



Diseño de una planta de tratamientos de aguas miel de Kilamupi café

Wastewater treatment system design for Kilamupi café

Projeto de estação de tratamento de água de mel para café Kilamupi

William Xavier Ibáñez-Moreno ^I

william.ibañez@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6488-1121>

Jessica Paola Arcos-Logroño ^{II}

paola.arcos@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-9462-2219>

Liz de Lourdes Ortiz-Contreras ^{III}

liz.ortiz@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4766-183X>

Bori Javier Ortega-Naranjo ^{IV}

bori.ortega@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4880-648X>

Correspondencia: william.ibañez@esPOCH.edu.ec

Ciencias de la Educación

Artículo de investigación

***Recibido:** 30 de enero de 2021 ***Aceptado:** 15 de febrero de 2021 * **Publicado:** 05 de marzo de 2021

- I. Master Universitario en Química Industrial e Introducción a la Investigación Química, Ingeniero Químico, Docente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, Macas, Ecuador.
- II. Master Universitario en Ciencias Agroambientales y Agroalimentarias, Ingeniera en Biotecnología Ambiental, Docente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, Macas, Ecuador
- III. Estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, Macas, Ecuador.
- IV. Estudiante de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, Macas, Ecuador.

Resumen

Se diseñó una planta de tratamientos de aguas miel para Kilamupi café. El diseño cuenta con un sistema de filtración compuesto por piedra, caliza, grava, arena y carbón activado, se realizaron análisis de laboratorio antes y después de ingresar el agua residual a la planta a escala piloto, para lo que se utilizó muestras compuestas con tres réplicas. En la caracterización inicial se obtuvieron los siguientes resultados, nitrógeno total 199,15 mg/L, fósforo total 11,63 mg/L, pH 3,8, sólidos totales 4086 mg/L, DBO5 5358,66 mg/L, 44 Pt-Co de color real y 1150 mg/L para turbidez. Se logró reducir las concentraciones de cada parámetro después de filtrar el agua residual con un caudal de 0,5 L/s, el nitrógeno total se redujo un 98,61%, el fósforo total alcanzó una reducción de 97,59%, la DBO5 disminuyó en un 97,55 %, los sólidos totales disminuyeron un 98,15%, el color real logró ser inapreciable en una dilución 1/20, el parámetro de pH logró incrementarse hasta 7,58 y el parámetro de turbidez alcanzó un valor de 26,83 NTU, cuyos valores se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa ambiental vigente. Además, mediante estudios realizados se ratificó que los procesos físicos (secundarios) y los materiales del lecho filtrante constituyen una opción viable para la descontaminación de aguas residuales. Finalmente, para la finca Kilamupi café se dimensionó un tanque de filtración con las siguientes medidas: 1,17 m² de área transversal; 0,82 m de alto; 1,08 m de ancho, 1,05 m de longitud y 0,93 m³ de capacidad.

Palabras clave: Aguas miel; PTAR; Remoción de contaminante; Procesos físicos; Diseño.

Abstract

The wastewater treatment plant was designed for Kilamupi café. The design has a filtration system composed of limestone, gravel, sand and activated carbon, the laboratory analysis were carried out before and after the treatment process, using composite samples with three replicas. In the initial characterization the following results were obtained, total nitrogen 199.15 mg / L, total phosphorus 11.63 mg / L, pH 3.8, total solids 4086 mg / L, BOD5 5358.66 mg / L, 44 Pt -Co for true color and 1150 mg / L for turbidity. It was possible to reduce the concentrations of each parameter after filtering the wastewater with a flow rate of 0.5 L / s. Total nitrogen was reduced by 98.61%, total phosphorus reached a reduction of 97.59%, BOD5 decreased by 97.55%, total solids decreased by 98.15%, color became negligible in a 1/20 dilution, pH parameter increased to 7.58 and turbidity parameter reached a value of 26,83 NTU, whose values are within the limits established by current environmental regulations. In addition, through studies carried out, it was confirmed that the physical processes

(secondary) and the materials of the filter bed constitute a viable option for the decontamination of wastewater. Finally, for Kilamupi Café, a filtration tank was dimensioned with the following measurements: 1.17 m² of cross-sectional area; 0.82 m high; 1.08 m wide, 1.05 m long and 0.93 m³ capacity.

Keywords: Honey waters; WWTP; Pollutant removal; Physical processes; Design.

Resumo

Uma estação de tratamento de água com mel foi projetada para o café Kilamupi. O projeto conta com um sistema de filtração composto por pedra, calcário, brita, areia e carvão ativado, as análises laboratoriais foram realizadas antes e após a entrada no efluente da planta em escala piloto, para a qual compôs amostras com três réplicas. Na caracterização inicial foram obtidos os seguintes resultados, nitrogênio total 199,15 mg / L, fósforo total 11,63 mg / L, pH 3,8, sólidos totais 4086 mg / L, BOD₅ 5358,66 mg / L, 44 Pt -Co para cor verdadeira e 1150 mg / L para turbidez. Foi possível reduzir as concentrações de cada parâmetro após filtrar o efluente com uma vazão de 0,5 L / s, o nitrogênio total foi reduzido em 98,61%, o fósforo total atingiu uma redução de 97,59%, o DBO₅ diminuiu em 97,55%, os sólidos totais diminuíram 98,15%, a cor real passou a ser desprezível na diluição 1/20, o parâmetro de pH aumentou para 7,58 e o parâmetro de turbidez atingiu o valor de 26,83 NTU, cujos valores estão dentro dos limites estabelecidos pela regulamentação ambiental vigente. Além disso, por meio de estudos realizados, constatou-se que os processos físicos (secundários) e os materiais do leito filtrante constituem uma opção viável para a descontaminação de águas residuárias. Por fim, para a fazenda do café Kilamupi, um tanque filtrante foi dimensionado com as seguintes medidas: 1,17 m² de área transversal; 0,82 m de altura; 1,08 m de largura, 1,05 m de comprimento e 0,93 m³ de capacidade

Palavras-chave: Honey waters; WWTP; Remoção de poluentes; Processos físicos; Projeto.

