

Horizontal Subsurface Flow Wetland with *Phragmites australis* for Reducing COD, pH, and Temperature in the Anchac-Huasi Wastewater Treatment Plant

Taquiri Reyes Kelly Raquel¹ ; Pineda Cazorla Claudia Sundely² 

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202022004@upc.edu.pe

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, u202022022@upc.edu.pe

Abstract– This study evaluated the efficiency of a horizontal subsurface flow constructed wetland (HSSF-CW), vegetated with *Phragmites australis*, in reducing physicochemical parameters such as Chemical Oxygen Demand (COD), pH, and temperature in the domestic effluent treated by the Anchac-Huasi Wastewater Treatment Plant (WWTP), located in the highlands of Ayacucho, Peru. A pilot-scale experiment was conducted using six treatment cells: three vegetated and three without plant cover (control), operated under hydraulic retention times (HRT) of 4 and 6 days. The characterization of the influent revealed a neutral condition (pH 7.03), an average temperature of 14.4 °C, and a significant organic load (COD 440 mg/L). The results showed that the vegetated cells achieved an average COD removal of up to 94.77 %, while the control units did not exceed 67.27 %. One-way ANOVA confirmed that both the presence of *Phragmites australis* and the increase in HRT significantly influenced the improvement in effluent quality. Vegetation contributed to pH stabilization and provided more consistent thermal regulation across cells, demonstrating its positive role in the system's performance. Moreover, longer HRTs enabled greater efficiency in the degradation of organic matter. This study supports the use of nature-based technologies as a viable and sustainable solution for wastewater treatment in rural communities.

Keywords-- constructed wetlands, *Phragmites australis*, COD, hydraulic retention time, wastewater treatment.

Horizontal Subsurface Flow Wetland with *Phragmites australis* for Reducing COD, pH, and Temperature in the Anchac-Huasi Wastewater Treatment Plant

Taquiri Reyes Kelly Raquel¹ ; Pineda Cazorla Claudia Sundely² 

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202022004@upc.edu.pe

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, u202022022@upc.edu.pe

Abstract– This study evaluated the efficiency of a horizontal subsurface flow constructed wetland (HSSF-CW), vegetated with *Phragmites australis*, in reducing physicochemical parameters such as Chemical Oxygen Demand (COD), pH, and temperature in the domestic effluent treated by the Anchac-Huasi Wastewater Treatment Plant (WWTP), located in the highlands of Ayacucho, Peru. A pilot-scale experiment was conducted using six treatment cells: three vegetated and three without plant cover (control), operated under hydraulic retention times (HRT) of 4 and 6 days. The characterization of the influent revealed a neutral condition (pH 7.03), an average temperature of 14.4 °C, and a significant organic load (COD 440 mg/L). The results showed that the vegetated cells achieved an average COD removal of up to 94.77 %, while the control units did not exceed 67.27 %. One-way ANOVA confirmed that both the presence of *Phragmites australis* and the increase in HRT significantly influenced the improvement in effluent quality. Vegetation contributed to pH stabilization and provided more consistent thermal regulation across cells, demonstrating its positive role in the system's performance. Moreover, longer HRTs enabled greater efficiency in the degradation of organic matter. This study supports the use of nature-based technologies as a viable and sustainable solution for wastewater treatment in rural communities.

Keywords– constructed wetlands, *Phragmites australis*, COD, hydraulic retention time, wastewater treatment.

I. INTRODUCCIÓN

En muchas regiones rurales del Perú, los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas están poco desarrollados o son inexistentes, lo que incrementa el riesgo de contaminación ambiental y problemas de salud pública [1], [2]. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Anchac-Huasi, ubicada en la sierra de Ayacucho, ejemplifica esta problemática: no se realiza monitoreo del efluente, la cámara de cloración se encuentra inoperativa y las descargas finales fluyen directamente al río Cachi, donde el ganado de la comunidad se alimenta de la vegetación cercana.

Ante esta situación, los humedales artificiales (HA), especialmente los de flujo subsuperficial horizontal (HSSF-CW, por sus siglas en inglés), ofrecen una alternativa sostenible y de bajo costo para comunidades pequeñas [3], [4]. Estos sistemas replican los procesos naturales de depuración mediante la interacción entre el sustrato, los microorganismos y las plantas acuáticas, permitiendo una eficiente remoción de

materia orgánica y estabilización de parámetros físicoquímicos [5].

