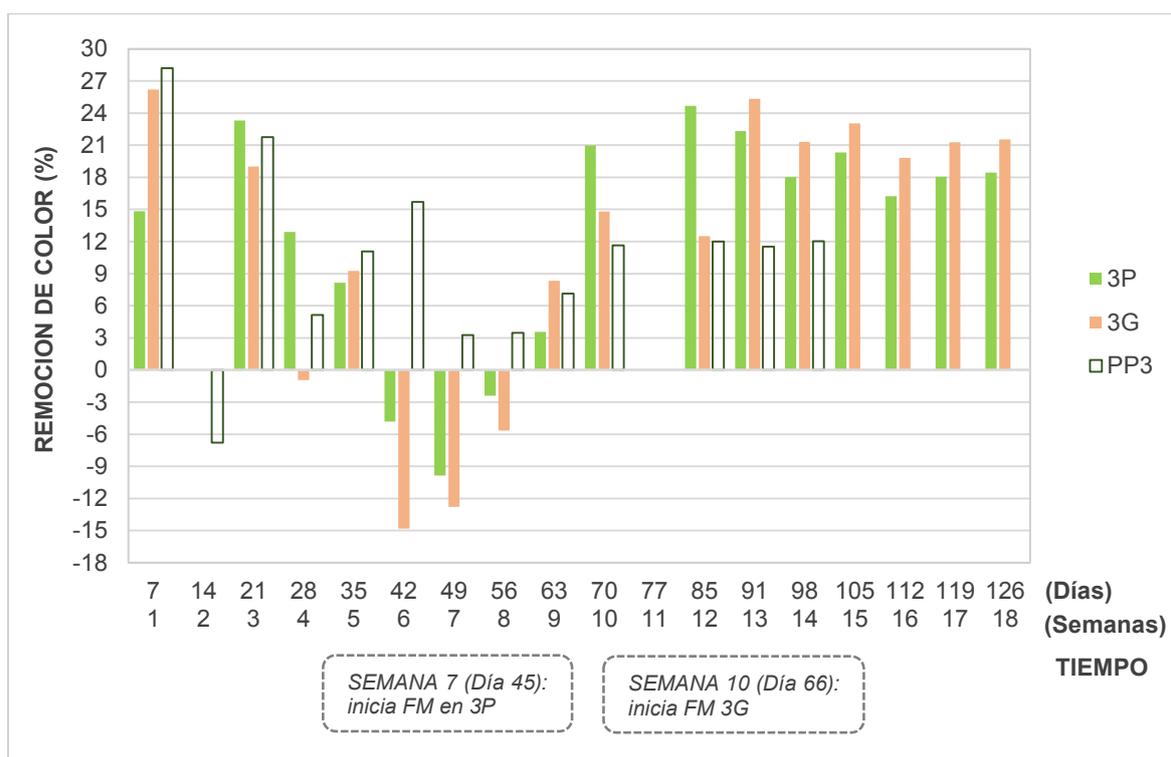
BIOFILTRO	FASE INICIAL		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
2P	9,23	26,30	19,04 ± 6,50
2G	5,84	23,20	12,99 ± 6,04
BIOFILTRO	FASE MODIFICADA		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio período de estabilización (%)
2P	8,72	20,83	18,74 ± 1,40
2G	11,69	20,22	19,14 ± 1,16

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

- **REMOCIÓN DE COLOR EN EL PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN CON ALTURA DE LECHO FILTRANTE DE 0,60 M**

El Gráfico 4.13 indica el comportamiento de la remoción de color en 3P y 3G, durante el período experimental.

Gráfico 4.13 Remoción de color a lo largo del período de experimentación en los reactores con altura de medio filtrante de 0,60 m



PP3= filtro blanco para altura de 0,60 m; FM = fase modificada

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

A pesar que durante las primeras 5 semanas de funcionamiento, los biofiltros presentan remociones positivas alcanzando los picos más altos de remoción a la primera semana en 3G y a la tercera en 3P, con 26,21% y 23,31% respectivamente, es notable que las remociones disminuyen de la semana 3 a la 4, no solo en estos reactores, sino en también en los anteriores, debido a la variación en el color de los afluentes de una semana a otra, lo que pudo haber ocasionado la desestabilización de los microorganismos.

Adicional, los valores negativos presentados de la semana 6 a la 8, pueden asociarse a las pérdidas de altura del lecho filtrante evidenciados en la semana 5

en 3P y semana 6 en 3G. Efectivamente, las fallas en el funcionamiento del sistema por la compactación producida, influye negativamente al desarrollo de la biopelícula.

3P sigue presentando remociones negativas durante dos semanas posteriores a la adición de piedra pómez, comportamiento considerado normal debido a que los pocos microorganismos desarrollados en el material de empaque, al pasar por problemas de compactación, requieren de un período de aclimatación con la piedra pómez, aparentemente hasta los 70 días (semana 10), tiempo en que se evidencia remociones mayores a las obtenidas durante la fase inicial.

Respecto a 3G, a la primera semana en mezcla con piedra pómez, se obtienen eficiencias mayores al período inicial, esto puede indicar que la biopelícula formada en el material biofiltrante, tiende a estar mejor desarrollada a los 70 días de funcionamiento, coincidiendo con 3P.

A partir de los 98 días, correspondientes a la semana 14, los biofiltros empiezan a tener remociones estables, que oscilan de 18,03% a 20,34% en 3P y de 21,29% a 23,05% en 3G, a excepción de la semana 16, donde los porcentajes de remoción disminuyen respectivamente 4,11% y 3,24%, respecto a la semana anterior.

Este descenso, al igual que en todos los reactores, puede justificarse por la mayor coloración del afluente con el que trabajaron los reactores durante esta semana, además de la variación en la carga hidráulica superficial.

A pesar de este acontecimiento, el porcentaje en que se reduce las eficiencias es leve, requiriendo de una semana de estabilización para volver a tener eficiencias similares a la semana 14.

Con base en lo expuesto, el biofiltro en mezcla con piedra pómez más eficiente para la remoción de color, es 3G correspondiente a un tamaño de partícula de 4,75 mm, además es el reactor menos sensible ante cambios en la operación del sistema.

La Tabla 4.11 presenta los porcentajes de remoción de color mínimos y máximos alcanzados en cada fase por 3P y 3G, así como también la remoción promedio para la etapa inicial y la etapa de modificación (a partir del día 98, semana 14).

Al comparar las remociones alcanzadas por los biofiltros una vez estabilizados en la fase modificada, con el 11,80% de remoción de color que se obtiene del monitoreo de PP3, a partir de 70 días de funcionamiento, se asume que la cáscara de banana brinda eficiencias de 6,92% en 3P y 10,00% en 3G, por lo tanto, el reactor 3G tiene la peculiaridad de ser el único donde el material biofiltrante y la piedra pómez, aportan eficiencias similares en la remoción de color.

Tabla 4.11 Porcentajes de remoción de color en los reactores con altura de lecho filtrante de 0,60 m

BIOFILTRO	FASE INICIAL		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
3P	8,15	23,31	14,79 ± 6,33
3G	8,33	26,21	15,71 ± 8,51
BIOFILTRO	FASE MODIFICADA		
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio período de estabilización (%)
3P	3,57	24,68	18,72 ± 1,09
3G	12,50	25,32	21,80 ± 0,84

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

De manera general, los seis reactores aumentan sus eficiencias de remoción en la fase modificada, por lo tanto la piedra pómez, no solo aporta cierta eficiencia en la remoción de DQO, sino también ayuda a la remoción de color.

4.7 DETERMINACIÓN DEL BIOFILTRO MÁS EFICIENTE SEGÚN EL TAMAÑO DE PARTÍCULA Y ALTURA DEL LECHO FILTRANTE

La Tabla 4.12 resume los porcentajes de remoción de DQO y color alcanzados por los biofiltros en mezcla con piedra pómez, una vez estabilizados.

Al comparar los dos tamaños de partícula del material biofiltrante se aprecia que la granulometría de 4,75 mm, presenta mejores remociones, resultado justificable por la cantidad de poros evidenciados en la morfología del material. En cuanto alturas del lecho filtrante, se evidencia que a mayor altura, mayor eficiencia, esto puede

deberse a que existe más superficie de contacto entre el agua residual y la biopelícula.

Por consiguiente, el tamaño de partícula y altura de lecho filtrante más eficiente, es 4,75 mm y 0,60 m, correspondiente al biofiltro 3G, el cual alcanza eficiencias de $30,05 \pm 1,51\%$ para DQO y $21,80 \pm 0,84\%$ para color, a partir de la semana 14.

Por otro lado, el biofiltro que menor desempeño tiene es 1P, con tamaño de partícula de 2,00 mm y altura de lecho filtrante 0,40 m, alcanzando remociones de $19,24 \pm 4,06\%$ para DQO y $12,79 \pm 4,89\%$ para color.

Tabla 4.12 Resumen de las eficiencias alcanzadas por los biofiltros

BIOFILTROS	PARÁMETROS	
	DQO (%)	COLOR (%)
1P*	19,24 ± 4,06	12,79 ± 4,89
1G*	19,40 ± 7,28	16,62 ± 3,80
2P	21,18 ± 0,87	18,74 ± 1,40
2G	24,00 ± 1,14	19,14 ± 1,16
3P	27,03 ± 1,72	18,72 ± 1,09
3G	30,05 ± 1,51	21,80 ± 0,84

* No estabilizados: eficiencias promedio durante fase modificada

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

4.8 GRADO DE CUMPLIMIENTO CON LA NORMATIVA AMBIENTAL

Como se determina en el numeral anterior, el biofiltro más eficiente es 3G, por tal razón se caracteriza el efluente del mismo para compararlo con la normativa ambiental aplicable a descargas a cuerpos de agua dulce. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.13.

Con una muestra inicial de 4130 unit Pt-Co de color aparente y 1920 unit Pt-Co de color real, el biofiltro 3G logra reducir 20,83% el color del afluente, eficiencia poco significativa que puede justificarse por el carácter recalcitrante del colorante índigo. En cuanto a la DBO₅ y DQO también se evidencia reducción del 20,00% y 30,61%,

respectivamente, al igual que los SST con 71,23%, ST con 27,40% y turbidez con 15,87% de remoción. No obstante, la conductividad aumenta 4,24% al igual que los SDT 3,75%. Finalmente, en cuanto al pH, se aprecian un leve descenso.

Es importante mencionar, que el índice DBO₅/DQO, aumenta de 0,26 (agua sin filtrar) a 0,29 (agua filtrada), lo que indica que el efluente tiende a aumentar su biodegradabilidad.

Tabla 4.13 Comparación del biofiltro más eficiente con la normativa ambiental vigente

PARÁMETROS	EXPRESADOS COMO	UNIDAD	AFLUENTE	EFLUENTE	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
Color real	Color real	Unidades de color	1920	1520	Inapreciable en dilución: 1/20
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg/L	375	300	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	1470	1020	250
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/L	188	54	100
Sólidos Totales	ST	mg/L	924	671	1600
Potencial Hidrógeno	pH	-	6,49	6,24	5 - 9
Temperatura	-	°C	17,92	17,64	< 35

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

A pesar de que los parámetros que no cumplen con la normativa son: DQO, DBO₅ y color, mientras que los que cumplen son: SST, ST, pH y temperatura, se observa

que el agua residual tiende a mejorar, teniendo en cuenta que la composición del agua residual está muy por encima de los límites permitidos.

4.9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE REMOCIÓN DE DQO Y COLOR CON OTROS DATOS QUE EMPLEAN OTRO TIPO DE MATERIAL

La Tabla 4.14 detalla investigaciones realizadas para el tratamiento de efluentes textiles, respecto a parámetros de color y DQO.