Introducción

El cultivo del café se encuentra ampliamente difundido en los países tropicales y subtropicales, en Perú, en el Caserío Barrio Nuevo se realizó un estudio sobre la situación actual de las aguas residuales producto del beneficio del café en donde concluyeron que el 100% de agricultores no realiza tratamiento de las mismas (Huaman 2018, p. 57). Ecuador no es la excepción, mostrando un cuadro crítico por la contaminación ocasionada debido al destino final de las aguas miel sin previo tratamiento (Zuñiga 2005, p. 18).

Kilamupi café es una empresa de la provincia de Morona Santiago, se encuentra ubicada en el Km 8 de la vía Macas-Puyo. Esta empresa se dedica a la siembra, cultivo y tostado de café (Kilamupi 2019, p. 1). Durante este proceso, se generan residuos sólidos y líquidos entre ellos el mucílago, pulpa y aguas miel (Ministerio de Agricultura y Ganadería 2010, p. 12-15) que, al no ser tratadas, se consideran contaminantes para el suelo o recursos hídricos, dependiendo donde sean vertidos (Zuñiga 2005, p. 19). Es por ello que se ha visto necesario realizar el diseño de una Planta de tratamiento de aguas miel, ayudando de esta manera a la empresa a disminuir el impacto ambiental ocasionado, al implementar una gestión sustentable en su proceso productivo.

Para el diseño del sistema de tratamiento de las aguas miel, se pensó no solo en la empresa Kilamupi, si no en los 1.874 productores de café de la provincia de Morona Santiago, (Ministerio de Agricultura y Ganadería 2020, p. 1), que no realizan un manejo adecuado de sus efluente, debido al costo que representa esta actividad. Es por eso, que se ha presentado una alternativa eficaz y de fácil implementación que ayudará a que las aguas miel cumplan con las características necesarias para que pueda ser descargadas en un cuerpo de agua dulce o reutilizadas en el sistema.

Este proyecto técnico estará estructurado de la siguiente manera, en el capítulo I se encuentra el diagnóstico del problema, en el capítulo II se presenta la revisión de la literatura o fundamentos teóricos, en el capítulo III se indica el marco metodológico, en el capítulo IV se plasma los resultados y finalmente se presenta las conclusiones y recomendaciones.

Materiales y métodos

- **Tipo de la Investigación**

La investigación que se utilizó fue de tipo aplicada, mediante el uso de elementos técnicos, experimentales y conceptuales para el diseño de una PTAR, con el fin de mitigar el impacto ambiental producido por los elementos contaminantes de las aguas miel realizando un correcto manejo de las mismas (Cedron & Cribilleros, 2017, p. 17).

- **Diseño de la Investigación**

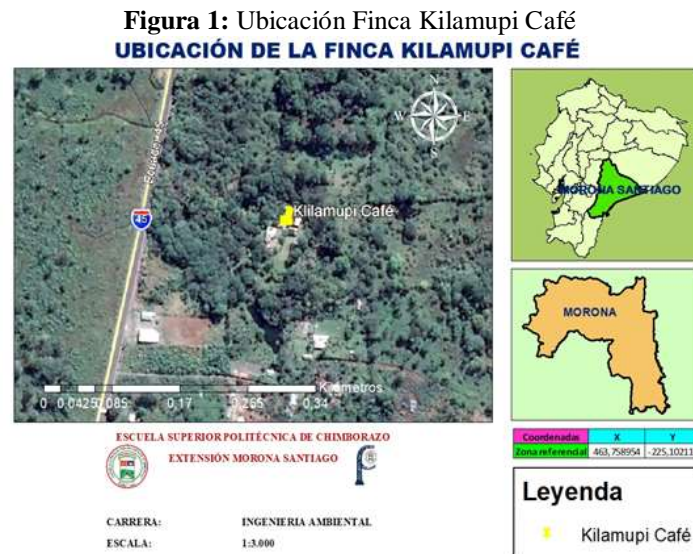
Se realizó el diseño experimental de un solo factor de tratamiento y para su análisis se utilizó el programa SPSS, el cual se basó en el análisis de regresión lineal estudiando la relación entre variables cuantitativas (Pérez 2013, p. 15). El factor, número de tratamientos, variables de respuesta y réplicas se detallan en la Tabla 1-3.

Tabla 1: Factor, niveles y variables para el diseño experimental

Factor de tratamiento	Número de tratamientos	Variable de respuesta	Réplicas
Caudal	3	Nitrógeno total, Fósforo total, pH, DBO ₅ , Sólidos totales, Color y Turbidez	3

- **Tecnológico**

- *Localización del proyecto*



La Finca Kilamupi se encuentra ubicada en la provincia de Morona Santiago, cantón Morona, en el Km. 8 de la vía Macas-Puyo. Con una elevación de 1100 msnm y una temperatura que varía entre 16 - 26 °C, lugar donde se obtuvo la información para crear el diseño del sistema de tratamiento de las aguas miel.

- *Población de estudio y/o tamaño muestra*

En este caso nuestra población de estudio será el total de agua residual generada por Kilamupi café, el muestreo que se utilizó fue compuesto por qué se mezcló muestras individuales tomadas de los tres lavados que son parte del proceso de producción de café en la finca Kilamupi. (Kilamupi 2019, p. 1)

- *Técnicas de recolección de datos*

En la primera etapa se obtuvo información de los procesos productivos de café, mediante una entrevista con el gerente de Kilamupi café, el Sr. José Merino.

