



## **Eficiencia de remoción con un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal de contaminantes disueltos en aguas residuales del beneficio húmedo del café**

### ***Efficiency of a horizontal subsurface flow constructed wetland treatment system for the removal of dissolved pollutants of the wastewater of the benefit of coffee***

**Ángela Sofía Gómez\*, Juan Carlos Casas-Zapata, Paola Andrea Rivera-Chantre**

Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil, Grupo de Ciencia e Ingeniería en Sistemas Ambientales, Oficina 407 del Edificio de Ingenierías, Carrera 2# 15N, 190002 Popayán, Colombia

\*Autora a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido: Enero 15, 2024 / *Received: January 15, 2024*

Aceptado: Febrero 15, 2024 / *Accepted: February 15, 2024*

#### **Resumen**

Se evaluó la eficiencia de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal sembrado con la macrófita *Phragmites australis* para la depuración de aguas residuales del beneficio húmedo del café, ARBHC, medida como sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Se hizo un análisis estadístico descriptivo, exploratorio y gráfico de las variables de respuesta implementando el paquete estadístico IBM SPSS y Microsoft Excel 2016 y, posteriormente, se aplicó la prueba de hipótesis no paramétrica de Wilcoxon sobre las medianas de las distribuciones de las concentraciones de salida. Los resultados mostraron que las distribuciones de los porcentajes de remoción fueron asimétricas a la izquierda con predominancia de las eficiencias altas de remoción: SST, DQO, nitritos y fosfatos tuvieron porcentajes de remoción medianos del 80, 77, 84, 75, y 85%, respectivamente. Complementariamente, la prueba de Wilcoxon al evaluar las hipótesis nulas planteadas para las distribuciones de concentraciones de salida de DQO y nutrientes arrojó niveles p superiores al nivel de confiabilidad ( $\alpha$ ) del 5% lo que indicó que el sistema debe incrementar su estabilidad y eficiencia para cumplir con los valores guías correspondientes de Colombia. En cuanto a los SST y pH la prueba arrojó niveles p inferiores a  $\alpha$ , indicando que el humedal remueve eficientemente los primeros compuestos mediante mecanismos físicos comportándose como un sistema amortiguado, al incrementar el pH en 2 unidades mediante el contacto del agua residual con el material filtrante y la interacción entre la grava y la biopelícula que produce dióxido de carbono.

**Palabras clave:** Humedales construidos o artificiales o de tratamiento, agua residual, macrófitas, biopelículas, remoción, nitritos, fosfatos, DQO, SST

#### **Abstract**

*The efficiency of a horizontal subsurface flow constructed wetland planted with the macrophyte *Phragmites australis* was evaluated for the purification of wastewater from wet coffee processing, WWWCP, measured as total suspended solids (TSS), chemical oxygen demand (COD), nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) and phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). A descriptive, exploratory and graphic statistical analysis of the response variables was carried out by implementing the IBM SPSS statistical package and Microsoft Excel 2016 and, subsequently, the non-parametric Wilcoxon hypothesis test was applied to the medians of the distributions of the output concentrations. The results showed that the distributions of removal percentages were asymmetric to the left with a predominance of high removal efficiencies: TSS, COD, nitrites and phosphates had median removal percentages of 80, 77, 84, 75, and 85%, respectively. Additionally, the Wilcoxon test when evaluating the null hypotheses raised for the distributions of output concentrations of COD and nutrients showed p levels higher than the reliability level ( $\alpha$ ) of 5%, which indicated that the system must increase its stability and efficiency to comply with the corresponding Colombian guide values. Regarding the TSS and pH, the test showed p levels lower than  $\alpha$ , indicating that the wetland efficiently removes the first compounds through physical mechanisms, behaving as a buffered system, by increasing the pH by 2 units through the contact of the residual water with the filtering material and the interaction between gravel and biofilm that produces carbon dioxide.*

**Keywords:** *Constructed or artificial or treatment wetlands, wastewater, macrophytes, biofilms, removal, nitrites, phosphates, COD, TSS*

---

## Introducción

El procesamiento del café por vía húmeda es una alternativa viable para solucionar el problema de la biodegradación inmediata y excesiva de la cáscara y pulpa del café en zonas tropicales (Álvarez et al., 2008). El proceso húmedo del café consta de varias etapas: Cosecha manual de la cereza, eliminación de los componentes externos, despulpado o eliminación del epicarpio, limpieza de los granos despulpados, biotransformación<sup>1</sup> del café para hidrolizar las pectinas y glúcidos que conforman el mucílago o mesocarpio del fruto, lavado del café y, finalmente, el secado (Guardia, 2012). Pese a las ventajas en términos de calidad y sabor que adquiere el café obtenido, este proceso genera graves problemas ambientales como es la producción de aguas residuales con un elevado contenido de materia orgánica biodegradable y un gasto excesivo de agua, entre 40 y 60 litros para la obtención de 1 kg de café pergamino seco (Đã Đăng Trê, 2023; Gururaj et al., 2021; Ijanu et al., 2020; Laili et al., 2022; Solarte y Urrea, 2015; Ulsido et al., 2024).

El líquido generado en los procesos de despulpado y lavado del café se conoce coloquialmente en Colombia como "aguas mieles". Contiene principalmente material orgánico conformado por carbohidratos o glúcidos, proteínas, grasas, polifenoles y pectinas que proveen su característica alta acidez (pH entre 3 y 5). Tiene altas concentraciones de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (1,185 - 32,459 mg DQO/L y como demanda bioquímica de oxígeno (3,450-12,100 mg DBO<sub>5</sub> /L), entre 60 y 240 veces superiores a los de las aguas residuales domésticas (Zambrano y Rodríguez, 2008). También tiene sólidos suspendidos totales entre 7,000 y 10,900 mg SST /L, nutrientes como fósforo y nitrógeno (4.4 a 70 mg/L, respectivamente, así como 37 a 279 mg/L de materia suspendida (Cruz-Salomón et al., 2017).

Ramírez et al. (2011) estimaron que durante el lavado del café biotratado ('fermentado'<sup>2</sup>) se producen efluentes líquidos con un valor de DQO de 31,920 mg/kg de café cereza. Estas aguas al ser liberadas a un ecosistema acuático sin previo tratamiento eficiente pueden destruir el equilibrio del cuerpo hídrico receptor a causa de la anaerobiosis generada en el medio, que ocasiona la asfixia subsecuente de fauna aerobia y el daño a la flora acuática (Hernández e Hidalgo, 2000) y la disminución de la productividad del ecosistema como medio imprescindible para el desarrollo integral de las familias 'cafeteras', que viven de este fruto.

Como una opción integral, eficiente y de muy bajo costo, con base en la revisión bibliográfica realizada (Đã Đăng Trê, 2023; Gururaj et al., 2021; Ijanu et al., 2020; Laili et al., 2022; Ulsido et al., 2024), para el tratamiento secundario de las aguas residuales del café se implementó un sistema basado en procesos naturales llamado humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HCFSSH), en el que se presenta una interacción entre plantas, medio de soporte, bacterias y agua, de tal forma que los contaminantes son almacenados, transformados o degradados a través de diversos procesos físicos, químicos y biológicos (Bernal et al., 2003).

El proyecto desarrollado tuvo como objetivo principal evaluar la eficiencia de remoción de ese HCFSSH como tratamiento secundario para disminuir los niveles de contaminación orgánica de los efluentes provenientes del proceso de beneficio húmedo del café (PBHC) en la finca cafetalera o cafetera "El Pomorroso", localizada en el Municipio de Sotará, Colombia. Para alcanzarlo se realizaron análisis temporales del comportamiento de las variables fisicoquímicas del sistema, seleccionadas de acuerdo con las características más importantes de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café, verificando si los parámetros analizados se encontraban dentro de los límites permitidos en

---

<sup>1</sup> Los glúcidos del café no se fermentan sino que tiene una biotransformación (lo único que se fermenta con levaduras *Saccharomyces cerevisiae* es la glucosa y se transforma en alcohol etílico y dióxido de carbono y a esa biorreacción Louis Pasteur la denominó fermentación hace casi dos siglos. En los años 70 del Siglo Veinte en un congreso a nivel mundial de ingeniería bioquímica, lo que después se llamó biotecnología, se acordó usar las palabras biorreacciones y biorreactores en vez de fermentaciones y fermentadores, a menos que se refirieran justamente a lo estudiado por Pasteur) [Nota de los(as) editores(as)]

<sup>2</sup> Ver el pie de página anterior sobre fermentación y biorreacción o biotransformación o biotratamiento [Nota de los(as) editores(as)]

vertimientos puntuales a cuerpos de agua por la normativa colombiana, la Resolución 631 de 2015 (MinAmbiente, 2015) y el criterio de calidad vigente en su momento orientado por la World Health Organization (WHO, 1996), identificando los mecanismos de remoción predominante y proponiendo acciones de mejora en relación con el manejo y diseño del HCFSSH.

## Metodología

### Localización

El sistema se encuentra ubicado en La Finca "El Pomorroso" de la Vereda El Carmen, al sur de la cabecera municipal (Sotará) (

Figura 1), con una temperatura promedio de 18°C y una altura aproximada de 1700 metros sobre el nivel del mar (Alcaldía Municipal de Sotará, 2018).



**Figura 1.** Localización del Municipio de Sotará y el Departamento del Cauca en Colombia (Alcaldía Municipal de Sotará, 2018)

Tiene una producción promedio por semana de 80 arrobas (ver Glosario) de café que fue el valor utilizado para el caudal de diseño, 1,000 kg y se consideró el valor de 40 L por kg de café procesado pergamino seco (Solarte y Urrea, 2015).

### Constitución del tren de tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café, ARBHC

El tren de tratamiento tiene en cuenta condiciones como que el beneficio húmedo se realiza en diferentes épocas del año, con tendencia a hacerse más esporádicas desde mediados hasta finales de año debido a que el cultivo de café decae en diferentes meses a causa de condiciones climáticas extremas (lluvias fuertes y sequías prolongadas). Este consta de las siguientes partes:

- Trampa de grasas (pretratamiento): Retiene grasas, la pulpa del fruto y los sólidos de mayor tamaño, evitando que en los sistemas de tratamiento posteriores se presente colmatación, problemas operacionales y bajas eficiencias de remoción (Pabón y Suárez-Gélvez, 2009).