Tabla 4.14 Comparación de eficiencias con otros materiales

MATERIAL	DQO (mg/L)		COLOR (unit Pt-Co)		OBSERVACIONES	REFERENCIA
	Vi	Ef (%)	Vi	Ef (%)		
Tusa de maíz más CAT	1670	57,44	3275	78,63	Agua residual real 20 horas de operación	Torres & Gaibor, 2015.
Piedra pómez	1338	95,22	703	86,2	Agua residual real 29 días de operación	Sánchez, 2017
Grava	284,60	47,15	580	51,72	Agua residual real 16 días de operación	Toapanta, 2018.
Turba	284,60	11,60	580	48,28	Agua residual real 28 días de operación	Pérez, 2018.
Cáscara de banano	16,67	70,01	105	77,92	Agua residual sintética 3 horas de operación	Aucancela, 2018.
Cáscara de banano en mezcla con piedra pómez	3586	30,05	4726	21,80	Agua residual real 126 días de operación	Jurado & Suintaxi, 2020.

Vi: valor o concentración inicial del agua residual; CAT: carbón activado de tusa de maíz

Elaborado por: Jurado & Suintaxi, 2019.

Se puede observar que las eficiencias en la disminución de DQO y color, varían en relación al material biofiltrante. Así, para la remoción de DQO, se tiene a la piedra

pómez como el material más eficiente, seguida de la cáscara de banano, tusa de maíz más CAT, grava, turba y finalmente la cáscara de banano en mezcla con piedra pómez. Respecto al color, la piedra pómez presenta eficiencias altas, seguido por la tusa maíz más CAT, cáscara de banano, grava, turba y por último el material estudiado en este trabajo.

De los resultados analizados, es importante mencionar que cada investigación presenta variación en las condiciones de operación, como valores variables de color y DQO, diferentes tiempos de monitoreo y distintos tipos de agua residual a tratar.

Estas particularidades interfieren en las eficiencias de remoción, así se tiene en primer lugar a la cáscara de banano y tusa de maíz más CAT con un tiempo de monitoreo de 3 a 20 horas respectivamente, lo cual no es un tiempo relevante para el desarrollo de microorganismos, seguidamente se tiene la investigación de Aucancela (2018), donde utilizó agua residual sintética lo cual genera variación en las eficiencias de remoción al no ser un agua real. Sin embargo las eficiencias de DQO alcanzadas por la cáscara de banano en mezcla con piedra pómez es mayor al porcentaje de remoción que se logra con la turba, pero esta situación no se repite con el color.

Adicionalmente las concentraciones con las que trabajan las investigaciones reportadas son muy bajas en comparación a la investigación realizada en el presente trabajo, por lo tanto, las eficiencias alcanzadas pueden considerarse aceptables al trabajar con aguas residuales reales.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La caracterización física y química del material biofiltrante, cáscara de banano, evidenció que de acuerdo a su humedad, porosidad, densidad aparente y pH, cumple con los rangos establecidos en bibliografía, para ser considerado apto para procesos de biofiltración.
- El tamaño de partícula del material constituye un parámetro importante en el funcionamiento de los biofiltros, pues con base en la caracterización morfológica, se evidenció que el tamaño de 4,75 mm presenta mejor formación y distribución de poros, a diferencia del tamaño de 2,00 mm que presentó pocos poros, en su mayoría irregulares y destruidos.
- La tamaño de partícula del material biofiltrante en conjunto con su relación lignina/celulosa, resultó en un material de empaque ineficiente para mantener un soporte estable y duradero dentro del reactor, lo que conllevó al aumento de pérdidas de altura y degradaciones más rápidas del material, por lo tanto, estos parámetros son de importancia en la selección de un material biofiltrante.
- La caracterización del agua residual a tratar de la empresa “Color & Denim” mostró que parámetros como color y DQO, están muy por encima de los límites permisibles para descargas a cuerpos de agua dulce, siendo la DQO hasta 33 veces mayor al permitido.
- El índice de biodegradabilidad del agua residual lo caracterizó como biodegradable a través de tratamientos biológicos.
- El biofiltro 3G empacado con el material biofiltrante con tamaño de partícula de 4,75 mm y altura de lecho de 0,60 m, en mezcla con piedra pómez, resultó ser el más eficiente para la remoción de DQO y color a partir de 98 días de funcionamiento, llegando a valores de $30,05 \pm 1,51\%$ y $21,80 \pm 0,84\%$ respectivamente. También se reflejó la remoción de otros parámetros como: DBO₅ 20,00%, ST 27,40%, SST 71,23% y turbidez 15,87%. No obstante, la conductividad y los SDT presentaron un leve incremento de 4,24% y 3,75%,

respectivamente. Así, los SST, ST, pH y temperatura, cumplen con la normativa mientras que los que no cumplen son: DQO, DBO₅ y Color.

- El biofiltro en mezcla con piedra pómez con menor eficiencia es 1P, empacado con tamaño de partícula de 2,00 mm y altura de lecho filtrante de 0,40 m, con remociones no estables que varían entre 12,10% a 25,62% para DQO y de 2,50% a 17,47% para color.
- Los biofiltros logran mejores remociones cuando trabajan con afluentes con valores similares de DQO y color, puesto que el cambio brusco de estos parámetros somete a los microorganismos a un ambiente de estrés haciendo que las eficiencias disminuyan.
- De los seis biofiltros estudiados, el reactor 3G es el menos sensible ante cambios en la operación del sistema, requiriendo de una semana de aclimatación para volver a obtener eficiencias estables.
- El pH de los efluentes de los biofiltros presentó variaciones que van de 5,11 a 7,71; los cuales cumplen con los límites estipulados en la normativa aplicable. Sin embargo, se tuvo la particularidad que a partir de la semana 8, tienden a disminuir 0,43 unidades respecto al afluente. Este comportamiento es atribuible a la cáscara de banano, ya que la piedra pómez al tener pH neutro, no tiene mayor influencia en el pH de los efluentes.
- Durante la etapa experimental, la temperatura tanto del afluente como de los efluentes, se mantuvieron en un rango de 16,43°C y 19,63°C, valores adecuados para el desarrollo de procesos biológicos sin causar interferencias en las eficiencias de remoción de DQO y color.
- Respecto a la conductividad, todos los sistemas presentaron incrementos de $10,99 \pm 2,00\%$ en la fase inicial y $4,87 \pm 1,25\%$ en la fase modificada, debido al aumento de sólidos o sales disueltas en los efluentes provenientes del lavado de sales solubles que contiene el material biofiltrante y el incremento de iones resultantes de su descomposición.
- La turbidez en los seis biofiltros disminuyó a lo largo del período experimental, durante la fase inicial se redujo $13,60 \pm 3,28\%$, a diferencia del $18,96 \pm 2,18\%$ de la fase modificada, evidenciándose mayor remoción en los biofiltros empacados con tamaño de partícula de 4,75 mm.

- Durante la fase inicial, los biofiltros empacados con tamaño de partícula de 2,00 mm, son los que presentan mayor compactación, con una pérdida de altura de hasta 13 cm del lecho filtrante.
- La adición de piedra pómez en los sistemas propuestos con cáscara de banano, contribuyeron a mejorar el funcionamiento de cada reactor, reduciendo la compactación del material por el aporte de 10,64% de porosidad al medio.
- El uso de la cáscara de banano como material de empaque para tratar aguas residuales provenientes del lavado y tinturado de jeans, no es viable, ya que de forma general, se alcanza eficiencias menores al 30% en los parámetros evaluados.

5.2 RECOMENDACIONES

- Con la visión de incrementar las eficiencias del tratamiento, se plantea optimizar el sistema propuesto mediante la operación de biofiltros en serie y a su vez, diseñar los biofiltros en mezcla con piedra pómez y cáscara de banano, con un rango variado de tamaños de partícula, de preferencia mayor a las usadas en este trabajo.
- Para futuras investigaciones se propone evaluar la remoción de metales pesados en los sistemas de biofiltración propuestos, ya que con base en bibliografía revisada, la cáscara de banano remueve eficientemente este parámetro en procesos de adsorción.
- Con el fin de reconocer el tipo de comunidad microbiana encargada de la depuración y su influencia en la degradación del material, se sugiere identificar los microorganismos que componen la biopelícula que se formó sobre la cáscara de banano.
- Sería importante realizar investigaciones con nuevos materiales orgánicos, a fin de encontrar el más eficiente para el tratamiento de estos efluentes textiles, que constituyen un serio problema para los cuerpos de aguas y actualmente, las tecnologías que existen no son económicamente viables para pequeñas y medianas empresas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alatorre, F. (2007). *Diseño de reactores empacados para la remoción de color en aguas residuales industriales* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Amaringo, F., & Hormaza, A. (2013). Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 27-36.
- Annadurai, G., Juang, R., & Lee, D. (2002). Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions. *Hazardous Materials*, 92(3), 263-274. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00017-1)
- Arana, A. (2010). *Biofiltro edificio de tamices de la EDAR de Arazuri: estudio y propuesta de mejoras* (tesis de pregrado). Universidad Pública de Navarra, Navarra, España.
- Arango, A. (2004). La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua. *Lasallista de investigación*, 1(2), 61-66. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/695/69510210.pdf>
- Asociación de Industrias textiles del Ecuador (AITE). (2018). *Historia y Actualidad*. Recuperado de <http://www.aite.com.ec/index.html#nosotros>
- Aucancela, E. (2018). *Estudio de la correlación hidráulica y la remoción de contaminantes en agua residual sintética mediante un lecho filtrante de musa paradisiaca* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Barrera, C. (2015). *Rediseño de la planta de tratamiento de aguas residuales procedentes de la lavandería "procesos textiles Llerena" del cantón Pelileo, año 2015* (tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Blasco, G., & Gómez, F. (2014). Propiedades funcionales del plátano (*Musa sp*). *Revista Médica de la Universidad Veracruzana*, 14(2), 22-26. Recuperado

de

https://www.uv.mx/rm/num_anteriores/revmedica_vol14_num2/articulos/proiedades.pdf

Buelna, G., Garzón, M., & Moeller, G. (2011). Los biofiltros de empaque orgánico: una alternativa simple, robusta y eficiente para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. *Ide@s CONCYTEG*, 6(71), 540-551. Recuperado de https://docplayer.es/18861716-Los-biofiltros-de-empaque-orgnico-una-alternativa-simple-robusta-y-eficiente-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-zonas-rurales.html?fbclid=IwAR3ahDxsHTy4q4L36z4zK8iB_oFPcB118TBTzdBhdXsy-WLubv3lkqK_Zr0

Buelna, G., Garzón, M., & Moeller, G. (2012). *Patente N° 2007013109*. Morelos, México: Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

Cabarcas, E., Guerra, A., & Henao, C. (2012). *Extracción y caracterización de pectina a partir de cáscaras de plátano para desarrollar un diseño general del proceso de producción* (Tesis pregrado). Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias.

Cardoso, G. (2010). *Avaliação de diferentes tratamentos de efluentes têxteis simulado contendo o azocorante preto de diresul* (Tesis de pregrado). Universidade Tiradentes, Aracaju, Brasil.

Carlos, G., Munive, R., Mallma, T., & Orihuela, C. (2014). Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 4(2), 32-43. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5094682>

Castro, B. (2015). *Uso de la cáscara de banano (Musa Paradisiaca) maduro deshidratada (seca) como proceso de bioadsorción para la retención de metales pesados, Plomo y Cromo en aguas contaminadas* (tesis de maestría). Universidad de Guayaquil, Guayas, Ecuador.