La caracterización físico- química de las aguas miel, se realizó mediante la recolección de una muestra compuesta, para posteriormente realizar su respectivo análisis, en el laboratorio de la Planta de tratamientos de agua del Gobierno Municipal del cantón Morona, ubicado en la parroquia San Isidro. Para el análisis de laboratorio se utilizó el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition, 2017, mediante el uso de los métodos especificados en la Tabla 2-3.

Tabla 2: Parámetros para la caracterización Físico - Química de las aguas miel de Finca Kilamupi

PARÁMETRO	MÉTODO	CITA
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Standard Methods 5210-B	(Asociación Americana de Salud Pública et al 2017, p. 575-580)
Solidos Totales	Standard Methods 2540-B	(Asociación Americana de Salud Pública et al. 2017, p. 186-187)
Fosfatos (PO ₄)	Standard Methods 4500-P-D	(Asociación Americana de Salud Pública et al. 2017, p. 524-525)
Turbidez	Standard Methods 2130-B	(Asociación Americana de Salud Pública et al. 2017, p. 131-132)
Nitratos (NO ₃ -)	Standard Methods 4500-NO ₃ -E	(Asociación Americana de Salud Pública et al. 2017, p. 490-491)
Potencial Hidrógeno (pH)	Standard Methods 4500-H+A Standard Methods 4500-H+B	(Asociación Americana de Salud Pública et al. 2017, p. 456-460)
Color	Standard Methods 2120-E	(Asociación Americana de Salud Pública et al. 2017, p. 123-124)

Realizado por: Los autores, 2021

◦ *Análisis Estadístico*

Análisis Descriptivo

Para determinar si es que existen diferencias significativas entre los parámetros de interés y los caudales propuestos se realizó un análisis de varianzas (Anova). Cuando el valor de la probabilidad del estadístico de la prueba Anova es inferior al nivel de significancia ($\alpha < 0,05$), se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_i). (Ferreo y López 2020, p. 1)

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 \dots = \mu_k$$

$$H_i = \mu_1 \neq \mu_2 \dots \neq \mu_k$$

La validez del diseño experimental se realizó al comprobar el supuesto de normalidad de datos, mediante una gráfica de predichos vs residuos. El supuesto de interdependencia de datos se verificó con una gráfica de residuos y finalmente la homocedasticidad de datos se confirmó mediante la prueba estadística de Levene.

Análisis de Contraste

Los valores obtenidos de la caracterización de aguas miel y del agua residual después de pasar por el sistema de filtración, fueron contrastados con los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce, especificado en la Tabla 9, Anexo 1, Libro VI del A.M. 097 A. (Ministerio del Ambiente 2015, p. 16-17), para poder realizar esta comparación se llevó a cabo un ajuste de conversión para los parámetros de Nitratos (NO₃⁻) y Fosfatos (PO₄), tomando como referencia los valores de nitrógeno total y fósforo total respectivamente, las fórmulas de conversión se detallan a continuación en la Tabla 3-3.

Tabla 3: Fórmulas de conversión

Parámetros	Fórmula
Nitratos (NO ₃ ⁻)	$N = NO_3^- / 4,427$
Fosfatos (PO ₄)	$P = PO_4 / 3,06$

Fuente: Hach 2020, p. 1; Hanna Instruments 2020, p. 1

Realizado por: Los autores, 2021

Adicionalmente, los parámetros que cumplieron las condiciones establecidas en el A.M 097-A, se evaluó la eficiencia del sistema de filtración con los caudales propuestos.

Ecuación 1: Fórmula utilizada para determinar la eficiencia

$$E = \frac{Co - Cf}{Co} \times 100$$

Donde:

E: eficiencia

Co: concentración Inicial

Cf: concentración Final

Análisis Explicativo

Se efectuó un análisis explicativo de todo el sistema de tratamiento, el cual detalla medidas, materiales y variables del diseño de la PTAR.

◦ *Ingeniería del proyecto*

Sistema de Filtración

La planta piloto estuvo conformada por un sistema de filtración, compuesto por un filtro elaborado en un tanque de 20 litros de capacidad.

El filtro fue elaborado con los siguientes materiales: piedra caliza, grava, arena y carbón activado. Para determinar el tamaño del material filtrante, el espesor del material y la velocidad de filtración se basó en literatura existente y se detallan en la Tabla 4-3.

Tabla 4: Características de diseño del sistema de filtración

MATERIAL DEL LECHO FILTRANTE	TAMAÑO DEL MATERIAL FILTRANTE Mm	ESPESOR DE LA CAPA Cm	VELOCIDAD DE FILTRACIÓN m/h
Piedra	>50	10	5
Grava	20-4	20-30	3,1
Arena	0,06-0,1	10	3,6
Piedra Caliza	19	5	5-7
Carbón activado	0,83-2,36	12	-

Fuente: Ordóñez y Pesantez 2017, p. 42

Realizado por: Los Autores, 2021

El Caudal Teórico (QT), se determinó con los valores del material del lecho filtrante limitante del sistema (grava), al tener la menor velocidad de filtración se consideró como caudal mínimo (QMin), y con base en este caudal se propuso un caudal medio (QMed) y un caudal máximo (QMax).

Determinación del Caudal Mínimo

Ecuación 2: Fórmula para determinar el caudal mínimo

$$Q_{Min} = V * A_T$$

Donde:

Q_{Min}: caudal (L/s)

V: velocidad (m/s)

A_T: área de tanque (m²)

El cálculo del caudal mínimo se determinó en base al área transversal del tanque de filtración de la planta piloto, con la siguiente fórmula:

Ecuación 3: Fórmula para determinar el área transversal del tanque

$$A_{TD} = \frac{\pi D^2}{4}$$

Donde:

A_{TD}: área transversal del tanque (m²)

D: diámetro del tanque (m)

Mientras que la velocidad de filtración se encuentra detallada en la Tabla 4-3; con esos datos se obtuvo el valor del caudal mínimo, que se muestra en la Tabla 5-3.