- Laguna acidogénica (tratamiento primario): Reduce el contenido de sólidos y materia orgánica. Su tiempo de residencia hidráulica, de 2 días, permite que se hidrolicen los compuestos de alta masa molecular o sustratos neutros en las ARBHC como las pectinas y protopectinas y, a su vez, se acidifiquen los compuestos que han sido hidrolizados o se encuentran en forma soluble como los glúcidos propios del mucílago y la pulpa del café (CENICAFÉ, 2011; Dávila y Flores, 2016). Las ARBHC generan ácidos grasos como los ácidos acético, propiónico y butírico (CENICAFÉ, 2011), los cuales le aportan iones hidronio causantes de que el pH alcance valores de entre 3 y 4 unidades.
- Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HCFSSH) (sistema secundario): Recibe el efluente del sistema de tratamiento primario por medio de una tubería subterránea ubicada por debajo del nivel del agua, fluyendo a una baja velocidad. Este sistema fue diseñado según los parámetros de la
- Tabla 1 y sembrado con plantas de la especie *Phragmites australis* (Figura 2). Cuenta con tuberías de entrada y salida de 5.4 cm de diámetro (2"), tipo flauta, presentando orificios de 1.25 cm de diámetro (1/2") separados entre sí cada 5 cm, a 50 cm de la entrada y salida y 6 piezómetros distribuidos en forma de espina de pescado. El humedal se impermeabilizó utilizando una geomembrana de polietileno de alta densidad, de tipo lisa y calibre 40, la cual fue protegida con un geotextil comercial.

**Tabla 1.** Parámetros de diseño del humedal construido estudiado en esta investigación

Parámetro	Resultado calculado
Área	6 m <sup>2</sup>
Ancho	1.5 m
Largo	4 m
Carga de entrada	661 g/día
Carga superficial	110.25 g/m <sup>2</sup> *día
Carga transversal	551.25 g/m <sup>2</sup> *día
Tiempo de residencia hidráulica	11 días
Medio de soporte	Grava media y grava gruesa con tamaños efectivos D10 de 32 mm y 128 mm respectivamente Porosidad teórica del 40% Altura de la capa de grava: 0.8 metros previamente lavada



**Figura 2.** Sistema tipo humedal construido de flujo subsuperficial horizontal, HCFSSH, evaluado

### Caracterización fisicoquímica del influente<sup>3</sup> y efluente del humedal

**Variables de respuesta:** En función de las características de las aguas residuales a tratar, se eligieron el pH, la demanda química de oxígeno (DQO), los nitritos, los fosfatos y los sólidos suspendidos totales (SST) como covariables para evaluar la eficiencia de remoción del sistema.

**Muestreo:** Se realizaron 9 muestreos a la entrada y salida del humedal por triplicado en los días en los que se practicó el beneficio húmedo de café en la finca. Las respectivas muestras se depositaron en frascos de plástico previamente lavados con el tipo de agua a coleccionar y rotulados. Posteriormente, se refrigeraron mediante el uso de gel refrigerante y se transportaron al laboratorio certificado de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) (Figura 3). Allí se estudiaron las variables ya mencionadas bajo los métodos presentados en la Tabla 1 (MinAmbiente, 2007; 2015). Se midió *in situ* el valor de pH y también al llegar las muestras al laboratorio corroborando que no hubiera cambios en la composición por el traslado usando esta variable.



**Figura 3.** Método de muestreo: a) Toma de muestra de aguas residuales. b) Transporte de muestras

**Tabla 2.** Métodos de análisis implementados en el laboratorio receptor

Variable	Método colombiano usado / Equipo
DQO (mg/L)	SM5220D
Valor de pH (unidades de pH)	Sonda multiparamétrica
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	SM2540D
Fosfatos (mg/L)	SM4500-P E, modificado
Nitritos(mg/L)	SM 4500-NO <sub>2</sub> – B

El caudal se midió, implementando el método volumétrico, que consistió en la cuantificación del volumen respectivo descargado desde la entrada y salida del humedal en un balde graduado, durante un periodo determinado de tiempo. Los valores del caudal, tanto del influente como del efluente, resultaron al promediar los tres que se midieron a la entrada y salida del sistema.

### Procesamiento de datos y análisis de resultados

Se llevó a cabo un análisis estadístico básico, exploratorio, gráfico y descriptivo de cada una de las variables de respuesta (DQO, SST, nitritos, fosfatos y pH) el cual permitió evaluar su comportamiento y realizar una interpretación de las mismas. Se utilizaron diagramas de caja, de líneas múltiples, histogramas y estadísticas básicas, mediante la aplicación del programa IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 23 y Microsoft Office Excel 2016; una vez estudiadas las distribuciones de las concentraciones de cada parámetro a la salida del humedal. Se aplicó la prueba de hipótesis no

<sup>3</sup> Influyente, efluente y afluente provienen del latín *fluere*, *fluir*, implicando el prefijo *in* que entra el fluido a un sistema, el prefijo *e* que sale del sistema y el prefijo *a* que se une a una corriente secundaria a una primaria o principal [Nota de los(as) editores(as)]

paramétrica de Wilcoxon sobre la mediana de cada distribución, suponiendo un nivel de significancia del 5% para un 95% de confiabilidad, con el objetivo de aprobar o no la hipótesis nula en cada caso y verificar el cumplimiento de la resolución 0631 (MinAmbiente, 2015) y los criterios de calidad expuestos. Esta Resolución no brinda los valores guía para los nitritos y fosfatos. Por ende, la concentración mediana a la salida de nitritos se comparó con el criterio de calidad para la conservación de la biota orientado por la OMS (WHO, 1996) y la concentración mediana de fosfatos se comparó con el criterio de calidad para evitar eutrofización.

Teniendo en cuenta que se presentaron datos atípicos que afectan la media (medida de tendencia central sensible frente a valores extremos), producidos por diferentes factores climáticos inherentes a cada muestreo, tales como vientos, precipitaciones, brillo solar, radiación entre otros (factores aleatorios); se tomó como valor de referencia la mediana de cada conjunto de variables de respuesta debido a que es una medida de tendencia central de baja sensibilidad frente a la inestabilidad de los datos.

Cada porcentaje de remoción, sobre el que se planteó el objetivo general del trabajo, ejercido por el humedal se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{[CE - CS]}{CE} * 100 \quad (1)$$

donde

*CE*: Corresponde a la concentración en mg/L de la variable medida a la entrada del humedal en el muestreo X.

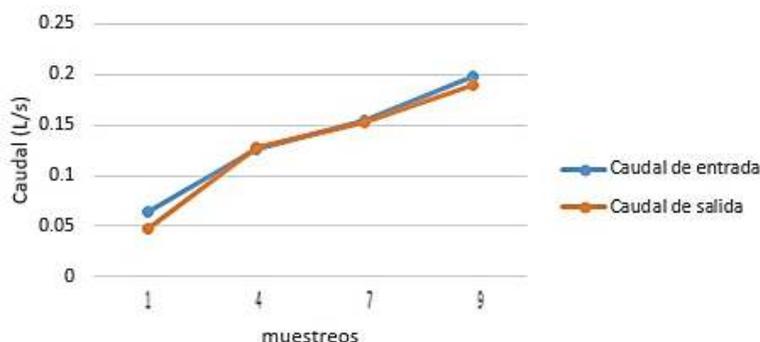
*CS*: Corresponde a la concentración en mg/L de la variable medida a la salida del humedal en el muestreo X.

Las mediciones de caudal se realizaron en las jornadas de muestreo 1, 4, 7 y 9, en las que se generaron volúmenes adecuados de efluente del beneficio húmedo del café con los que se conseguía aplicar el método volumétrico, es decir en los muestreos en los que fue factible aforar.

## Resultados y discusión

### Caudal

El caudal tuvo un comportamiento intermitente en los diferentes muestreos, sin presentar una tendencia a estabilizarse en el tiempo como consecuencia de que las cantidades de pulpa y mucílago liberados diferían conforme lo hacía la cantidad de café lavado en cada jornada. Por ello, el volumen de agua residual tratado por el humedal no era constante (Figura 4).

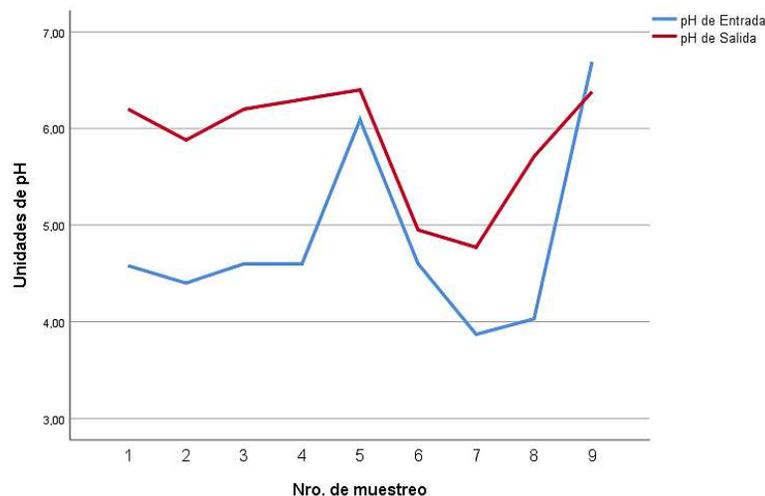


**Figura 4.** Comportamiento del caudal del influente (entrada) y efluente (salida) durante el desarrollo de esta jornada experimental

También se puede apreciar que los caudales medidos indican que se está superando el caudal pico de diseño con el que fue modelado el humedal (0.0020 L/s). Esta disparidad en los caudales entrantes al sistema directamente condiciona el pH del influente y la concentración de contaminantes en el agua residual a tratar. La intermitencia del caudal en este tipo de sistemas es un factor negativo que desestabiliza las condiciones microbiológicas e hidráulicas desarrolladas dentro del sistema, ocasionando problemas de colmatación e inestabilidad de la fijación de la biopelícula adherida al material de empaque y a las raíces de *Phragmites*, lo que indudablemente reduce la eficiencia de los procesos físicos, químicos y biológicos que remueven o transforman los contaminantes estudiados.

