

Tratamiento biológico de aguamieles del café y su reúso para fertirriego en pasto *King grass* (*Pennisetum Purpureum x Pennisetum Typhoide*)¹

Luisa Fernanda Trujillo Rodríguez², Walter Murillo Arango³

Resumen

Introducción: las aguamieles generadas en el proceso de beneficio húmedo del café se convierten en uno de los subproductos más contaminantes de fuentes hídricas y del suelo debido a su alta carga orgánica representada en nutrientes como lípidos, enzimas, proteínas, azúcares, entre otros. **Objetivo:** evaluar la eficiencia de los procesos biológicos encaminados a la reducción de la DQO y la DBO en un sistema artesanal para el tratamiento de aguamieles del café y su potencial uso al final del proceso. **Materiales y métodos:** se construyó un sistema artesanal para el tratamiento biológico de las aguamieles del café compuesto por dos biofiltros inoculados con microorganismos

eficientes y una laguna verde que incluye el uso de plantas acuáticas como *Azolla filiculoides* y *Pistia stratiotes*, la eficiencia del proceso se midió a través del análisis de las variables pH, sólidos suspendidos totales, turbidez, DBO y DQO. **Resultados:** se obtuvieron remociones de hasta el 93,4 % para la DBO y del 94,24 % para la DQO, cumpliendo de esta forma con los lineamientos del artículo 9 de la Resolución 631 de 2015, en cuanto a vertimiento de aguamieles. Posteriormente, las aguamieles tratadas se utilizaron para fertirregar parcelas de pasto *King grass* de un año de siembra, y se comparó frente a parcelas sin tratamiento. Se observó alta producción de biomasa en las parcelas fertirregadas, la composición nutricional del

1 Artículo original derivado del proyecto de tesis *Tratamiento biológico de aguamieles del café y su reúso para fertirriego en pasto King grass (Pennisetum Purpureum x Pennisetum Typhoide)*, desarrollado entre marzo de 2021 y marzo de 2023. Financiado por los autores y la Universidad de Manizales.

2 Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales. Agrónomo de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Correo: luisa.trujillorodriguez@gmail.com. wmurillo@umanizales.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-4301-0149>.

3 Ph. D. y MSc. en Ciencias Químicas. Licenciado en Biología y Química. Docente investigador del Centro de Investigación en Medio Ambiente y Desarrollo (CIMAD), Universidad de Manizales, docente de la Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Universidad del Tolima. Correo: wmurillo@umanizales.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1482-070X>.

Autor para Correspondencia: wmurillo@umanizales.edu.co / luisa.trujillorodriguez@gmail.com

Recibido: 04/04/2023 Aceptado: 10/11/2023

*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

pasto y esto sin afectar las características del suelo. Se analizaron muestras de suelos de las parcelas con y sin fertirriego, encontrándose incremento de nutrientes en las parcelas tratadas y como resultado anexo se obtuvo aumento en la producción de biomasa hasta en un 223 %. **Conclusión:** el sistema artesanal de tratamiento mostró

altos porcentajes de remoción de carga orgánica de las aguamieles, habilitando su reúso para fertirriego de pasto *King grass* con altos rendimientos de biomasa.

Palabras clave: aguas residuales del café; bioinsumo; fertirriego en cultivos de pasto; remoción de carga contaminante.

Biological Treatment of Coffee Honey Water and Its Reuse for Fertigation in King Grass (*Pennisetum Purpureum* x *Pennisetum Typhoide*)

Abstract

Introduction: The honey water generated in the wet coffee processing becomes one of the most contaminating byproducts of water sources and soil due to their high organic load, characterized by nutrients such as lipids, enzymes, proteins, sugars, among others. **Objective:** to evaluate the efficiency of biological processes aimed at reducing COD and BOD in an artisanal system for the treatment of coffee water and its potential use at the end of the process. **Materials and methods:** an artisanal system for the biological treatment of coffee wastewater was built, consisting of two biofilters inoculated with efficient microorganisms and a green lagoon that includes the use of aquatic plants such as *Azolla filiculoides* and *Pistia stratiotes*, the efficiency of the process was measured

through the analysis of the variables; pH, total suspended solids, turbidity, BOD and COD, Results: Removal efficiencies of up to 93.4 % for BOD and 94.24 % for COD were achieved, thereby ensuring compliance with the guidelines outlined in Article 9 of Resolution 631 of 2015 concerning the discharge of spent water. Subsequently, the treated spent waters were employed for fertigation, serving as irrigation for one-year-old King grass plots. A comparison was made with untreated plots. The fertigated plots exhibited a high biomass production (223 %) and maintained the nutritional composition of the grass without impacting soil characteristics. **Conclusion:** The artisanal treatment system showed high percentages of removal of organic load from the coffee wastewater, enabling its reuse for King grass fertigation with high biomass yields.

Keywords: coffee wastewater; bio-input; fertigation in grass crops; removal of pollutant load.