Tabla 5: Determinación del caudal mínimo

ETAPA	MATERIAL FILTRANTE DE REFERENCIA	VELOCIDAD DE FILTRACIÓN (M/S)	ÁREA DEL TANQUE (M ²)	CAUDAL MÍNIMO (L/S)
Filtro	Grava	3,1	0,07	0,22

Realizado por: los autores, 2021

Caudales propuestos para el diseño de la PTAR

Los niveles del caudal utilizados en la planta piloto se consideraron tres, los cuales se detallan a continuación en la Tabla 6-3.

Tabla 6: Caudales propuestos

CAUDAL	VALORES	UNIDADES
QMin	0,22	L/s
Qmed	0,5	L/s
QMax	1	L/s

Realizado por: Los autores, 2021

Dimensionamiento de los Tanques de Filtración

Para realizar el dimensionamiento de los Tanques de Filtración se calculó la velocidad de filtración con la siguiente fórmula:

Ecuación 4: Fórmula para determinar la velocidad de filtración

$$w = \frac{Q_D}{A_{TD}}$$

Donde:

w: velocidad de filtración (m/s)

QD: caudal de salida de la planta piloto (m³/s)

ATD: área transversal del tanque de la planta piloto (m²)

Con el valor que se obtuvo anteriormente, se determinó el área del tanque de filtración para la Empresa Kilamupi Café, con la siguiente fórmula:

$$A_T = Q/w$$

Ecuación 5: Fórmula para determinar el área superficial

$$A_T = \frac{Q}{w}$$

Donde:

AT: área superficial (m²)

Q: caudal de funcionamiento (m³/s)

w: velocidad de filtración (m/s)

El tiempo de retención hidráulica se determinó con la fórmula que se detalla a continuación:

Ecuación 6: Fórmula para determinar el tiempo de retención hidráulica

$$TRH = \frac{A_T * H * p}{Q}$$

Donde:

AT: área superficial (m²)

H: altura (m)

p: porosidad del medio granular

Q: caudal de funcionamiento (m³/s)

Posteriormente se calculó el volumen necesario con la fórmula que se presenta a continuación:

Ecuación 7: Fórmula para determinar el volumen del tanque

$$V = Q * TRH$$

Donde:

V: volumen del tanque (m³)

Q: caudal de funcionamiento (m³/s)

TRH: tiempo de retención hidráulica (s)

Además, se calculó la altura del tanque con la siguiente fórmula:

Ecuación 8: Fórmula para determinar la altura

$$H = \frac{V}{A_T}$$

Donde:

H: altura del tanque(m)

V: volumen del tanque (m³)

AT: área superficial (m²)

Para calcular el ancho del tanque de filtración, primero se calculó el coeficiente de costo mínimo con la fórmula que se muestra a continuación

Ecuación 9: Fórmula para determinar el coeficiente de costo mínimo

$$Kc = \frac{2n}{n + 1}$$

Donde:

Kc: coeficiente de costo mínimo

n: número de filtros

Ecuación 10: Fórmula para determinar el ancho del filtro

$$af = \sqrt{\frac{AT}{Kc}}$$

Donde:

af: ancho del filtro (m)

AT: área superficial (m²)

Kc: coeficiente mínimo de costo (adimensional)

Para calcular la longitud del tanque de filtración, se utilizó los valores del volumen, ancho del filtro y la altura, con la fórmula que se muestra a continuación:

Ecuación 11: Fórmula para determinar la longitud del tanque

$$L = \frac{V}{B * H}$$

Donde:

L: longitud del tanque (m)

b: base del tanque (m)

H: altura del tanque(m)

V: volumen del tanque (m³)

◦ *Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria*

Los requerimientos necesarios para la elaboración de este proyecto se dividen en tres aspectos, el primero se especifica en la Tabla 7-3, donde se detalla los equipos que fueron utilizados para la caracterización de cada uno de los parámetros de interés.

Tabla 7: Requerimientos para análisis en laboratorio

CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DEL AGUA	
PARÁMETRO	EQUIPOS
Nitratos	Fotómetro
Fosfatos	Fotómetro
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Bench
Sólidos Totales	Estufa Universal
pH	pH metro
Turbidez	Fotómetro
Color	Fotómetro

Realizado por: Los autores, 2021

En la Tabla 8-3, se especifica los materiales que se utilizaron en la planta piloto de tratamiento de aguas miel.

Tabla 8: Requerimientos para la creación del diseño y análisis de datos

DISEÑO	
USO	MATERIAL
Material de medición	Flexómetro
Tanque de filtración	Tina de 20 L
Material filtrante	Piedra
Material filtrante	Grava
Material filtrante	Piedra caliza
Material filtrante	Carbón activado
Material filtrante	Arena
Diseño Experimental	SPSS

Realizado por: Los autores, 2021

Resultados

Análisis descriptivo

En la Tabla 9-4, se observó que los valores de la probabilidad del estadístico de prueba (Anova) son menores al nivel de significancia (0,05) por lo que se rechazó la hipótesis nula (H₀) y se aceptó la hipótesis alternativa (H₁), es decir que existe diferencias significativas entre nuestros factores (caudal máximo, medio y mínimo) de estudio.

