

Optimización del tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal

Optimization of wastewater treatment from a flower crops using a horizontal sub-surface flow constructed wetland

Otimização do tratamento de águas residuárias em plantações de flores usando alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal

Mónica L. Jaramillo-Gallego¹; Ruth M. Agudelo-Cadavid²; Gustavo A. Peñuela-Mesa³

¹ Administradora en salud: Gestión Sanitaria y Ambiental, Magíster en Ciencias Ambientales. Corporación Académica Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: molujara@hotmail.com

² Doctora en Ingeniería Ambiental, Magíster en educación y desarrollo comunitario, Ingeniera sanitaria. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: ruth.agudelo@udea.edu.co

³ Químico. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: gpenuela@udea.edu.co

Recibido: 28 de julio de 2014. Aprobado: 24 de noviembre de 2015. Publicado: 12 de febrero de 2016

Jaramillo-Gallego ML, Agudelo-Cadavid RM, Peñuela-Mesa GA. Optimización del tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. Rev. Fac. Nac. Salud Pública 2016; 34(1): 20-29. DOI: 10.17533/udea.rfnsp.v34n1a03

Resumen

Objetivo: optimizar un sistema de tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores, con el fin de mejorar la eficiencia en la remoción de los contaminantes, usando humedales construidos de flujo subsuperficial-horizontal. **Metodología:** se realizó un estudio de tipo exploratorio experimental en dos etapas, en la primera se efectuó el acondicionamiento fisicoquímico y biológico del sistema de tratamiento, en la segunda, se llevó a cabo el seguimiento de la remoción de los contaminantes durante nueve meses, para lo cual se monitoreó la demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, pH y oxígeno disuelto. **Resultados:** Se logró mejorar la eficiencia del sistema de tratamiento en 7,1% para la Demanda biológica

de oxígeno 4,1% Demanda química de oxígeno, 56,9% sólidos totales y 117,2% sólidos suspendidos totales. **Conclusión:** La concentración de DQO disminuyó con el tratamiento primario (Precipitación y oxidación química) y favoreció la eficiencia del sistema de tratamiento secundario, dado que las aguas a tratar tenían valores muy altos de DQO que pueden saturar los humedales con contaminantes persistentes. Se podrían obtener mayores eficiencias, si se logra mejorar el sistema de tratamiento primario.

-----**Palabras clave:** tratamiento de aguas residuales industriales, humedales construidos, remoción materia orgánica e inorgánica, *Typha domingensis*.

Abstract

Objective: to optimize the wastewater treatment system of flower crops in order to improve pollutant removal efficiency, using a horizontal subsurface flow constructed wetland.

Methodology: An exploratory experimental study was conducted in two stages; in the first stage the treatment system was conditioned physically, chemically and biologically. In the second stage pollutant removal was monitored for nine months. To achieve this, chemical oxygen demand, biological oxygen demand, total solids, total suspended solids, pH and dissolved oxygen were monitored. **Results:** It was possible to improve the efficiency of the treatment system in 7.1% for biological oxygen demand 4.1 % for chemical oxygen demand,

56.9 % for total solids and 117.2 % for total suspended solids.

Conclusion: the concentration of COD decreased with the primary treatment (precipitation, chemical oxidation) and favored the efficiency of the secondary treatment system since the water to be treated had very high values of COD which may saturate the wetlands with persistent pollutants. Higher efficiency could be obtained by enhancing the primary treatment system.

-----**Keywords:** industrial wastewater treatment, constructed wetlands, organic and inorganic matter removal, *Typha domingensis*

Resumo

Objetivo: otimização do sistema de tratamento das águas residuárias de cultivos de flores, a fim de melhorar a eficiência na remoção dos contaminantes, usando alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal.

Metodologia: realizou-se estudos experimentais em duas etapas, na primeira efetuou-se o desenvolvimento físico-químico e biológico do sistema de tratamento, na segunda, o acompanhamento da remoção dos contaminantes durante nove meses, foi monitorado a demanda química de oxigênio, demanda biológica de oxigênio, sólidos totais, sólidos suspensos totais, pH e oxigênio dissolvido. **Resultados:** Foi possível melhorar a eficiência do sistema de tratamento em 7,1% para a demanda biológica de oxigênio, 4,1% demanda química

de oxigênio, 56,9% sólidos totais e 117,2% sólidos suspensos totais. **Conclusão:** a concentração de DQO diminuiu com o tratamento primário (Precipitação e oxidação química) e favoreceu a eficiência do sistema de tratamento secundário, uma vez que as águas a tratar tinham valores muito altos de DQO que podem saturar os alagados com contaminantes persistentes. Poderiam alcançar maiores eficiências, consegue-se melhorar o sistema de tratamento primário.

-----**Palavras-chave:** tratamento de águas residuárias industriais, alagados construídos, remoção de matéria orgânica e inorgânica, *Typha domingensis*.