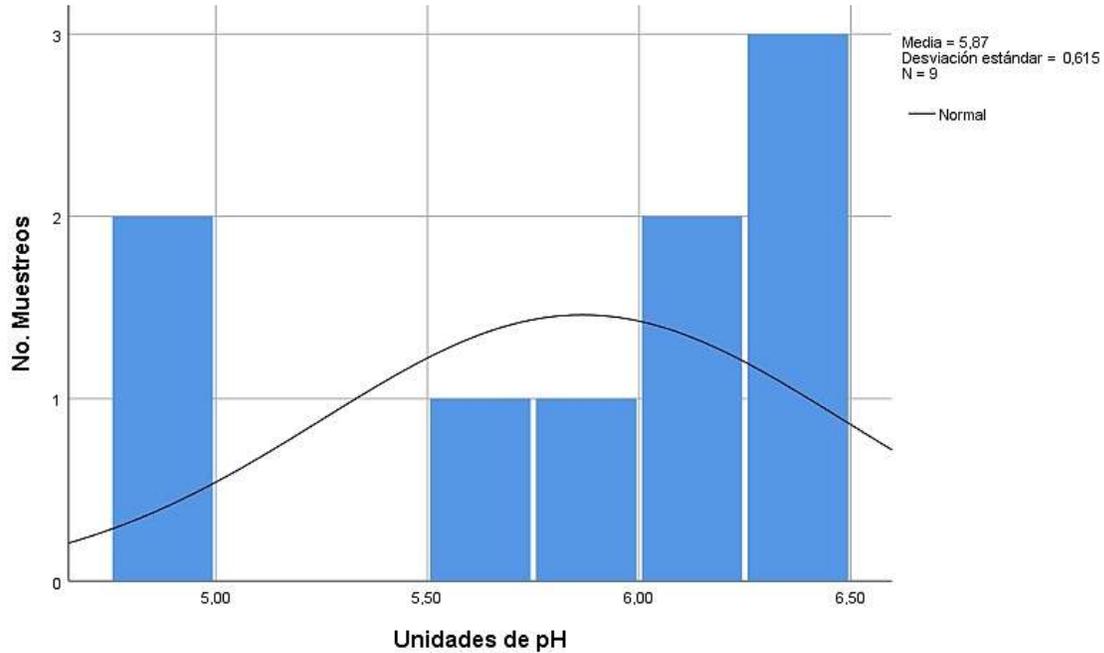
### Valores de pH

Durante los primeros 8 muestreos el pH del influente resultó ser inferior al del efluente, siendo esto constatado por el límite inferior al 95% de confianza del pH del influente y el límite superior al 95% de confianza del efluente, 4.14 y 6.38, respectivamente. Así pues, el humedal incrementó el pH aproximadamente en más de dos unidades (Figura 5), mejorando las condiciones de acidez del sistema. Esto es esperado ya que los microorganismos presentes usan la materia carbonosa como fuente de energía (respiración) produciendo dióxido de carbono que amortigua el valor de pH del sistema. La capacidad que tienen los humedales de actuar como sistemas amortiguadores en el tratamiento de algunos tipos de aguas residuales altamente contaminadas ha sido informado por dos autores (Selvamurugan et al., 2010; Zupanc et al., 2009) logrando un incremento del pH hasta llegar a niveles cercanos a 6 y 7. Al aumentar la materia orgánica y biomasa proveniente de las plantas, el sistema amortiguador desarrollado en el humedal incrementa su efectividad, pues al comparar los valores de pH promedio medidos en el influente después del periodo de aclimatación del sistema y dos años después en esta investigación, se puede apreciar un incremento de pH desde 5.42 (Solarte y Urrea, 2015), a 6.2 unidades. Aunque el incremento es de aproximadamente una unidad, se evidencia que el sistema puede estar potenciando su capacidad amortiguadora.



**Figura 5.** Comportamiento del pH en el influente y efluente del sistema durante los muestreos

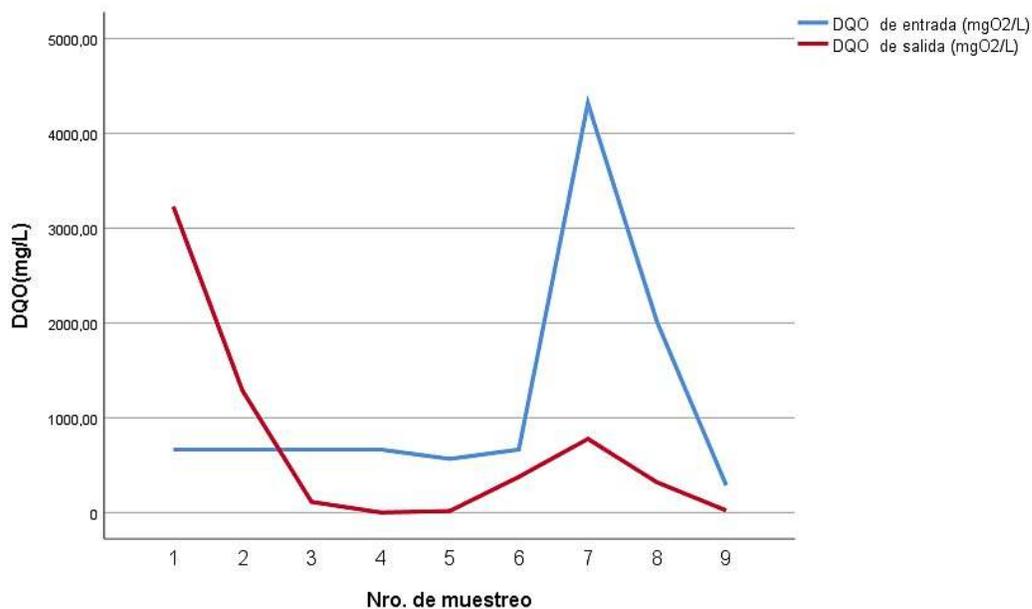
A partir de la información brindada por la Figura 1, se abstrae que la distribución no sigue un comportamiento normal y presenta asimetría negativa a la izquierda, predominando valores de pH a la derecha mayores (entre 5.5 y 7.5) por sobre los menores localizados a la izquierda e inferiores a 5 unidades de pH. Al aplicarse la prueba de Wilcoxon, se evidencia que el humedal provee la estabilidad requerida para mantener el pH a lo largo del tiempo y cumpliendo con la RES 0631 (MinAmbiente, 2015), con un pH mediano del efluente entre 5 y 9. Es preciso mencionar que la mediana de esta distribución se encuentra también en armonía con los límites de seguridad para la conservación de la biota acuática en la India (CPCB, 2020) 5.5 y 9 (Selvamurugan et al., 2010).



**Figura 1.** Histograma de la distribución de los valores de pH en el efluente del sistema

### DQO

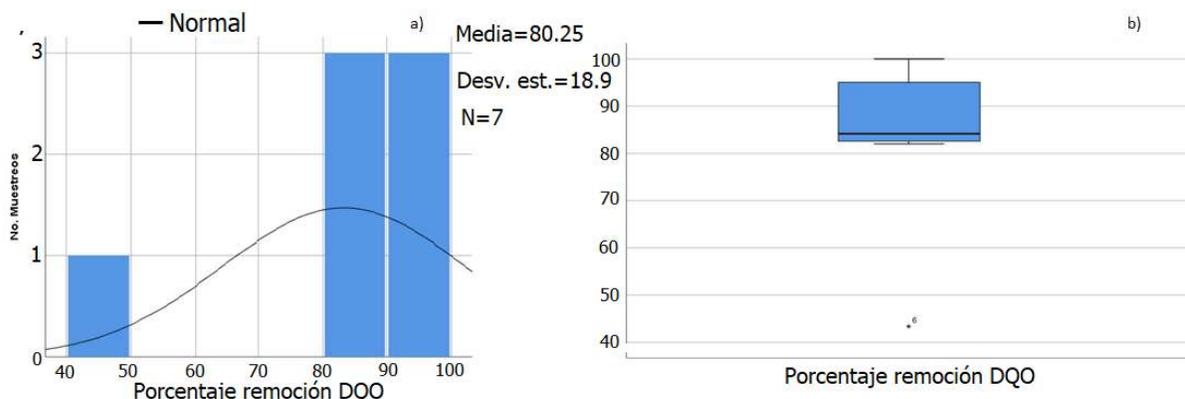
La DQO en el influente presentó un comportamiento estable desde el muestreo 1 al 6 (Figura 7), después del cual alcanza el valor máximo (4315 mg/L).



**Figura 7.** Comportamiento de la DQO en el influente y efluente del sistema durante los muestreos

Posterior a este, las concentraciones de DQO tendieron a decrecer. Los factores primordiales que determinaron estas fluctuaciones en los muestreos fueron las cantidades de mucílago fermentado, la pulpa transferida a las ARBH (Solarte y Urrea, 2015) y el número de lavados que se le efectuaron al café. Se obtuvo una remoción de 84.17%, similar a los de otros estudios (Fia et al., 2010) con 85%, quienes a un menor tiempo de residencia (ver Glosario) obtuvieron eficiencias más bajas; por lo cual, se puede plantear que el tiempo de residencia de las aguas en el humedal provee las condiciones para alcanzar un porcentaje de remoción que puede encontrarse con un 95% de confianza entre 65.70 y 100%, siempre y cuando el sistema sea estable y consistente en la remoción de este parámetro.

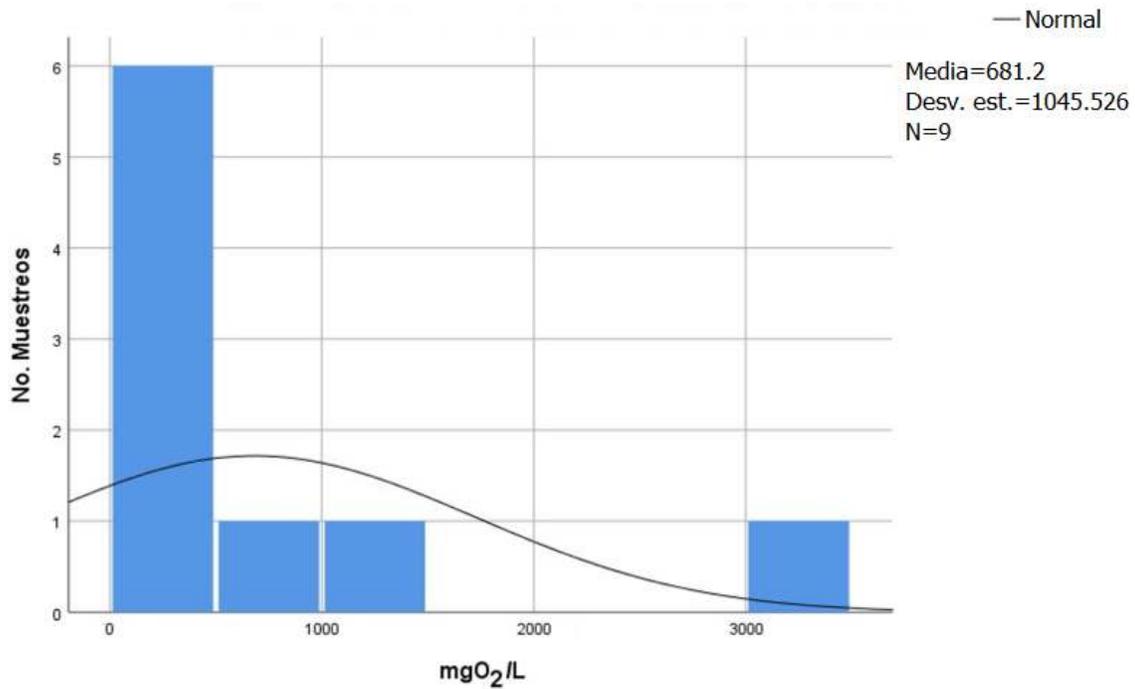
A partir del análisis del diagrama de caja (Figura 8b) se observa que la altura de la caja no fue significativa, lo que indica que hubo baja variabilidad en la remoción de DQO a causa de que el humedal se comportó como un sistema estable en la remoción de este parámetro. Se observa que la distribución no sigue un comportamiento normal (Figura 8a), presentando asimetría negativa de 0-1.88, en la que predominan los porcentajes de remoción mayores sobre los menores.