Tabla 9: Análisis de Varianza (ANOVA)

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen	VARIABLES dependientes	Tipo III de suma de cuadrados	Gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Caudal	pH	3,360	2	1,680	744,842	0,000
	Color	222,000	2	111,000		0,000

Turbidez	12617,389	2	5308,694	6488,943	0,000
Fósforo Total corregido	2,872	2	1,436	2754,528	0,000
Sólidos Totales corregidos	383,010	2	191,505	50,392	0,000
Nitrógeno Total	8,63E-06	2	4,32E-06	1201,643	0,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno corregido	1,83E-12	2	9,17E-13	1577,019	0,000

Realizado por: Los autores, 2021

◦ **Verificación de supuestos**

Se verificó el supuesto de normalidad de datos, en donde se visualizó que los datos al seguir la línea de tendencia, mediante una gráfica de predichos vs residuos, están cumpliendo con este primer supuesto. Al mismo tiempo se verificó el supuesto de interdependencia de datos, mediante una gráfica de residuos, en donde se indicó que los datos se encuentran dispersos y al no seguir una tendencia, cumplen con el segundo supuesto.

Finalmente, se analizó el tercer supuesto de homocedasticidad de varianzas mediante la prueba estadística de Levene, en donde se acepta la hipótesis nula al tener valores mayores a 0,05 de significancia, es decir que las varianzas son iguales.

• **Análisis de Contraste**

◦ *Caracterización de las Aguas Miel de Kilamupi Café*

En la Tabla 10-4, se detalla los valores obtenidos para cada parámetro de estudio.

Tabla 10: Caracterización de las aguas miel de Kilamupi Café

PARÁMETRO	EXPRESADO COMO	UNIDAD	VALORES
Nitratos	NO ₃ ⁻	mg/L	881,66
Fosfatos	SO ₄	mg/L	35,59
Potencial de Hidrógeno	pH		3,8
Sólidos totales	ST	mg/L	4 086
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO5	mg/L	5358,66
Color	Color real	Pt-Co	44
Turbidez	NTU	NTU	1150

Realizado por: Los autores, 2021

◦ *Ajuste de conversión*

Una vez realizada la caracterización de las aguas miel, se realizó la conversión de unidades en los parámetros de Nitratos y Fosfatos, transformándolos a nitrógeno total y fósforo total respectivamente,

para comprar los valores obtenidos con los límites máximos permisibles referentes de la Tabla 9, Anexo 1, Libro VI del A.M. 097-A, como se encuentra expresado la Tabla 11-4.

Tabla 11: Ajuste de conversión en la caracterización de las aguas miel

PARÁMETRO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	VALORES
Nitrógeno Total	50	199,15
Fósforo Total	10	11,63
Potencial de Hidrógeno	6 a 9	3,8
Sólidos totales	1 600	4 086
Demanda Bioquímica de Oxígeno	100	5358,66
Color	0	44
Turbidez	-	1150

Realizado por: Los autores, 2021

El agua residual (aguas miel) producto del procesamiento de Kilamupi café, presentó altas concentraciones de nitrógeno total de 199,15 mg/L, valor que se encuentran fuera del rango que establece el límite máximo permisible, para el fósforo total, el valor obtenido sobrepasa los 10 mg/L correspondientes al límite máximo permisible con un valor de 11,63 mg/L, el pH se encuentra fuera del rango de 6-9, con un valor de 3,8. Para los sólidos totales, el valor obtenido fue de 4086 mg/L, es decir, sobrepasa el límite máximo permisible de 1600 mg/L. La Demanda Bioquímica de Oxígeno es la medición de la materia orgánica existente en el agua residual, el resultado de este parámetro fue elevado con respecto al límite máximo permisible, alcanzado los 5358,66 mg/L. La Norma establece que el límite máximo permisible para el color real debe ser inapreciable en dilución 1/20, es decir dar un valor de 0, sin embargo, el valor obtenido fue 44 Pt-Co, encontrándose fuera del límite máximo permisible. Finalmente, la turbidez obtuvo un valor de 1150 mg/L, resultado que se encuentra fuera del límite máximo permisible.

- ***Análisis de la eficiencia del sistema de filtración***

Se evaluó la eficiencia del sistema de filtración con base en las concentraciones de los parámetros de estudios que se obtuvieron tanto en la caracterización de las aguas miel como en la de las aguas filtradas, considerándose estos valores como concentración inicial y final respectivamente.

Para la evaluación del sistema de filtración de la planta piloto, se establecieron tres caudales: caudal máximo (1 L/s), caudal medio (0,5 L/s) y caudal mínimo (0,22 L/s). Para cada parámetro de estudio se realizaron pruebas de laboratorio con el agua tratada, a fin de determinar la eficiencia del proceso.

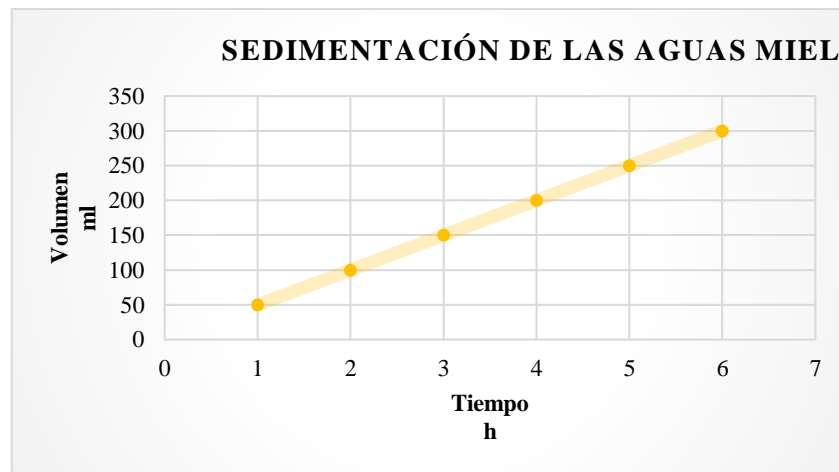
Tabla 12: Comparación de la de los parámetros antes y después del sistema de filtración

PARÁMETROS	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	ANTES DEL TARTAMIENTO	DESPUÉS DEL TRATAMIENTO
Nitrógeno Total (mg/L)	50	199,15	2,78
Fósforo Total (mg/L)	10	11,63	0,28
Potencial de Hidrógeno	6 a 9	3,8	7,58
Sólidos totales (mg/L)	1 600	4 086	100
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	100	5358,66	99
Color (Pt-Co)	0	44	0
Turbidez (NTU)	-	1150	26,83

Realizado por: Los autores, 2021

Después del tratamiento de las aguas residuales para un caudal de 0,5 L/s se obtuvieron los siguientes resultados 2,78 mg/L para el nitrógeno total, 0,28 mg/L para el fósforo total, 7,58 para el pH, 100 mg/L para los sólidos totales, 99 mg/L para la DBO5, 0 Pt-Co para el color real, y 26,83 NTU, para la turbidez, encontrándose todos los parámetros dentro de los límites máximos permisibles.