Introducción

En Colombia, los vertimientos están regulados por el Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura [1], en el cual se exigen remociones de materia orgánica en términos de la Demanda biológica de oxígeno (DBO₅), Demanda química de oxígeno (DQO) y Sólidos suspendidos totales (SST), superiores al 80%, y se establecen concentraciones mínimas permisibles para parámetros de interés sanitario como los metales pesados. Por su lado el Decreto 3930 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [2], hace parte de la construcción normativa que gira en torno a la Política para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) en Colombia, la cual busca establecer directrices unificadas para el manejo del agua en el país, con el fin de contribuir a la protección del recurso hídrico y hacer uso eficiente del mismo [3]. En este decreto se especifica que el Estado debe ejercer

control sobre los vertimientos, con el fin de evitar que las fuentes superficiales, subterráneas y marinas se conviertan en focos de contaminación que pongan en riesgo los ciclos biológicos, el normal desarrollo de las especies y la capacidad oxigenante y reguladora de los cuerpos de agua, y adicionalmente se constituyan en un problema de salud pública, por favorecer la propagación de plagas y vectores transmisores de enfermedades.

En los sectores productivos es indispensable el uso del agua para el desarrollo de los procesos y como consecuencia de ello, se generan vertimientos que deben cumplir con lo estipulado en la normatividad vigente, por lo cual las industrias deben tratar las aguas residuales, previa descarga a los recursos hídricos. Actualmente, se están implementando tecnologías sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales tales como los humedales construidos, los cuales han sido utilizados en el tratamiento de aguas residuales de diferente origen, agrícolas, domésticas, industriales, drenajes de minas entre

otras [4-7]. En los humedales construidos se lleva a cabo una interacción de sus componentes: agua, grava, plantas y microorganismos, que permiten la descontaminación de las aguas residuales [8,9]. Sin embargo estas tecnologías deben combinarse con tratamientos previos, que remuevan algunos contaminantes que son difíciles de eliminar por medio de los humedales construidos [4], o que puedan ser una obstrucción de los procesos que participan en la remoción de los contaminantes en este tipo de sistemas.

El uso de los humedales construidos se ha extendido a lo largo del mundo y se argumenta su fácil mantenimiento y operación, sin embargo se debe tener en cuenta su complejidad dado que constituyen un sistema biológico susceptible a variabilidad de las características del afluente y sobrecargas hidráulicas. Generalmente se asume que es un sistema sencillo de construir y poner en funcionamiento, en ocasiones, son utilizados sin tener en cuenta un sistema de tratamiento primario.

Colombia no ha sido ajena al empleo de este tipo de sistemas, la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (ASOCOLFLORES) en el marco del programa de responsabilidad social empresarial, construyó un sistema de tratamiento que incluye humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, para tratar los residuos

acuosos que resultan de teñir las flores en algunos cultivos del oriente antioqueño, donde se encuentran el 19,2% de hectáreas sembradas a nivel nacional para la producción de flores ornamentales de tipo exportación [10].

El sistema de tratamiento construido por una empresa de consultoría, se puso en funcionamiento a finales del año 2009 y en el año 2012 se empezaron a detectar deficiencias en la remoción de parámetros como DQO, DBO₅, sólidos suspendidos totales, sólidos totales y algunos metales como plomo, cadmio y cromo y por lo tanto, el vertimiento no cumplía con los requerimientos exigidos por el decreto 1594 de 1984, normatividad colombiana vigente al momento de realización de la investigación. Se esperaba que la corrección en el funcionamiento fuera fácil, sin embargo al realizar el análisis de la situación, fue necesario planear la presente investigación la cual tuvo por objetivo, optimizar el sistema de tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores, con el fin de mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, usando humedales construidos de flujo subsuperficial-horizontal por medio del acondicionamiento de los procesos físico-químicos y biológicos en Rionegro, Antioquia en 2013.

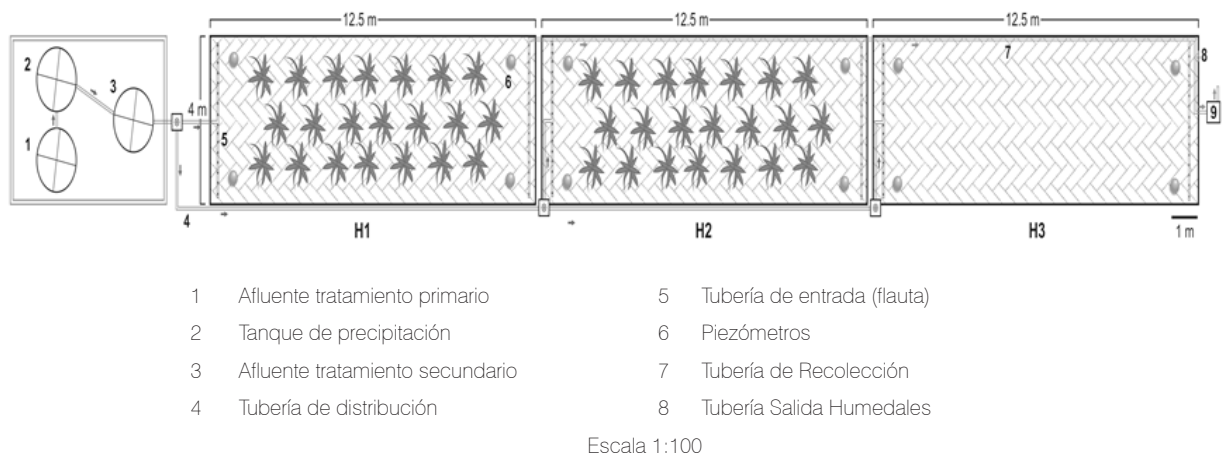


Figura 1. Representación esquemática del sistema de tratamiento de aguas residuales

Fuente: Elaboración propia

Metodología

Se realizó un estudio de tipo exploratorio experimental, desarrollado en un sistema de tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores, ubicado en el área rural del municipio de Rionegro, Oriente de Antioquia. Las aguas residuales provenientes de cultivos de flores de la región son transportadas desde los cultivos de flores hasta el sistema de tratamiento, en canecas de

aproximadamente 30 litros, siguiendo los protocolos de transportes establecidos para este tipo de residuos.