- Chávez, C. (2017). *Estudio de la reducción del consumo de agua en el proceso enzimático de lavado de pantalones denim mediante combinación de etapas* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Chávez, C., Mora, Z., Cabra, J., Carmona, Y., Revah, S., & Gnecco, G. (2011). Biofiltración de Ácido Sulfhídrico (H₂S), utilizando Bagazo de Caña de Azúcar y Piedra Pómez como Material de Soporte. *Ingeniería y competitividad*, 5(2), 7-15. Recuperado de <https://doi.org/10.25100/iyc.v5i2.2291>
- Ciro, H., Montoya, M., & Millán, J. (2005). Caracterización de propiedades mecánicas del banano (Cavendish Valery). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(2), 2975-2988. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v58n2/a12v58n2.pdf>
- Clariant. (2012). *Denim Book from cotton to fashion*. Recuperado de <https://goo.gl/ZHTPd0>
- Clavijo, J. (2013). *Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM)* (Tesis de pregrado). Universidad de América, Bogotá, Colombia.
- Coronel, V. (2017). *Biosorción de Ciprofloxacina con bagazo de caña y mazorca de maíz en tanque agitado* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Coronel, V., & Tenesaca, M. (2013). *Estudio de factibilidad de un proceso de biorremediación del colorante índigo presente en aguas residuales de la industria textil en la ciudad de Cuenca, a través de hongos Ligninolíticos* (tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Cortázar, A., Coronel, C., Lozada, A., & González, C. (2014). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Vida Científica Boletín Científico De La Escuela Preparatoria*, 2(3). Recuperado de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>

- Couillard, D. (1994). El uso de turba en el tratamiento de aguas residuales. *Water Research*, 28 (6), 1261-1274. doi: 10.1016 / 0043-1354 (94) 90291-7
- Dalzell, H., Biddlestone, A., Gray, K., & Thurairajan, K. (1991). *Manejo del suelo: producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales*. Recuperado de https://books.google.com.ec/books?id=WgZ47ud_bpoC&printsec=frontcover#v=onepage&q=deficiente&f=false
- Elbehri, A., Calberto, C., Staver, A., Hospido, L., Roibas, D., Skully, P., Siles, J., Arguello, I., Sotomayor, I., & Bustamante, A. (2015). *Cambio climático y sostenibilidad del banano en el Ecuador: Evaluación de impacto y directrices de política*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma, Italia.
- El Telégrafo. (2015). *Solo 25 lavadoras de jeans de Pelileo tienen permiso. Las que se quedaron fuera pagarán una multa de \$ 708*. Recuperado de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional/1/solo-25-lavadoras-de-jeans-de-pelileo-tienen-permiso-las-que-se-que-daron-fuera-pagaran-una-multa-de-708>
- El Universo. (2009). *Se remediará impacto por fábricas en Pelileo*. Recuperado de <https://www.eluniverso.com/2009/09/18/1/1447/remediara-impacto-fabricas-pelileo.html>
- Escobar, H., Monsalve, O., Forero, A., & Medina, A. (2010). *Uso de materiales orgánicos en el manejo de suelo en cultivo de hortalizas*. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=NjCjDwAAQBAJ&pg=PA40&dq=lignina+de+materiales+organicos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiTiuu6v5DmAhWldN8KHRmNBdQQ6AEIKDAA#v=snippet&q=velocidad&f=false>
- Etcharren, P. (2005). *Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de la fábrica "Lubascher y Krausse" Temuco* (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Temuco, Temuco, Chile.

- Eugenio, V. (2017). *Estudio de la optimización de un sistema de biofiltración con material de empaque de Lantana Camara y residuo de mora para la remoción de nutrientes en aguas residuales domésticas* (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Franks, G., & Meagher, L. (2003). Los puntos isoeléctricos de los cristales de zafiro y el polvo de alfa-alúmina. *Coloides y superficies A: Aspectos fisicoquímicos y de ingeniería*, 214 (1-3), 99–110. doi: 10.1016 / s0927-7757 (02) 00366-7
- Galarza, C. (2017). *Análisis del carbón activado como filtro en el tratamiento de agua residuales provenientes de la industria de lavado de jean "Tintex River" situado en el barrio El Tambo Central del cantón Pelileo* (tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
- Gamarra, F. (2014). *Evaluación del uso de cáscaras de banano (Musa paradisiaca sp.) para la descontaminación del agua con metales pesados de la cuenca de Milluni – La Paz* (Tesis de pregrado). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- García, L. (2007). *Decoloración fúngica de efluentes industriales con colorantes azo en sistemas de biofiltración con diferentes empaques orgánicos* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- García, A. (2014). Elaboración de una bio-resina intercambiadora de cationes para eliminar metales pesados en aguas a partir de cáscara de plátano o guineo. *Escuela Especializada en Ingeniería ITCA FEPADE*, 9, 17-24. Recuperado de http://www.redicces.org.sv/jspui/bitstream/10972/2921/3/Art_RT_2016.pdf
- Garzón, M. (2001). *Mecanismos para eliminar el nitrógeno del estiércol de cerdo por biofiltración aireada en turba* (Tesis de doctorado). Universidad Laval, Quebec, Canadá.
- Garzón, M. (2005). La biofiltración sobre cama de turba, un tratamiento eficiente para diferentes tipos de aguas residuales industriales. *XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitario y Ambiental*. San Juan, Puerto Rico.

- Garzón, M., Lessard, P., & Buelna, G. (2003). Determination of the hydraulic residence time in a trickling biofilter filled with organic matter. *Environmental Technology*, 24(5), 605–614. doi:10.1080/09593330309385595
- Garzón, M., Moeller, G., Buelna, G., & Tremblay, M. (2006). *Biofiltración sobre materiales orgánicos de regiones tropicales y subtropicales*. Desarrollo IMTA-CRIQ (1a Etapa). Informe de proyectos: IMTA. TC0512.4-2005.
- Garzón, M., & Buelna, G. (2011). *Treatment of wastewater from a school in a decentralized filtration system by percolation over organic packing media*. *Water Science & Technology*, 64(5), 1169-1177. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22214067>
- Gavril, M., & Hodson, P. V. (2007). Investigation of the Toxicity of the Products of Decoloration of Amaranth by *Trametes versicolor*. *Journal of Environment Quality*, 36(6), 1591. doi:10.2134/jeq2006.0433
- Góngora, C., & Zapata, T. (2016). *Diseño y operación de un prototipo de sistema para tratamiento de aguas contaminadas a causa de procesos de teñido en lavadora artesanal textil Rv* (Tesis Pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Granda, F. (2009). *Obtención de azúcares fermentables por degradación fúngica de cáscara de banana (Cavendish valery)* (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Particular Loja, Loja, Ecuador.
- Guamán, A. (2014). *Gestión ambiental en la empresa lavandería y tintorería de jeans mundo color y su incidencia en el recurso agua* (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
- Guarantini, C., & Sanoni, M. (2011). *Química Nova*. Campinas: Atlas.
- Hao, O., Kim, H., & Chiang, P. (2000). Decolorization of Wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 30(4), 449-505. doi: 10.1080 / 10643380091184237

- Hurtado, G. (2019). *La incidencia del acuerdo comercial entre el Ecuador y el EFTA en el sector de exportación de banano* (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) & Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT). (2011). *Filtración de aguas residuales municipales con contaminantes recalcitrantes para remoción de macronutrientes*. Recuperado de http://repositorio.imta.mx:8080/cencarepositorio/bitstream/123456789/1555/2/TC1109.4_Informe_Primer%20etapa.pdf
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2010). Información Económica. Recuperado de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Infoeconomia/info6.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2007). *Biofiltración*. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/biofiltra.html>
- Jiménez, E., & Villegas, A. (2005). Diseño de un sistema de biofiltración para la remoción de Estireno. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquía*, (3), 9-20. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149217448001>
- Juárez, H. (2014). *Cultivo hidropónico en mangas verticales de dos variedades de acelga y lechuga* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Kuhad R., Sood N., Tripathi K., Singh A., & Ward O. (2004). Developments in microbial methods for the treatment of dye effluents. *Advances in Applied Microbiology*, 56, 185-213. doi: 10.1016/S0065-2164(04)56006-9
- Lara, C. (2017). *Estudio de la eficiencia en la remoción de DQO del residuo de mora y Lantana camara como material de empaque en sistemas de biofiltración* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

- Mansilla, H., Lizama, C., Gutarra, A., & Rodríguez, J. (2001). Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil. *CYTED VII-G*, 60-84. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/237275070_TRATAMIENTO_DE_RESIDUOS_LIQUIDOS_DE_LA_INDUSTRIA_DE_CELULOSA_Y_TEXTIL
- Marmagne, O., Coste, C., & Jacquart J. (1996) Effluents decoloration. *L'Industrie Textile* 1278, 46–51 (in French).
- Martínez, L. (2010). *Estudio de la evolución de una ETAP para la adecuación legislativa*. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/10383>
- Mayorga, E., & Carrera, D. (2015). Diseño de reactores biológicos para tratamiento de aguas de canales de riego. *X Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 10(1), 30-36. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/316668805_DISENO_DE_REACTORES_BIOLOGICOS_PARA_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_DE_CANALES_DE_RIEGO
- Medina, A. (2012). *Efecto de la granulometría sobre el desempeño de un sistema de biofiltración utilizando material orgánico* (Tesis de posgrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Morelos, México.
- Melo, D., Torres, Y., Serna, J., & Torres, L. (2015). Aprovechamiento de pulpa y cáscara de plátano (*Musa paradisiaca spp*) para la obtención de maltodextrina. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13(2), 76-85. doi: 10.18684/BSAA(13)76-85
- Miettinen, A. (2007). Cellulases in the Textile Industry. En Polaina, J. & MacCabe, A. (Ed.), *Industrial Enzymes* (pp. 51-63). Dordrecht, Países Bajos: Springer. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-5377-0_4
- Mishra, A., & Bajpai, M. (2005). Flocculation behavior of model textile wastewater treated with a food grade polysaccharide. *Journal of Hazardous Materials*, 118(1-3), 213–217. doi: 10.1016 / j.jhazmat.2004.11.003

- Moreta, M. (2017, 27 de mayo). Pelileo viste al Ecuador con la confección del jean. *Líderes*. Recuperado de <https://www.revistalideres.ec/lideres/pelileo-viste-ecuador-confeccion-jean.html>
- Nezamzadeh, A., & Kabiri, M. (2013). Effective removal of Ni (II) from aqueous solutions by modification of nano particles of clinoptilolite with dimethylglyoxime. *Journal of Hazardous Materials*, 260, 339-349. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.05.014
- Novoa, C. (2016, 6 de agosto). La producción de jeans en Pelileo bajó 50% por 2 factores externos. *El Telégrafo*. Recuperado de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional/1/la-produccion-de-jeans-en-pelileo-bajo-50-por-2-factores-externos>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2018). *Los bosques se pasean por las pasarelas de la moda*. Recuperado de <https://news.un.org/es/story/2018/07/1438312>
- Ordoñez, M. (2015). Los Dos Lados De La Tela. *Revista Gestión*. Recuperado de <https://revistagestion.ec/empresas/los-dos-lados-de-la-tela>
- Pacheco, R. (2015). *Es así, que se considera una tecnología sostenible por su eficiencia de remoción, facilidad de construcción, bajo costo de operación y mantenimiento* (Tesis de pregrado). Universidad de las Américas, Quito, Ecuador.
- Pacheco, M., & Ramírez, C. (2017). *Evaluación de la eficiencia de remoción de ácido acético y pentano en un sistema de biofiltración con compost de pollinaza, residuos de poda y cascarilla de arroz* (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Padmavathy S., Sandhya S., Swaminathan K. (2003). Aerobic decolorization of reactive azo dyes in presence of various cosubstrates. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 17(2), 147-151. Recuperado de <http://silverstripe.fkit.hr/cabeq/assets/Uploads/Cabeq-2003-02-7.pdf>

- Palma, C., Contreras, E., Urra, J., & Martínez, M. (2011). Eco-friendly technologies based on Banana Peel use for the decolourization of the dyeing process wastewater. *Waste and Biomass Valorization*, 2, 77-86. doi: 10.1007/s12649-010-9052-4
- Paredes, D. (2016). *Biofiltración sobre cama de turba, para el tratamiento sobre agua residual proveniente del lavado de jeans* (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
- Pérez, V. (2018). *Análisis de la cama de turba como filtro en el tratamiento de aguas residuales industriales provenientes de la lavadora tinturadora de jeans "Dayantex", ubicada en el cantón Pelileo, provincia de Tungurahua* (tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
- Quiceno, M., Giraldo, G., & Villamizar, R. (2014). Caracterización fisicoquímica del plátano (*Musa paradisiaca* sp. AAB, Simmonds) para la industrialización. *UGCiencia* 20. 48-54. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/9641/b0299fb068c48412553b02597b6b485163ef.pdf>
- Quilligana, L. (2018). *Análisis del bagazo de la caña de azúcar como filtro en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la lavadora de jeans "LAVACLASSIC", ubicada en la ciudad de Pelileo, provincia de Tungurahua* (tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
- Quintero, L., & Cardona, S. (2009). Tecnologías para la decoloración de tintes índigo e índigo carmín. *DYNA*, 77(162), 371-386.
- Reddy, G., Ravindra Babu, P., Komaraiah, P., Roy, K., & Kothari, I. (2003). Utilization of banana waste for the production of lignolytic and cellulolytic enzymes by solid substrate fermentation using two *Pleurotus* species (*P. ostreatus* and *P. sajor-caju*). *Process Biochemistry*, 38(10), 1457–1462. doi:10.1016/s0032-9592(03)00025-6
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a

proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(3), 247–255. doi:10.1016/s0960-8524(00)00080-8

Rodríguez, M., Flores, S., Rangel, M., Cubillán, L., & Argotte, A. (2015). Un estudio de la remoción de manganeso (II) a partir de sistemas acuosos usando cápsulas de *Moringa oleifera* como bioadsorbente. *Revista CENIC Ciencias Biológicas* (46), 424-433. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181259521016.pdf>

Romero, H., Ayala, H., & Lapo, B. (2015). Efecto de tres pre-tratamientos de cáscaras de banana para la obtención de jarabe glucosado mediante hidrolisis enzimática. *Avances en Química*, 10(1), 79-82. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/293178620_Effect_of_three_pre-treatments_on_banana_peel_to_obtain_a_glucose_syrup_by_enzymatic_hydrolysis

Romero, J. (2002). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Romero, J. (2009). *Calidad del agua*. Colombia: Bogotá, Escuela Colombiana de Ingeniería.