**Figura 8.** Resultados de DQO obtenidos a) Histograma de la distribución de los porcentajes de remoción de DQO b) Diagrama de caja para los porcentajes de remoción de DQO

La zona radicular de la macrófita *Phragmites australis*, crea un ambiente aerobio adecuado al que se adhieren los microorganismos protagonistas de la oxidación química o mecanismo que remueve en mayor proporción la materia contaminante (Zhu et al., 2014).

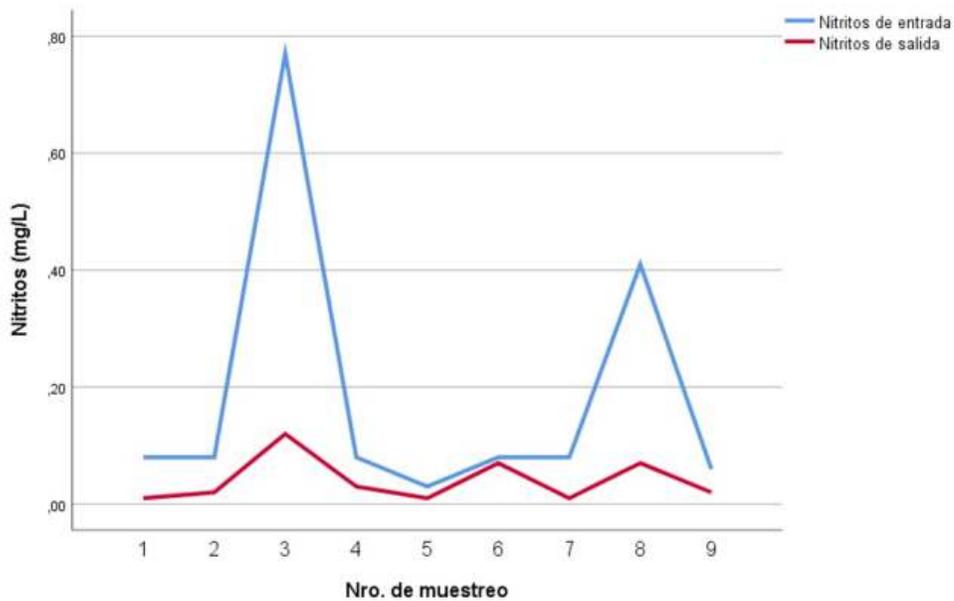
Una vez realizado el análisis de la distribución de las concentraciones de la DQO a la salida del sistema (Figura 9), se abstrae que ésta no se comporta como una distribución normal y es asimétrica a la derecha; reflejando que a la salida del sistema predominan las concentraciones bajas de DQO por sobre las altas. En este caso a pesar de haber obtenido una mediana de la concentración de DQO de salida inferior a 650 mg/L (RES 0631, MinAmbiente, 2015), la prueba Wilcoxon aprueba con un nivel de significancia del 0.05 la hipótesis nula; es decir, no se puede afirmar que la mediana será mucho menor al valor máximo permisible, porque podría llegar a ser igual a éste. A nivel de los factores ambientales que alteran la remoción de DQO, se identifica la incidencia de altas precipitaciones en la vereda "El Carmen", las cuales fueron significativas durante los muestreos en los que se obtuvieron mayores concentraciones a la salida; un resultado semejante fue reportado por Romero-Aguilar et al. (2009), quienes evidenciaron a la salida de un humedal construido una DQO de 7 mg/L en temporada de estiaje y otra de 30mg/L en temporadas de lluvia, ratificando dos hechos; el primero que la DQO incrementa en cuanto lo hacen las precipitaciones y el segundo que el porcentaje de remoción del sistema se reduce al incrementar las lluvias, probablemente por arrastre con la escorrentía de materia orgánica del suelo.



**Figura 9.** Histograma de distribución de las concentraciones de DQO en el efluente del sistema

### Nitritos

Se obtuvieron concentraciones bajas de nitritos en el efluente, que no superaron el valor de 0.12 mg/L (Figura 10).



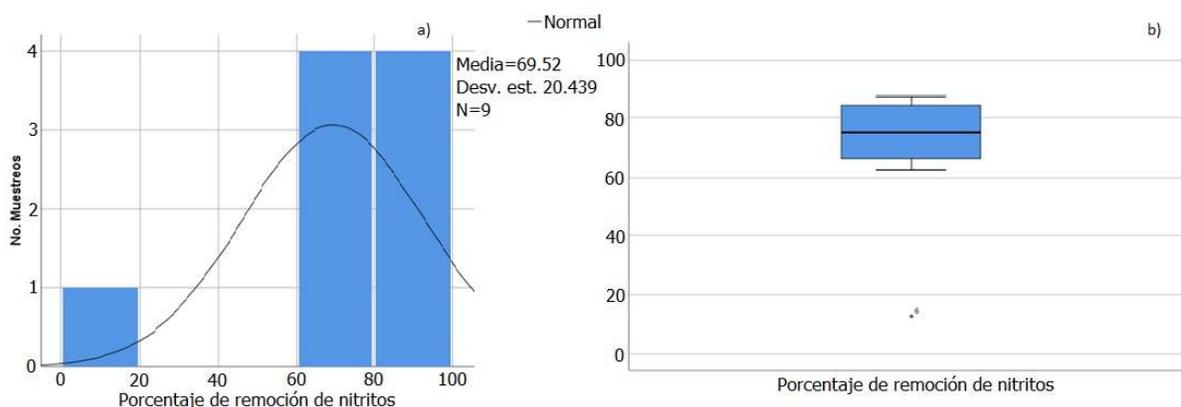
**Figura 10.** Comportamiento de los nitritos en el influente y efluente del sistema durante los muestreos

El pico máximo presentado a la salida del humedal puede ser explicado por el hecho de que las plantas de *Phragmites* no estaban siendo cosechadas periódicamente, lo que en teoría debiese inducir a la descomposición de la biomasa y su contenido de nitrógeno, liberándose así en las ARBHC carbono y nitrógeno. Algunas fracciones de éste se someten a procesos anaerobios<sup>4</sup> en el humedal y algunos residuos pueden ser translocados hasta el rizoma (Vymazal, 2007).

Las concentraciones bajas de nitritos obtenidos son evidencia de que estos iones formados por la nitrificación desaparecen rápidamente de las aguas residuales al interior del humedal a causa de su veloz transformación por medio de desnitrificación; también suelen ser inmovilizados bajo la retención de plantas, adsorción y precipitación (Kuschik et al., 2003). Para comprender los posibles procesos de remoción de nitrógeno que se efectuaron en el humedal es necesario mencionar que estos son diversos en los HCFSSH, variando desde las rutas biológicas dentro de las que se encuentran la nitrificación, amonificación, desnitrificación y absorción por parte de microorganismos y plantas, hasta las de índole físico las cuales incluyen volatilización del amonio y adsorción. (Saeed y Sun, 2012). En principio se presenta la conversión bacteriana de nitrato a nitrito y posteriormente el nitrito es convertido a NO, N<sub>2</sub>O y gas de nitrógeno (N<sub>2</sub>) (Arias, 2004; Tanner, 2004). Dado que estos tres productos finales son gaseosos se liberan a la atmósfera, predominando la liberación del gas N<sub>2</sub>.

Otro mecanismo de remoción de nitrógeno importante, pero dado en menor medida en el HCFSSH evaluado, es la mineralización. Durante la mineralización, el N orgánico se convierte biológicamente en amoníaco en un pH óptimo de 6.5-8.5, y luego se convierte en formas orgánicas a través de reacciones de desaminación y liberación de energía. Este proceso es utilizado por microorganismos para sus funciones metabólicas, y el amoníaco resultante se incorpora directamente a la biomasa microbiana (Kadlec y Knight, 1996; Vymazal, 2007). La planta *Phragmites* tiene como función la liberación de materia orgánica que pueden alcanzar hasta 10 y 100 mg de compuestos solubles/g de raíces de compuestos solubles (Wang et al., 2012).

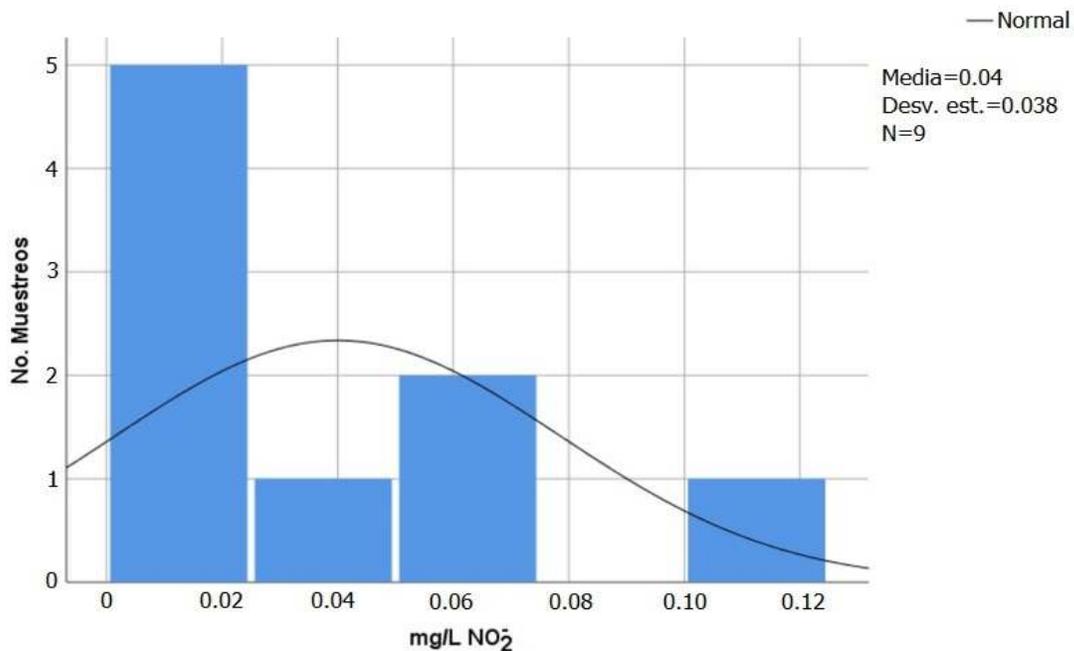
El histograma y la curva normal (Figura 11a) muestra una asimetría negativa (-2.11), lo cual significa que predominaron los valores mayores de porcentajes de remoción de nitritos, entre 60 y 100% localizados en torno a la mediana y un valor extremo de 12.5%, por fuera del diagrama de caja (Figura 11b). El diagrama de caja también evidencia que el sistema resultó ser estable en la remoción de nitritos (N-NO<sub>2</sub>) (variabilidad aproximada de 17%); así pues, se presentó una tendencia hacia el centro o mediana de la distribución, 75%.



