



IMPLEMENTACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y MATERIA ORGÁNICA, ACOPLADOS A REACTORES CON MICROALGAS

Kelly Leani Quintero García, Joan Amir Arroyave Rojas, Andrea Anchila Arteaga

**Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia
Medellín, Colombia**

Resumen

Las importantes cargas de materia orgánica y nitrógeno en las aguas residuales de instituciones educativas, han llevado a la búsqueda de sistemas de depuración eficientes, económicos, fáciles de operar y que permitan considerar el agua residual como un recurso que se pueda evaluar y tratar para que su descarga a fuentes hídricas naturales no tenga un alto impacto y genere alteraciones a los ecosistemas acuáticos. Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento promisorios que trabajan por biofiltración, en estos se dan procesos físicos, químicos y microbiológicos que permiten la eliminación de materia orgánica, bioindicadores de contaminación fecal y turbidez del agua residual, permitiendo que esta sea utilizada en actividades que no impliquen el uso de agua potable (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015). Los humedales artificiales de flujo subsuperficial acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas, se convierte en una opción promisoriosa para la remoción de nitrógeno y materia orgánica procedente del efluente tratado en los humedales, con el fin de continuar el proceso de degradación, debido a que las microalgas captan nutrientes inorgánicos que se aprovechan para producir biomasa, y a la vez, se reduce la capacidad del efluente de provocar eutrofización en los cuerpos de agua (Candela, 2016).

En este proyecto se presentan los resultados de la implementación de humedales artificiales de flujo subsuperficial para la remoción de nitrógeno y materia orgánica, plantados con *Heliconia psittacorum* y acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas, inoculados con cepas de *Chlorella vulgaris*, donde se encontró una eficiencia en la transformación de nitrógeno con un

porcentaje del 73,4%, materia orgánica entre el 30-40%, coliformes totales del 87% y coliformes fecales (*E.coli*) del 88%.

Palabras clave: agua residual; materia orgánica; nitrógeno; humedales artificiales; reactores; microalgas; tratamiento biológico

Abstract

The significant loads of organic matter and nitrogen in the wastewater of educational institutions have led to the search for efficient, economical, easy-to-operate purification systems that allow wastewater to be considered as a resource that can be evaluated and treated so that its discharge to the natural environment does not have a high impact on water sources and generates alterations to aquatic ecosystems.

Artificial wetlands are promising treatment systems that work by bio filtration, allowing the elimination of organic loads and generating discharges that can be used in activities that do not involve the use of drinking water (Metropolitan Area of the Aburrá Valley, 2015).

The coupling to these systems, of reactors with algae, becomes a viable option. For the removal of nitrogen and organic matter that come from wetlands, in order to continue the degradation process, because micro algae capture inorganic nutrients that are used to produce biomass, while reducing the capacity of Effluent to cause eutrophication in water bodies (Candela, 2016).

*This project will present the results of the evaluation of the removal of nitrogen and organic matter through a system of artificial wetlands with horizontal subsurface flow, planted with *Heliconia psittacorum* and coupled to fixed-bed reactors with algae, inoculated with *Chlorella strains vulgaris*, where it is expected to find a high efficiency in the degradation of nitrogen in a percentage of 73,4%, organic matter between 30-40%, total coliforms of 87% and fecal coliforms (*E. coli*) of 88%.*

Keywords: wastewater; organic matter; nitrogen; artificial wetlands; reactors; algae; biological treatment

Introducción

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible reporta que cerca del 90 % de las aguas residuales domésticas en nuestro país son vertidas directamente en los ríos, sin procesos de tratamiento, lo cual se convierte en la principal causa de contaminación de aguas superficiales. Se estima que en Colombia se vierten diariamente alrededor de 700 toneladas de carga orgánica del sector doméstico urbano a los cuerpos de agua, generando un desequilibrio en los ecosistemas acuáticos y genera condiciones de difícil recuperación que limitan la vida de las comunidades acuáticas y generan procesos de eutrofización. (Lizarazo y Orjuela, 2013). Las últimas revisiones de la Asociación Colombiana de Ingeniería (Acodal) indican que el 70% de las aguas residuales domésticas en los centros urbanos del país no son tratadas (Acodal, 2017); en Antioquia la gerencia de servicios públicos de la Gobernación reporta que de 125 municipios del departamento