Descripción del sistema de tratamiento

El sistema de tratamiento original constaba de un tratamiento primario, donde se realizaba la precipitación de los metales pesados contenidos en las aguas residuales provenientes de los cultivos, utilizando hidróxido de sodio (NaOH) 10 N.

Adicionalmente un tratamiento secundario con tres humedales de flujo subsuperficial, Humedal 1 (H1), Humedal 2 (H2) y Humedal 3 (H3). Cada uno de 12,5 m de largo, 4 m de ancho y 0,45 m de profundidad, con afluente independiente y un caudal de 500 ml/min. Impermeabilizados con geomembrana y doble protección de geotextil. El tiempo de retención hidráulico (TRH) de diseño para cada módulo fue de 3,5 días. Para la experimentación los humedales 1 y 2, se plantaron con *Typha domingensis* (dos planta por m²) y El humedal H3 se dejó como blanco, por lo tanto sin vegetación.

Etapas del estudio

La finalidad del trabajo fue la optimización del sistema de tratamiento de aguas provenientes de cultivos de flores, para ello se desarrollaron dos etapas:

Etapa 1: Acondicionamiento de los componentes del sistema de tratamiento de aguas residuales

En esta etapa se realizaron cambios estructurales en las instalaciones, tanto en el sector del tratamiento primario, como en el secundario. Adicionalmente se realizaron pruebas con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) como agente oxidante y sulfato ferroso (FeSO₄) como catalizador, con la finalidad de disminuir las concentraciones de materia orgánica que ingresan al sistema secundario con

humedales. En los humedales, se revisaron y mejoraron las condiciones de las redes hidráulicas de abastecimiento y recolección. Así mismo se realizó la siembra de plantas en los humedales 1 y 2, y se verificó el tiempo de retención hidráulico por medio de un trazador químico (bromuro de potasio). En la figura 1 se presenta el esquema del sistema de tratamiento, posterior al acondicionamiento.

Etapa 2: Evaluación de la eficiencia del sistema de tratamiento

Después del acondicionamiento físico, se procedió al seguimiento del comportamiento de la eficiencia del sistema de tratamiento, por un periodo de nueve meses, donde se tomaron muestras mensuales, para un total de nueve muestreos, con la finalidad de determinar la eficiencia de remoción de los contaminantes en el sistema.

Los cuatro muestreos iniciales se llevaron a cabo bajo las condiciones normales de operación, es decir, las aguas residuales pasaban por un cribado para retener el material grueso, posteriormente se realizaba la precipitación de los metales y el sobrenadante ingresaba a los humedales. Los cinco muestreos finales fueron realizados con la aplicación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso al agua de entrada del humedal posterior a la precipitación de los metales.

En el sitio, se midieron pH y oxígeno disuelto. En el laboratorio se analizó DQO, DBO₅, ST y SST, bajo los procedimientos establecidos en los métodos estándar para el análisis de aguas y aguas residuales [11] (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros físico-químicos y métodos de análisis utilizados en la investigación

Parámetro	Método	Equipo
Demanda química de oxígeno	SM 5220 D; Ed. 2012	Termoreactor Espectrofotómetro Evolution 600
Demanda biológica de oxígeno	SM 5210 D; Ed. 2012	Incubadora WTW TS 606/3-I Oxítop WTW IS 12
Sólidos Suspendidos totales	SM 2540 D; Ed. 2012	Horno para operación a 103 A 105 °C Balanza analítica
Sólidos totales	SM 2540 B; Ed. 2012	Balanza analítica Baño María
pH	SM 4500 H+ B; Ed. 2012	pH Metro WTW pH 3210
Oxígeno disuelto	SM 4500 O G; Ed. 2012	WTW 3205

Puntos de muestreo

Las muestras fueron tomadas a la entrada del sistema de tratamiento, en el afluente del sistema de tratamiento secundario (después de la precipitación de metales y aplicación de peróxido de hidrógeno y sulfato de hierro), en el efluente de cada humedal y en la salida del sistema (efluente conjunto de los tres humedales).

Análisis de los datos

Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para determinar la distribución de los datos, dado que éstos presentaron alta variabilidad. La distribución de los datos no fue normal, por tanto se aplicaron pruebas no paramétricas de Friedman y Wilcoxon para determinar las diferencias entre los efluentes de los humedales [12]. Para el análisis estadístico de los datos, se empleó el programa estadístico SPSS, versión 21.

Resultados

Caracterización fisicoquímica inicial del tratamiento de aguas residuales

En la tabla 2 se presentan las concentraciones y porcentajes de remoción iniciales de los parámetros de interés, los cuales se obtuvieron mediante un muestreo compuesto, y se observa que el sistema requería mejorar la eficiencia para los ST, SST y DQO, teniendo en cuenta los requerimientos de la normatividad de vertimientos en Colombia [1]. Adicional a esto CORNARE, autoridad ambiental competente en la región, hace más restrictiva la norma de vertimientos bajo el Acuerdo 198 del 03 de abril de 2008, mediante el cual se estipulan porcentajes de remoción para los parámetros de interés, superiores al 90%.