Tratamiento biológico da água mel de café e sua reutilização para fertirrigação no capim King Grass (*Pennisetum Purpureum* x *Pennisetum Typhoide*)

Resumo

Introdução: As águas doces geradas no processo de beneficiamento úmido do café se tornam um dos subprodutos mais poluentes das fontes de água e do solo, devido à sua alta carga orgânica, representada por nutrientes como lipídios, enzimas, proteínas, açúcares, entre outros. **Objetivo:** avaliar a eficiência de processos biológicos voltados à redução de DQO e DBO em sistema artesanal de tratamento de água de café e seu potencial de aproveitamento ao final do processo. **Materiais e métodos:** foi construído um sistema artesanal para tratamento biológico de águas de mel de café, composto por dois biofiltros inoculados com microorganismos eficientes e uma lagoa verde que inclui o uso de plantas aquáticas como *Azolla filiculoides* e *Pistia stratiotes*, a eficiência do processo foi medido através da análise das variáveis;

pH, sólidos totais em suspensão, turbidez, DBO e DQO, Resultados: Foram alcançadas eficiências de remoção de até 93,4 % para DBO e 94,24 % para DQO, garantindo assim a conformidade com as diretrizes estabelecidas no Artigo 9 da Resolução 631 de 2015 referente ao descarte de águas residuais. Posteriormente, as águas residuais tratadas foram utilizadas para fertirrigação, servindo como irrigação para parcelas de capim King de um ano de idade. Foi feita uma comparação com parcelas não tratadas. As parcelas fertirrigadas apresentaram uma alta produção de biomassa (223 %) e mantiveram a composição nutricional do capim sem afetar as características do solo. **Conclusões:** O sistema de tratamento artesanal apresentou altas porcentagens de remoção de carga orgânica das águas melíferas, possibilitando seu reaproveitamento para fertirrigação com capim-rei com alto rendimento de biomassa.

Palavras-chave: efluente do café; bioinsumo; fertirrigação em pastagens; remoção de carga poluente.

Introducción

En Colombia la producción de café se ha incrementado en los últimos años, especialmente en los departamentos de Cauca Huila y Nariño, ello ha dado lugar a que en la actualidad la zona suroccidental del país sea considerada como el nuevo eje cafetero. El Cauca con sus 91.000 familias dedicadas al cultivo de café alcanzó volúmenes de 1.500.000 sacos de café

pergamino seco al año en 2020. La región se caracteriza por el aporte de pequeños y medianos caficultores que benefician el café con métodos tradicionales utilizando equipos e instalaciones básicas; proceso que incluye el despulpado, la selección, la fermentación y el lavado del grano (Comité de Cafeteros del Cauca, 2021).

A través del tiempo, para el beneficio de la cereza del café se han utilizado diferentes modelos de infraestructura,

maquinaria y equipos los cuales han evolucionado hasta lograr reducir el consumo de 50 a 0,3 litros de agua por cada kilogramo de café pergamino seco con la implementación de sistemas de beneficio ecológico en tanques tina ECOMIL entre otros (Zuluaga y Zambrano,1993). No obstante, se generan aguas residuales con alto contenido de carga contaminante que requieren de adecuado tratamiento para evitar la degradación ambiental a causa del vertimiento directo a los suelos o a fuentes de agua.

De acuerdo con Zuluaga y Zambrano (1993), los sistemas modulares de tratamiento anaeróbico (SMTA) son eficientes para el tratamiento de aguamieles y presentan resultados favorables en la remoción de la DQO y DBO a niveles que oscilan entre el 80 % y el 74,3 % respectivamente, pero la adopción completa de esta alternativa se ve limitada por su exigente mantenimiento y los costos que en ocasiones no se encuentran al alcance de los pequeños caficultores.

En el departamento del Cauca existen modelos artesanales construidos de diversas maneras fundados en sistemas con filtros secuenciales que sirven para el depósito de las aguamieles, para la separación y transformación de sedimentos mediante la acción de microorganismos eficientes. Por lo general, las aguas después de filtradas se conducen a una laguna de oxidación o filtro verde, sin embargo, no existen datos sobre la remoción que se puede lograr, sobre la calidad de agua obtenida al final del proceso, y mucho menos si es posible su reúso para otras tareas desarrolladas a nivel de la finca, como por ejemplo el fertirriego. En este

estudio se evaluó el potencial reúso del agua tratada al final del proceso —aprovechando su contenido nutricional remanente— para el fertirriego de pasto *King grass* (*Pennisetum Purpureum x Pennisetum Typhoides*), además de establecer el efecto sobre la composición fisicoquímica del suelo tratado. Se tomó como caso de estudio la finca La Palma.

Materiales y métodos

Localización. Zona de estudio

La finca La Palma se encuentra en la vereda Sevilla en el municipio de El Tambo, departamento del Cauca, Colombia. Está ubicada sobre los 1.687 msnm, con temperaturas promedio de 17 a 21 °C; localizada en 2.447371 de latitud y a los -76.716312 de longitud. Cuenta con una extensión aproximada de 2,5 hectáreas y 3.000 árboles en producción de la variedad Castillo Tambo, en edades que oscilan entre los 4 y 7 años.