solo 75 cuentan con plantas de tratamiento, aunque presentan deficiencias financieras y técnicas para enfrentar de forma eficiente el tratamiento de las aguas residuales (Molina y Mejía, 2012). En Latinoamérica el 80% de las aguas residuales no son tratadas y la infraestructura de los sistemas de tratamiento no es óptimo, generando riesgos para la salud pública y enfermedades asociadas a este tema son frecuentes (UNESCO, 2017); por lo descrito anteriormente se diseña un sistema de tratamiento económico y de fácil operación como los humedales artificiales, su implementación se convierte en una opción viable, para mitigar la problemática, resaltando el bajo costo en la construcción, operación y mantenimiento, comparado con los procesos mecánicos de tratamiento (EPA, 2000). Los humedales de flujo subsuperficial, acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas para el agua residual domestica generada en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, la cual cuenta con una población de 4.520 estudiantes y 250 empleados administrativos, es de resaltar que la institución universitaria no cuenta con sistemas de tratamiento previo a su descarga al sistema de alcantarillado, es por ello que el sistema es coherente con las premisas institucionales del sistema de gestión ambiental, políticas y certificaciones de contribuir al buen desempeño ambiental.

Métodos

El sistema de tratamiento de Humedales artificiales flujo subsuperficial acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas, se desarrolló en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia en el Municipio de Medellín.

Caracterización del agua residual

El sistema se desarrolló con la referencia de la caracterización del agua residual domestica realizada por Bedoya, Ardila y Reyes (2014). en su trabajo evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la institución universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia.

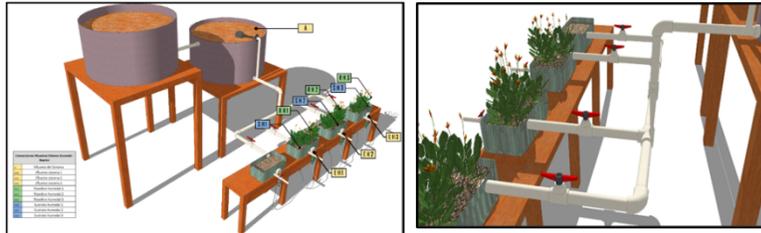
Construcción del sistema de humedales artificiales y reactores de lecho fijo.

En la construcción del sistema se implementaron dos tanques escalonados cada uno de 14 litros para el almacenamiento, distribución y pretratamiento del agua residual, para los humedales se usaron cubículos de plástico transparente de 37,4 cm de largo, 26,7 cm de ancho y 13,8 cm de alto con una capacidad de 10,3 L y profundidad de 25 cm (figura 1). El diseño fue realizado según el modelo de Reed y RAS, (2017), basados en la DBO_5 . (Minambiente, 2017). La vegetación utilizada fue *Heliconia psittacorum*; plantadas en los cubículos con una densidad de 10 plantas por cada uno y de 20 a 25 cm de alto; posteriormente se da una alimentación escalonada con el agua residual y solución nutritiva para plantas en las siguientes proporciones: 70:30, 50-50, 30-70 y solo agua residual por espacios de 5 días. Para los reactores se utilizaron tres recipientes plásticos, con un volumen final de 250 ml, el lecho fijo usado fue suncho, material plástico para embalaje con el mismo peso en los reactores, se esterilizó en luz UV durante 30 minutos, de flujo



ascendente, generado por una bomba tipo acuario y piedra difusora; el montaje de los reactores estuvo a temperatura ambiente y fotoperiodo 12/12 con luz natural. posteriormente fueron inoculados con cepas de *Chlorella vulgaris* se utilizó como medio de cultivo BG-11 con un inoculo inicial del 15%, controlado por cinco días en ambiente natural, la cepas fueron provenientes del Centro de Biotecnología de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia.

Figura 1. Esquema experimental del montaje humedal – reactor



Fuente: Elaboración propia.