Roshan, P. (2012). Denim and jeans: an overview. En Roshan, P. (Ed), *Denim Manufacture, Finishing and Application* (pp. 1-11). Cambridge, Reino Unido: Elsevier. Recuperado de <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-843-6.00001-9>

Ruiz, S. (2011). *Evaluación de la remoción del colorante ÍNDIGO utilizado en empresas dedicadas a la producción de tela tipo DENIM empleando a *Pleurotus ostreatus* como modelo biológico* (Tesis de maestría). Universidad de la Sabana, Colombia.

Sánchez, G. (2017). *Análisis de piedra pómez como filtro en el tratamiento de aguas residuales industriales provenientes de la lavadora y tinturadora de jeans "Dayantex" ubicada en el cantón Pelileo, provincia de Tungurahua,*

Ecuador (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

Sangucho, W., & Rodríguez, A. (2018). *Evaluación de la viabilidad del uso del raquis como lecho filtrante para el tratamiento de agua residual proveniente de la extracción de aceite de palma* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Saulquin, S. (2004). *Jeans: La vigencia de un mito* (1ra. Ed.). Buenos Aires, Argentina: Nobuko.

Saura, V., & Galindo, F. (2015). Utilización del colorante índigo en el laboratorio docente de Química Orgánica. *Educación Química*, 27(2), 133-138. doi: 10.1016/j.eq.2015.11.005

Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES). (2017). *Plan Nacional del Buen Vivir 2017-2021*. Recuperado de <https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf>

Solís, M., Gil, J., Solís, A., Pérez, H., Manjarrez, N., & Perdomo, M. (2013). El proceso de sedimentación como una aplicación sencilla para reducir contaminantes en efluentes textiles. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 585-594. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v12n3/v12n3a20.pdf>

Sosa, D. (2015). *Uso de astillas de madera de mezquite (Prosopis) en un sistema de biofiltros para tratar aguas residuales municipales* (tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, México.

Sosa, D., Viguera, J., & Holguín, E. (2014). La biofiltración: una alternativa sustentable para el tratamiento de aguas residuales. *Vid supra, Vision Científica*, 6(2), 56-60. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/695/69510210.pdf>

- Srivastava, NK., & Majumder, CB. (2008). Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 151(1), 1-8. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.101>
- Toapanta, A. (2017). *Análisis Del Bagazo De La Caña De Azúcar Como Filtro En El Tratamiento De Aguas Residuales Provenientes De La Industria De Lácteos “Lácteos Valenzuela Divino Niño” De La Provincia De Cotopaxi, Cantón Saquisilí*. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
- Toapanta, A. (2018). *Análisis de grava como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora y tinturadora de jeans Dayantex, ubicada en el cantón Pelileo, provincia Tungurahua* (tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
- Torres, N., & Gaibor, K. (2015). *Estudio de la aplicación del elote o tusa de maíz para la reducción del color en aguas residuales de la hilandería Guijarro Cantón Guano* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Torres, P., Rodríguez, J., & Uribe, I. (2003). Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. *Scientia et technica*, 3(23).
- Trapote, A. (2016). *Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas* (Segunda ed.). Publicacions Universitat D'Alacant.
- Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. (2017). Anexo I: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua.
- Van der Zee, F., & Villaverde, S. (2005). Combined anaerobic–aerobic treatment of azo dyes—A short review of bioreactor studies. *Water Research*, 39(8), 1425-1450. doi:10.1016/j.watres.2005.03.007

- Van Groenestijn, J., & Hesselink, P. (1993). Biotechniques for air pollution control. *Biodegradation* (4), 283-301. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1007/BF00695975>
- Varila, J., & Díaz, F. (2008). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio. *Revista de Tecnología - Journal of Technology*, 7(2), 1-28. Recuperado de https://www.academia.edu/23072533/Tratamiento_de_aguas_residuales_mediante_lodos_activados_a_escala_laboratorio_Sewage_treatment_by_activated_sludge_at_laboratory_scale
- Vega, M. (2017). El mundo de color gracias a la química. *Encuentro con la química*, 3(1), 62-67.
- Vigueras, J., Villanueva, I., Garzón, M., de Jesús Návar, J., Chaires, I., & Hernández, C. (2013). Performance of a biofilter system with agave fiber filter media for municipal wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 68(3), 599-607. doi: 10.2166/wst.2013.285

ANEXOS

ANEXO N° 1:
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA CÁSCARA DE BANANO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 19 - 175-I
Hoja 01 de 01

Quito, 17 de julio de 2019

SOLICITA: GUISELA SUNTAXI; PAOLA JURADO
Atención: Guisela Suntaxi; Paola Jurado
Dirección: Ladrón De Guevara E11-253 Y Andalucía (Epn)
PROYECTO: EVALUACIÓN DE LA CÁSCARA DE BANANO COMO MATERIAL DE EMPAQUE EN UN SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN PARA TRATAR AGUAS RESIDUALES
CONTRATISTA: ***
FISCALIZADOR: ***
MUESTRA: CÁSCARA DE BANANO
PROCEDENCIA: ***
NORMA: INEN 696

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
3/4"	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.7	272.8	4.3	4.3	95.7
3/8"	9.5	516.3	8.2	12.5	87.5
No. 4	4.750	2543.1	40.3	52.8	47.2
No. 10	2.000	2450.9	38.8	91.6	8.4
No. 18	1.000	353.2	5.6	97.2	2.8
No. 35	0.500	148.0	2.3	99.5	0.5
BANDEJA	-	29.2	0.5	100.0	0.0
TOTAL		6313.5			

Observaciones: Los datos de procedencia son responsabilidad del cliente



ING. MERCEDES VILLACIS
 JEFE DEL LABORATORIO



GR-F-19-004-I

Telf.: 2976300
Ext.: 1609

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 **Email:** lemsur@epn.edu.ec

ANEXO N° 2:
CARACTERIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE BANANO

A2.1 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CÁSCARA DE BANANO

Tabla A2.1 Porcentaje de humedad de la cáscara de banano

CARACTERÍSTICAS	N° DE MUESTRA		
	1	2	3
<i>Peso crisol (gr)</i>	37,9301	31,2429	28,9538
<i>Peso crisol + MF húmedo (gr)</i>	51,6427	45,1972	38,5802
<i>Peso crisol + MF seco (gr)</i>	39,7881	33,1554	30,2452
<i>MF seco (gr)</i>	1,9	1,9	1,3
<i>MF húmedo</i>	13,7	14,0	9,6
<i>Contenido de agua en el MF (gr)</i>	11,9	12,0	8,3
<i>Humedad MF (%)</i>	86,5	86,3	86,6
<i>PROMEDIO (%)</i>	86,4		

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A2.2 Densidad aparente de la cáscara de banano

CARACTERÍSTICAS	Tamaño de partícula de 2,00 mm		Tamaño de partícula de 4,75 mm	
	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>
	<i>Peso de la probeta (gr)</i>	43,3140	43,3951	43,3770
<i>Volumen que ocupa el material filtrante (mL)</i>	10	10	10	10
<i>Peso probeta + material filtrante (gr)</i>	45,9796	46,6886	45,7096	45,5888
<i>Masa del material filtrante (gr)</i>	2,7	3,3	2,3	2,3
<i>Densidad aparente (g/mL)</i>	0,3	0,3	0,2	0,2
<i>PROMEDIO (g/mL)</i>	0,3		0,2	

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A2.3 Porcentaje de porosidad de la cáscara de banano

CARACTERÍSTICAS	Tamaño de partícula de 2,00 mm		Tamaño de partícula de 4,75 mm	
	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>
	<i>Peso del material filtrante acondicionado (gr)</i>	152,8319	152,8274	133,0335
<i>Peso del material filtrante acondicionado saturado (gr)</i>	353,1	351,9	337,2	336,8
<i>Porosidad (%)</i>	56,7	56,6	60,5	60,9
<i>PROMEDIO (%)</i>	56,6		60,7	

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A2.4 Tasa de infiltración de la cáscara de banano

CARACTERÍSTICAS	Tamaño de partícula de 2,00 mm		Tamaño de partícula de 4,75 mm	
	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>
<i>Área de base del tubo PVC (cm²)</i>	95,03	95,03	95,03	95,03
<i>Volumen de fluido infiltrado (mL)</i>	500	500	500	500
<i>Tiempo que demora el fluido en infiltrarse (min)</i>	3,30	3,13	2,52	2,18
<i>Tasa de infiltración (mL/min.cm²)</i>	1,6	1,7	2,1	2,4
<i>PROMEDIO (mL/min.cm²)</i>	1,6		2,3	

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

A2.2 PORCENTAJE DE LIGNINA Y CELULOSA DE LA CÁSCARA DE BANANO

MC-LSAIA-2201-04



INSTITUTO NACIONAL AUTÓNOMO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
 ESTACION EXPERIMENTAL SANTA CATALINA
 DEPARTAMENTO DE NUTRICIÓN Y CALIDAD
 LABORATORIO DE SERVICIO DE ANÁLISIS E INVESTIGACIÓN EN ALIMENTOS
 Panamericana Sur Km. 1, CutugaguaTlfs. 2690691-3007134. Fax 3007134
 Casilla postal 17-01-340



INFORME DE ENSAYO No: 19- 144

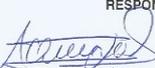
NOMBRE PETICIONARIO: Srtas. Paola Jurado - Guisela Suintaxi
DIRECCION: Chaguarquingo Calle Olmos Pasaje A
FECHA DE EMISION: 03/09/2019
FECHA DE ANALISIS: Del 28 de Agosto al 2 de Septiembre del 2019

INSTITUCION: Escuela Politécnica Nacional
ATENCIÓN: Srtas. Paola Jurado - Guisela Suintaxi
FECHA DE RECEPCION.: 28/08/2019
HORA DE RECEPCION: 12:28:00
ANÁLISIS SOLICITADO: Lignina y Celulosa

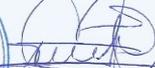
ANÁLISIS	HUMEDAD	F.D.A. ^Ω	LIGNINA. ^Ω	CELULOSA. ^Ω		IDENTIFICACIÓN
METODO	MO-LSAIA-01.01	MO-LSAIA-02.02	MO-LSAIA-02.03			
METODO REF.	U. FLORIDA 1970	U. FLORIDA 1970	U. FLORIDA 1970			
UNIDAD	%	%	%	%		
19-1026	6,43	53,74	28,22	25,52		Cáscara de Banano

Los ensayos marcados con Ω se reportan en base seca.
 OBSERVACIONES: Muestra entregada por el cliente

RESPONSABLES DEL INFORME


 ING. Bladimir Ortíz
 RESPONSABLE DE CALIDAD




 Dr. Iván Samaniego, MSc.
 RESPONSABLE TÉCNICO

Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
 Los resultados arriba indicados solo están relacionados con el objeto de ensayo

NOTA DE DESCARGO: La información contenida en este informe de ensayo es de carácter confidencial, está dirigida únicamente al destinatario de la misma y solo podrá ser usada por este. Si el lector de este correo electrónico o fax no es el destinatario del mismo, se le notifica que cualquier copia o distribución de este se encuentra totalmente prohibido. Si usted ha recibido este informe de ensayo por error, por favor notifique inmediatamente al remitente por este mismo medio y elimine la información.