**Figura 11.** Resultados obtenidos de nitritos: a) Histograma del porcentaje de remoción de nitritos  
b) Diagrama de caja para los porcentajes de remoción de nitritos

<sup>4</sup> Anaerobio y aerobio son palabras derivadas del griego y del latín, de *aeros*, aire y *bios*, vida con el alfa privativa para anaerobia (sin aire), por lo que es absurdo usar en español, una lengua romance, la terminación del inglés *anaerobic* y *aerobic* [Nota de los(as) editores(as)]

A partir del histograma y curva de normalidad (Figura 12), se encuentra que la distribución de concentraciones de nitritos a la salida no sigue una tendencia normal y es de tipo asimétrica a la derecha, predominando concentraciones de nitritos menores, por sobre las mayores. Al aplicarse la prueba de Wilcoxon se evidencia que, aún habiendo obtenido una mediana de concentración de nitritos inferior al criterio de calidad para la conservación de la vida acuática de 0.06mg/L (WHO, 1996), hay suficiente evidencia estadística para afirmar que la mediana de la concentración de nitritos en el efluente puede llegar a ser 0.06 mg/L. A partir de los resultados arrojados por la prueba es preciso mencionar que, aunque el sistema se comportó óptimamente en la remoción de nitritos, se debe incrementar su eficiencia y estabilidad para garantizar que estos iones de los efluentes estén permanentemente en concordancia con el criterio de calidad considerado.

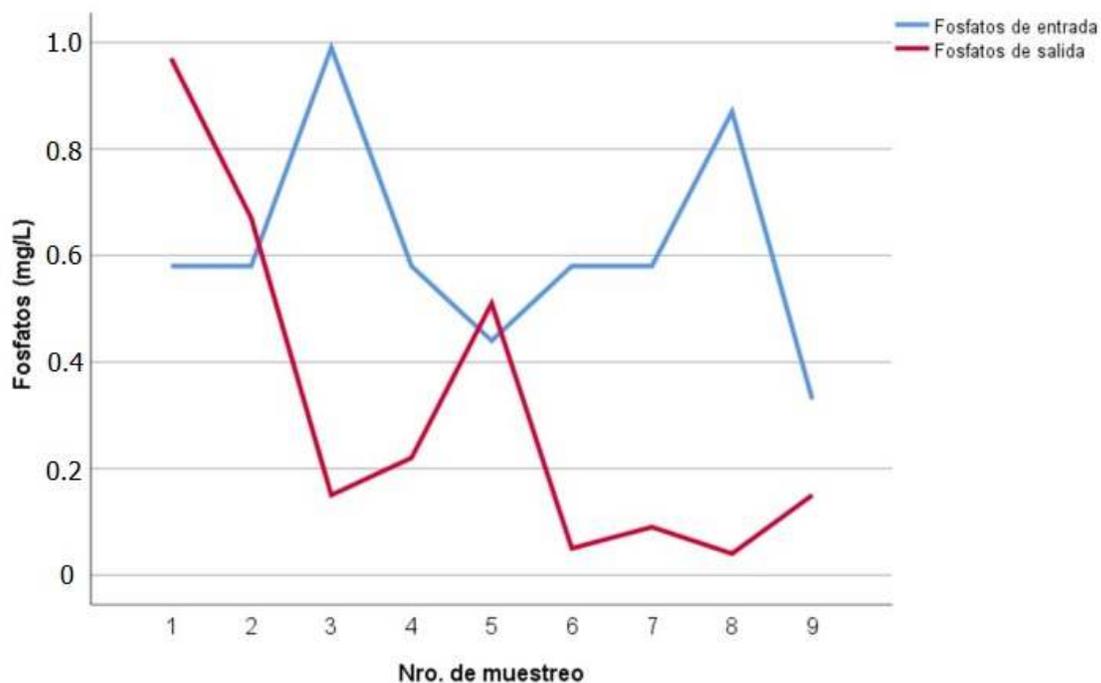


**Figura 2.** Histograma de la distribución de las concentraciones de nitritos en el efluente del sistema

### Fosfatos

Se puede aseverar que la mediana del porcentaje de remoción de fosfatos ha incrementado desde que el sistema fue puesto en marcha en el año 2016, desde 74.03% (Solarte y Urrea, 2015), hasta 84.67%, debido a la óptima adsorción ejercida por la grava, además de otros factores como el tiempo de residencia hidráulica de 11 días el cual, aún después de 2 años de implementación del humedal, provee las condiciones idóneas para que se establezca un contacto adecuado entre las "aguas mieles" del café y la grava (Vohla et al., 2007; Vymazal, 2007) y la configuración fisiológica de la planta *Phragmites australis*, que permite la aireación del lecho, formando zonas aerobias entorno a las raíces, bajo las cuales se pueden incrementar los potenciales redox en el sustrato y los niveles de sustancias húmicas aportadas por las plantas (Tanner et al., 1995).

Se puede observar que durante los dos primeros muestreos se obtuvieron concentraciones de fosfatos superiores en el efluente del sistema (Figura 13). Este fenómeno puede haberse presentado como consecuencia de un alto porcentaje de plantas y brotes muertos de las macrófitas de la especie *Phragmites australis* dentro del humedal por inadecuado mantenimiento. Este material vegetal en descomposición al año después de la senescencia tiene la particularidad de liberar los nutrientes acumulados en sus estructuras hacia tierras húmedas, incrementando así la concentración de fosfatos en el efluente de ARBHC (Kadlec y Knight, 1996).

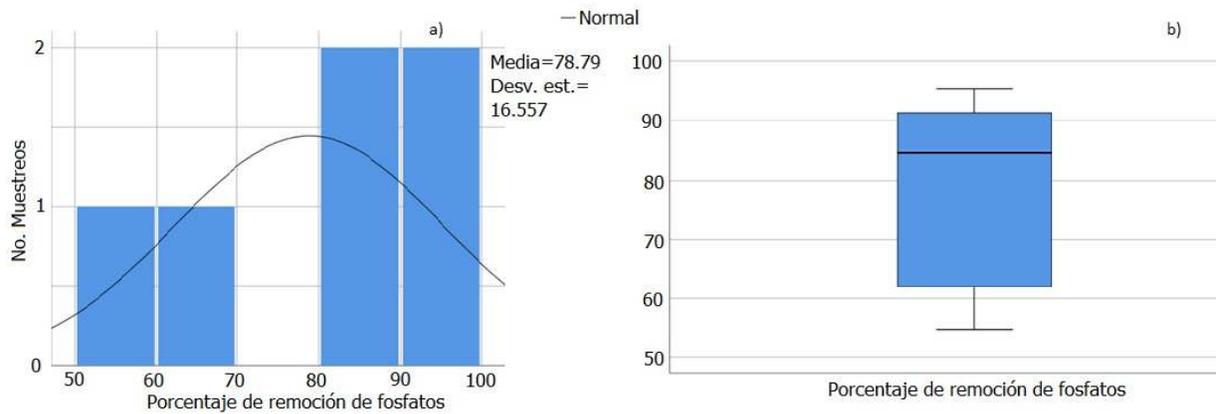


**Figura 13.** Comportamiento de los fosfatos en el influente y efluente del sistema durante los muestreos

Después del quinto muestreo, las concentraciones de fosfatos del efluente decrecieron, resultando inferiores a las de la entrada del humedal, lo que indica que el sistema efectuó el reciclaje y retención de este nutriente una vez que se realizó el respectivo mantenimiento. Con un 95% de confianza, se espera que las concentraciones de fosfatos en el efluente estén entre 0.066 y 0.568 mg/L, con una concentración mediana de 0.15 mg/L. A pesar de estar por debajo del límite permitido para agua potable en Colombia (RES 2115, MinAmbiente, 2007), se supera el límite de concentración para evitar la eutrofización en el cuerpo receptor (0.02 mg/L).

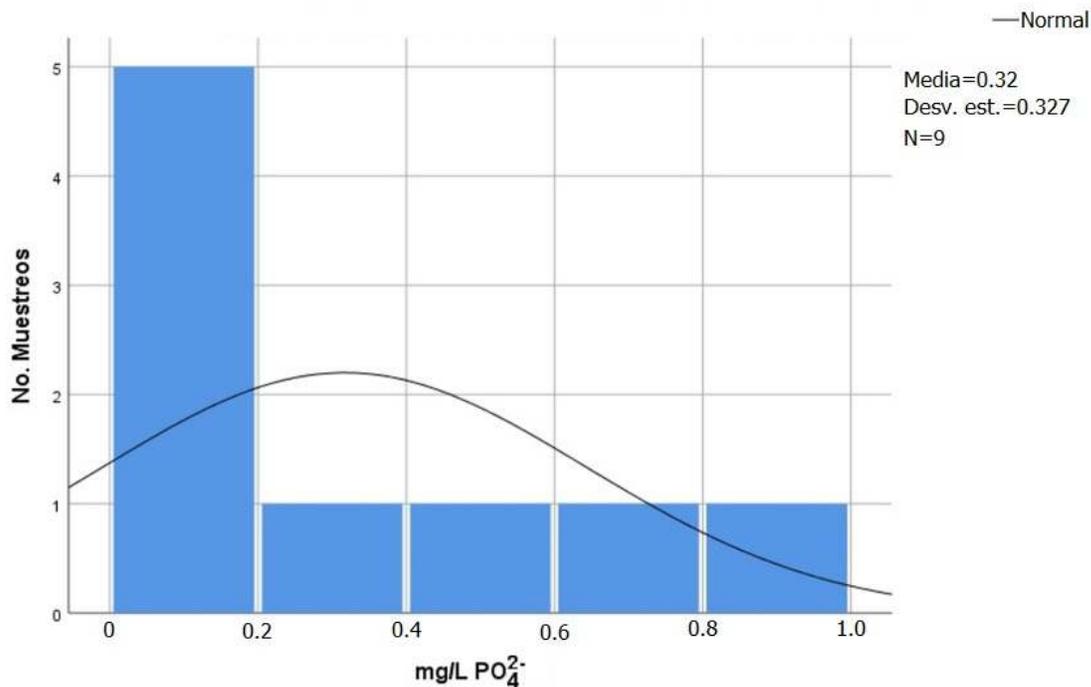
Los mecanismos de retención de fósforo predominantes en el sistema son la adsorción y precipitación y, en menor proporción, la captación por parte de los microorganismos y las plantas, la absorción por la microbiota constituida por bacterias, algas, hongos y macro invertebrados, entre otros (Richardson et al., 1997; Vymazal, 2007). La planta *Phragmites australis* absorbe la mayor parte del fósforo a través de sus raíces y, en menor proporción, por sus brotes almacenando el fósforo en la biomasa aérea de macrófitas emergentes a corto plazo. Algunos autores reportan en sus estudios los valores de la reserva permanente de fósforo en la superficie de tejido vegetal de macrófitas sumergidas siendo de 0.1 a 6.8 g de P/m<sup>2</sup> (Johnston, 1991) y 0.1 a 11 g de P/m<sup>2</sup> (Vymazal, 2007). Después del decaimiento de la planta el fósforo se libera desde la biomasa al ecosistema del humedal, pudiendo incorporarse en el protoplasma de los organismos degradadores.