Entre las macrófitas más efectivas empleadas en los HSSF-CW se encuentra *Phragmites australis*, una especie conocida por su alta adaptabilidad, tolerancia a condiciones contaminadas y capacidad para mejorar la transferencia de oxígeno hacia la rizosfera [6], [7]. Diversos estudios han demostrado su potencial para mejorar la remoción de DQO y mantener un buen rendimiento en diferentes estaciones y rangos de temperatura [8], [9].

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la eficacia de un humedal HSSF-CW vegetado con *Phragmites australis* en la reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el pH y la temperatura en los efluentes de la PTAR Anchac-Huasi. Específicamente, se analiza el efecto de la vegetación y del tiempo de retención hidráulica (TRH) bajo condiciones controladas, comparando TRH de 4 y 6 días sin lluvias. Los resultados buscan contribuir con soluciones descentralizadas basadas en la naturaleza, adaptadas a comunidades rurales andinas. Se desarrolló un ensayo piloto de 6 celdas con tratamiento de humedales subsuperficiales horizontales: tres de ellas vegetadas con *Phragmites australis* y tres sin presencia de macrófitas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Montaje experimental: sistema piloto de humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Se desarrolló un estudio piloto en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Anchac-Huasi, situada en el distrito de Vinchos, provincia de Huamanga, Ayacucho, Perú a 3210 m.s.n.m., con coordenadas UTM (WGS84) en la zona 18S, al Norte 8.530.577.80 y al Este 570,946.78. La instalación consistió en seis celdas rectangulares de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF-CW), con dimensiones de 2 m × 1 m × 0,7 m (largo × ancho × profundidad) y un volumen útil aproximado de 1140 L, construidas con geomembrana HDPE de 0.75 mm de espesor como revestimiento impermeable (Figura 1 y Figura 2). Cada celda fue equipada con un sistema de entrada y salida de agua utilizando tuberías de PVC y caños de regulación.

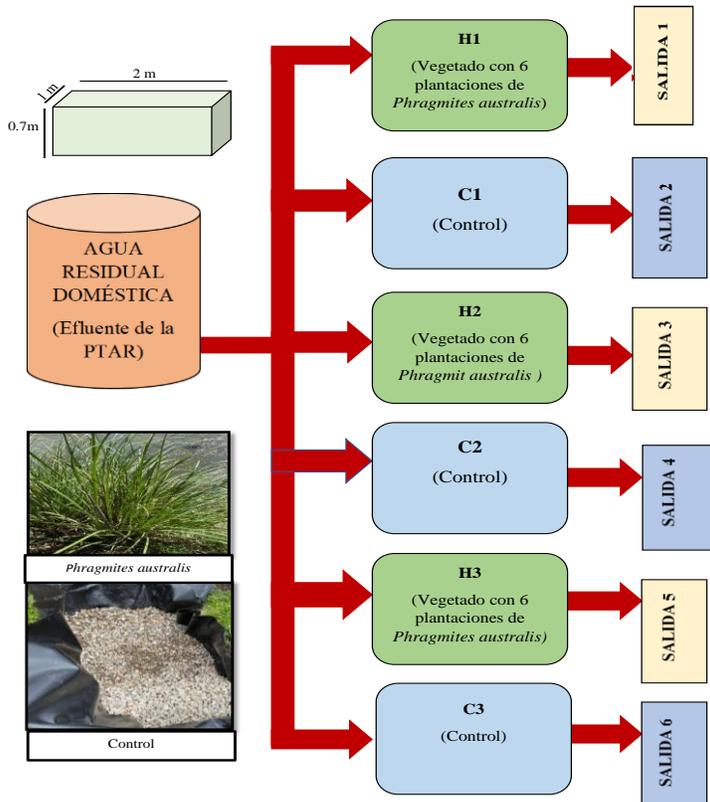


Figura 1. Configuración de un sistema piloto de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas con *Phragmites australis* unidades sin vegetación.



Figura 2. las etapas de construcción de las pozas (control y humedal con macrófita)

De las seis celdas, tres fueron sembradas con *Phragmites australis* (H1, H2, H3) y tres se mantuvieron sin vegetación como controles (C1, C2, C3). En cada celda vegetada se plantaron 6 macrófitas distribuidas uniformemente, previamente enjuagadas y estabilizadas en agua durante un periodo de adaptación (Tabla I y Tabla II). El sustrato fue colocado en tres capas: grava gruesa (20–40 mm) en las zonas de entrada y salida, y grava fina (10–20 mm) en el centro, con el fin de favorecer el desarrollo radicular y mantener la permeabilidad hidráulica.

TABLA I
RESUMEN DE HUMEDALES SUBSUPERFICIALES HORIZONTALES A ESCALA PILOTO CON Y SIN *PHRAGMITES AUSTRALIS* EN LA PTAR ANCHAC-HUASI.