ANEXO N° 3:
CARACTERIZACIÓN FÍSICO – MECÁNICA DE LOS BIOFILTROS

A3.1 Resultados de las características físico – mecánicas de los biofiltros en la fase inicial

A3.1.1 Porosidad in situ del medio filtrante

Tabla A3.1 Volumen acumulado después de la tercera prueba de vaciado

Tiempo (min)	1P	1G	2P	2G	3P	3G
1	160	250	225	275	242	365
2	144	98	174	180	200	200
4	34	45	93	162	158	100
15	34	42	94	98	124	120
30	53	33	43	44	56	57
60	34	21	38	39	57	70
180	38	31	38	49	75	72
240	12	4	12	14	25	22
360	0,5	13	14	13	27	26
1440	12	2	16	14	12	24
Volumen acumulado (mL)	521,5	539	747	888	976	1056

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.2 Contenido de agua en la muestra inicial para cada tamaño de partícula

TAMAÑO DE PARTÍCULA	2,00 mm	4,75 mm
Peso crisol (gr)	31,7312	28,0262
Peso crisol + MF húmeda (gr)	35,6959	31,0322
Peso crisol + MF seca (gr)	33,5892	29,4295
MF seco (gr)	1,9	1,4
MF húmedo (gr)	4,0	3,0
CONTENIDO DE AGUA EN EL MF (gr)	2,1	1,6
HUMEDAD MF (%)	53,1	53,3

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.3 Peso seco del MF en los biofiltros

BIOFILTROS	1P	2P	3P	1G	2G	3G
Filtro + grava (gr)	377,3	377,9	404,4	382,1	379,3	420,8
Filtro + grava + MF (gr)	1364	1540,8	1676,6	1355	1410,7	1619,7
Peso MF húmedo (gr)	986,7	1162,9	1272,2	972,9	1031,4	1198,9
Peso MF seco empacado en el reactor (gr)	462,4	545,0	596,2	454,2	481,5	559,7

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.4 Contenido de humedad promedio al final de la tercera prueba de vaciado en los biofiltros con tamaño de partícula de 2,00 mm

BIOFILTROS	1P		2P		3P	
	Parte alta	Parte media	Parte alta	Parte media	Parte alta	Parte media
Peso crisol (gr)	36,6466	29,3525	41,5857	34,0023	28,0893	27,1796
Peso crisol + MF húmedo (gr)	41,2821	35,9066	46,5365	41,6717	35,4733	31,9831
Peso crisol + MF seca (gr)	37,7523	30,8003	42,8038	35,7091	29,8658	28,2584
MF seco (gr)	1,1	1,4	1,2	1,7	1,8	1,1
MF húmedo (gr)	4,6	6,6	5,0	7,7	7,4	4,8
Contenido de agua en el MF (gr)	3,5	5,1	3,7	6,0	5,6	3,7
% Humedad MF	76,1	77,9	75,4	77,7	75,9	77,5
PROMEDIO HUMEDAD (%)	77,0		76,6		76,7	

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.5 Contenido de humedad promedio al final de la tercera prueba de vaciado en los biofiltros con tamaño de partícula de 4,75 mm

BIOFILTROS	1G		2G		3G	
	Parte alta	Parte media	Parte alta	Parte media	Parte alta	Parte media
Peso crisol (gr)	37,2556	33,2289	40,3498	31,7330	28,0325	40,1976
Peso crisol + MF húmedo (gr)	44,3718	38,8103	47,6551	37,6005	35,9073	44,2107
Peso crisol + MF seca (gr)	39,2337	34,6167	42,1660	33,1928	29,8321	41,1257
MF seco (gr)	2,0	1,4	1,8	1,5	1,8	0,9
MF húmedo (gr)	7,1	5,6	7,3	5,9	7,9	4,0
Contenido de agua en el MF (gr)	5,1	4,2	5,5	4,4	6,1	3,1
% Humedad MF	72,2	75,1	75,1	75,1	77,1	76,9
PROMEDIO HUMEDAD (%)	73,7		75,1		77,0	

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.6 Contenido de agua retenido en el MF empacado

BIOFILTROS	1P	2P	3P	1G	2G	3G
Humedad inicial del MF (%)	53,1	53,1	53,1	53,3	53,3	53,3
MF seco antes del vaciado (gr)	1,9	1,9	1,9	1,4	1,4	1,4
Contenido de agua en el MF antes de vaciado (gr)	2,1	2,1	2,1	1,6	1,6	1,6
Promedio de humedad después del vaciado (%)	77,0	76,6	76,7	73,7	75,1	77,0
Contenido de agua en el MF después de vaciado (gr)	3,1	3,0	3,0	2,2	2,3	2,3
gr de agua por cada gr de MF seco	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
gr de agua retenido en el MF empacado	760,0	890,4	976,3	716,7	774,9	923,3

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

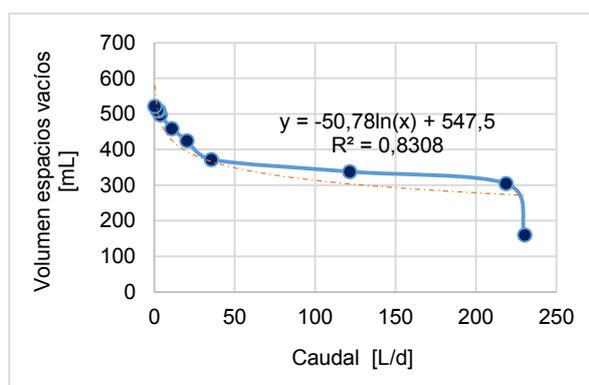
Tabla A3.7 Porcentaje de porosidad en los biofiltros

BIOFILTROS	1P	2P	3P	1G	2G	3G
Volumen acumulado después de la 3era prueba de vaciado [L]	0,5	0,7	1,0	0,5	0,9	1,1
Volumen de agua retenido en el MF [L]	0,8	0,9	1,0	0,7	0,8	0,9
Volumen correspondiente a la porosidad in situ [L]	1,3	1,6	2,0	1,3	1,7	2,0
POROSIDAD (%)	49,3	51,2	52,8	48,3	52,0	52,9

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

A3.1.2 Porcentaje de espacios vacíos en los biofiltros**Tabla A3.8 Caudal de salida para** **Gráfico A3.1 Curva de espacios vacíos****1P****para 1P**

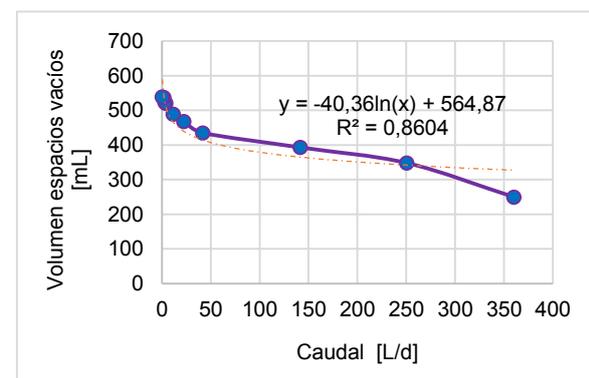
Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	160	160	230,4
2	144	304	218,9
4	34	338	121,7
15	34	372	35,7
30	53	425	20,4
60	34	459	11,0
180	38	497	4,0
240	12	509	3,1
360	0,5	510	2,0
1440	12	522	0,5



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.9 Caudal de salida para**Gráfico A3.2 Curva de espacios****1G****vacíos para 1G**

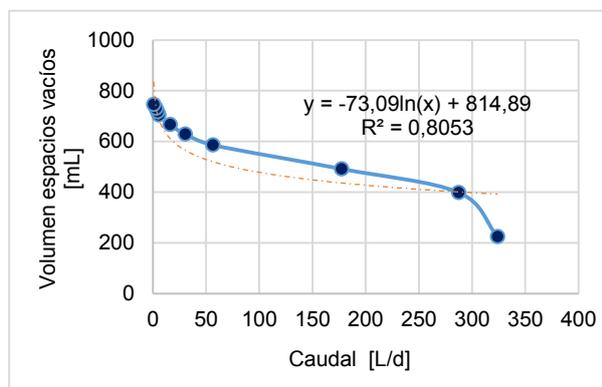
Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	250	250	360,0
2	98	348	250,6
4	45	393	141,5
15	42	435	41,8
30	33	468	22,5
60	21	489	11,7
180	31	520	4,2
240	4	524	3,1
360	13	537	2,1
1440	2	539	0,5



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.10 Caudal de salida para 2P **Gráfico A3.3 Curva de espacios vacíos para 2P**

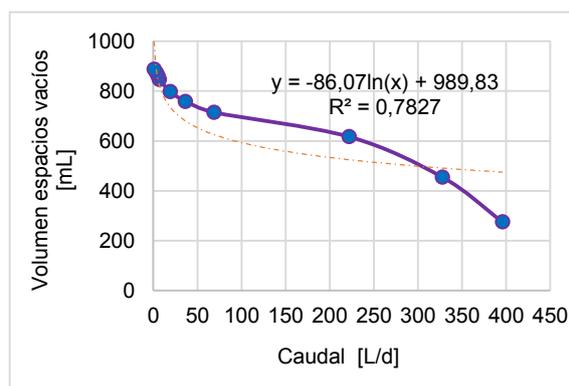
Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	225	225,00	324,0
2	174	399	287,3
4	93	492	177,1
15	94	586	56,3
30	43	629	30,2
60	38	667	16,0
180	38	705	5,6
240	12	717	4,3
360	14	731	2,9
1440	16	747	0,7



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.11 Caudal de salida para el 2G **Gráfico A3.4 Curva de espacios vacíos para 2G**

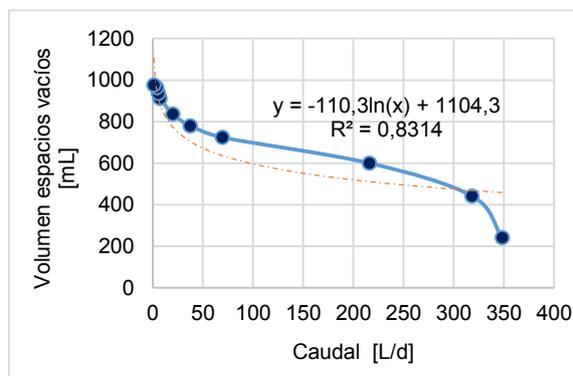
Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	275	275	396,0
2	180	455	327,6
4	162	617	222,1
15	98	715	68,6
30	44	759	36,4
60	39	798	19,2
180	49	847	6,8
240	14	861	5,2
360	13	874	3,5
1440	14	888	0,9



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.12 Caudal de salida para 3P **Gráfico A3.5 Curva de espacios vacíos para 3P**

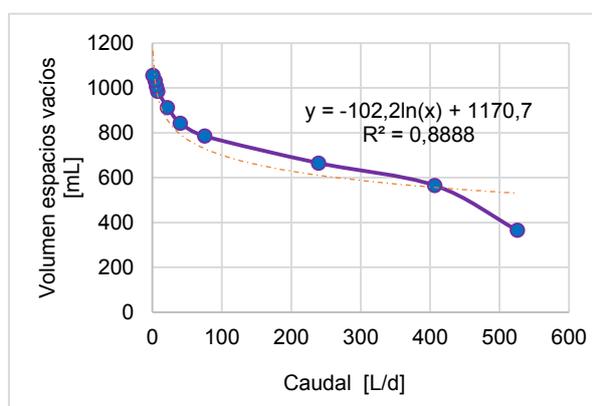
Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	242	242	348,5
2	200	442	318,2
4	158	600	216,0
15	124	724	69,5
30	56	780	37,4
60	57	837	20,1
180	75	912	7,3
240	25	937	5,6
360	27	964	3,9
1440	12	976	1,0



Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.13 Caudal de salida para 3G **Gráfico A3.6 Curva de espacios vacíos para 3G**

Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	365	365	525,6
2	200	565	406,8
4	100	665	239,4
15	120	785	75,4
30	57	842	40,4
60	70	912	21,9
180	72	984	7,9
240	22	1006	6,0
360	26	1032	4,1
1440	24	1056	1,1



Elaborado por: Jurado & Suintaxi, 2019.