La distribución del histograma tiene una leve asimetría negativa de 0.88 (Figura 14a). La superposición de la curva normal de la distribución sobre el histograma indica una concentración de valores altos de remoción de fosfatos a la derecha, con aproximadamente el 67% de los valores entre 80 y 100%. El diagrama de caja (Figura 14b), presenta una variabilidad considerable con un ancho de 29.31%.



**Figura 14.** Resultados de fosfatos obtenidos: a) Histograma de porcentaje de remoción de fosfatos  
b) Diagrama de caja para los porcentajes de remoción de fosfatos

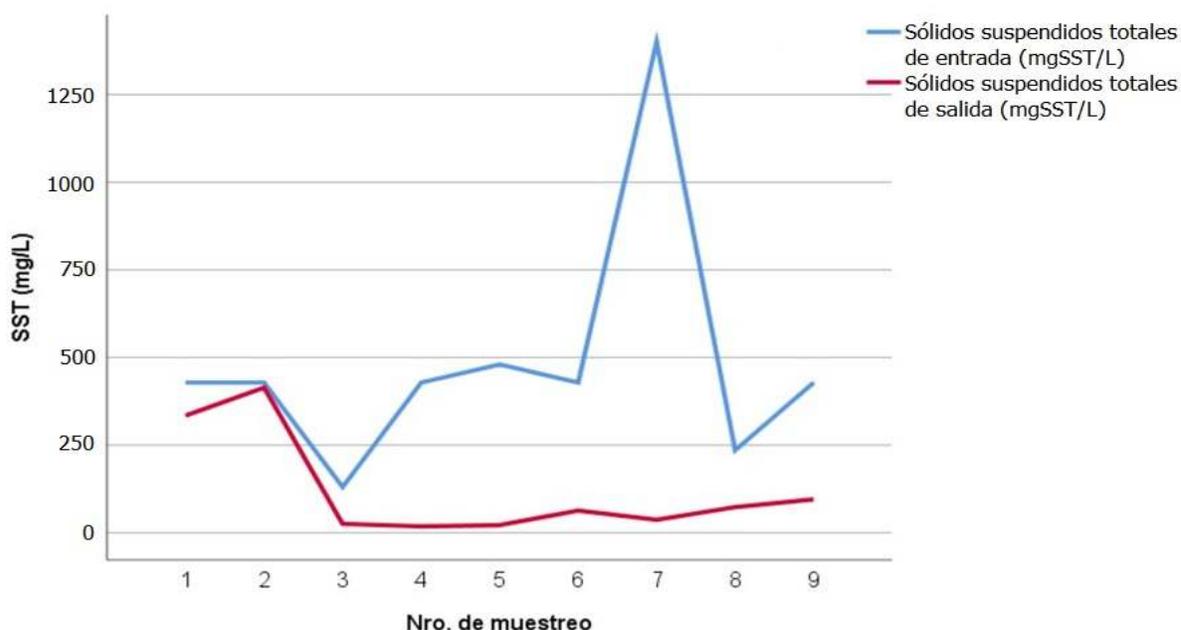
En el histograma se evidencia que la curva presenta asimetría positiva; reflejando que a la salida del sistema predominan las concentraciones bajas de fosfatos por sobre las altas (Figura 15). Los resultados de la prueba de Wilcoxon demostraron que la mediana (0.15 mg/L) es superior al criterio de calidad (0.02 mg/L), por lo cual, hay suficiente evidencia estadística para concluir que las concentraciones de fosfatos de salida tienden a sobrepasar el criterio de calidad para evitar eutrofización. En este sentido, se tendría que incrementar considerablemente la eficiencia del sistema atendiendo al hecho de que el criterio supuesto es incluso más exigente que el orientado por la Resolución 2115 (MinAmbiente, 2007) que brinda un valor máximo permisible para agua potable de 0.5 mg/L.



**Figura 15.** Histograma de la distribución de las concentraciones de fosfatos en el efluente del sistema

### Sólidos suspendidos totales (SST)

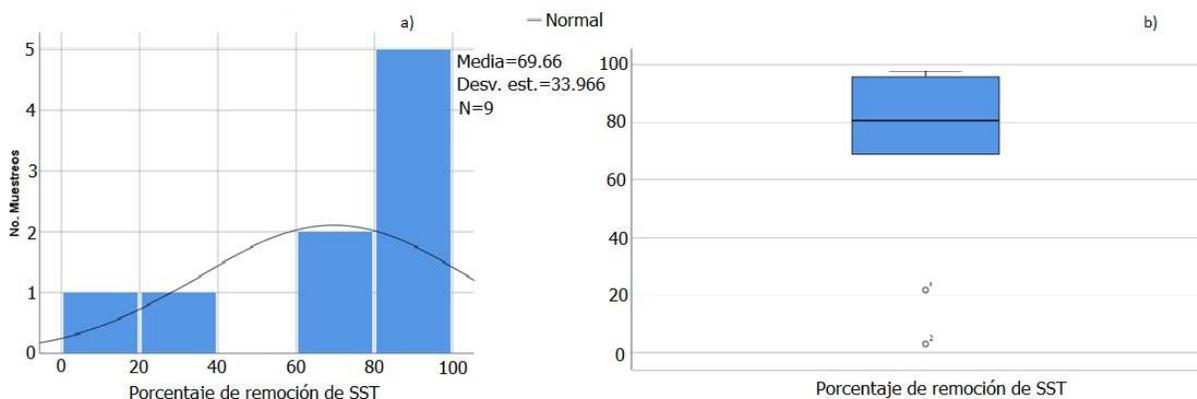
El diagrama de líneas (Figura 16) muestra que las concentraciones de SST que ingresaron al sistema fluctuaron entre 130 mg/L y 1400 mg/L, variaciones que se presentan como consecuencia de que la cantidad de café sometida al proceso de beneficio húmedo difería en cada muestreo y con ello el agua utilizada en los lavados presentaba diferentes concentraciones de estos compuestos orgánicos. De ahí que en investigaciones como la realizada por Cruz-Salomón et al. (2017), las concentraciones de SST en ARBHC, de entre 7000–10,900 mg/L, no hayan presentado tendencia estacional ni temporal aparentes, concluyendo que las concentraciones de estos sólidos suspendidos totales varían conforme lo hace la cantidad de agua utilizada para el procesado de granos de café y la cantidad de pulpa y mucílago liberado en el respectivo lavado.



**Figura 16.** Comportamiento de los sólidos suspendidos totales (SST) en el influente y efluente del sistema durante los muestreos

El histograma de la distribución de porcentajes de remoción de SST (Figuraa) refleja que en el 77% de los muestreos realizados se obtuvieron porcentajes de remoción considerablemente altos, de entre 60 y 100%, predominando los encontrados entre 80 y 100% de remoción con una mediana, 80.77%. El diagrama de caja (Figurab) sugiere que la remoción de sólidos suspendidos totales no presentó variabilidad considerable a lo largo del periodo de muestreo evidenciando que el humedal se comportó como un sistema estable en la remoción de este parámetro. En los primeros muestreos se encontraron porcentajes más bajos de remoción por fuera del intervalo intercuartil (21.9 y 3.36%), predominando la sedimentación y la retención provistos a través de vegetación como principales mecanismos físicos que mayormente remueven SST en los HCFSSH. A partir del tercer muestreo la eficiencia del sistema incrementó considerablemente, alcanzando un valor máximo de 97.38% de remoción. Otros autores también demostraron la efectividad de los HCFSSH para la remoción de SST. Tal es el caso de Rossmann et al. (2013) con un 84% quienes evaluaron la eficiencia de remoción de SST ejercida por en un HCFSSH a escala piloto sembrado con *Lolium multiflorum* y con grava gruesa. Por su parte, Quipuzco y Ushñahua (2002) reportaron una remoción de SST de 97.2% en un HCFSSH constituido por substratos de grava y arena y sembrado con plantas de la especie *Phragmites australis* para el

tratamiento de aguas negras, explicando que esta eficiencia es producto de la mineralización efectiva que se da en este tipo de humedales.



**Figura 17.** Resultados de SST obtenidos. a) Histograma del porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) b) Diagrama de caja para los porcentajes de remoción de los sólidos suspendidos totales (SST)

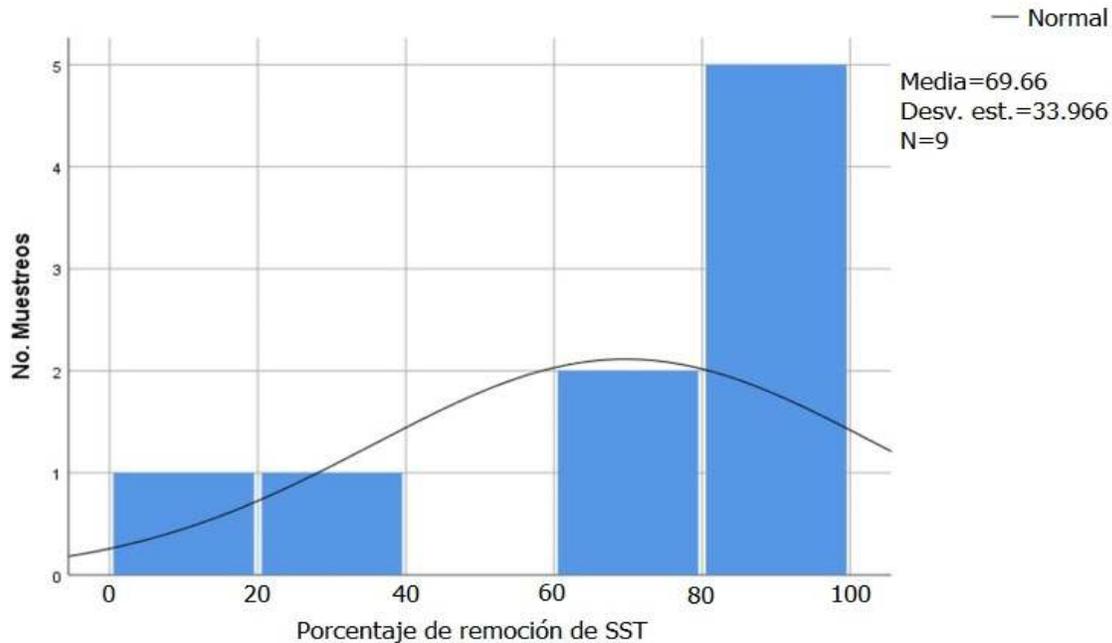
Los HCFSSH sembrados e inundados son eficientes en la reducción de SST gracias a la incidencia de procesos físicos originados en el sustrato tales como: Sedimentación en los intersticios, retención por restricción al flujo (filtración) y adhesión a los gránulos del material de soporte, comportándose como filtro horizontal (Fia et al., 2010).