Tabla 2. Línea base del sistema de tratamiento de aguas residuales, 2012

Variable	Entrada Sistema	Afluente Humedales	Efluente Sistema	Remoción	Límite permisible ^a
	mg/L	mg/L	mg/L	%	mg/L
DBO	1948,0	493,0	249,0	87,2	---
DQO	14590,0	7085,0	3221,0	77,9	---
ST	14338,0	9452,0	10340,0	27,8	---
SST	240,0	101,0	304,0	-2,6	---
Pb	3,3	3,1	0,2		0,5
Cr	5,7	0,7	0,2		0,5
Cd	23,3	1,7	0,0		0,1

^aLímite permisible según Decreto 1594/1984, para vertimientos N=1

Acondicionamiento de los componentes del sistema de tratamiento de agua

Las actividades realizadas para el acondicionamiento del sistema de tratamiento tuvieron una duración de seis meses, en los cuales se realizaron mejoras en la infraestructura física del sistema de tratamiento primario, en las redes hidráulicas de distribución y recolección del sistema de tratamiento secundario, montaje de sistema de control de precipitación, el cual consistió en la instalación de un techo tipo invernadero, y re-siembra de plantas. Lo anterior en pro de mejorar el funcionamiento del sistema de tratamiento y de este modo aprovechar la infraestructura existente para cumplir con las eficiencias requeridas por la normatividad vigente.

Antes de realizar las actividades de acondicionamiento físico en el sistema de tratamiento, la precipitación de los metales se realizaba en un tanque

de 500 L con hidróxido de sodio y el sobrenadante ingresaba al sistema secundario, sin embargo por la turbulencia que se generaba, los metales se re-suspendían e ingresaban a los humedales algunas trazas de los mismos. Por lo anterior, se instaló un tanque de 2000 L, solo para realizar la precipitación de los metales, el sobrenadante ingresa por bombeo a un segundo tanque de 2000 L, el cual tenía la función de almacenar el agua de ingreso a los humedales. En este segundo tanque se implementó la aplicación de sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno en una relación de 1:3, con la finalidad de disminuir la carga orgánica que ingresaba a los humedales. En la tabla 3 y figura 2 se presenta una síntesis de las condiciones del sistema de tratamiento antes y después de las actividades de acondicionamiento.

Comportamiento de los contaminantes en el sistema de tratamiento de aguas residuales

La distribución de los datos obtenidos para las variables DBO₅, DQO, SST y OD, en la entrada del sistema, en el afluente del sistema secundario y en el efluente de los humedales, por lo general no fue normal (valor $-p < 0,05$ prueba de Shapiro-Wilk), con excepción del pH y ST. Por lo anterior, se aplicaron pruebas no paramétricas para el análisis de los resultados y la mediana para la descripción de los mismos.

Seguimiento de la materia orgánica en el sistema de tratamiento de aguas residuales

Para el análisis de la materia orgánica se tuvieron en cuenta los parámetros DQO, DBO₅, ST y SST. Para la DQO se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de los efluentes de los humedales (Valor $p = 0,001$ prueba de Friedman), por medio de la prueba de Wilcoxon se encontraron diferencias del efluente de H2, con H1 y H3 (Valor $p < 0,05$). La DBO₅ no presentó diferencias en los datos de salida de los humedales (Valor $p > 0,05$ prueba de Friedman).

En la Figura 3a se presenta el comportamiento de la DQO durante el tiempo de estudio. Se observa que en el periodo en el cual se adicionó peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso al afluente del sistema de tratamiento secundario, se presentó una considerable disminución en la mediana de la concentración de la DQO en el afluente del sistema de humedales, la cual pasó de 7122 mg/L a 2780 mg/L. Así mismo en el efluente del sistema se observó disminución de la mediana de la concentración, la cual pasó de 2983 mg/L a 2093 mg/L de DQO. Con lo que se demuestra que la adición sulfato de hierro y peróxido de hidrógeno favoreció la remoción de los contaminantes.

Similar situación se presentó con la DBO₅, para la cual la mediana de la concentración del afluente del sistema de humedales pasó de 253,5 mg/L a 209

Tabla 3. Comparación del estado del sistema de tratamiento pre y post actividades de acondicionamiento.

Estado inicial	Posterior al acondicionamiento
Tanque de 500 L para la precipitación de los metales y alimentación simultánea a los humedales	Construcción de base en concreto e instalación de tanque de 2000 L para precipitación de metales, y otro de igual capacidad para la alimentación del sistema con humedales
Crecimiento incipiente de plantas	Re-siembra y vegetación abundante en H1 y H2
Las tuberías de alimentación y recolección, habían perdido la pendiente, impidiendo la distribución homogénea y la recolección continua del efluente	Reinstalación de redes de distribución y recolección en el sistema de humedales
Humedal dos, con fugas e infiltración del agua residual en el suelo	Apiques en los costados del humedal, desinstalación del humedal 2 para reparación de la geomembrana
Concentraciones de materia orgánica alta en la entrada del sistema con humedales	Aplicación de peróxido de hidrógeno y sulfato de hierro en el tanque de alimentación de los humedales
Sistema secundario con humedales a la intemperie	Instalación de sistema de control de precipitación, para los humedales