Estructura del sistema artesanal para el tratamiento de aguamieles

En la implementación del sistema artesanal para el tratamiento de aguamieles se utilizó una manguera de polietileno de 1,5 pulgadas, de 40 m de largo para la conducción de las aguamieles desde los tanques de fermentación hasta los filtros artesanales; 8 m de plástico negro calibre 7 por 5 m de ancho; 4 codos de 1,5 pulgadas; 6 m de tubo de 1,5 pulgadas y cintas de neumático para realizar los empalmes de la manguera a la salida de cada uno de los filtros.

Se construyeron en tierra los filtros 1 y 2 con capacidad de 0,8 y 0,34 m³ respectivamente; suficientes para el manejo de los volúmenes de aguamieles generados. Una vez contruidos y forrados los filtros con el plástico se procedió a depositar entre 80 y 100 recipientes plásticos (botellas *pet* de 500 hasta 3.000 ml) con el fin de generar hábitats para bacterias y microorganismos encargados de consumir y transformar los nutrientes disponibles en las aguamieles. Posteriormente se llenaron los filtros con aguamieles y se le adicionó a cada uno 5 kg de melaza, 1 l de leche, 10 kg de estiércol fresco de bovino; además de 1 l de microorganismos eficientes por cada filtro; de esta manera se dejó fermentar el sustrato durante quince días antes de recibir la primera descarga de aguamieles.

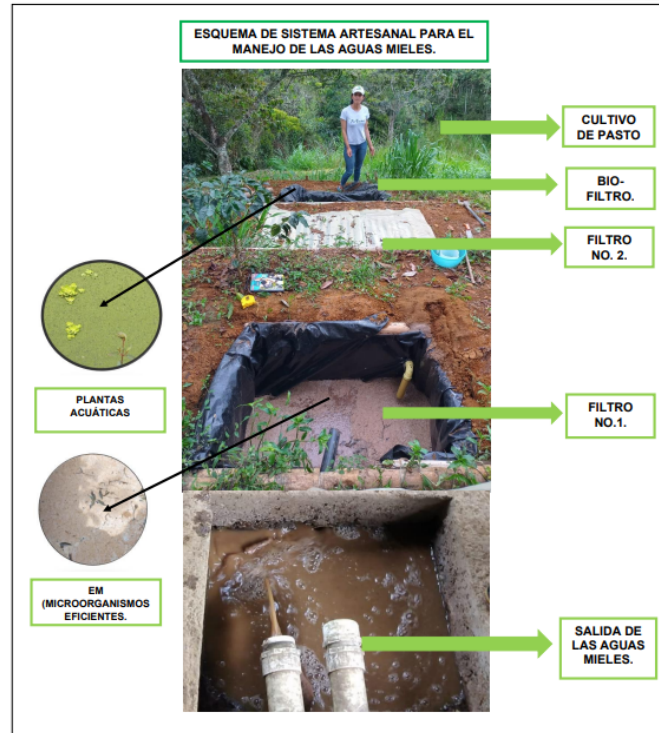
Las cantidades de materiales descritos anteriormente se usaron teniendo en cuenta la experiencia en la producción de abonos orgánicos sólidos y líquidos dado que se busca facilitar la reproducción de

los microorganismos en las aguamieles generando condiciones favorables para su multiplicación.

Transcurridos quince días de fermentación del sustrato en los dos filtros se realizó la primera descarga de aguamieles al filtro 1 con un volumen aproximado de 150 litros que se mantendrán en el filtro hasta alcanzar un nivel de 60 centímetros de altura, iniciando la conducción de las aguas hasta el segundo filtro donde se repite el mismo procedimiento hasta llegar a la laguna verde o biofiltro donde se sembraron 500 gr de *Azolla filiculoides* y 1.000 gr de *Pistia stratiotes* para complementar la remoción del material orgánico. Estas especies se usaron por ser plantas que presentan un adecuado desarrollo en diferentes cuerpos de agua en la región. La repetición del ciclo osciló entre 15 a 20 días dependiendo de factores climatológicos, estado de la cosecha y volúmenes de café recolectado. El esquema del sistema se puede apreciar en la **figura 1**.

Figura 1.

Esquema del sistema artesanal para el tratamiento de aguamieles



- **Análisis fisicoquímico de muestras de agua**

Se recolectó una muestra de agua de la salida de los tanques de fermentación provenientes del primer y segundo lavado del café para utilizarlas como *testigo* en las mediciones de pH, sólidos suspendidos, DQO y DBO, asimismo se tomaron muestras de agua de los filtros 2 y 3. Los análisis se realizaron por triplicado de acuerdo con la Resolución 631 de 2015, ello para garantizar la confiabilidad en los resultados. La metodología aplicada para el análisis de las muestras corresponde al *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* edición 23 de 2017.

- **Análisis de la producción de forraje verde en lotes de pasto *King grass* regados con aguamieles de café tratadas biológicamente**

Las aguamieles tratadas se utilizaron para la fertilización de parcelas de pasto *King grass* de un año de sembrado en surcos a 60 cm de distancia, con un área de 300 m² (15 m x 20 m) cada una, frente a parcelas sin tratamiento de la misma área. Las parcelas se ubicaron en la parte inferior del sistema a una inclinación promedio del 42 % para fertirriego por gravedad mediante el uso de mangueras de una pulgada ubicadas en diferentes sitios para asegurar una dispersión homogénea. Las aplicaciones se realizan en lapsos de 15 a 30 días dependiendo de los periodos y

volúmenes de cosecha, por cada aplicación se utilizaron entre 150 y 200 litros de aguas tratadas sin diluir; así los filtros mantienen un 40 % de su volumen para conservar los microorganismos encargados del consumo y tratamiento de la próxima descarga.