Descripciones del funcionamiento	Tratamiento a escala piloto
Tipo de aguas residuales	Aguas residuales domésticas
Número de celdas de tratamiento	6
Volumen de cada celda (m ³)	1.4
Caudal promedio a las celdas(L)	0.8
Tiempo de Retención Hidráulica (TRH, día)	4 y 6
Especie de cobertura en los humedales	C1, C2 y C3 sin cobertura vegetal (control) H1, H2 Y H3 con <i>Phragmites australis</i>

TABLA II
DISTRIBUCIÓN DE LAS RÉPLICAS DEL PROYECTO

Tratamiento		Réplicas	Resultado
Presencia vegetal	Tiempo (días)		
Pozas sin plantas (Control)	4	3 réplicas	Diferencia de parámetros iniciales menos parámetros finales en dicho día
Pozas sin plantas (Control)	6	3 réplicas	Diferencia de parámetros iniciales menos parámetros finales en dicho día
Pozas con <i>Phragmites australis</i>	4	3 réplicas	Diferencia de parámetros iniciales menos parámetros finales en dicho día
Pozas con <i>Phragmites australis</i>	6	3 réplicas	Diferencia de parámetros iniciales menos parámetros finales en dicho día

B. Operación del sistema experimental y procedimientos de análisis

La configuración experimental operó con un volumen útil de 1140 litros por celda, bajo un régimen de flujo continuo. La entrada de las aguas residuales se mantuvo por encima del nivel de la columna de agua en cada humedal. El sistema fue evaluado con tiempos de retención hidráulica (TRH) de 4 y 6 días, seleccionados en base a referencias de estudios previos y criterios experimentales. El sistema HSSF-CW a escala piloto fue alimentado con efluentes provenientes de la PTAR de la comunidad de Anchac-Huasi, los cuales fueron previamente almacenados en un tanque de polietileno de 2000 litros conectado por gravedad a las unidades experimentales.

Antes de ingresar a los humedales, el agua residual pasaba por un tratamiento preliminar en la PTAR que incluía rejillas para la remoción de sólidos grandes, con el fin de evitar obstrucciones en el sistema. El flujo hacia las celdas de tratamiento se distribuyó mediante una red de tuberías que mantenía la operación por gravedad. El tanque de almacenamiento fue llenado una única vez antes del inicio del periodo de retención evaluado.

La calidad del agua del HSSF-CW se monitoreó la entrada del agua residual a este; y cada 4 días y 6 días de salida de cada celda (C1, C2, C3, H1, H2 y H3) durante un

período de una semana (de 15 de abril al 23 de abril de 2025). Se recogió una muestra del afluente utilizando con vaso de vidrio para ser ingresado a los 3 frascos de vidrio para la DQO con 100 ml, y se colocó en el cooler. Asimismo, mediante el phmetro se tomó el pH y la T°C. Respecto a recolección de los efluentes de los humedales artificiales con sus controles respectivos, se recogió una muestra del efluente utilizando otro vaso de vidrio de 1000 ml para los 6 frascos de 100 mL, etiquetados previamente y colocados en los cooler con pilas de hielo. Los 12 frascos con las muestras de aguas residuales fueron transportados en los coolers con las pilas refrigerantes hasta el laboratorio de SEDA Ayacucho Totorá para su evaluación paramétrica.

Parámetros como la temperatura y el pH se midieron utilizando un medidor de pH y Temperatura, profesional, Waterproof, Rango: 0.00-20.00 mS/cm, 0.00-10.00 ppt, AD32, Adwa; y la demanda química de oxígeno (DQO) se midieron con el método APHA 5220-B. Las características del afluente de los HSSF-CW se dan en la Tabla III. Estimamos los cambios en la concentración y la eficiencia de remoción para cada celda de tratamiento del HSSF-CW a escala piloto utilizando las ecuaciones (1).

$$E = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 \quad (1)$$

Donde C_{in} representa la concentración del afluente y C_{out} del efluente, para cada uno de los humedales.

En la presente investigación, se planteó como hipótesis nula que la presencia de la *phragmites australis* y el TRH en las celdas de tratamiento no generaba efectos significativos en la remoción de contaminantes. Para verificar esta premisa, se compararon los niveles de concentración del afluente y efluente en cada celda mediante una prueba t. Se consideró evidencia estadísticamente significativa cuando el valor de p fue inferior a 0,05, lo que permitió rechazar la hipótesis nula.