Fuente: Elaboración propia

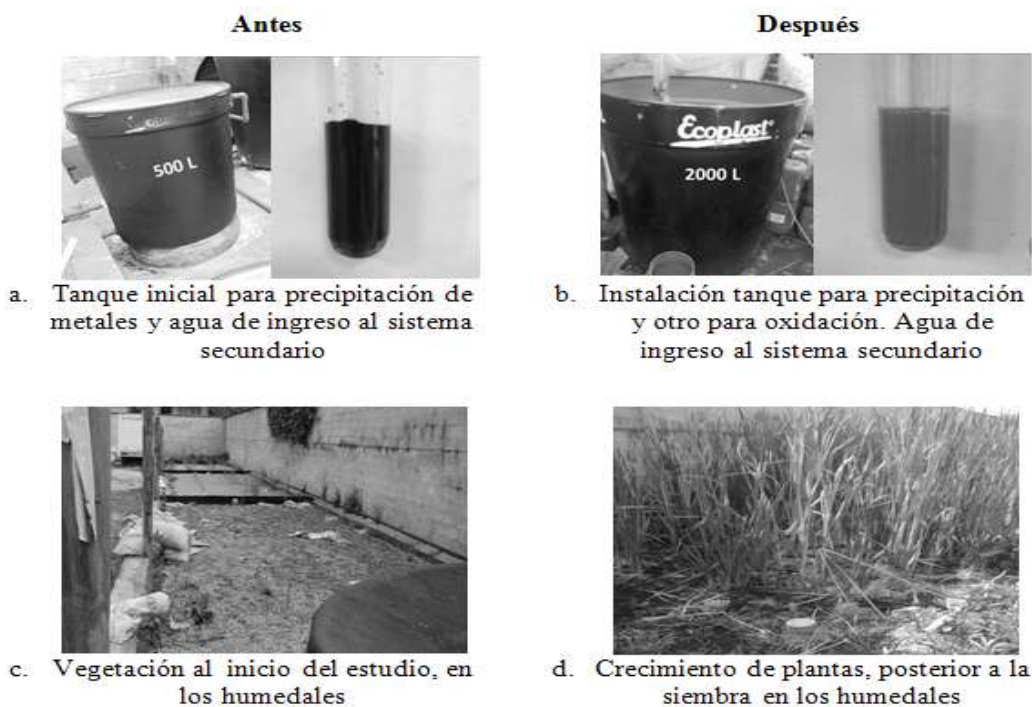


Figura 2. Componentes del sistema de tratamiento antes y después de las actividades de acondicionamiento

Fuente: Fotos tomadas por el investigador

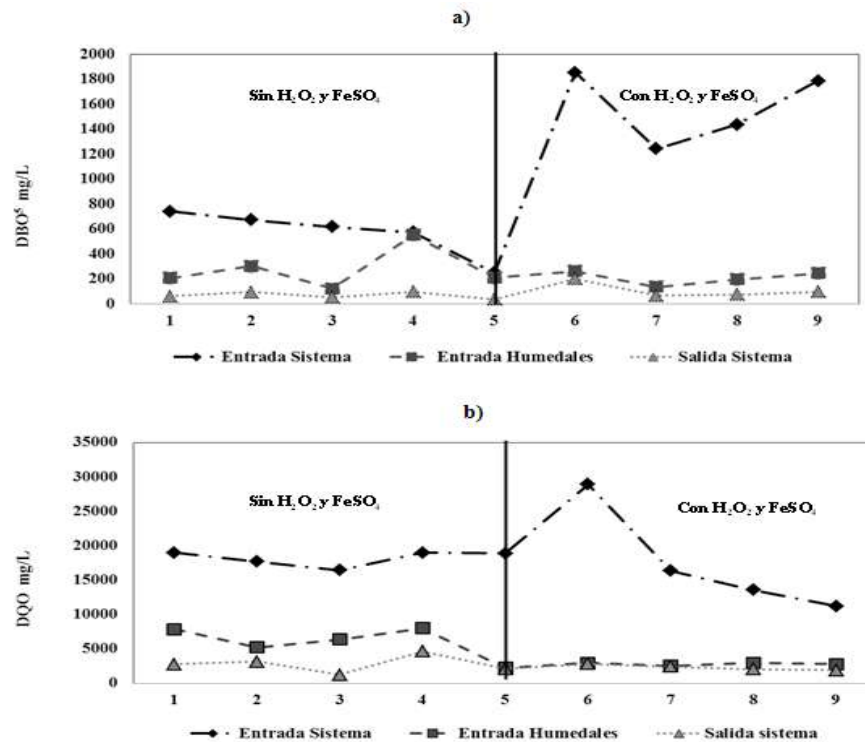


Figura 3. a). Variación de la DQO en el afluente del sistema, en el afluente de los humedales y en el efluente del sistema de tratamiento. b) Variación de la DBO₅ en el afluente del sistema, en el afluente de los humedales y en el efluente del sistema de tratamiento

mg/L, al aplicar el peróxido de hidrógeno y el sulfato ferroso. En el efluente del sistema de humedales se logró una disminución en la mediana de la concentración de 77,4 mg/L a 74 mg/L. Cuando se analiza el comportamiento del sistema secundario con humedales se puede apreciar que en ellos se alcanzó una remoción de 64,6% (135 mg/L) para la DBO₅ y de 17,8% (529,8 mg/l) para la DQO.