Seguimiento del sistema humedal reactor

Se midieron parámetros fisicoquímicos como demanda química de oxígeno (DQO), a través del método SM 5220 D, nitrógeno total Kjeldahl SM-4500-Norg, pH, Potencial Redox, Conductividad, tomados con Kit de pH Sensión + marca HACH y turbiedad medida con turbidímetro portátil HF Scientific Micro Tpw, Los microbiológicos (coliformes totales, coliformes fecales (*E. coli*)), se cuantificaron mediante el método de filtración por membrana en agar *chromocult*, incubados 24h a 37°C, identificando las unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/ml) estos parámetros fueron medidos en los laboratorios de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, según los protocolos estandarizados y en el laboratorio de calidad de agua de la Universidad de Medellín para las pruebas de Nitrógeno del efluente. Para la cuantificación de bacterias nitrificantes y desnitrificantes, se realizaron muestreos de forma aleatoria en la rizosfera y el lecho filtrante; la técnica utilizada para la identificación y cuantificación de bacterias nitrificantes y desnitrificantes fue número más probable (NMP) tomada de Belser (1977) y modificada por estudiantes de especialización en Microbiología Ambiental de la I.U Colegio Mayor de Antioquia en el 2016. La identificación en sustrato se realizó tomando 1 g de grava, adicionando está a un tubo de ensayo con 9 ml de solución salina estéril al 0.85%, agitando durante un minuto a 3000 rpm. Para rizosfera se pesa 1 gramo de raíz, macerada en una cápsula de porcelana estéril y se diluye en un tubo con 9 ml de solución salina estéril al 0.85%, agitando durante un minuto a 3000 rpm. Se realizó un banco de diluciones seriadas desde 10^{-1} hasta 10^{-3} , sembrando 3 diluciones seriadas con cinco réplicas en caldo amonio para bacterias nitrificantes compuesto por sulfato de amonio 0,53 g, carbonato de calcio 1,052, potasio dihidrofosfato 1,052, sulfato heptahidratado 0,316 g y caldo nitrato para bacterias desnitrificantes preparado con KNO₃ 0,5 g, CaCO₃ 5 g, Glucosa 10 g, solución salina 50 ml. Se afora hasta un litro con agua destilada y enriquecido con 0,5 g/L sulfuro de sodio y rezarsurina 0,01%. Tomado de Belser (1977) y modificado por trabajo de investigación de estudiantes de Especialización en Microbiología Ambiental de la I.U. Colegio Mayor de Antioquia; las muestras fueron incubadas a temperatura ambiente en el laboratorio de Biotecnología de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia durante dos semanas



Resultados

Caracterización del agua residual

La tabla 1 presenta los parámetros evaluados en Caracterización de aguas domésticas de la I.U. Colegio mayor de Antioquia en 2014. Los cuales fueron tomados en cuenta para realizar la alimentación del sistema humedal reactor.

Tabla 1. caracterización del agua residual domestica de la Institución. Universitaria Colegio Mayor de Antioquia.
Fuente: Bedoya, Ardila y Reyes. (2014), pág. 279.

Parámetro	Unidad	Agua residual no tratada ¹
Caudal	mL/s	331.8
Temperatura	°C	24
pH	UdepH	8.7
Color	UPC	583
Turbiedad	UNT	33
Conductividad	μS/cm	852
Oxígeno disuelto	% Sat. ³	37
Acidez	ppm	ND
DBO ₅	ppm	255
DQO	ppm	326.9
COT	ppm	213
Fósforo	ppm	13.2
Cloruros	ppm	177.7
Nitritos	ppm	0.0653
Nitrógeno amoniacal	ppm	54.9
Nitrógeno total	ppm	202.2
Sólidos suspendidos	ppm	67.0
Sólidos totales	ppm	538
Coliformes totales	NMP/100mL	> 2400

Construcción del sistema de humedales artificiales y reactores de lecho fijo.