Adicionalmente, las aguas del tercer lavado (60 litros por descarga) se utilizaron directamente como fertirriego. La producción de forraje verde se calculó utilizando como herramienta de medición un cuadrado de 1m x 1m construido en bambú; el cuadro se sobrepuso al azar tres veces dentro lote para luego cortar y pesar el forraje que quedaba en su interior; promediando los resultados para obtener la producción de biomasa por metro cuadrado.

Como control de tratamiento se utilizaron dos lotes de pasto *King grass*, uno de ellos sin

tratamiento y el otro regado con aguamieles tratadas y de tercer lavado del café como única fuente de fertilización, dichos análisis se realizaron por triplicado cada 45 días por ser el periodo vegetativo del forraje.

Análisis estadístico

Los resultados se expresaron como promedios con su respectiva desviación estándar a fin de conocer la variación de los datos en las variables analizadas.

Resultados

En las **tablas 1 y 2** se muestran los resultados del análisis de varios parámetros del aguamiel no tratada y cómo cambian a medida que se avanza en el sistema de tratamiento. Los valores de salida del agua se comparan con la Resolución 631 de 2015.

Tabla 1.

Resultados de indicadores de análisis de laboratorio de aguamieles al paso por el sistema de tratamiento

Indicador	DBO	DQO
Muestra testigo tanques de fermentación	10.350	25.000
Filtro 2, repetición 1	7.080	18.149
Filtro 2, repetición 2	3.364	3.863
Filtro 2, repetición 3	2.734	3.411
Filtro 3/biofiltro, repetición 1	3.624	3.790
Filtro 3/biofiltro, repetición 2	1.930	2.035
Filtro 3/biofiltro, repetición 3	683	940

Nota. DBO: demanda bioquímica de oxígeno, DQO: demanda química de oxígeno.

Tabla 2.

Promedio de resultados de indicadores de análisis de laboratorio de aguamieles al paso por el sistema de tratamiento

Indicadores	Muestra testigo	Filtro 2 del biofiltro	Filtro 3 del biofiltro	Resolución 631 de 2015
DBO mgO ₂ /L	10.350	4.393	2.079	400
DQO mgO ₂ /L	25.000	8.474	2.255	3.000
pH	3	3,1	3,89	6,0-9,0
SST mg/L	808	504	423	800
Turbidez NTU	>800	405,5	106,35	N/A

Nota. DBO: demanda bioquímica de oxígeno, DQO: demanda química de oxígeno, SST: sólidos suspendidos totales, NTU: unidad nefelométrica de turbidez.

Los resultados obtenidos reflejan la disminución de la DBO y de la DQO ajustándose a los parámetros exigidos en la Resolución 631 de 2015 en lo relacionado a la DQO de la cual se permite un máximo de 3.000 mg/L O₂ y aproximándose a cumplir con los 400 mg/L permitidos en la DBO. De igual manera el pH al final del día 16 pasó de 3,1 a 3,89 unidades mostrando que el agua aún sigue con valores de acidez fuera de los límites exigidos por la Resolución 631 (pH entre 6 y 9 unidades); por lo tanto, es necesario buscar alternativas que coadyuven a la neutralización del pH, como por ejemplo la aplicación de cal o la implementación de otros tratamientos biológicos.

De acuerdo con los resultados obtenidos en cada análisis se evidencian porcentajes de remoción para la DBO de hasta un 93,4 % y para la DQO de hasta un 94,24 %; esto comprueba la efectividad del sistema artesanal en los procesos de remoción de la carga contaminante. Cabe anotar que la media para el filtro 2 para DBO fue del 58

% y para el biofiltro del 60 %; así mismo la media para DQO en el filtro 2 fue del 67 % y para el biofiltro del 90 %. Los resultados se pueden observar en la **figura 2** que permite apreciar el cambio de color alcanzado gracias a la decantación y acción microbiológica del sistema teniendo como referencia las aguamieles sin tratar y las aguas resultantes al final del proceso.

No existen resultados que permitan comparar este tipo sistemas, sin embargo algunos autores han reportado el uso de humedales de flujo superficial para el tratamiento de aguas residuales del empacado de hortalizas que logran remociones de tan solo 77/48 en la relación BDO/DQO a altas cargas de materia orgánica y remociones del 92/94 cuando las aguas residuales presentaron cargas inferiores a 1.200 mg L⁻¹ lo cual está muy por debajo de los valores de carga orgánica que presentan las aguamieles del café (Navarro *et al.*, 2013). No obstante, humedales de flujo superficial usando las especie *Eleocharis Elegans Kunth*

y *Phragmites australis* mostraron que esta última presenta valores promedios altos de remoción en cuanto a materia orgánica (DQO 93 %, DBO 92 % y SST 98 %) siendo necesaria primero la adaptación de las especies antes del vertimiento de las aguamieles (Bermúdez y Cruz, 2018). Los resultados son comparables con los obtenidos en este estudio, con la ventaja de no requerir una fase de adaptación para las especies usadas lo que permite mayor

versatilidad de uso. Otro estudio a escala de laboratorio con aguamieles del café que presenta el uso de humedales construidos, combinó el uso de un humedal de flujo vertical y uno de flujo horizontal, el estudio mostró que se pueden lograr remoción de la DQO del 78,2 % evidenciando el uso de este tipo de sistemas de bajo costo en la remoción de carga contaminante de aguas residuales de la producción de café (Pérez *et al.*, 2022).