Tabla III
CARACTERÍSTICAS DEL AFLUENTE DE LOS HSSF-CW

Parámetros	Unidades	Concentraciones
pH	-	7.03
Temperatura	°C	14.4
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	440

III. RESULTADOS

A. Características del afluente de los HSSF-CW.

La caracterización del afluente de los humedales subsuperficiales horizontales (HSSF-CW) permite identificar las condiciones iniciales de las aguas residuales domésticas tratadas en el sistema experimental. Según los resultados obtenidos (Tabla III), el valor promedio de pH fue de 7.03, indicando una condición neutra en el afluente. La temperatura del agua residual al momento del ingreso al sistema fue de 14.4 °C, característica de climas templados de altura.

Asimismo, se registró una concentración de Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 440 mg/L, lo cual refleja una carga orgánica significativa en el agua residual doméstica. Estos valores representan las condiciones iniciales para evaluar la eficiencia del sistema en la remoción de contaminantes.

B. Características de los efluentes y eliminación de contaminante de los HSSF-CW.

La eficacia de remoción alcanzada por cada tratamiento experimental, considerando los dos tiempos de retención hidráulica (4 y 6 días), se basa en el análisis de 12 muestras recolectadas en campo durante el periodo de monitoreo. Los resultados de eficacia para los parámetros pH, temperatura y DQO se resumen en la Tabla IV.

Tabla IV
EFICACIA DE LOS EFLUENTES DE CADA CELDA HSSF-CW (C1, C2, C3, H1, H2 Y H3)

Parámetros	Afluente (mg/L)	C1				H1			
		Efecto (mg/L)		Reducción (%)		Efecto (mg/L)		Reducción (%)	
		TRH (4 días)	TRH (6 días)			TRH (4 días)	TRH (6 días)		
pH	7.03	6.9	7.13	1.85	-1.42	6.89	7.2	1.99	-2.42
Temperatura	14.4	13.3	13.9	7.64	3.47	12.6	15.7	12.50	-9.03
DQO	440	313	233	28.86	47.05	86	23	80.45	94.77
Parámetros	Afluente (mg/L)	C2				H2			
		Efecto (mg/L)		Reducción (%)		Efecto (mg/L)		Reducción (%)	
		TRH (4 días)	TRH (6 días)			TRH (4 días)	TRH (6 días)		
pH	7.03	6.78	7.13	3.56	-1.42	6.79	7.06	3.41	-2.32
Temperatura	14.4	13.8	14.4	4.17	0.00	13.5	14.3	6.25	-7.52
DQO	440	235	144	46.59	67.27	109	84	75.23	73.16
Parámetros	Afluente (mg/L)	C3				H3			
		Efecto (mg/L)		Reducción (%)		Efecto (mg/L)		Reducción (%)	
		TRH (4 días)	TRH (6 días)			TRH (4 días)	TRH (6 días)		
pH	7.03	7.01	7.34	0.28	-6.38	6.94	7.19	1.28	-4.20
Temperatura	14.4	15.1	14	-4.86	-5.26	15	14.6	-4.17	-9.77
DQO	440	291	163	33.86	47.92	101	98	77.05	68.69

B.1. Variaciones del pH

La Figura 3 representa las variaciones del pH en las diferentes celdas del sistema experimental. Si bien se observaron diferencias mínimas entre las unidades con y sin vegetación, los valores de pH permanecieron dentro de un rango cercano a la neutralidad. Estos resultados permiten establecer una visión general del comportamiento del pH bajo las distintas condiciones operativas del humedal.

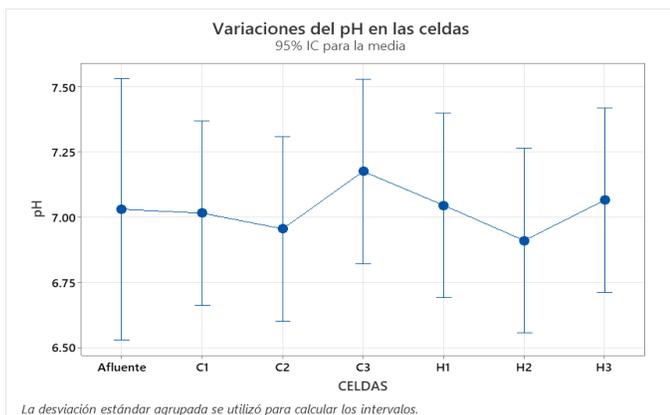


Figura 3. Variación del pH en el afluente y el efluente de cada celda HSSF-CW (C1, C2, C3, H1, H2 y H3).