La construcción contemplo el bajo tiempo de retención hidráulica, asociado al volumen de los tanques y al caudal; el pretratamiento se lleva a cabo con dos tanques reciclados uno de ellos con un tamiz para retener sólidos de mayor tamaño. Autores como Mefcalt y Eddy (1995) proponen que todo sistema de tratamiento natural debe llevar a cabo un pretratamiento para la retención de solidos gruesos; dando paso por medio de tubería en PVC de media pulgada y controlada con una válvula de flotador, para garantizar un nivel de la lámina de agua constante al tanque de distribución, tal como se observa en la figura 2. En la tabla 2 se presentan los datos obtenidos para el diseño de los humedales artificiales

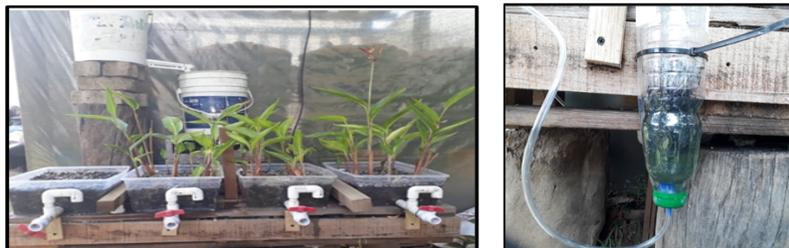
Tabla 2. Datos para el diseño de los humedales

Modelo para eliminación DBO, flujo pistón, ley de darcy: CÁLCULO DEL HUMEDAL UTILIZANDO EL MODELO DE DISEÑO DE REED Y RAS, (2017) y ROMERO 2004				
Parámetro de diseño	Valor	Unidad	Símbolo	Observación
Caudal	0,005	l/min	Q	-
DBO ₅ entrada	303,55	mg/l		porcentaje de 65%
Constante de primer orden	1,104	d ⁻¹	K ₂₀	1,839
Temperatura promedio favorable en el tratamiento del agua residual.	22,3	°C	T	-
Profundidad promedio del agua	0,55	M	H	-
Altura total del humedal	0,138	M	Hl	-



Porosidad promedio lecho	0,37	adimensional	N	2 mm
Pendiente del humedal	0,01	m/m	m	-
Conductividad hidráulica	1000	m/d	Ks	-
Concentración de DBO5 en el efluente HSSF	81,3	mg/LO ₂	C	Supuesta eficiencia del humedal
Constante de primer orden dependiente de la temperatura	1,26	d ⁻¹	KT	-
Área superficial	0,1	m ²	As	-
Carga orgánica por m2	48,9	gDBO/(m ² *d)	-	Kg DBO/ha*d <122 según romero
Carga hidráulica	0,049	m ³ /(m ² *d)	-	m ³ /(ha*d) <1870 según romero
Área transversal (m2)	5,0	cm ²	-	-
Ancho humedal (m)	0,3	M	-	-
Largo del humedal (m)	0,4	M	-	-
L/A	1,4		-	-
Tiempo de retención hidráulico	1,04	Día	-	-

Figura 2. Montaje de tanques, sistema de humedales y reactores con microalga



Fuente: Elaboración propia

En el montaje de los reactores se utilizaron botellas recicladas PET (Polietileno Tereftalato) de 500 ml con perforaciones en la parte superior para el ingreso del agua residual, en la tapa para la aireación y alrededor como se muestra en la figura 2; el material de soporte se definió luego de experimentar en laboratorio mediante montaje en Erlenmeyer de 500 ml con medio BG-11 inoculado con cepas *Chlorella vulgaris*.

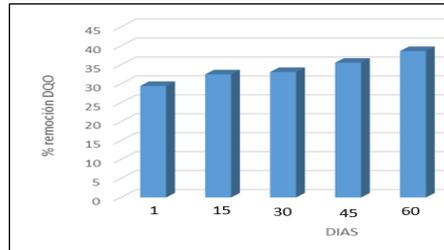
Eficiencia en Remoción de Materia Orgánica y Nitrógeno

Los porcentajes de remoción de DQO oscilaron entre el 30 y 40% (figura 3) se asocian a los procesos físicos sedimentación y filtración, además de químicos que se dan en el humedal (García, Morato, Bayona, 2004) en este caso se relaciona con la retención en el lecho filtrante del humedal más que a procesos de degradación biológicos, en razón de la turbiedad medida al inicio y al final del tren de tratamiento, si bien la turbiedad no es una variable directamente atribuible a materia orgánica, si es directamente proporcional a la cantidad de sólidos en suspensión, y estos



a su vez representan una gran porción de la materia orgánica en un agua residual doméstica, al comparar con la turbiedad final fue menor que al inicio, donde se puede inferir que dichos sólidos en suspensión se eliminaron en procesos físicos como sedimentación y filtración, por tener un tiempo de retención de un día y autores como (García et al, 2004) reportan tiempos de retención hidráulico de 3 y 4 días para mejorar la degradación de materia orgánica Mefcalt y Eddy (1995)

Figura 3. Porcentajes de remoción en DQO



Fuente: Elaboración propia.