Gráfico 1: Tiempo de sedimentación con respecto al volumen sedimentado



Realizado por: Los autores, 2021

En el gráfico 1-4 se representa la curva de sedimentación de las aguas miel, para lo cual se utilizó 1 litro de agua residual en una probeta de 1000 ml, obteniendo así los siguientes resultados: en 1 hora de monitoreo se sedimentó 50 ml de aguas miel, a las 2 horas sedimentó 100 ml, a las 3 horas sedimentó 150 ml, a las 4 horas sedimentó 200 ml, a las 5 horas sedimentó 250 ml, alcanzando su sedimentación máxima a las 6 horas con un total de 300 ml de aguas miel.

Tabla 13: Eficiencia de los parámetros del agua después del tratamiento.

EFICIENCIA %	
PARÁMETROS	VALOR
Nitrógeno Total	98,61
Fósforo Total	97,59
Potencial de Hidrógeno	99,47
Sólidos totales	97,55
Demanda Bioquímica de Oxígeno	98,15
Color	100
Turbidez	97,67

Realizado por: Ortiz & Ortega, 2021

En la Tabla 13-4, se puede visualizar la eficiencia que se obtuvo para cada uno de los parámetros de estudio después de pasar por el sistema de filtración a escala piloto.

- **Ingeniería del proyecto**

- *Sistema de Filtración*

- *Dimensionamiento del tanque de filtración*

Para dimensionar los tanques de filtración se realizó un diseño experimental, con el objetivo de determinar cuál es el caudal óptimo para diseñar la PTAR, garantizando el soporte técnico del filtro.

Cálculos del dimensionamiento para los tanques de filtración

Velocidad de Filtración

$$w = \frac{Q}{A_{TD}}$$

Donde:

w: velocidad de filtración (m/s)

Q: caudal salida de la planta piloto (caudal medio)

A_{TD}: área transversal del tanque de la planta piloto (m²)

Ecuación 12: Cálculo de la velocidad de filtración

$$w = \frac{8,33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{0,07 \text{ m}^2}$$

$$w = 1,14 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Área superficial del tanque de filtración para la empresa Kilamupi café

$$A_T = \frac{Q}{w}$$

Donde:

A_T: área transversal tanque (m²)

Q: caudal de funcionamiento (m³/s)

w; velocidad de filtración (m/s)

Ecuación 13: Cálculo del área transversal del tanque

$$A_T = \frac{0,00013 \text{ m}^3/\text{s}}{1,14 \times 10^{-4} \text{ m/s}}$$

Tiempo de retención hidráulica

$$TRH = \frac{A_T * H * p}{Q_D}$$

Donde:

A_T: área superficial del tanque (m²)

H: altura (m)

p: porosidad del medio granular

Q: caudal de salida de la planta piloto (m³/s)

Ecuación 14: Cálculo del tiempo de retención hidráulica

$$TRH = \frac{1,17 \text{ m}^2 * 0,82 \text{ m} * 0,0625}{8,33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$TRH = 7200 \text{ s}$$

Volumen

$$V = Q * TRH$$

Donde:

V: volumen (m³)

Q: caudal de funcionamiento (m³/s)

TRH: tiempo de retención hidráulica (s)

Ecuación 15: Cálculo del volumen del tanque

$$V = 0,00013 \text{ m}^3/\text{s} * 7200 \text{ s}$$

$$V = 0,93 \text{ m}^3$$

Altura

$$H = \frac{V}{A_T}$$

Donde:

H: altura (m)

V: volumen (m³)

A_T: área superficial del tanque (m²)

Ecuación 16: Cálculo de la altura del tanque

$$H = \frac{0,96m^3}{1,17m^2}$$

$$H = 0,82 \text{ m}$$

Coefficiente de costo mínimo

$$Kc = \frac{2n}{n + 1}$$

Donde:

Kc: coeficiente de costo mínimo

n: número de filtros

Ecuación 17: Cálculo del coeficiente de costo mínimo

$$Kc = \frac{2(1)}{1 + 1}$$

$$Kc = 1$$

Ancho

$$af = \sqrt{\frac{A_T}{Kc}}$$

Donde:

af: ancho del filtro (m)

A_T: área superficial del tanque (m²)

Kc: coeficiente mínimo de costo (adimensional)

Ecuación 18: Cálculo del ancho del filtro

$$af = \sqrt{\frac{1,17 \text{ m}^2}{1}}$$

$$af = 1,08 \text{ m}$$

Longitud

$$L = \frac{V}{B * L}$$

Donde:

L: longitud del tanque (m)

b: base del tanque (m)

H: altura del tanque(m)

V: volumen del tanque (m³)

Ecuación 19: Cálculo de la longitud del tanque

$$L = \frac{0,93m^3}{0,82m * 1,08m}$$

$$L = 1,05m$$

Tabla 14: Resultados para el dimensionamiento de la planta de tratamientos de aguas miel en Kilamupi Café