Por otro lado, la Figura 4 muestra la variación del pH promedio en función del tiempo de retención hidráulica (TRH), incluyendo los valores correspondientes al afluente (TRH = 0). Se aprecia una ligera disminución en el pH en el TRH de 4 días, seguida de un incremento en el TRH de 6 días, lo cual sugiere una posible estabilización de las condiciones fisicoquímicas en función del tiempo de permanencia del agua en el sistema. Los intervalos de confianza del 95 % reflejan la dispersión de los valores registrados para cada tratamiento.

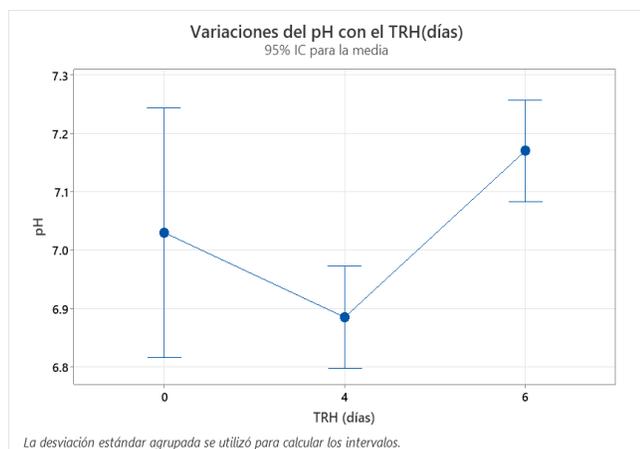


Figura 4. Variación del pH respecto al TRH en el afluente (0 días) y los efluentes (4 días y 6 días) de los HSSF-CW.

B.2. Variaciones de Temperatura

La Figura 5 muestra la distribución de los valores de temperatura en cada una de las celdas experimentales, tanto con vegetación (*Phragmites australis*) como sin ella. Las diferencias entre celdas son mínimas, con valores que se mantienen cercanos al promedio del afluente. Sin embargo, las unidades con vegetación (H1, H2, H3) tendieron a conservar temperaturas ligeramente más estables en comparación con las celdas control, lo cual podría relacionarse con la cobertura vegetal y su capacidad de regulación térmica.

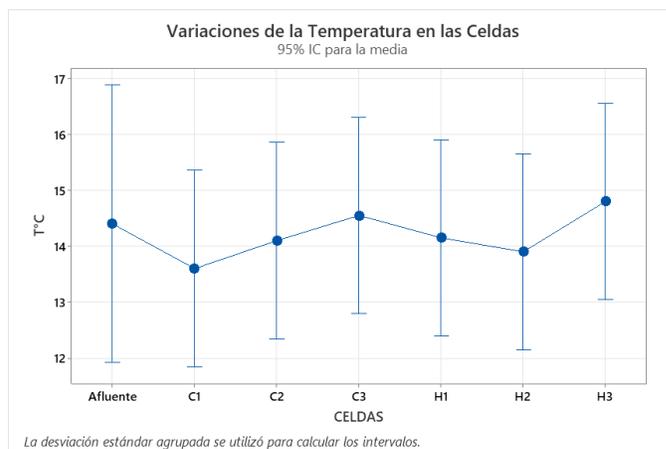


Figura 5. Variación de la Temperatura en el afluente y el efluente de cada celda HSSF-CW (C1, C2, C3, H1, H2 y H3).

Por su parte, la Figura 6 presenta la variación de la temperatura promedio del agua residual en función del tiempo de retención hidráulica (TRH). Se observa un ligero descenso de temperatura en el TRH de 4 días, seguido de un aumento en el TRH de 6 días, en comparación con el valor del afluente. Este comportamiento puede estar asociado a la mayor exposición del agua al ambiente y al efecto disipador de calor del sustrato y la vegetación durante el tiempo de permanencia en el sistema.

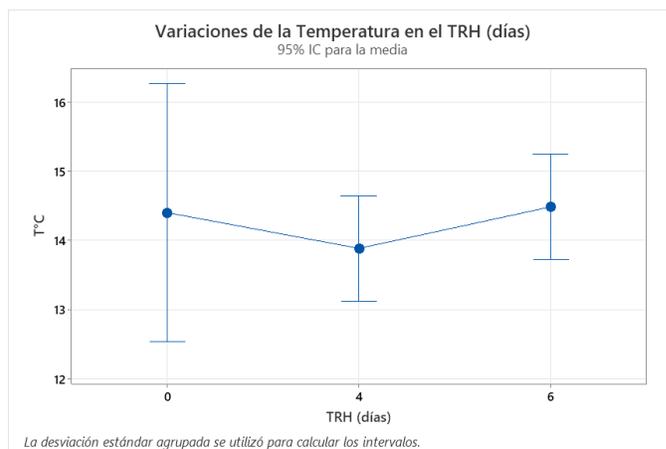


Figura 6. Variación de la temperatura respecto al TRH en el afluente (0 días) y los efluentes (4 días y 6 días) de los HSSF-CW.