A3.1.3 Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) de los biofiltros

Tabla A3.14 Tiempo de retención hidráulica en cada biofiltro empacado con tamaño de partícula de 2,00 mm

Biofiltro	1P	2P	3P
Ecuación de espacios vacíos	$y = -50,78\ln(x) + 547,5$	$y = -73,09\ln(x) + 814,89$	$y = -110,3\ln(x) + 1104,3$
Q [L/día]	2,9	2,9	2,9
Volumen de espacios vacíos [L]	0,5	0,7	1,0
Volumen correspondiente a la porosidad in situ [L]	1,3	1,6	2,0
Volumen real en tratamiento [L]	0,8	0,9	1,0
TRH= Vreal / Q (días)	0,3	0,3	0,3
TRH (horas)	6,6	7,5	8,0

Elaborado por: Jurado & Suintaxi, 2019.

Tabla A3.15 Tiempo de retención hidráulica en cada biofiltro empacado con tamaño de partícula de 4,75 mm

Biofiltro	1G	2G	3G
Ecuación de espacios vacíos	$y = -40,36\ln(x) + 564,87$	$y = -86,07\ln(x) + 989,83$	$y = -102,2\ln(x) + 1170,7$
Q [L/día]	2,9	2,9	2,9
Volumen de espacios vacíos [L]	0,5	0,9	1,1
Volumen correspondiente a la porosidad in situ [L]	1,3	1,7	2,0
Volumen real en tratamiento [L]	0,7	0,8	0,9
TRH= Vreal / Q (días)	0,3	0,3	0,3
TRH (horas)	6,1	6,4	7,6

Elaborado por: Jurado & Suintaxi, 2019.

A3.2 Resultados de las características físico – mecánicas de los biofiltros en la fase modificada

A3.2.1 Porosidad in situ del medio filtrante

Tabla A3.16 Volumen acumulado después de la tercera prueba de vaciado

Tiempo (min)	1P	1G	2P	2G	3P	3G
1	398	450	720	750	978	1080
2	28	30	26	26	32	26
4	34	22	14	18	16	18
15	34	33	20	24	26	32
30	10	10	10	7,1	14	12
60	12	16	10	12	16	13
180	18	16	14	19	18	20
240	5	4	3	4,6	8	6,2
360	8	5	5	7,2	10	9,8
1440	12	9	4	10	10	22
Volumen acumulado (mL)	559	595	826	877,9	1128	1239

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.17 Contenido de agua en la muestra inicial para cada tamaño de partícula

TAMAÑO DE PARTÍCULA	2,00 mm		4,75 mm	
Peso crisol (gr)	37,6294	39,6755	44,9490	42,6432
Peso crisol + MF húmeda (gr)	56,6640	54,6170	59,7472	57,6264
Peso crisol + MF seca (gr)	44,3909	45,2535	49,9087	48,1099
MF seco (gr)	6,8	5,6	5,0	5,5
MF húmedo (gr)	19,0	14,9	14,8	15,0
Contenido de agua en el MF (gr)	12,3	9,4	9,8	9,5
Humedad MF (%)	64,5	62,7	66,5	63,5
PROMEDIO CONTENIDO DE AGUA EN EL MF (gr)	10,8		9,7	
PROMEDIO HUMEDAD MF (%)	63,6		65,0	

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.18 Peso seco del MF en los biofiltros

BIOFILTROS	1P	2P	3P	1G	2G	3G
Filtro + grava (gr)	388,2	389,3	471,2	392,4	399,9	469,3
Filtro + grava + MF (gr)	1766	1959	2196	1708	1850	2108
Peso MF húmedo (gr)	1377,8	1569,7	1724,8	1315,6	1450,1	1638,7
Peso MF seco empacado en el reactor (gr)	500,4	570,1	626,4	460,6	507,7	573,7

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.19 Contenido de humedad promedio al final de la tercera prueba de vaciado en los biofiltros con tamaño de partícula de 2,00 mm

BIOFILTROS	1P		2P		3P	
	Parte alta	Parte media	Parte alta	Parte media	Parte alta	Parte media
Peso crisol (gr)	28,0292	32,9092	38,2770	38,1868	27,1765	26,9802
Peso crisol + MF húmedo (gr)	47,7899	46,9667	53,0220	54,2139	40,3588	43,1354
Peso crisol + MF seca (gr)	33,8903	36,8966	42,6395	42,7083	31,0288	31,5142
MF seco (gr)	5,9	4,0	4,4	4,5	3,9	4,5
MF húmedo (gr)	19,8	14,1	14,7	16,0	13,2	16,2
Contenido de agua en el MF (gr)	13,9	10,1	10,4	11,5	9,3	11,6
% Humedad MF	70,3	71,6	70,4	71,8	70,8	71,9
PROMEDIO HUMEDAD (%)	71,0		71,1		71,4	

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.20 Contenido de humedad promedio al final de la tercera prueba de vaciado en los biofiltros con tamaño de partícula de 4,75 mm

BIOFILTROS	1G		2G		3G	
	Parte alta	Parte media	Parte alta	Parte media	Parte alta	Parte media
Peso crisol (gr)	29,3522	28,0292	28,5330	28,4716	43,5719	37,2538
Peso crisol + MF húmedo (gr)	44,9480	46,5898	43,0981	45,1969	59,1836	52,1895
Peso crisol + MF seca (gr)	33,8693	33,0903	32,5641	33,0758	47,8470	41,3009
MF seco (gr)	4,5	5,1	4,0	4,6	4,3	4,1
MF húmedo (gr)	15,6	18,6	14,6	16,7	15,6	14,9
Contenido de agua en el MF (gr)	11,1	13,5	10,5	12,1	11,3	10,9
% Humedad MF	71,0	72,7	72,3	72,5	72,6	72,9
PROMEDIO HUMEDAD (%)	71,9		72,4		72,8	

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.21 Contenido de agua retenido en el MF empacado

BIOFILTROS	1P	2P	3P	1G	2G	3G
Humedad inicial del MF (%)	63,6	63,6	63,6	65,0	65,0	65,0
MF seco antes del vaciado (gr)	6,2	6,2	6,2	5,2	5,2	5,2
Contenido de agua en el MF antes de vaciado (gr)	10,8	10,8	10,8	9,8	9,8	9,8
Promedio de humedad después del vaciado (%)	71,0	71,1	71,4	71,9	72,4	72,8
Contenido de agua en el MF después de vaciado (gr)	12,1	12,1	12,1	10,9	11,0	11,0
gr de agua por cada gr de MF seco	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1
gr de agua retenido en el MF empacado	979,7	1118,0	1232,9	961,3	1067,2	1212,0

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

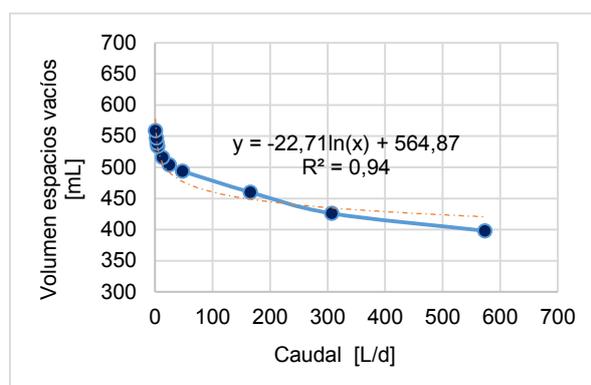
Tabla A3.22 Porcentaje de porosidad en los biofiltros

BIOFILTROS	1P	2P	3P	1G	2G	3G
Volumen acumulado después de la 3era prueba de vaciado [L]	0,6	0,8	1,1	0,6	0,9	1,2
Volumen de agua retenido en el MF [L]	1,0	1,1	1,2	1,0	1,1	1,2
Volumen correspondiente a la porosidad in situ [L]	1,5	1,9	2,4	1,6	1,9	2,5
POROSIDAD (%)	59,2	61,3	63,1	59,9	61,3	65,5

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

A3.2.2 Porcentaje de espacios vacíos en los biofiltros**Tabla A3.23 Caudal de salida para Gráfico A3.7 Curva de espacios vacíos****1P**

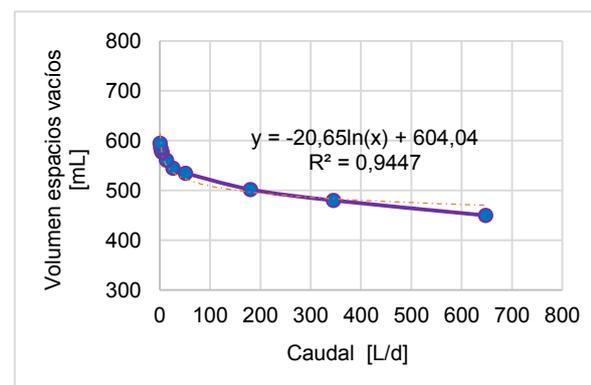
Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	398	398	573,1
2	28	426	306,7
4	34	460	165,6
15	34	494	47,4
30	10	504	24,2
60	12	516	12,4
180	18	534	4,3
240	5	539	3,2
360	8	547	2,3
1440	12	559	0,6

para 1P

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.24 Caudal de salida para Gráfico A3.8 Curva de espacios vacíos**1G**

Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	450	450	648,0
2	30	480	345,6
4	22	502	180,7
15	33	535	51,4
30	10	545	26,2
60	16	561	13,5
180	16	577	4,6
240	4	581	3,5
360	5	586	2,3
1440	9	595	0,6

para 1G

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A3.25 Caudal de salida para 2P

Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	720	720,00	1036,8
2	26	746	537,1
4	14	760	273,6
15	20	780	74,9
30	10	790	37,9
60	10	800	19,2
180	14	814	6,5
240	3	817	4,9
360	5	822	3,3
1440	4	826	0,8

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Gráfico A3.9 Curva de espacios vacíos para 2P

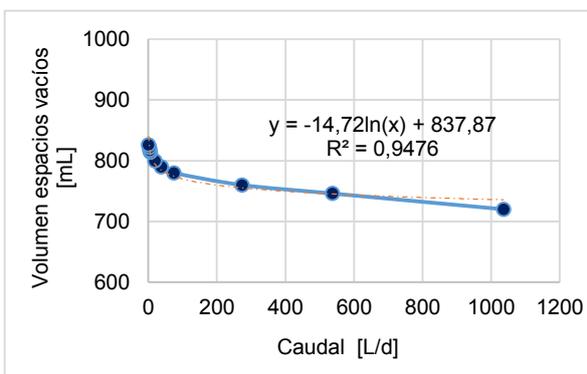


Tabla A3.26 Caudal de salida para 2G

Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	750	750	1080,0
2	26	776	558,7
4	18	794	285,8
15	24	818	78,5
30	7	825	39,6
60	12	837	20,1
180	19	856	6,8
240	5	861	5,2
360	7	868	3,5
1440	10	878	0,9

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Gráfico A3.10 Curva de espacios vacíos para 2G

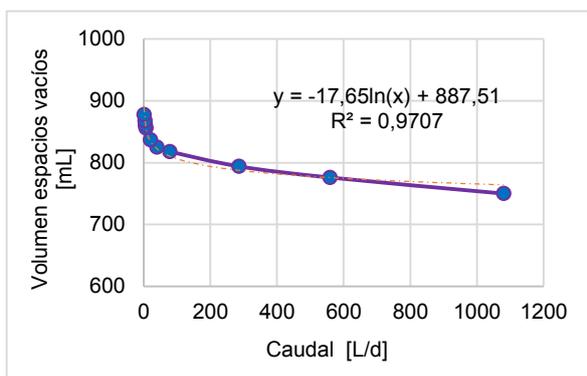


Tabla A3.27 Caudal de salida para 3P

Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	978	978	1408,3
2	32	1010	727,2
4	16	1026	369,4
15	26	1052	101,0
30	14	1066	51,2
60	16	1082	26,0
180	18	1100	8,8
240	8	1108	6,6
360	10	1118	4,5
1440	10	1128	1,1