Al igual que la DQO, los sólidos totales que ingresaron al sistema de tratamiento fueron altos. En el tratamiento primario se logró una disminución de 12324 mg/L de ST, y en los humedales se removieron 1374 mg/L de ST. En cuanto a los sólidos suspendidos totales en el tratamiento primario se alcanzó la disminución de 80 mg/L y en los humedales se remueven 65 mg/L (Tabla 4).

Eficiencias de remoción para DQO, DBO₅, ST, SST en el tratamiento de aguas residuales

En la tabla 5, se presentan los porcentajes de remoción de los parámetros de interés en el sistema de tratamiento (primario y secundario), teniendo en cuenta la caracterización inicial (línea base de muestreo). Se aprecia que después de realizar las actividades de acondicionamiento del sistema de tratamiento, se logró un aumento en la remoción de 4,1% para la DBO₅, y 7,1% para la DQO. Las actividades de acondicionamiento realizadas permitieron la optimización del sistema frente a los parámetros más críticos, como los

ST y los SST, para los cuales se logró una optimización de 56,9% y 117,2%, respectivamente.

Los tres humedales tuvieron comportamientos diferentes, aunque contaban con las mismas dimensiones, material granular y caudal. Lo cual se evidencia mediante el análisis estadístico. El H2 presentó las menores remociones con relación a los otros dos humedales. El H3, sin plantas, alcanzó mayor remoción de los parámetros de estudio (Tabla 5).

Comportamiento del pH y OD en el sistema de tratamiento de aguas residuales

Al comparar los valores de pH en los efluentes de los tres humedales se encontraron diferencias significativas (Valor $p = 0,00$ prueba de Friedman), al aplicar la prueba de Wilcoxon se comprobó que las diferencias se presentaron del H2 con H1 y H3 (valor $p < 0,05$). Esto confirma que H2 tuvo un comportamiento diferente, a los otros dos humedales, presentando valores de pH más bajos. Adicionalmente en la tabla 6, se puede observar que el pH sufre un aumento de 2,15 unidades desde la entrada al sistema, hasta la salida de los humedales, lo que hace que el efluente sea menos agresivo para las fuentes de agua receptoras y se ubica dentro de los rangos establecidos por la normatividad de vertimientos vigente, 5,0 a 9,0 unidades de pH [1].

Tabla 4. Estadísticos descriptivos para ST y SST en el sistema estudiado

Variable	Sitio Muestreo	N	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	DS ^a	CV ^b
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	-	-
ST	Entrada Sistema	9	16452	16268	10360	24496	3696	22
	Afluente Humedales	9	4619	3944	2492	7296	1777	38
	Efluente H1	9	2673	2776	1080	3240	644	24
	Efluente H 2	9	3789	3520	2345	4968	899	24
	Efluente H3	9	2168	2098	1490	3166	562	26
	Efluente sistema	9	2594	2570	1987	3166	401	15
SST	Entrada Sistema	9	167	124	77	370	103	61
	Afluente Humedales	9	106	80	12	476	142	135
	Efluente Humedal 1	9	22	24	12	46	10	45
	Efluente Humedal 2	9	21	20	4	40	13	61
	Efluente Humedal 3	9	23	10	4	92	30	130
	Efluente sistema	9	16	15	4	35	11	70

^aDesviación estándar, ^bCoefficiente de variación

Tabla 5. Medianas de remoción para los parámetros de seguimiento de la materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales

Parámetro	Línea base	Afluente	Humedal 1 ¹		Humedal 2 ²		Humedal 3 ³		Salida Sistema	
	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L
DBO ₅	87,2	740,9	91,6	71,4	90,4	82,6	93,1	82,6	91,4	74,0
DQO	77,9	17672,8	84,5	2721,9	76,8	3983,0	88,1	2142,0	85,0	2450,1
ST	27,9	16268,0	82,1	2776,0	79,2	3520,0	86,9	2098,0	84,8	2570,0
SST	-26,7	124,0	87,1	24,0	86,9	20,0	91,8	10,0	90,5	15,0

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al OD, se presenta heterogeneidad de los datos obtenidos tanto en el afluente del sistema de tratamiento, como en el afluente de los humedales, con coeficientes de variación superiores al 20%. Los valores del efluente oscilan entre 0,08 mg/L y 1,36 mg/L. El OD disminuye al pasar por el tratamiento primario de precipitación y oxidación, al tratamiento secundario con humedales disminuyendo en 1,55 mg/L y continúa su disminución con el paso por el tratamiento secundario en 0,37 mg/L (Tabla 6).

Discusión

Los humedales construidos son sistemas complejos en los cuales intervienen procesos fisicoquímicos y biológicos [13, 14]. En la mayoría de las publicaciones referentes al tema, se encuentra una amplia descripción de las ventajas de este tipo de sistemas enfatizando en su fácil mantenimiento y operación, sin embargo es importante tener en cuenta que para su óptimo funcionamiento se requiere de un buen diseño que permita la mejor hidráulica, la mejor interacción de los

contaminantes con los consorcios microbianos y realizar un adecuado tratamiento primario.