Figura 2.

Análisis de las etapas del sistema de tratamiento de aguamieles



Tabla 3.

Contenido de minerales en las aguamieles del café

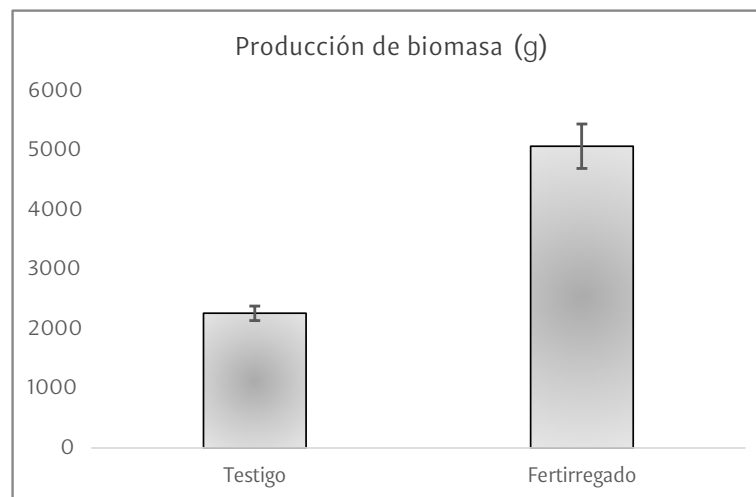
Producto	Aluminio Al. mg Al/L	Magnesio Mg. mg Mg/L	Nitritos mg NO ₂ ⁻ /L	Nitratos mg NO ₃ ⁻ /L	Fosforo reactivo soluble P. mg PO ₄ ³⁻ /L	Potasio total K. mg K/L
Aguamieles biofiltro	<0,08	28,5	0,047	<0,5	0,2	198
Aguamieles de tercer lavado	<0,08	16,1	0,098	<0,5	0,447	38,1

De acuerdo con la Resolución 631 del 2015 los vertimientos no pueden exceder el contenido de aluminio del 0,1 %. En este caso los resultados del análisis de laboratorio indican que las aguamieles de la laguna 3 contienen aluminio en concentraciones menores al 0,08 %, lo cual no afecta la vida de la flora y fauna de las fuentes hídricas o el suelo donde se conducen las aguas tratadas.

Los resultados muestran contenido de minerales disponibles en las aguamieles tratadas y del tercer lavado tales como el magnesio (Mg), fósforo (P) y potasio (K); características que pueden ser aprovechadas por los productores como alternativa de nutrición y reducción de costos de producción mediante la aplicación de fertirriego para los cultivos.

Figura 3.

Producción media de biomasa en las parcelas de pasto King grass



La **figura 3** permite realizar análisis comparativo de la producción de forraje entre una parcela sin tratamiento (testigo) y otra parcela que ha recibido aplicaciones periódicas de aguamieles tratadas en los sistemas artesanales. Es evidente que las parcelas regadas con aguamieles duplican la producción de materia verde desde el primer corte; producción que aumenta a medida que los suelos se enriquecen con el aporte de nutrientes. Los aforos de pasto *King grass* se realizan cada 45 días obteniendo

resultados favorables en suelos donde se aplican aguamieles tratadas.

Tres cortes independientes en el tiempo realizados cada 45 días después del riego, muestran un incremento promedio en producción de biomasa verde del 123,6 % en relación con los lotes testigos. Esto indica el beneficio generado por el aporte de nutrientes proporcionados por las aguamieles al suelo y la rápida asimilación por parte de las plantas, esta ventaja se debe tener en cuenta como opción favorable para

el reúso de las aguamieles tratadas que las convierte de desecho contaminante a un valioso bioinsumo para la fertilización de cultivos o como un mejorador de suelos gracias al contenido de minerales descrito en los análisis.

Estudios recientes han mostrado el potencial aprovechamiento de los efluentes líquidos generados en el beneficio del café desde el enfoque de la sostenibilidad para la obtención de productos de valor agregado, incluyendo la recuperación de nutrientes (Campos *et al.*, 2021; Hurisso *et al.*, 2021; Pires *et al.*, 2021)

Tabla 4.