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Gráfico A3.11 Curva de espacios vacíos para 3P

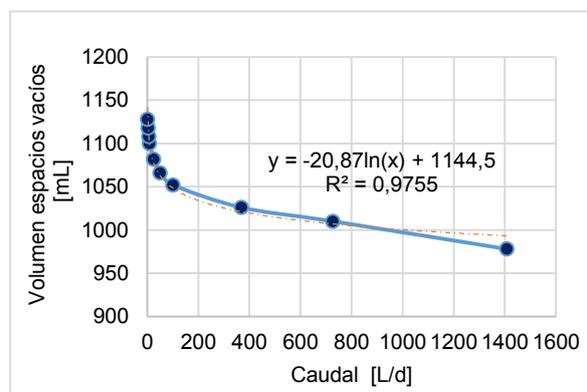
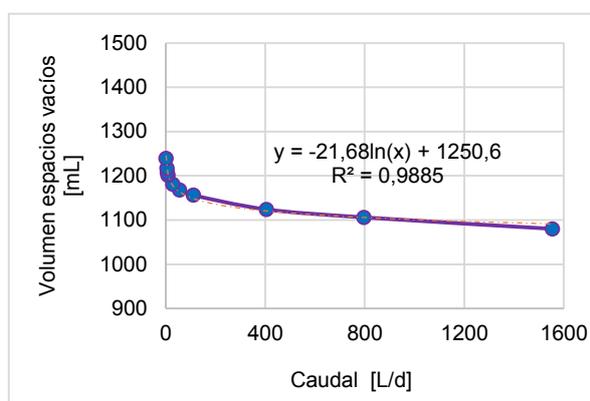


Tabla A3.28 Caudal de salida para 3G

Tiempo [min]	Volumen 3ra prueba de vaciado [mL]	Volumen espacios vacíos [mL]	Caudal [L/d]
1	1080	1080	1555,2
2	26	1106	796,3
4	18	1124	404,6
15	32	1156	111,0
30	12	1168	56,1
60	13	1181	28,3
180	20	1201	9,6
240	6	1207	7,2
360	10	1217	4,9
1440	22	1239	1,2

Gráfico A3.12 Curva de espacios vacíos para 3G



Elaborado por: Jurado & Suintaxi, 2019.

A3.2.3 Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) de los biofiltros

Tabla A3.29 Tiempo de retención hidráulica en cada biofiltro empacado con tamaño de partícula de 2,00 mm

Biofiltro	1P	2P	3P
Ecuación de espacios vacíos	$y = -22,71\ln(x) + 564,87$	$y = -14,72\ln(x) + 837,87$	$y = -20,87\ln(x) + 1144,5$
Q [L/día]	2,9	2,9	2,9
Volumen de espacios vacíos [L]	0,5	0,8	1,1
Volumen correspondiente a la porosidad in situ [L]	1,5	1,9	2,4
Volumen real en tratamiento [L]	1,0	1,1	1,2
TRH= Vreal / Q (días)	0,3	0,4	0,4
TRH (horas)	8,3	9,3	10,3

Elaborado por: Jurado & Suintaxi, 2019.

Tabla A3.30 Tiempo de retención hidráulica en cada biofiltro empacado con tamaño de partícula de 4,75 mm

Biofiltro	1G	2G	3G
Ecuación de espacios vacíos	$y = -20,65\ln(x) + 604,04$	$y = -17,65\ln(x) + 887,51$	$y = -21,68\ln(x) + 1250,6$
Q [L/día]	2,9	2,9	2,9
Volumen de espacios vacíos [L]	0,6	0,9	1,2
Volumen correspondiente a la porosidad in situ [L]	1,6	2,0	2,5
Volumen real en tratamiento [L]	1,0	1,1	1,2
TRH= Vreal / Q (días)	0,3	0,4	0,4
TRH (horas)	8,1	9,0	10,2

Elaborado por: Jurado & Suintaxi, 2019.

ANEXO N° 4:
RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL Y OPERACIÓN DE LOS
BIOFILTROS

Tabla A4.1 Mediciones de pH en el período de experimentación

pH										
Tiempo		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes	
Semanas	Días	T1	1P	1G	T2	2P	2G	T3	3P	3G
1	2	6,0	6,5	6,4	5,9	6,7	6,6	5,8	6,6	6,6
	7	6,4	6,6	-	6,4	6,9	6,5	6,2	6,4	6,7
2	10	6,2	7,2	7,5	6,2	8,0	7,5	6,3	7,1	7,4
	14	7,4	7,3	7,3	7,3	7,2	7,0	7,5	7,3	7,2
3	17	6,0	7,1	7,1	6,1	7,2	7,0	6,1	7,0	7,0
	21	6,6	7,15	6,9	6,6	6,9	6,8	6,7	6,7	7,0
4	24	6,1	7,3	7,1	6,1	6,9	6,8	6,1	6,8	6,6
	28	6,5	7,2	7,1	6,2	7,0	6,9	6,1	6,8	6,7
5	31	6,0	6,6	6,4	5,9	6,3	5,9	5,7	6,0	5,7
	35	5,6	6,0	5,9	5,7	5,8	5,6	5,4	5,9	5,7
6	38	5,8	6,6	6,6	5,8	6,5	5,8	5,9	6,2	5,7
	42	5,7	5,9	6,0	5,5	5,5	5,3	5,3	5,6	5,5
7	45	6,3	-	-	6,0	-	-	6,5	-	-
	49	6,6	6,7	6,9	6,6	6,7	6,3	6,7	6,8	6,6
8	52	6,5	6,1	5,8	6,4	5,6	6,5	6,4	6,0	6,4
	56	7,2	6,7	6,9	7,2	7,0	7,0	7,1	6,7	6,9
9	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	63	5,8	5,1	5,4	5,8	5,4	5,3	5,6	5,1	5,3
10	66	6,8	6,5	6,3	6,8	6,2	6,2	6,7	6,2	6,1
	70	6,6	6,7	6,4	6,6	6,5	6,6	6,6	6,4	6,5
11	73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	7,4	7,3	7,4	7,5	7,6	7,3	7,4	7,5	7,2
13	87	7,9	7,6	7,8	8,0	7,6	7,7	7,8	7,7	7,8
	91	8,1	7,7	7,6	8,1	7,8	7,7	8,0	6,7	7,7
14	94	7,2	6,0	6,1	7,2	6,2	6,2	7,0	6,1	6,1
	98	7,2	6,0	6,2	7,1	6,0	6,1	7,0	6,0	6,2
15	101	6,1	5,3	5,4	6,1	5,4	5,3	6,1	5,5	5,5
	105	6,1	5,6	5,5	6,0	5,4	5,3	6,3	5,4	5,4
16	108	5,7	-	-	6,0	-	-	5,9	-	-
	112	6,0	5,4	5,7	6,0	5,7	5,4	5,9	5,6	6,0
17	115	6,9	6,1	6,1	6,7	6,1	6,1	6,6	6,2	6,2
	119	6,8	6,0	6,3	6,6	6,3	6,2	6,5	6,3	6,1
18	122	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	126	6,8	6,32	6,4	6,7	6,7	6,4	6,6	6,2	6,4

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.



Fase inicial



Fase modificada

Tabla A4.2 Mediciones de temperatura en el período de experimentación

Temperatura (°C)										
Tiempo		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes	
Semanas	Días	T1	1P	1G	T2	2P	2G	T3	3P	3G
1	2	19,4	19,5	19,6	19,3	19,6	19,6	19,4	19,7	19,8
	7	18,8	18,9	-	18,9	19,0	19,1	18,9	19,1	19,2
2	10	24,0	17,4	17,1	24,0	17,5	17,2	24,0	17,1	17,0
	14	24,0	18,0	18,0	23,0	18,0	17,5	24,0	17,5	17,5
3	17	19,0	18,0	17,5	19,0	17,2	17,8	20,0	17,5	18,0
	21	19,0	18,0	17,5	18,9	18,0	18,0	18,8	17,5	18,0
4	24	18,8	17,9	17,7	18,7	17,7	17,7	18,4	17,7	17,9
	28	18,5	17,9	17,8	18,3	17,3	17,5	18,3	17,8	17,8
5	31	18,5	17,8	17,5	18,4	17,4	17,6	18,4	17,8	17,9
	35	18,1	17,7	17,6	18,2	17,5	17,8	18,1	17,4	17,7
6	38	20,0	19,1	19,2	19,9	19,2	19,1	19,8	19,1	19,2
	42	19,4	19,6	19,6	19,4	19,7	19,6	19,3	19,6	19,6
7	45	19,4	-	-	19,3	-	-	19,4	-	-
	49	19,1	18,9	18,6	18,9	18,6	18,4	19,0	18,5	18,6
8	52	19,1	17,3	17,3	19,0	17,2	17,2	19,0	17,2	17,3
	56	18,6	18,2	18,0	18,4	18,0	17,9	18,4	17,9	17,9
9	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	63	18,8	17,6	17,6	18,6	17,7	17,7	18,6	17,7	17,8
10	66	19,5	17,7	17,2	19,2	17,2	17,3	19,3	17,3	17,4
	70	18,3	18,5	18,3	18,2	18,4	18,2	18,2	18,3	18,3
11	73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	16,6	17,8	17,3	16,5	17,3	17,3	16,2	17,3	17,2
13	87	17,6	17,3	17,3	17,4	17,3	17,3	17,5	17,3	17,5
	91	17,0	17,4	17,2	16,6	17,1	17,2	16,8	17,2	17,1
14	94	18,4	17,0	17,0	18,3	17,2	17,2	18,0	17,2	17,4
	98	18,5	17,4	17,3	18,2	17,4	17,3	18,1	17,4	17,3
15	101	18,1	18,2	18,1	18,6	18,0	18,1	18,5	18,2	18,0
	105	18,5	18,3	18,0	18,4	18,0	18,1	18,4	18,1	18,0
16	108	19,6	-	-	19,3	-	-	19,3	-	-
	112	17,6	17,3	17,1	17,4	17,2	17,1	17,2	17,3	17,6
17	115	18,6	17,0	17,0	18,7	17,0	17,0	18,5	17,0	17,0
	119	17,6	16,4	16,3	17,7	16,6	17,3	17,5	17,2	17,5
18	122	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	126	18,3	17,7	17,6	17,9	17,6	17,7	17,9	17,6	17,6

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

 Fase inicial
  Fase modificada

Tabla A4.3 Mediciones de conductividad en el período de experimentación

Conductividad (uS/cm)										
Tiempo		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes	
Semanas	Días	T1	1P	1G	T2	2P	2G	T3	3P	3G
1	2	614	1330	1525	605	1471	1340	679	1380	1230
	7	1654	1264	-	1621	1209	1507	1610	1470	1320
2	10	1055	1539	1718	1109	1517	1677	1224	1437	1707
	14	1416	1286	1428	1416	1213	1412	1416	1315	1410
3	17	1474	1580	1627	1478	1587	1589	1475	1694	1549
	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	24	806	1009	904	803	928	854	796	945	867
	28	787	782	777	787	818	714	785	795	802
5	31	585	671	736	575	661	754	624	738	713
	35	583	659	680	578	644	641	612	672	640
6	38	555	691	596	542	639	634	536	648	633
	42	564	627	572	554	579	586	551	578	584
7	45	658	-	-	656	-	-	670	-	-
	49	658	616	615	648	619	614	669	583	656
8	52	763	632	669	763	649	704	764	659	695
	56	817	661	711	804	695	755	813	710	764
9	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	63	585	634	613	574	614	584	565	589	612
10	66	966	711	736	950	629	617	956	642	605
	70	974	904	938	979	893	891	975	911	855
11	73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	363	330	361	355	360	364	346	359	368
13	87	335	302	326	326	320	323	342	314	301
	91	330	297	325	322	324	320	315	307	293
14	94	660	699	661	659	669	670	669	639	640
	98	667	721	670	663	665	666	671	650	643
15	101	668	700	663	660	684	689	658	671	683
	105	679	705	677	671	694	691	674	679	694
16	108	682	-	-	684	-	-	690	-	-
	112	843	855	817	842	827	833	782	730	763
17	115	794	666	743	793	710	696	791	708	702
	119	798	736	758	800	742	739	810	725	711
18	122	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	126	303	314	322	326	382	343	301	356	336

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.