La alta concentración de DQO y de los ST del agua residual proveniente de los cultivos de flores (17672 mg/L y 16268 mg/L respectivamente) hace necesario un adecuado tratamiento primario que disminuya las cargas contaminantes que llegan al sistema de tratamiento secundario. La precipitación a pH por encima de 9, evita el ingreso de los metales que contiene el agua residual al sistema de humedales, mientras la mezcla de peróxido de hidrogeno y de sulfato ferroso produce radical libre hidroxilo (OH), el cual es un gran agente oxidante que tiene la capacidad de oxidar una gran cantidad de compuestos orgánicos, entre ellos los colorantes que contiene el agua residual [15]. El radical libre hidroxilo garantiza la oxidación de compuestos recalcitrantes a compuestos simples fáciles de degradar por procesos biológicos [16], lo que contribuye a que los procesos de degradación en los humedales sean más fáciles.

Los humedales construidos de flujo subsuperficial son utilizados como tratamientos secundarios o terciarios, con la finalidad de contribuir a pulir efluentes

Tabla 6. Estadísticos descriptivos para OD y pH

Variable	Sitio Muestreo	N	Media mg/L	Mediana mg/L	Mínimo mg/L	Máximo mg/L	DS ^a -	CV ^b -
OD	Entrada Sistema	9	2,0	2,2	0,0	4,4	1,3	63,7
	Afluente Humedales	9	0,6	0,5	0,2	1,1	0,3	55,9
	Efluente Humedal 1	9	0,3	0,1	0,0	1,6	0,5	144,3
	Efluente Humedal 2	9	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	135,6
	Efluente Humedal 3	9	0,5	0,5	0,2	0,8	0,3	56,5
	Efluente sistema	9	0,5	0,2	0,1	1,4	0,5	103,1
	Entrada Sistema	9	4,9	4,4	2,5	8,3	2,2	45,1
pH	Afluente Humedales	9	5,5	6,2	3,2	6,9	1,4	26,2
	Efluente Humedal 1	9	5,9	6,1	5,6	6,1	0,2	2,8
	Efluente Humedal 2	9	5,7	5,8	5,6	5,9	0,1	1,9
	Efluente Humedal 3	9	6,6	6,6	6,2	6,8	0,2	2,6
	Efluente sistema	9	6,4	6,5	5,9	7,3	0,4	6,3

^aDesviación estándar, ^bCoefficiente de variación

con concentraciones de DQO menores de 1000 mg/L [17, 18, 19]. Al afluente del sistema de tratamiento secundario con humedales posterior a la aplicación del peróxido de hidrogeno y el sulfato ferroso, y las modificaciones realizadas en los diferentes procesos del sistema de tratamiento, ingresaron aguas residuales con DQO y DBO₅ de 2780 mg/L y 209 mg/L respectivamente. A pesar de tener concentraciones de DQO en el afluente del sistema de tratamiento secundario con humedales, tres veces mayores a las recomendadas, los humedales lograron remover 529,89 mg/L de DQO, probablemente por la acción de los microorganismos, como los heterótrofos aerobios, anaerobios y otros que utilizaron los compuestos orgánicos del agua para la producción de biomasa [18]. A pesar de la notable remoción de DQO, en los efluentes de los humedales continuaba una alta concentración (2450 mg/L), lo que indica que las cargas que ingresen al sistema secundario deben ser más bajas, tal como lo recomiendan varios investigadores [17-19]. Además, gran parte de esta fracción no era biodegradable, dado que la DBO₅ en el afluente de los humedales fue de 209 mg/L.

En el humedal tres (sin plantas) se logró una mayor remoción de DQO, DBO₅ y sólidos, posiblemente porque en los humedales 1 y 2, pudo haber aporte de materia orgánica y sólidos al agua por parte de las raíces de las plantas sembradas en dichos humedales, que hizo que el efluente tuviera mayor valores en estos parámetros [17, 20].

El agua residual del teñido de flores, tiene un pH bajo (alrededor de 5), con la adición de hidróxido de sodio, aumenta el pH del agua a valores por encima de

9, pero cuando el agua ingresa a los humedales, el pH esta alrededor de 6, el cual es un pH más adecuado para el desarrollo de los microorganismos, que el que tenía originalmente el agua residual (alrededor de 5), dado que el desarrollo de los microorganismos se favorece entre 6,5 y 8,5 unidades de pH [21]. Sin embargo, se han reportado que ciertas poblaciones microbianas son capaces de metabolizar contaminantes a pH bajos, como el estudio reportado por López y colaboradores que reportan que a pH 5 se obtienen buenos resultados en el tratamiento con humedales de agua de minería [21]. Además Maja [22], describe que los humedales tienen la capacidad de actuar como un sistema tampón o buffer cuando se presenta un cambio de pH, por esta razón se decidió realizar el tratamiento del presente trabajo a pH menores de 6. Adicionalmente la disminución del OD en el sistema de humedales se presentó por la actividad microbiana (bacterias aerobias y facultativas) y por la formación de compuestos en la mineralización de la materia orgánica [14, 23, 24].