Cálculo	Símbolo	Valor	Unidades
Velocidad de filtración	W	1,14x10 ⁻⁴	m/s
Área transversal	A _T	1,17	m ²
Volumen	V	0,93	m ³
Tiempo de retención Hidráulica	TRH	7200	S
Altura	H	0,82	M
Coefficiente de costo mínimo	Kc	1	Adimensional
Ancho	Af	1,08	m
Diámetro de la tubería	D	0,02	m
Espesor del lecho	-	0,57	m
Filtrante	L	1,05	m
Longitud del tanque			

Realizado por: Los autores, 2021

Discusión

Una vez establecida la línea base de las aguas miel de la finca Kilamupi, se cuantificaron los parámetros: de potencial de hidrógeno (pH) 3,8 siendo distinto al pH que deben tener las aguas naturales para mantener la vida acuática, que se encuentra en un rango de 6 a 9 (Fernández 2012, p. 13), los parámetros de nitrógeno total y fósforo total presentan concentraciones elevadas en este residuo, con valores de 199,15 mg/L y 11,63 mg/L respectivamente, que se encuentran fuera de los límites permisibles que establece la normativa. Fernández (2012, p. 18) indica que los aportes excesivos de estos dos parámetros pueden ocasionar fenómenos de eutrofización, en cuerpos de aguas dulce.

Inicialmente se consideró un tanque de sedimentación como tratamiento primario para la remoción de partículas más pesadas por acción de la fuerza de gravedad (Vallejos, et al. 2008, p. 3). Sin embargo, en la fase experimental se evidenció que la velocidad de sedimentación de las aguas miel es baja debido

al tamaño de sus partículas, pues para un litro de agua residual, se sedimentó únicamente 300 ml en un periodo de 6 horas. Además, utilizando únicamente el sistema de filtración los parámetros cumplen con los objetivos propuestos, encontrándose dentro de los límites máximos permisibles; con un caudal de 0,5 L/s se obtuvieron valores de 2,78 mg/L para nitrógeno total, 0,28mg/L para fósforo total, 7,58 para pH, 100 mg/L para sólidos totales, 99 mg/L para la DBO5, 0 unidades de color Pt-Co para el color real y 26,83 NTU para la turbidez.

De acuerdo a investigaciones realizadas en Colombia, en la finca “Los Arrayanes”, con la aplicación de un humedal artificial de flujo vertical para el tratamiento de las aguas residuales de la producción cafetera, los resultados fueron 13,5 mg/L para el nitrógeno, 10,5 mg/L para el fósforo, y para el pH, el afluente subió de 3,69 a 6,52 (Ortíz y Montes 2018, p. 38, 53). Comparando los valores obtenidos por el humedal artificial de flujo vertical y el sistema de filtración utilizado en la presente investigación, el cual está compuesto por piedra caliza, grava, arena y carbón activado, se obtienen mejores resultados para el tratamiento de aguas residuales provenientes del café. Ratificando que los procesos físicos (secundarios) para la descontaminación de aguas residuales constituyen una opción viable.

Según Fernández (2019, p. 70) en su investigación para el tratamiento de aguas negras utilizando un biofiltro de bagazo de caña, piedra caliza, carbón activado, grava, arena y piedra pómez, logró reducir la DBO5 de 175,7 mg/L a 132 mg/L, los sólidos totales de 254 mg/L a 201 mg/L y la turbidez de 52 NTU a 26 NTU. A través de estos estudios se evidencia la efectividad que tienen los materiales filtrantes utilizados en la presente investigación para el tratamiento de aguas residuales con contaminantes orgánicos.

Conclusiones

Se realizó el diseño de la planta de tratamientos de aguas miel para Kilamupi café, para mitigar las afecciones ambientales y cumplir con los límites máximos permisibles como lo establece la Normativa Ambiental Vigente.

Se realizó la caracterización físico-química de las aguas miel procedentes del lavado de café, considerando los parámetros de nitrógeno total, fósforo total, potencial de hidrógeno, sólidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, color y turbidez, obteniendo valores de 199,15 mg/L; 11,63mg/L; 3,8; 4086 mg/L; 5358,66 mg/L y 44 Pt-Co y 1150 NTU respectivamente, por lo cual éstas aguas evidencia un alta carga contaminante y no pueden ser descargadas sin previo tratamiento a un cuerpo de agua dulce.

Se realizó la caracterización físico-química de las aguas miel pos-tratamiento. Las pruebas que se realizaron en la planta piloto con caudal de 0,5 L/s (caudal óptimo de tratamiento) obteniéndose valores que cumplen con la normativa ambiental vigente; 2,78 mg/L de nitrógeno total, 0,28 mg/L para el fósforo total, pH 7,58, 100 mg/L de sólidos totales, 99 mg/L de DBO5 y para el color 0 Pt-Co, evidenciando el funcionamiento adecuado.

Se determinaron las variables de diseño para el sistema de filtración de la PTAR considerándose la velocidad de filtración de $1,14 \times 10^{-4}$ m/s y el caudal de operación de 0,00013 m³/s. Determinando que Kilamupi café para realizar un correcto manejo de sus desechos líquidos (aguas miel) necesita un tanque con un área transversal de 1,17 m², que tenga una altura mínima de 0,82 m y de ancho 1,08 m, con un volumen de 0,93 m³ y una longitud de 1,05 m.