Resultados análisis bromatológico de pasto tratado con fertirriego y testigo

Parámetros	Unidad	Testigo	Fertirriego con aguamieles tratadas y de tercer lavado
Ceniza	%	10,8	14,8
Proteína cruda	%	10	11,42
Extracto etéreo	%	1,0	3,3
Fibra bruta	%	29,6	30,0
Nitrógeno	%	1,6	1,82
Calcio	%	0,56	0,5
Magnesio	%	0,17	0,2
Sodio	mg/kg	315,8	337,2
Potasio	%	2,62	3,8
Hierro	mg/kg	244,8	139,8
Cobre	mg/kg	27,9	15,3
Manganeso	mg/kg	114,7	74,9
Zinc	mg/kg	49,9	37,6
Boro	mg/kg	43,2	59,1
Fósforo	%	0,12	0,2
Azufre	%	0,07	0,1

Con los resultados de análisis bromatológico del pasto obtenido se evidenció que en la parcela tratada con fertirriego hay un incremento en el porcentaje de cenizas y nutrientes como Mg, Na, K, B, P y S. Igualmente, el extracto etéreo muestra

incrementos significativos pasando del 1 % al 3,3 % que, de acuerdo con Osorio (2004), a partir del 2,4 % se pueden considerar forrajes de buena calidad. A nivel general, se refleja un incremento de nutrientes que favorecen la calidad del forraje permitiendo

comprobar la acción positiva del fertirriego como fuente de abono para las pasturas.

El periodo de corte del forraje afecta directamente el contenido de nutrimentos y de fibra bruta, la cual se incrementa con la madurez del cultivo afectando el aprovechamiento de los nutrientes. El contenido de proteína se encontró óptimo para la especie. La muestra testigo mostró valores contenido de proteína del 10 %, mientras que la parcela tratada con fertirriego registró un 11,42 %. Según Ordaz-Contreras *et al.* (2018), para esta especie se han alcanzado valores en

proteína del 10 % en intervalos de corte de 90 días, sin embargo Araya y Boschini (2005) reportaron 11,75 y 10,51 %; valores similares a los obtenidos en la presente investigación, por lo que esos resultados son comparables con lo esperado para la especie, sin embargo el contenido de proteína disminuye con el incremento de lignina el cual está ligado al tiempo de corte de acuerdo con Segura *et al.* (2008, como se citaron en Ordaz-Contreras *et al.*, 2018), por lo que es muy importante realizar los cortes en los tiempos adecuados como los realizados para garantizar una mejor calidad nutricional.

Tabla 5.

Resultados de análisis de suelos. (Lote testigo y lote tratado con aguamieles)

Indicador	Unidad	Lote testigo	Lote tratado con aguamieles
pH		5,24	5,33
N -TOTAL		0,33	0,54
M.O	%	6,69	10,83
P	(ppm)	4,85	7,62
Sat Al	%	44,56	45,11
Al		1,35	1,06
Ca		1,05	0,72
Mg	(meq/100g)	0,14	0,25
K		0,09	0,15
Na		0,16	0,36
CICe		2,79	2,54
B		0	0
Cu		0,8	0,55
Fe	(ppm o mgKg)	21,09	1,84
Mn		2,37	2,88
Zn		1,7	1,15

Nota. CICe: capacidad de intercambio catiónico.

De acuerdo con los resultados del análisis de suelos se aprecia que en el lote tratado con aguamieles se incrementaron la materia orgánica, el nitrógeno total (N), el fósforo (P), el potasio (K), el magnesio (Mg), el manganeso (Mn), el sodio (Na). La materia orgánica y los minerales son componentes fundamentales para el mejoramiento de la textura, la estructura de los suelos y la productividad, con lo que se favorece la circulación de oxígeno, agua, microorganismos y el desarrollo radicular de las plantas.

No se observó alteración en los niveles de acidez del suelo pese a los valores de pH de las aguamieles aplicadas. Sin embargo, valores bajos de pH podrían afectar la disponibilidad de hierro, cobre y manganeso alterando la capacidad de intercambio catiónico del suelo y reduciendo la disponibilidad de estos nutrientes (Intagri, 2018).

Discusión

Como se puede apreciar en investigaciones similares, los sistemas artesanales para el tratamiento de aguamieles permiten reducir la carga contaminante de DBO y DQO a niveles permitidos por las normas nacionales. Si se comparan los resultados obtenidos en esta investigación con los descritos por Álvarez *et al.* (2011), se puede observar que los niveles de contaminación generados tradicionalmente durante la etapa de beneficio del café se reducen significativamente, como se presenta en el trabajo realizado en la comunidad de Carmen Pampa, municipio Coroico, provincia Nor Yungas del departamento

de La Paz en Bolivia y bajo diferentes condiciones climatológicas y de manejo del beneficio húmedo. Las aguamieles del café, al ser tratadas biológicamente, presentan descontaminación gracias al trabajo de microorganismos, en este caso específico la DBO fue reducida de 6.102,5 mg O₂/L a 1.245 mg O₂/L y la DQO se ha reducido de 9.800 mg O₂/L a 1.658,75 mg O₂/L.

Autores como Vitezová *et al.* (2019) consideran que “la actividad respiratoria de los microorganismos puede ser un factor importante para tratamiento de aguas residuales ya que su incremento nos permite lograr la máxima descomposición de complejos compuestos orgánicos; su participación en el metabolismo microbiano”, por lo tanto, se logra mejorar los procesos de descontaminación de las aguamieles del café gracias a la actividad microbiana.