Las cantidades de SST en las ARBHC provienen en mayor proporción de las pectinas, proteínas y glúcidos de la pulpa y el mucílago (Cruz-Salomón et al., 2017), además de los sólidos de la pulpa del café y del mucílago digerido, en los cuales se suelen acumular las sustancias tóxicas de las ARBHC, es decir taninos, alcaloides y polifenoles (von Enden et al., 2002). La importancia de la macrófita *Phragmites australis* radica en que sus densas raíces retienen materia suspendida y, además, favorecen la sedimentación de los SST, pues ralentizan la turbulencia y velocidades del flujo evitando así caminos preferenciales y arrastre de materia suspendida a la salida del sistema (Rossmann et al., 2013).

El histograma de la distribución de las concentraciones de SST a la salida (Figura 18) presenta una asimetría positiva de 1.57, prevaleciendo a la derecha concentraciones bajas de entre 0 y 100 mg/L por sobre las mayores de entre 200 y 500 mg/L. La prueba de Wilcoxon rechaza la hipótesis nula con a un nivel de significancia del 95%, acogiendo a la hipótesis alternativa, estando por debajo del valor máximo permisible otorgado por la RES 0631 (MinAmbiente, 2015) (400 mg/L) con un valor de 62.9 mg/L, por lo cual se puede afirmar que las concentraciones de salida de SST tendieron y probablemente tenderán a ser menores al valor máximo permisible.

## Discusión final

Se mencionó al inicio que se tenía, como parte del sistema de tratamiento, una laguna acidogénica que reducía el contenido de sólidos y materia orgánica. Su tiempo de residencia hidráulica, de 2 días, permite que se hidrolicen los compuestos de alta masa molecular o sustratos neutros en las ARBHC como las pectinas y protopectinas y, a su vez, se acidifiquen los compuestos que han sido hidrolizados o se encuentran en forma soluble como los glúcidos propios del mucílago y la pulpa del café (CENICAFÉ, 2011; Dávila y Flores, 2016). Las ARBHC, debido justamente a la presencia de organismos anaerobios en la laguna y a su propia composición, hace que se generen ácidos grasos como los ácidos acético, propiónico y butírico (CENICAFÉ, 2011), los cuales le aportan iones hidronio causantes de que el pH alcance valores de entre 3 y 4 unidades.



**Figura 18.** Histograma de distribución de las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) en el efluente sistema

Una parte interesante de esta fase del tratamiento sería probar con tiempos de residencia un poco más largos donde se transformen parte de estas biocomunidades microbianas en totalmente anaerobias y empiecen a incrementar el pH por su autoproducción de bióxido de carbono. Otra opción puede ser instalar un pequeño tanque que opere en condiciones propiamente anaerobias. Cualquiera de estas dos opciones, ya sea de la propia laguna o la del tanque sencillo de cloruro de polivinilo que se instalara después de ella, haría que el efluente tuviera ya un pH neutro haciendo que el humedal artificial sea aún más eficiente (Bernal-González y Durán-de-Bazúa, 2024).

## Conclusiones

Se alcanzaron eficiencias promedio de remoción de contaminantes de 84% de DQO, 75% de nitritos, 84.67% de fosfatos y 81% de SST del ARBHC en el sistema de humedal construido y plantado con *Phragmites australis* durante este lapso en que la universidad apoyó a los propietarios de la finca.

Los parámetros de salida evaluados se encuentran por debajo de lo exigido por la normativa colombiana (Res. 0631, MinAmbiente, 2015).

De acuerdo con los resultados de la prueba de Wilcoxon, el sistema debe incrementar su estabilidad y eficiencias, dentro de lo cual se sugiere implementar un mecanismo previo al humedal que neutralice la acidez entrante.

Al comparar el comportamiento que tuvo el sistema en esta investigación con respecto al evaluado por Solarte y Urrea (2015), así como los de una referencia muy reciente (Mihret et al., 2024), para la remoción de materia orgánica medida en términos de DQO, material suspendido y nutrientes medidos en términos de nitritos y fosfatos, es posible afirmar que el humedal se estabilizó, en tanto que aumentó su eficiencia de remoción en todos los parámetros comparados. Este comportamiento puede ser el resultado del tiempo óptimo de contacto entre el material de soporte y las ARBHC, la

maduración y adaptación de las plantas a las características de dichas aguas residuales, y el desarrollo óptimo de sus raíces, fundamentales en todos los procesos de remoción de contaminantes.

## Glosario

Sigla o término	Significado
Alfa ( $\alpha$ )	Nivel de confiabilidad (95%)
ARBHC	Aguas residuales del beneficio húmedo del café (conocidas en Colombia como <i>aguas mieles</i> )
Arroba	Unidad de medida de masa <sup>5</sup> equivalente a 12.5 kilogramos. Se emplea en las operaciones de comercialización del café dentro de Colombia ( <a href="https://federaciondecafeteros.org/wp/glosario/arroba/#:~:text=Unidad%20de%20peso%20equivalente%20a,del%20caf%C3%A9%20dentro%20de%20Colombia">https://federaciondecafeteros.org/wp/glosario/arroba/#:~:text=Unidad%20de%20peso%20equivalente%20a,del%20caf%C3%A9%20dentro%20de%20Colombia</a> )
CE	Concentración en mg/L de la variable medida a la entrada del humedal en el muestreo X
CENICAFÉ	Centro Nacional de Investigaciones de Café (Colombia)
C <sub>s</sub>	Concentración en mg/L de la variable medida a la salida del humedal en el muestreo X
cm	Centímetros
CPCB	Siglas en inglés para <i>Central Pollution Control Board, Ministry of Environment, Forest and Climate Change, Water Pollution, Air Pollution, Noise Pollution, etc.</i> (India)
CRC	Corporación Autónoma Regional del Cauca
DBO <sub>5</sub>	Demanda bioquímica de oxígeno a cinco días
DQO	Demanda química de oxígeno
HCFSSH	Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal
S	Segundos
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences: Software utilizado para realizar la captura y análisis de datos para crear tablas y graficas con datos complejos tiene la capacidad de gestionar grandes volúmenes de datos y es capaz de llevar a cabo análisis de texto entre otros formatos más
kg	Kilogramo
L	Litros
mg	Miligramos
mm	Milimetro
N <sub>2</sub>	Nitrógeno
NO	Óxido nítrico
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Nitritos
OMS	Organización Mundial de la Salud ( <i>WHO</i> en inglés, <i>World Health Organization</i> )
PBHC	Proceso de beneficio húmedo del café
pH	Potencial de hidrógeno
P	Planta
P	Valor de probabilidad
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Fosfatos
SST	Sólidos suspendidos totales

<sup>5</sup> La masa y el peso NO SON SINÓNIMOS. La masa es una propiedad de los cuerpos y se mide en kg en el Sistema Internacional de Unidades. El peso es una fuerza que se aplica a los cuerpos y se mide en la unidad conocida como newton, N, en el sistema Internacional de Unidades. La confusión provino probablemente desde el uso de las básculas que pesaban cosas y personas y daban la masa de ellas pero las personas la confundían con el peso por su desconocimiento de las ciencias físicas [Nota de los(as) editores(as)]

<b>Sigla o término</b>	<b>Significado</b>
TRC	Tiempo de retención celular o de sólidos. Término usado en ingeniería para calcular el tiempo que una fase sólida permanece dentro de un sistema, en este caso, el humedal construido considerado como un reactor continuo (a régimen permanente) donde los sólidos forman una biopelícula adherida a la zona radicular y/o al soporte o empaque
TRH	Tiempo de residencia hidráulica. Término usado en ingeniería para calcular el tiempo que una fase líquida permanece dentro de un sistema, en este caso, el humedal construido considerado como un reactor continuo (a régimen permanente)
<i>WWWCP</i>	Siglas en inglés para <i>Wastewater from wet coffee processing</i>

## Reconocimientos

Los autores dan un especial agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca por el valioso apoyo que permitió el desarrollo del proyecto de investigación. Asimismo, los autores se disculpan porque, lamentablemente, no se pudieron modificar algunas cosas solicitadas por los evaluadores pues la autora principal se fue a continuar su formación académica a España y, por el momento, el humedal artificial objeto de esta investigación se quedó nuevamente en manos de los propietarios de la finca cafetalera o cafetera "El Pomorroso", por lo que no hay datos experimentales posteriores a esta fase de la investigación. Los autores esperan que los propietarios sigan teniendo éxito con el sistema con las recomendaciones dadas.