B.3. Variaciones de la Demanda Química de Oxígeno

La Figura 7 muestra las variaciones en la concentración de DQO entre las distintas celdas del sistema experimental. Se observa una clara tendencia descendente en los valores promedio de DQO desde el afluente hacia las celdas con presencia de *Phragmites australis* (H1, H2, H3), lo cual sugiere una mayor eficiencia de remoción en los tratamientos vegetados. Esta diferencia fue confirmada estadísticamente mediante un análisis de varianza de un solo factor (ANOVA), el cual arrojó un valor F de 8.29 y un valor p de 0.011. Dado que $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula, concluyéndose que existen diferencias significativas entre las celdas en cuanto a la remoción de DQO.

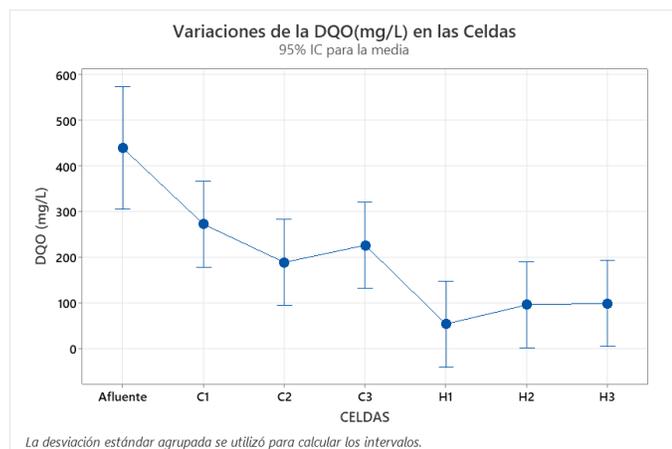


Figura 7. Variación de la DQO en el afluente y el efluente de cada celda HSSF-CW (C1, C2, C3, H1, H2 y H3).

Por otro lado, la Figura 8 presenta los valores promedio de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en función del tiempo de retención hidráulica (TRH). Se observa una disminución progresiva en la concentración de DQO conforme aumenta el TRH de 0 a 6 días, lo que evidencia el efecto positivo del mayor tiempo de permanencia del agua en el sistema sobre la degradación de materia orgánica. Esta tendencia sugiere que, al disponer de un mayor intervalo para el contacto entre el agua residual, el sustrato y la comunidad microbiana, se optimizan los procesos de descomposición y oxidación de compuestos orgánicos.

El análisis estadístico mediante ANOVA de un solo factor confirmó la significancia de este comportamiento, obteniéndose un valor F de 5.50 y un valor p de 0.025. Dado que el valor p es menor al umbral de significancia de 0.05, se rechaza la hipótesis nula que plantea la inexistencia de diferencias entre los tratamientos. Por tanto, se concluye que el tiempo de retención hidráulica tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la eficiencia del sistema en la remoción de DQO.

Estos resultados respaldan la influencia tanto de la vegetación como del tiempo de retención sobre el rendimiento

del HSSF-CW en la remoción de materia orgánica, expresada como DQO.

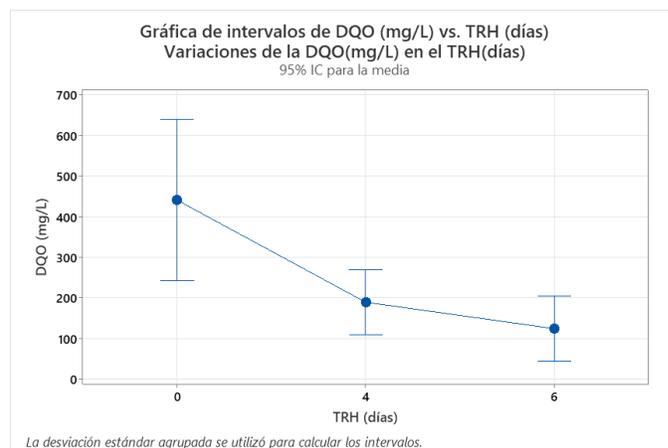


Figura 8. Variación de la DQO respecto al TRH en el afluente (0 días) y los efluentes (4 días y 6 días) de los HSSF-CW.