Mediante el uso de lodos como inóculos provenientes de la etapa de beneficio en investigaciones realizadas en Cuba por Rodríguez *et al.* (2000) para el tratamiento de las aguamieles, se lograron remociones hasta del 46 % gracias a la acción de microorganismos que utilizan los compuestos fermentables para su crecimiento, sin embargo es de anotar que en términos de remoción existen porcentajes de DQO no biodegradables sin implicar inhibición para la reproducción de los microorganismos.

Asimismo, Osorio (2007) en su investigación presenta resultados significativos en la remoción de hasta el 98 % de la DQO. Adicionalmente, se logra la producción de

biogás a partir de la fermentación de las aguas, los bajos costos y fácil operatividad del sistema permiten su adopción por parte de los pequeños productores.

En otro contexto, Gardiman *et al.* (2019) presenta reducciones significativas de la DQO mediante la utilización de sistemas electrolíticos para el manejo de aguamieles obteniendo remociones hasta del 70 %, se evidencia la capacidad de descontaminación con la implementación de esta alternativa.

Situación muy similar ocurre en la finca La Palma, ubicada en la vereda Sevilla, departamento del Cauca, donde se logró reducir significativamente los niveles de contaminación con la implementación del sistema artesanal para el tratamiento de aguamieles, pues pasó de 1.0350 mgO₂L de DBO a 683 mgO₂L; mientras la DQO se redujo de 25.000 a 940 mgO₂L, por nombrar los principales indicadores. Ello ratifica los logros alcanzados en el proyecto de investigación convirtiéndose en una opción eficiente para el tratamiento de aguas residuales del café.

Los datos obtenidos en los análisis permiten comprobar que mediante la implementación de filtros artesanales se logra reducir la DQO y la DBO hasta niveles permitidos en la Resolución 631 de 2015, Se logran remociones más bajas de las permitidas en la DQO por lo que el sistema demuestra eficiencia y se convierte en una alternativa viable para ser adoptada en las fincas cafeteras minimizando el impacto ambiental causado en épocas de cosecha.

Los bajos costos y su fácil implementación son factores preponderantes para la

masificación del sistema, especialmente en fincas de pequeños productores que por falta de recursos no cuentan con una alternativa para el tratamiento de las aguamieles y continúan vertiéndose directamente a las fuentes naturales, causando con ello la degradación de los cuerpos de agua, del aire y del suelo.

La implementación del sistema artesanal utilizado en esta investigación a diciembre de 2022 tiene un costo de COP 769.000 (188 dólares), frente a los COP 2.300.000 (562 dólares) que cuesta la instalación del SMTA, es decir este último es tres veces más costoso que el sistema artesanal para una finca de características similares a la del presente estudio. Los costos descritos anteriormente para el sistema artesanal corresponden al precio ofertado a la fecha de los materiales requeridos en la instalación, mientras que los costos para el SMTA se actualizaron con los precios del mercado.

Otro logro significativo del uso de este sistema de tratamiento es que se permite el reúso de las aguamieles para el fertirriego de las parcelas de pasto *King grass* que incrementa la producción de forraje hasta en un 223 % gracias a que se aprovecha el contenido de nutrientes de las aguas aplicadas y al mejoramiento de los suelos tratados; ventajas que no se han tenido en cuenta en otros sistemas de manejo lo cual no ha permitido valorar este subproducto como un bioinsumo para la producción agrícola. Estudios posteriores podrían centrarse en evaluar de manera integral más las ventajas económicas desde la mirada de la economía circular.

La investigación permitió conocer el mejoramiento de la calidad del forraje con el incremento en los niveles de minerales como Ca, Mg, Na, K, P, S, extracto etéreo y cenizas; anotando que también se sufrió el descenso de elementos menores como el Fe, Cu y Mn, situación que obedece a diferentes factores, entre ellos la acidez del suelo lo cual es bien sabido que no permite la normal liberación de nutrientes, no obstante los resultados son favorables teniendo en cuenta el incremento de elementos mayores esenciales para el desarrollo de las plantas y la nutrición animal.

Conclusiones

Este estudio muestra la factibilidad del uso del sistemas artesanal empleado, no solo como medio para el tratamiento de las aguamieles generadas en la producción de café de pequeñas unidades productoras para minimizar el impacto ambiental causado por el vertimiento de aguamieles a través de la reducción de los valores de DBO y DQO, además con este tratamiento se pueden obtener aguamieles tratadas con niveles importantes de nutrientes que representan un valioso aporte nutricional para uso en operaciones de fertirriego, lo que incrementa el rendimiento de producción de forraje en cultivos de pastos (*King grass*).

La implementación del sistema artesanal es más económica que sistemas habituales de tratamiento como el SMTA, sin embargo, estudios adicionales deben realizarse para ajustar el pH del agua de salida, además de establecer con más detalle otras ventajas económicas por ahorro de fertilizantes,

ahorro del agua para riego y aumento en la producción de pasto.