## Referencias bibliográficas

- Alcaldía Municipal de Sotará. 2018. Municipio de Sotará. Recuperado de <http://www.sotara-cauca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Álvarez, J.A., Ruíz, I., Soto, M. 2008. 'Anaerobic' digesters as a pretreatment for constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 33(1): 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.02.001>
- Arias, O. 2004. Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Tesina. Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, Barcelona, España.
- Bernal, F., Mosquera, D., Maury, H.A., González, D., Guerra, R., Pomare, A., Silva, M. 2003. Humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en la Corporación Universitaria de la Costa. Universidad del Valle, Instituto CINARA. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Pp. 149-155. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/aqua2003/hume.pdf>
- Bernal-González, M., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2024. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria química y de proceso. Libro electrónico para cursos. Pub. Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Facultad de Química, UNAM. 6ª edición, mejorada por la primera autora como material audiovisual para los cursos de posgrado en ingeniería química y ambiental. Enero 2024. Ciudad de México, México (libro-e en publicación).
- CENICAFÉ. 2011. Centro Nacional de Investigaciones de Café y Federación Nacional de Cafeteros. Construya su tanque-tina para la 'fermentación' y lavado de café. Avances Técnicos Cenicafé. N° 408. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt04081.pdf>
- CPCB. 2020. Guidelines for Setting up of Biodiversity Parks in Floodplains of Rivers of India, including River Ganga. Central Pollution Control Board Ministry of Environment, Forest and Climate Change. Government of India. October. New Delhi, India.
- Cruz-Salomón, A., Ríos-Valdovinos, E., Pola-Albores, F., Lagunas-Rivera, S., Meza-Gordillo, R., Ruiz-Valdiviezo, V.M. 2017. Evaluation of hydraulic retention time on treatment of coffee processing wastewater (CPWW) in EGSB Bioreactor. *Sustainability*. 10(1): 83. <https://doi.org/10.3390/su10010083>. Recuperado de: <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.3390/su10010083>
- Đã Dăng Trê. 2023. Standard and modern coffee processing wastewater treatment methods. Bối Ark\_Vietnam. <https://arkvietnam.com/en/standard-and-modern-coffee-processing-wastewater-treatment-methods>
- Dávila, E., Flores, C. 2016. Comparación técnica - económica del revestimiento de laguna de estabilización para el tratamiento de aguas residuales mediante el empleo de geomembranas y arcilla del distrito de Laredo. Tesis de grado, Universidad Privada Antenor Orrego. Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Civil. [http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/upaorep/3422/1/RE\\_ING.CIVIL\\_ESTHEFANY.DAVILA\\_CARLOS.FLORES\\_REVESTIMIENTO.DE.LAGUNA\\_DATOS.PDF](http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/upaorep/3422/1/RE_ING.CIVIL_ESTHEFANY.DAVILA_CARLOS.FLORES_REVESTIMIENTO.DE.LAGUNA_DATOS.PDF)

- Fia, R., de-Matos, A.T., de-Matos, M.P., Abreu, E.C., Fia, F.R.L. 2010. Tratamiento das águas do processamento dos frutos do cafeiro em filtro anaeróbico seguido por sistema alagado construído: I - remoção de matéria orgânica / Treatment of the wastewater of coffee fruit processing in anaerobic filter system followed by constructed wetland system: I - removal of organic material. *Engenharia Agrícola*. 30(6):1191-1202. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000600019>
- Guardia, D.Y. 2012. Estudio de la 'digestión'<sup>6</sup> anaerobia en dos fases para el tratamiento de las aguas residuales de despulpe del beneficio húmedo del café. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Madrid. Recuperado de: [http://oa.upm.es/14684/1/YANS\\_GUARDIA\\_PUEBLA.pdf](http://oa.upm.es/14684/1/YANS_GUARDIA_PUEBLA.pdf)
- Gururaj, A., Manoj-Kumar, B.M., Achyuth, K.N., Manoj, B.R. 2021. Coffee Processing Wastewater Management: An Overview. *Journal of Engineering Research and Reports*. 20 (11):52-61. DOI:[10.9734/jerr/2021/v20i1117405](https://doi.org/10.9734/jerr/2021/v20i1117405)
- Hernández, J., Hidalgo, G. 2000. Evaluación de tres metodologías para reducir los niveles de contaminantes en efluentes del tratamiento primario de las aguas residuales del procesamiento del café en Costa Rica. Proyecto de Licenciatura. Universidad EARTH, Guácimo, Costa Rica. <https://www.sciencedirect.com/search?qs=Environmental%20impact%20of%20coffee%20processing%20effluent%20on%20the%20ecological%20integrity%20of%20rivers%20found%20in%20gomma%20woreda%20of%20Jimma%20zone&how=25&sortBy=relevance>
- Ijanu, E.M., Kamaruddin, M.A., Norashiddin, F.A. 2020. Coffee processing wastewater treatment: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Applied Water Science*. 10(1). 12 p. Doi: 10.1007/s13201-019-1091-9
- Johnston, C.A. 1991. Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: Effects on surface water quality. *Critical Reviews in Environmental Control*. 21(5-6):491-565. <https://doi.org/10.1080/10643389109388425>. <https://unioncounty-fl.gov/wp-content/uploads/45-Sediment-and-Nutrient-Retention-by-Freshwater-Wetlands-Effects-on-Surface-Water-Quality.pdf>
- Kadlec, R.H., Knight, R.L. 1996. Tratamiento humedales. Lewis Publishers, Boca Ratón, FL, Estados Unidos.
- Kuschik, P., Wiessner, A., Kappelmeyer, U., Wei, Weissbrodt, E., Kaestner, M., Stottmeister, U. 2003. Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate. *Water Research*. 37(17):4236-4242. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00163-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00163-5)
- Laili, N., Indrasti, N.S., Wahyudi, D. 2022. Design of sustainable coffee processing wastewater treatment system using K-means clustering algorithm. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Paper Sci*. 1063 012032. doi:10.1088/1755-1315/1063/1/012032. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1063/1/012032/pdf>
- MinAmbiente. 2015. Resolución 0631. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia. Recuperada de <https://www.levex.info/levex/Resolucionmads631de2015.pdf>
- MinAmbiente. 2007. Resolución 2115. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia. [http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res\\_2115\\_de\\_2007.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf)
- Mihret, D., Gonse, A., Lamisso, S., Kannan, N. 2024. Constructed wetland-based wastewater treatment of a coffee-washing plant and its impacts: a case study of Kege processing plant, Ethiopia. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society* (2024) 73 (4): 804-817. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.008>
- Pabón, S.L., Suárez-Gélvez, J.H. 2009. Arranque y operación a escala real de un sistema de tratamiento de lodos activos para aguas residuales de matadero. *Ingeniería e Investigación*. 29(2):53-58. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-56092009000200008&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092009000200008&lng=en&tlng=es)
- Quipuzco-Ushñahua, L.U. 2002. Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. 5(1):52-57. <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/2295>
- Ramírez, V., Arcila, J., Jaramillo, A., Rendón, J., Cuesta, G., García, J., Baute, B.J. 2011. Variabilidad climática y la floración del café en Colombia. *Chinchiná: Avances técnicos* N° 407. Recuperado de <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/333>
- Richardson, C.J., Qian, S., Craft, C.B., Qualls, R.G. 1997. Predictive models for phosphorus retention in wetlands. *Wetlands Ecology and Management*. 4(3):159-175. Citado en: Vohla, C., Köiv, M., Bavor, H.J., Chazarenc, F., Mander, Ü. 2011. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands - A review. *Ecological Engineering*. 37(1):70-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.08.003>
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., Ortiz-Hernández, L. 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 25(3):157-167.
- Rossmann, M., Matos, A.T., Abreu, E.C., Silva, F.F., Borges, A.C. 2013. Effect of influent aeration on removal of organic matter from coffee processing wastewater in constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*. 128:912-919. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.045>
- Saeed, T., Sun, G. 2012. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of Environmental Management*. 112:429-448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.011>
- Selvamurugan, M., Doraisamy, P., Maheswari, M. 2010. An integrated treatment system for coffee processing wastewater using anaerobic and aerobic process. *Ecological Engineering*. 36(12):1686-1690. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.07.013>
- Solarte, C., Urrea, P. 2015. Evaluar la eficiencia de un sistema de tratamiento con humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal para la depuración de aguas residuales del beneficio húmedo del café. Tesis de pregrado. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

<sup>6</sup> La digestión es inherentemente anaerobia, por tanto, no necesita el adjetivo anaerobio [Nota de los(as)editores(as)]

- 
- Tanner, C.C. 2004. Nitrogen Removal Processes in Constructed Wetlands. In *Development in Ecosystems*. Wong, M.H. Ed. Vol. 1, pp. 331–346). Elsevier. Países Bajos. <https://enviro2.doe.gov.my/ekmc/wp-content/uploads/2016/08/1386299752-3-s2.0-B9780444516916500211-main.pdf>
- Tanner, C.C., Clayton, J.S., Upsdell, M.P. 1995. Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands - II. Removal of nitrogen and phosphorus. *Water Research*. 29(1):27-34.
- Ulsido, M.D., Geleto, M.-Z., Berego, Y.S. 2024. Wastewater management in wet coffee processing mills and their impact on the water quality status of Gidabo River and its tributaries, Southern Ethiopia. *Environmental Health Insights*. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/11786302241260953>. <https://doi.org/10.1177/11786302241260953>
- Vohla, C., Alas, R., Nurk, K., Baatz, S., Mander, Ü. 2007. Dynamics of phosphorus, nitrogen and carbon removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland. *Science of the Total Environment*. 380(1–3):66-74. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.012>
- von Enden, J.C., Calvert, K.C., Sanh, K., Hoa, H., Tri, Q. 2002. Review of coffee waste water characteristics and approaches to treatment. PPP Project, Improvement of Coffee Quality and Sustainability of Coffee Production in Vietnam". German Technical Cooperation Agency (GTZ). Pp. 1–10. <http://www.coffee.20m.com/CoffeeProcessing/CoffeeWasteWater.pdf>
- Vymazal, J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Journal of The Science of the Total Environment*. 380:48-65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Wang, R., Baldy, V., Périsol, C., Korboulewsky, N. 2012. Influence of plants on microbial activity in a vertical-downflow wetland system treating waste activated sludge with high organic matter concentrations. *Journal of Environmental Management*. 95(SUPPL.):S158-S164. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.03.021>
- WHO. 1996. *Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments, and Water in Environmental Monitoring - Second Edition*. Chapman, Debora. Ed. United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, World Health Organization, United Nations Environment Programme. UNESCO/WHO/UNEP. University Press, Cambridge, Great Britain. [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/41850/0419216006\\_eng.pdf;jsessionid=65626660FEEBEE0C92EE24ADF443C9?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/41850/0419216006_eng.pdf;jsessionid=65626660FEEBEE0C92EE24ADF443C9?sequence=1)
- Zambrano, D., Rodríguez, V. 2008. Sistemas para el tratamiento de aguas mieles: Investigación aplicada en beneficio de los productores cafeteros. CEBICAFÉ. Disciplina de calidad y manejo ambiental. 25p. Chinchiná, Colombia.
- Zhu, H., Yan, B., Xu, Y., Guan, J., Liu, S. 2014. Removal of nitrogen and COD in horizontal subsurface flow constructed wetlands under different influent C/N ratios. *Ecological Engineering*. 63:58-63. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.018>
- Zupanc, M., Vrhovsek, D., Stuhlbacher, A., Bulc, T. 2009. Treatment of wastewater in hybrid constructed wetland from the production of vinegar and packaging of detergents. 247:101-110.