Fase inicial



Fase modificada

Tabla A4.3 Mediciones de turbiedad en el período de experimentación

Turbiedad (NTU)										
Tiempo		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes	
Semanas	Días	T1	1P	1G	T2	2P	2G	T3	3P	3G
1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	2330	1550	-	2260	1763	1980	2338	1440	1978
2	10	2800	2262	2250	2640	2345	2320	2710	2170	2310
	14	2570	2030	2100	2550	2240	2180	2640	2100	2170
3	17	3200	2675	2825	3100	2706	3000	3075	3155	2925
	21	2590	2380	2340	2560	2110	2430	2590	2202	2430
4	24	1580	1190	1280	1590	1235	1280	1630	1240	1290
	28	1520	1350	1360	1170	1128	1160	1430	1165	1220
5	31	1770	1700	1685	1770	1750	1760	1780	1753	1760
	35	1710	1540	1538	1740	1560	1620	1760	1545	1580
6	38	1810	1430	1610	1780	1560	1540	1810	1590	1650
	42	1690	1590	1660	1650	1569	1560	1700	1620	1620
7	45	733	-	-	750	-	-	741	-	-
	49	717	677	690	679	689	614	708	703	689
8	52	1505	853	787	1468	848	853	1465	893	875
	56	551	535	500	534	548	502	542	587	536
9	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	63	1040	896	901	1030	842	865	1020	918	990
10	66	458	458	450	458	477	417	457	449	645
	70	420	370	300	418	466	313	407	338	302
11	73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	336	210	178	341	227	219	218	276	250
13	87	393	326	306	374	322	330	390	283	322
	91	378	286	275	395	289	279	409	232	264
14	94	239	189	181	241	213	231	240	199	230
	98	243	183	189	249	220	228	248	203	243
15	101	281	262	235	300	249	239	475	165	115
	105	291	268	246	314	227	247	500	173	189
16	108	342	-	-	297	-	-	427	-	-
	112	1480	827	800	1410	826	805	1420	684	764
17	115	288	266	260	268	260	274	295	242	237
	119	246	224	248	237	249	277	246	215	209
18	122	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	126	330	345	316	340	302	351	315	289	284

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.



Fase inicial



Fase modificada

Tabla A4.4 Mediciones de DQO en el período de experimentación

DQO (mg/L)										
Tiempo		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes	
Semanas	Días	T1	1P	1G	T2	2P	2G	T3	3P	3G
1	7	8650	7100	5090	8300	7510	6320	8780	6250	6610
2	14	5325	4225	5475	6025	5200	6575	7225	7800	4825
3	21	7850	6340	6550	7740	6540	6420	8590	6090	6530
4	28	4640	5280	3810	4490	3700	3960	4460	3570	4320
5	35	4880	4280	4650	5010	4540	4670	5430	5070	4670
6	42	5040	4770	4120	5070	4590	4700	4790	4450	4530
7	49	2950	2870	2670	3030	3180	3380	3090	2570	2890
8	56	3530	3150	3370	3470	3420	3660	3630	3220	3460
9	63	4750	4130	3930	4590	4040	4320	4660	4120	4200
10	70	3280	2750	2600	3290	2800	2830	3200	2860	2680
11	77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	85	1160	929	837	1011	828	846	898	818	798
13	91	769	599	595	790	648	636	783	611	599
14	98	2810	2090	2260	2900	2430	2320	2910	2060	2090
15	105	3180	2520	2290	3240	2540	2420	2980	2180	2070
16	112	4380	3850	3660	4170	3540	3390	4390	3410	3300
17	119	4720	3890	3520	4660	3720	3570	4880	3660	3430
18	126	2790	2240	2190	2620	2050	2010	2770	2020	1890

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

 Fase inicial
  Fase modificada

Tabla A4.5 Mediciones de COLOR en el período de experimentación

COLOR (unit Pt-Co)										
Tiempo		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes	
Semanas	Días	T1	1P	1G	T2	2P	2G	T3	3P	3G
1	7	12400	10650	9200	13900	10475	10675	14500	12350	10700
2	14	21050	18250	23300	23150	23800	20050	24600	26250	21450
3	21	32150	24600	27600	32150	27350	27850	32600	25000	26400
4	28	16200	15300	15150	15400	11350	14500	15900	13850	16050
5	35	16700	14750	14900	19400	15100	16450	17800	16350	16150
6	42	12850	14300	14600	13150	14000	13650	13500	14150	15500
7	49	4530	4970	4640	4360	4940	5000	4460	4900	5030
8	56	5850	6000	5750	6500	5900	5950	6200	6350	6550
9	63	8100	8000	7900	8850	7350	7800	8400	8100	7700
10	70	4000	3900	4200	3850	4250	3400	4050	3200	3450
11	77	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A4.5 Mediciones de COLOR en el período de experimentación (continuación)

COLOR (unit Pt-Co)										
Tiempo		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes		Afluente	Efluentes	
Semanas	Días	T1	1P	1G	T2	2P	2G	T3	3P	3G
12	85	3280	2760	2740	3210	2930	2730	3120	2350	2730
13	91	4350	3590	3560	4600	3720	3670	4660	3620	3480
14	98	2230	1900	1720	2400	1900	1980	2440	2000	1920
15	105	2970	2570	2480	2730	2220	2200	2950	2350	2270
16	112	10250	9290	9090	10450	8980	8860	10350	8670	8300
17	119	4060	3390	3540	3960	3250	3230	4040	3310	3180
18	126	3890	3410	3180	4670	3870	3730	3850	3140	3020

Elaborado por: Jurado & Suintaxi, 2019.

Fase inicial
 Fase modificada

Tabla A4.6 Mediciones de pH y temperatura de los filtros blancos en el período de experimentación

Tiempo		pH				Temperatura (°C)			
		Afluente	Efluentes			Afluente	Efluentes		
Semanas	Días	TPP	PP1	PP2	PP3	TPP	PP1	PP2	PP3
1	7	5,7	5,7	5,8	5,7	17,7	17,9	17,3	17,3
2	10	6,5	6,5	6,5	6,5	17,9	17,8	18,0	17,9
	14	6,6	6,6	6,6	6,6	18,3	17,9	18,0	17,9
3	17	-	-	-	-	-	-	-	-
	21	6,1	6,0	6,0	6,0	16,7	17,2	17,2	17,5
4	24	5,8	6,0	6,0	5,8	18,3	17,5	16,9	17,1
	28	5,9	6,0	6,1	6,1	17,4	17,5	18,0	18,3
5	31	-	-	-	-	-	-	-	-
	35	6,2	6,3	6,0	6,2	17,7	17,6	17,6	18,1
6	38	6,1	6,3	6,1	6,4	18,4	18,6	18,4	18,4
	42	6,4	6,4	6,4	6,4	17,0	18,4	18,1	18,3
7	45	6,0	6,2	6,2	6,3	18,0	17,9	17,8	18,0
	49	6,2	6,3	6,3	6,2	18,5	18,7	18,6	18,5
8	52	6,0	6,0	6,5	6,8	18,7	18,5	18,3	18,3
	56	6,7	6,4	6,6	6,3	18,1	18,0	18,1	18,0
9	59	5,9	6,1	6,1	6,1	17,6	17,5	17,6	17,6
	63	6,0	6,1	6,1	6,0	17,4	17,6	17,5	17,5
10	66	6,8	6,9	6,8	6,9	18,3	18,0	18,2	18,0
	70	6,7	6,8	6,3	6,6	18,4	18,0	18,2	18,0

Elaborado por: Jurado & Suintaxi, 2019.

Tabla A4.6 Mediciones de pH y temperatura de los filtros blancos en el período de experimentación (continuación)

Tiempo		pH				Temperatura (°C)			
Semanas	Días	Afluente	Efluentes			Afluente	Efluentes		
		TPP	PP1	PP2	PP3	TPP	PP1	PP2	PP3
11	73	-	-	-	-	-	-	-	-
	77	-	-	-	-	-	-	-	-
12	80	6,1	6,3	6,3	6,4	18,3	18,1	18,0	18,0
	84	6,4	6,2	6,3	6,4	18,8	18,2	18,3	18,3
13	87	6,4	6,3	6,3	6,4	18,8	18,5	18,3	18,4
	91	6,2	6,2	6,2	6,3	18,4	18,6	18,5	18,6
14	94	6,9	7,0	7,2	6,9	19,2	19,3	19,3	19,4
	98	6,7	6,8	6,7	6,6	18,8	18,4	18,7	18,3

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A4.7 Mediciones de conductividad y turbiedad de los filtros blancos en el período de experimentación

Tiempo		Conductividad (uS/cm)				Turbiedad (NTU)			
Semanas	Días	Afluente	Efluentes			Afluente	Efluentes		
		TPP	PP1	PP2	PP3	TPP	PP1	PP2	PP3
1	7	479	489	479	502	602	477	493	433
2	10	643	645	651	692	621	611	637	647
	14	661	651	661	681	644	629	605	659
3	17	-	-	-	-	-	-	-	-
	21	795	792	795	799	959	750	791	823
4	24	818	818	854	836	1003	728	1000	886
	28	823	824	831	855	989	738	752	694
5	31	-	-	-	-	-	-	-	-
	35	309	317	311	387	433	325	376	323
6	38	442	448	461	453	414	489	384	481
	42	475	471	347	470	442	373	424	371
7	45	501	533	529	533	489	507	487	493
	49	515	542	528	543	480	515	437	463
8	52	567	554	584	569	515	450	447	457
	56	542	577	570	574	434	448	416	418
9	59	1025	1040	1048	1044	860	742	711	706
	63	1019	1030	1038	1053	839	852	815	806
10	66	799	726	746	759	833	755	780	795
	70	792	716	756	753	848	761	794	799
11	73	-	-	-	-	-	-	-	-
	77	-	-	-	-	-	-	-	-

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A4.7 Mediciones de conductividad y turbiedad de los filtros blancos en el período de experimentación (continuación)

Tiempo		Conductividad (uS/cm)				Turbiedad (NTU)			
		Afluente	Efluentes			Afluente	Efluentes		
Semanas	Días	TPP	PP1	PP2	PP3	TPP	PP1	PP2	PP3
12	80	621	634	612	608	601	483	471	505
	84	634	630	623	611	628	501	495	487
13	87	843	869	853	891	934	767	725	785
	91	863	895	894	889	957	787	748	774
14	94	646	656	639	635	874	696	718	703
	98	871	912	909	905	898	727	766	785

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.

Tabla A4.8 Mediciones de DQO y COLOR de los filtros blancos en el período de experimentación

Tiempo		DQO (mg/L)				COLOR (unit Pt-Co)			
		Afluente	Efluentes			Afluente	Efluentes		
Semanas	Días	TPP	PP1	PP2	PP3	TPP	PP1	PP2	PP3
1	7	1870	1370	1390	1360	3190	2490	2360	2290
2	14	2880	1930	2020	2040	2360	2540	2620	2520
3	21	990	750	830	740	3770	3000	3750	2950
4	28	4030	3510	3730	3780	5260	4270	4250	4990
5	35	4330	3920	3710	3450	9490	8810	9620	8440
6	42	3850	3800	3600	3450	8600	7750	8050	7250
7	49	5900	4800	4900	4550	6150	6000	5900	5950
8	56	4380	3880	3510	3750	5750	5950	5350	5550
9	63	3900	3200	3300	3650	9100	9050	8900	8450
10	70	1380	1190	1180	1170	7390	6610	6570	6530
11	77	-	-	-	-	-	-	-	-
12	85	1860	1630	1610	1590	6250	5600	5550	5500
13	91	1270	1100	1090	1080	7980	7220	7100	7060
14	98	1030	900	890	880	6900	6200	6100	6070

Elaborado por: Jurado & Suntaxi, 2019.