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, es necesario continuar realizando estudios que involucren el análisis de poblaciones microbianas con capacidad de adaptación a aguas con alto contenido de materia orgánica e inorgánica y presencia de otro tipo de sustancias como los metales pesados, y en el mismo orden de ideas continuar investigando en la mejora del sistema de tratamiento primario, o la aplicación de otros tratamientos alternativos que contribuyan a disminuir las concentraciones de DQO que ingresan al sistema de tratamiento secundario con humedales construidos.

Conclusiones

Las actividades de acondicionamiento realizadas en el sistema de tratamiento de aguas residuales, contribuyeron a mejorar la eficiencia de remoción en 7,1% para la DBO_5 , 4,1% DQO, 56,9% ST y 117,2% SST.

La concentración de DQO disminuyó con el tratamiento primario (Precipitación y oxidación química) y favoreció la eficiencia del sistema de tratamiento secundario, dado que las aguas a tratar tenían valores muy altos de DQO que pueden saturar los humedales con contaminantes persistentes. Se podrían obtener mayores eficiencias, si se logra mejorar el sistema de tratamiento primario. Los sistemas de tratamiento secundario o terciario como los humedales construidos contribuyen a pulir los efluentes, sin embargo no logran eliminar algunos compuestos recalcitrantes como los que se encuentran en las aguas residuales con altas cargas de materia orgánica e inorgánica como las tratadas en el presente estudio, tales como estructuras de los colorantes que están formados por enlaces dobles de Nitrógeno difíciles de romper por medios biológicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los Grupos de Investigación: Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON) y Salud y Ambiente (GISA) de la Universidad de Antioquia, por la financiación del proyecto y asesoría académica. Al Fondo de Gestión Ambiental de la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores, por el apoyo logístico y acompañamiento permanente.

Referencias

- Colombia. Ministerio de Agricultura. Decreto 1594 de 1984. por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Diario Oficial, 36700 (Jul. 26 1984).
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial, 47837 (Oct. 25 2010)
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Política para la gestión integral del recurso Hídrico. Bogotá: El Ministerio; 2010.
- Navarro A, García Y, Vázquez A, Marrugo J. Eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales del empaquetado de hortalizas. Avances en Ciencias e Ingeniería. 2013; (4):39-50
- Vymazal J. Review. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. Ecol. Eng. 2009; 35(1): 1–17
- Kadlec R, Wallace S. Treatment Wetlands. Second ed. Boca Raton, FL: CRC Press. Taylor & Francis Group; 2009.
- Crites R, Middlebrooks J, Reed S. Natural Wastewater Treatment Systems. Boca Raton, FL: CRC Press. Taylor & Francis Group; 2006.
- Agudelo R, Jaramillo M, Peñuela G, Aguirre N. Remoción del Carbono Orgánico disuelto en humedales Piloto de Flujo Subsuperficial y Superficial. Revista Facultad Nacional de Salud Pública. 2010; 28(1): 21-28
- Llagas W, Guadalupe E. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNSMS. Rev. Instituto de investigación FIGMMG. 2006; 15(17): 86-96.
- Superintendencia de Sociedades. Delegatura de Asuntos Económicos y Contables. Grupo de Estudios Económicos y Financieros Desempeño del Sector Floricultor 2008 - 2012. Bogotá D.C: La Superintendencia; 2013.
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22 th ed. Washington DC: APHA; 2012.
- Wayne WD. Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la salud. 4ª Edición. México: Limusa Wiley; 2002.
- Scholz M, Harrington R, Carroll P, Mustafa A. The integrated constructed wetlands concep. Wetlands. 2007; 27:337-354
- Agudelo R, Peñuela G, Aguirre NJ, Morató J, Jaramillo ML. Simultaneous removal of chlorpyrifos and dissolved organic carbon using horizontal sub-surface flow pilot wetlands. Ecol Eng. 2010; 36: 1401–1408.
- Garcés L. Cinética de degradación y mineralización del colorante naranja reactivo 84 en aguas. Revista Lasallista de Investigación. 2005; 2(2): 21–25
- Arroyave J, Rodríguez E, Barón C, Moreno C. Degradación y mineralización del colorante rojo punzó empleando el reactivo de Fenton. Producción + Limpia. 2012; 7(1): 48-58
- Quipuzco E. Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con Phragmites australis para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geogr. 2002; 5 (10):52–57
- Romero M, Colín A, Sánchez E, Ortiz L. Wastewater treatment by an artificial wetlands pilot system: evaluation of the organic charge removal. Rev. Int. Contam. Ambient. 2009, 25(3): 157-167.
- Vymazal J, Kröpfelová L. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. Sci Total Environ. 2009, 407(13): 3911 – 3922
- Lara J. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. [Tesis maestría] Barcelona: Instituto Catalán de tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña; 1999. p. 18.
- López E., Aduvire O, Baretino D. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero 2002; 113 (1): 3-21.
- Maja J, Vrhovsek D, Stuhlbacher A, Tjas B. Treatment of wastewater in hybrid constructed wetland from the production of vinegar and packaging of detergents. Desalination. 2009; 247:101–110
- Agudelo R, Machado C, Aguirre N, Morató J, Peñuela G. Optimal conditions for chlorpyrifos and dissolved organic carbon removal in subsurface flow constructed wetlands. Int J Environ An Ch. 2011, 91 (7-8): 668-679
- Seoáñez, M. Aguas Residuales: Tratamiento por humedales artificiales fundamentos científicos y tecnologías. Barcelona: Ediciones Mundi-prensa; 199. p. 231.