IV. DISCUSIÓN

El efecto de la presencia de *Phragmites australis* sobre la remoción de DQO, pH y temperatura en un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, considerando puntos con y sin vegetación. Para esta comparación se utilizaron los datos de los TRH de 4 y 6 días. Los resultados mostraron una mejora considerable en los puntos vegetados (H1, H2, H3), los cuales alcanzaron una reducción promedio de DQO del 81.0%, en contraste con solo 44.0% en los puntos sin vegetación (C1, C2, C3). Esta diferencia de 37 puntos porcentuales respalda la influencia positiva de *Phragmites australis* en el tratamiento de aguas residuales. En cuanto al pH, los puntos con vegetación se estabilizaron en un rango de 7.3 a 7.6, mientras que en los puntos sin vegetación hubo mayores fluctuaciones entre 6.8 y 7.5. Las temperaturas en los humedales con *Phragmites* oscilaron entre 17.9 °C y 21.5 °C, reflejando una ligera moderación térmica frente a los controles. Cabe resaltar que el sistema experimental contó con una dimensión de 2.00 m de largo, 1.00 m de ancho y una profundidad variable entre 0.60 m y 0.70 m, lo que garantiza una comparabilidad efectiva entre unidades con y sin vegetación, manteniendo constante el volumen hidráulico y el flujo aplicado. Estas dimensiones también aseguran una relación superficie-volumen adecuada para promover procesos bioquímicos eficaces en el entorno radicular.

La vegetación promueve la transferencia de oxígeno hacia la rizosfera, creando microzonas aeróbicas que estimulan la actividad microbiana y aceleran procesos de biodegradación. [8] reportaron efectos similares en humedales con *Phragmites australis* y *Typha latifolia*, donde los sistemas vegetados alcanzaron reducciones de hasta 90% en DQO, mientras que los controles no superaron el 50%. [9] también confirmaron que la vegetación contribuye a la remoción sostenida de materia orgánica y mejora la estabilidad del sistema. Por otro

lado, [10] observaron que los sistemas con vegetación eran menos sensibles a cambios de temperatura estacional, manteniendo un rendimiento superior incluso en climas fríos. Asimismo, estudios como los de [11] [12] indicaron que la presencia de vegetación permite una mayor retención y transformación de contaminantes orgánicos, en parte por la mayor superficie disponible para la biofilmación microbiana. [13] [14] reforzaron esta idea, al demostrar que el pH y la temperatura, modulados por la actividad vegetal y fotosintética, están directamente vinculados con la diversidad y actividad microbiana en los sistemas de tratamiento.

Los resultados de los TRH de 4 y 6 días. El TRH de 6 días mostró una reducción promedio de DQO del 68.0%, mientras que el TRH de 4 días obtuvo una reducción del 57.0%. Esta diferencia de 11 puntos porcentuales evidencia una mejora asociada al aumento del tiempo de contacto entre el agua residual y el medio filtrante. El pH promedio fue de 7.4 para TRH de 6 días y 7.2 para TRH de 4 días, mientras que la temperatura media fue de 19.7 °C y 18.5 °C respectivamente, indicando condiciones más estables y favorables en el TRH más largo. Dado que las dimensiones de los humedales se mantuvieron constantes (2.00 × 1.00 m de superficie y una profundidad de 0.60 a 0.70 m), la única variable operativa en esta comparación fue el tiempo de retención, permitiendo atribuir los cambios observados directamente a esta condición. Además, el flujo superficial horizontal se mantuvo mediante una pendiente del 1%, lo cual favorece un régimen de flujo constante y evita zonas muertas.

La efectividad del TRH más prolongado es congruente con los hallazgos de Wang et al. (2023), quienes identificaron una mejora progresiva de la remoción de DQO al comparar TRH de 2 (53%), 4 (65%) y 6 (74%) días en un HSSF-CW con *Phragmites australis* y *Typha orientalis*. [15] también reportaron una mayor eficiencia con TRH de 6 días (70%) frente al de 4 días (58%) en sistemas con y sin vegetación. Sin embargo, señalaron que esta mejora puede verse condicionada por la carga de entrada y las condiciones climáticas.

El estudio de [16] es relevante en este contexto, ya que analizaron humedales con *Typha latifolia* y *Commelina benghalensis* bajo un TRH de 12 días, observando reducciones de hasta 93% en DQO. Aunque nuestro TRH máximo fue de 6 días, los resultados apuntan en la misma dirección. [8] por su parte, destacan que la mejora por tiempo de retención es más evidente cuando se controla adecuadamente la pendiente y el flujo, como se hizo en nuestro diseño experimental.