Referencias

- Álvarez, J.; Smeltekop, H.; Cuba, N. y Loza-Murguía, M. (2011). Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales del prebeneficiado de café (*Coffea arábica*) implementado en la comunidad Carmen Pampa provincia Nor Yungas del Departamento de La Paz. *J. Selva Andina Res. Soc.*, .2(1), 21-43.
- Araya, M. y Boschini, C. (2005). *Producción de forraje y calidad nutricional de variedades de Pennisetum Purpureum en la meseta central de Costa Rica. Agronomía Mesoamericana*, 16(1), 37-43. http://www.mag.go.cr/rev_mesol/v16n01_037.pdf.
- Bermúdez Cucuñame, E. y Cruz Imbachi, C. (2018). *Evaluación de la eficiencia en las especies Phragmites Australis y Eleocharis Elegans Kunth mediante dos humedales horizontales de flujo subsuperficial en función de la DQO; DBO y SST en las aguamieles del beneficio del café; en la finca Don Renzo; del municipio de Piendamó Cauca*. [Tesis doctoral]. Uniautónoma del Cauca. <https://repositorio.uniautonoma.edu.co/handle/123456789/311>.
- Comité de Cafeteros del Cauca. (2021). *Informe de gestión 2020*. <https://cauca.federaciondecafeteros.org/app/uploads/sites/2/2021/04/>

INFORME-DE-GESTI%C3%93N-con-enlaces.pdf.

- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631 de marzo 17 por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>.
- Campos, R. C.; Pinto, V.; Melo, L. F.; Da Rocha, S. J.; and Coimbra, J. S. (2021). New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: A critical review. *Future Foods*, 4(40)100058. <https://www.sciencedirect.com/>.
- Federación Nacional de Cafeteros. (2004). *Cartilla 20. Beneficio del café, despulpado, remoción del mucilago y lavado*. https://caldas.federaciondecafeteros.org/app/uploads/sites/11/2020/07/Cartilla_20-Beneficio-del-caf%C3%A9-I.-Despulpado-remoci%C3%B3n-de-mucilago-y-lavado.pdf.
- Gardiman, B.; Oliveira, G. y Dos Reis, E. et al. (2019). *Avaliação da taxa de remoção e custo do tratamento da água residuária do café por um sistema eletrolítico*. *Revista em Agronegocio e Meio Ambiente* 12(3), 1019. <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/6490/3488>.
- Hurisso, T. T.; Davis, J. G.; Chalá, A.; Getachew; A. and Wolde-Meskel, E. (2021). Impacts of grinding and acidification of animal bones with coffee wastewater on plant dry matter yield and recovery of phosphorus. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*; 52(10), 1076-1088. <https://www.sciencedirect.com/>.
- Intagri. (2018). *Disponibilidad de nutrimentos y el pH del suelo*. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/disponibilidad-de-nutrimentos-y-el-ph-del-suelo>.
- Navarro, A.; García, Y.; Vázquez, A. y Negrete, J. L. M. (2013). Eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales del empacado de hortalizas. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(1), 39-50. <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323627689004.pdf>.
- Ordaz-Contreras, R.; Sosa-Montes, E.; Mendoza, S.; Améndola, R.; Reyes, S.; Ortega, E.; Joaquín, S. y Hernández, A. (2018). *Composición química del pasto King grass (Pennisetum purpureum) a diferente intervalo de corte*. <https://core.ac.uk/download/pdf/249320199.pdf>.
- Osorio, P. (2007). *El filtro anaeróbico con guadua: una alternativa para el tratamiento de las aguamieles*. <https://es.ircwash.org/sites/default/files/341.5-94FI-12133.PDF>.

- Pérez, R.; Jumbo, C.; Aguilar, S.; Benítez, Á. y Donoso, N. (2022). *Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales provenientes del procesamiento de café en el Ecuador*. [https://eventos.utpl.edu.ec/sites/default/files/files/RESUMENES%20CONGRESO%20CAFICULTURA%20\(1\).pdf#page=66](https://eventos.utpl.edu.ec/sites/default/files/files/RESUMENES%20CONGRESO%20CAFICULTURA%20(1).pdf#page=66).
- Pires, J. F.; Viana, D. C., Braga Jr., R. A.; Schwan, R. F. and Silva, C. F. (2021). Protocol to select efficient microorganisms to treat coffee wastewater. *Journal of Environmental Management*, 278, 111541. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720314663>.
- Rodríguez, S.; Pérez, R.; Fernández, M. (2000). Estudio de la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. *Interciencia*, 25(8), 386-390. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33905005>.
- Vítezová, M.; Jancikova, S.; Dordevic, D.; Vitez, T.; Elbl, J.; Hanisakova, N.; Jampilek, J. and Kushkevych, I. (2019). The Possibility of Using Spent Coffee Grounds to Improve Wastewater Treatment Due to Respiration Activity of Microorganisms. *Applied Sciences*, 9(15). <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/15/3155>.
- Zuluaga, J. y Zambrano, D. (1993). *Manejo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café para el control de la contaminación*. *Avance técnico* 187. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0187.pdf>.
- Zuluaga, J. y Zambrano, D. (1999). *Tratamiento de aguas residuales del lavado del café*. <https://www.cenicafe.org/es/publications/bot020.pdf>.