Referencias

1. ÁLVAREZ, J., HUGH, S., CUBA, N. y LOZA, M., 2011. Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales del beneficiado de café (Coffea arabica) implementado en la comunidad Carmen Pampa provincia Nor Yungas del Departamento de La Paz. Selva Andina Research Society, pp. 34-42. ISSN 2072-9294.
2. BOLAÑOS, J., CORDERO, G. y SEGURA, G., 2017. Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). Revista Tecnología en Marcha [en línea], vol. 30, no. 4, pp. 15. ISSN 0379-3982. DOI 10.18845/tm.v30i4.3408. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v30n4/0379-3982-tem-30-04-15.pdf>.
3. CEDRON, O. y CRIBILLEROS, A., 2017. «Diagnostico del sistema de aguas residuales en salaverry y propuesta de solución» [en línea]. S.l.: Universidad Privada Antenor Orrego. Disponible en: http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/upaorep/3561/1/REP_ING.CIVIL_OLGA.CEDRÓN_ANA.CRIBILLEROS_DIAGNÓSTICO.SISTEMA.AGUAS.RESIDUALES.SALAVERRY.PROPU. ESTA.SOLUCIÓN.pdf.
4. CORTÉS, Y., RODRÍGUEZ, K. y VARGAS, L., 2020. Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. Produccion y Limpia [en línea], vol. 15, no. 1, pp. 93-110. ISSN 23230703. DOI 10.22507/PML.V15N1A7. Disponible en: <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/2333/210210509>.

5. FERNÁNDEZ, A., 2012. El agua: un recurso esencial. Química Viva [en línea], vol. 11, no. 3, pp. 147-170. ISSN 1666-7948. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>.
6. FERNÁNDEZ, C. y VÁZQUEZ, Y., 2006. Origen de los nitratos (NO₃) y nitritos (NO₂) y su influencia de la potabilidad de las aguas subterráneas. Minería y Geología [en línea], vol. 2, no. 3, pp. 10. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223517652002.pdf>.
7. FERNÁNDEZ, V., 2019. Diseño y construcción de un sanitario ecológico a través de un biofiltro de bagazo de caña para aguas negras en la finca ovina San Pablo de la parroquia rural Facundo Vela [en línea]. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/11136/1/236T0438.pdf>.
8. FERREO, R. y LÓPEZ, J., 2020. Qué es el anova. Máxima Formación [en línea]. [Consulta: 27 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.maximaformacion.es/blog-dat/que-es-el-anova-de-una-via/>.
9. GALINDO, X., 2011. Producción e industrialización de café soluble: Solubles instantaneos [en línea]. S.l.: Universidad de Guayaquil. Disponible en: <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/01/Galindo-Veliz-Xiomara-Raiza.pdf>.
10. HACH, 2020. Cuál es el factor de conversión de NO₃-N a NO₃. [en línea]. [Consulta: 1 febrero 2021]. Disponible en: [https://essupport.hach.com/app/answers/answer_view/a_id/1026609/~/%E2%BFcu%E3%A11-es-el-factor-de-conversi%E3%B3n-de-de-no3-n-a-no3%3F-#:~:text=Para convertir unidades de Nitrógeno,dividir por el valor de 4.427](https://essupport.hach.com/app/answers/answer_view/a_id/1026609/~/%E2%BFcu%E3%A11-es-el-factor-de-conversi%E3%B3n-de-de-no3-n-a-no3%3F-#:~:text=Para%20convertir%20unidades%20de%20Nitr%C3%B3geno,dividir%20por%20el%20valor%20de%204.427).
11. HANNA INSTRUMENTS, 2020. Fósforo: comprender los diferentes tipos de fósforo métodos utilizados para medirlo. HANNA Instruments [en línea]. [Consulta: 1 febrero 2021]. Disponible en: [https://www.hannainst.es/blog/1504/Fósforo--Comprender-los-diferentes-tipos-de-f](https://www.hannainst.es/blog/1504/F%C3%B3sforo--Comprender-los-diferentes-tipos-de-f).
12. HUAMAN, D., 2018. Situación actual de las aguas residuales producto del beneficio del café (coffea arabica L.) sobre el medio ambiente en el Caserio barrio Nuevo, provincia de San Ignacio - Cajamarca [en línea]. S.l.: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Disponible en: http://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/UNPRG/8729/Huaman_Garcia_Diana_Marily.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
13. INEN, 2013. Agua. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas de muestreo. INEN [en línea]. Quito: Disponible en: <https://bit.ly/2C5dMyv>.
14. KILAMUPI, 2019. Kulamupi café. [en línea]. [Consulta: 13 noviembre 2020]. Disponible en: https://merino-bleumink.com/nuestro_proceso/.

15. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA, 2010. Manual de buenas prácticas de manufactura en el beneficio Bio café oro de Tarrazú S.A. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00205.pdf>.
16. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA, 2020. Morona Santiago tiene 1.799 hectáreas de cultivos de café y cacao. Ministerio de Agricultura y Ganadería [en línea]. [Consulta: 21 octubre 2020]. Disponible en: <https://www.agricultura.gob.ec/morona-santiago-comercializa-mas-de-440-quintales-de-cafe-de-calidad/>.
17. MINISTERIO DEL AMBIENTE, 2015. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes [en línea]. 2015. Ecuador: s.n. 387. Disponible en: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155128.pdf>.
18. ORTÍZ, N. y MONTES, C., 2018. Diseño preliminar de un sistema de tratamiento de aguas residuales de bajo impacto ambiental para una finca cafetera en el municipio de el Pital-Huila [en línea]. S.l.: Universidad Militar Nueva Granada. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/18018/MontesCamposCristian-OrtizSalazarNestor2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
19. PÉREZ, E., 2013. Análisis estadístico multivariante de un conjunto de datos biológicos experimentales. [en línea]. Granada: Disponible en: <http://masteres.ugr.es/moea/pages/curso201314/tfm1314/tfm-septiembre1314/memoriasterevaristoperezrial/>!
20. VALLEJOS, G., J. O. y PÉREZ, M., 2008. Estudio de la dinámica de sedimentación de lodos mediante un sistema óptico. Ingeniería [en línea], vol. 12, no. 2, pp. 17-29. ISSN 1665-529X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46712202.pdf>.