CONCLUSIONES

Los humedales subsuperficiales horizontales (HSSF-CW) vegetados con *Phragmites australis* demostraron una alta eficacia en la remoción de materia orgánica, alcanzando una reducción promedio de DQO del 81 %, en contraste con el 44 % obtenido en los sistemas sin vegetación. Asimismo, el tiempo de retención hidráulica (TRH) tuvo un impacto

significativo en el rendimiento del tratamiento, observándose una mayor eficiencia con 6 días de retención (68 %) frente a 4 días (57 %), así como condiciones más estables en pH y temperatura. El análisis estadístico ANOVA confirmó que tanto la presencia de vegetación como el TRH influyeron de manera significativa en los parámetros evaluados, especialmente en la remoción de DQO ($p < 0.05$). Estos resultados respaldan el uso de soluciones basadas en la naturaleza como los HSSF-CW, adaptados a contextos rurales andinos, como una alternativa eficaz, de bajo costo y ambientalmente sostenible para el tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas.

REFERENCES

- [1] World Health Organization, Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2022, WHO, 2023. [\[link\]](#)
- [2] SUNASS, Diagnóstico de las PTAR en el Ámbito de las Empresas Prestadoras, Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento, 2022. [\[link\]](#)
- [3] Gensberg, R. et al., “Integrated wastewater treatment using artificial wetlands: a gravel marsh case study,” *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*, CRC Press, 2020. [\[link\]](#)
- [4] Rodríguez, L. et al., “Reducción de la demanda química de oxígeno en humedales con Phragmites,” *Ecología Aplicada*, vol. 50, no. 1, pp. 85–95, 2022.
- [5] García, J., & Corzo, A., “Depuración con Humedales Construidos,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2008.
- [6] Eller, F., & Brix, H., “Phenotypic plasticity of *Phragmites australis* in response to nutrients and temperature,” *Aquatic Botany*, vol. 103, pp. 89–97, 2021. [\[link\]](#)
- [7] Milke, J. A., et al., “Review on the ecological traits of *Phragmites australis* in CWs,” *Water Research*, vol. 186, pp. 116276, 2020.
- [8] Samadi, M. T., et al., “The potential of *Phragmites australis* to bioaccumulate heavy metals,” *J. of Water Process Eng.*, vol. 64, 2024. [\[link\]](#)
- [9] R. Stentella, A. Cislighi, L. M. W. Rossi, L. Giupponi, E. Bona, A. Zambonardi, L. Rizzo, F. Esposito, and G. B. Bischetti, “Ecological design of constructed wetlands in cold mountainous region: from literature to experience,” *Landscape and Ecological Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 401–415, 2023. [\[link\]](#)
- [10] P. Bugajski, Z. Mucha, K. Józwiakowska, M. Mucha, and W. Wójcik, “Reliability and probability of organic and biogenic pollutants removal in a constructed wetland wastewater treatment plant in the aspect of its long-term operation,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 278, pp. 13–22, 2022. [\[link\]](#)
- [11] K. A. Liolios, “A Numerical Investigation Concerning the Effect of Step-Feeding on Performance of Constructed Wetlands Operating under Mediterranean Conditions,” *Sustainability*, vol. 15, no. 24, p. 16675, 2023. [\[link\]](#)
- [12] P. Li, T. Zheng, L. Li, X. Lv, W. Wu, Z. Shi, X. Zhou, G. Zhang, Y. Ma, and J. Liu, “Simulating and predicting the performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland using a fully connected neural network,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 380, p. 134959, 2022. [\[link\]](#)
- [13] A. Seth, R. Gupta, and A. Yadav, “Influence of seasonal variation on microbial community dynamics and nutrient removal in vertical flow constructed wetlands,” *Ecological Engineering*, vol. 195, 107616, 2024.
- [14] L. Yuan, X. Ma, H. Liu, and X. Zhang, “Effect of temperature and pH on organic matter removal and microbial activity in horizontal subsurface constructed wetlands,” *Environmental Technology & Innovation*, vol. 32, 102059, 2023.
- [15] C. D. Obreja, D. L. Buruiana, E. Mereuta, A. Muresan, A. M. Ceoromila, V. Ghisman, and R. E. Axente, “Detection of reed using cnn method and analysis of the dry reed (*Phragmites australis*) for a sustainable lake area,” *Plant Methods*, vol. 19, no. 1, p. 61, 2023. [\[link\]](#)
- [16] A. Pascual, J. A. Álvarez, D. de la Varga, C. A. Arias, D. Van Oirschot, R. Kilian, and M. Soto, “Horizontal flow aerated constructed wetlands for

municipal wastewater treatment: The influence of bed depth,” Science of The Total Environment, vol. 908, p. 168257, 2024. [\[link\]](#)