El afluente del sistema tuvo una concentración de 20 mg/l (tabla 3) de nitrógeno determinado por colorimetría con Kit de nitrógeno, Mefcalt y Eddy (1995) se refieren a los procesos de desnitrificación a la eliminación del 70 al 90 % del nitrógeno total y a la nitrificación del 5 al 20%. El sistema humedal - reactor por la presencia de bacterias nitrificantes y desnitrificantes muestran eficiencia en la remoción del nitrógeno total, comprendido por nitrógeno orgánico, amonio, nitrito y nitrato, dados los mecanismos de asimilación y nitrificación – desnitrificación en la degradación. (Salgado et al., 2010). La eliminación de nitrógeno orgánico es asociado a los sólidos suspendidos removidos en este tipo de sistemas por sedimentación y filtración, en la entrada y medio poroso, tal como se relaciona en los datos de cuantificación de bacterias nitrificantes (figura 7) se infiere que el nitrógeno amoniacal es absorbido por este proceso y posteriormente en forma de nitrato, y el cual es transportado por el agua percolada se degrada por las plantas y la desnitrificación bacteriana, en este caso las cantidades provenientes del humedal posteriormente son captadas por las microalgas para su proceso de crecimiento. (Mefcalt y Eddy, 1995).

Tabla 3. Datos de la medición de nitrógeno

NTK (mg/L)	
AFLUENTE	20
EFLUENTE	5,31
% DE REMOCION	73.4%

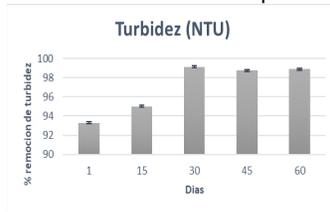
Fuente: Elaboración propia.

Remoción de turbiedad

La remocion de turbiedad fue superior al 90% resultados que concuerdan con Marin, Solis, Lopez, Bautista, Romellon (2007) los cuales obtuvieron porcentajes de remocion entre el 95 y 98% de turbidez. Estos resultados evidencian la capacidad del humedal como filtro para retencion de solidos tal como se presenta en la figura 4.



Figura 4. Eficiencia de remoción de turbiedad por el sistema humedal reactor.

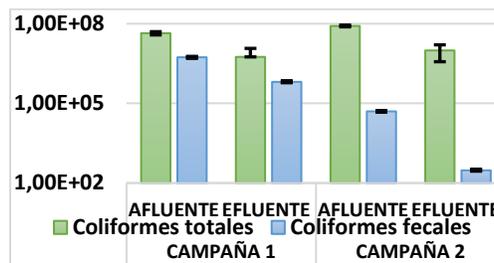


Fuente: elaboración propia

Evaluación microbiológica

Se obtuvieron porcentajes de remoción para coliformes totales de 87% y 88% para coliformes fecales (*E.coli*), y remociones del 88% y 99%, en cuanto a la remoción de coliformes fecales (*E.coli*) concuerda con lo obtenido por algunos autores como Vymazal et al., Rabat, J. Botero G, Kadlec R.H. and Wallace S., Díaz F., et al, Ávila, C., et al. (Rabat, J., 2016, Botero G., 2005, Kadlec R. and Wallace S., 2009, Díaz F., et al., 2010, Ávila, C., et al. 2012) quienes reportan para estos bioindicadores remoción en coliformes entre el 90% al 99% y enfatizan que en los casos en que se registraron las tasas más bajas, debido a tiempos de retención menores. Autores como Gonzales F, 2017. reporta remoción de coliformes totales de 77,65% a 99% lo cual es coherente con los resultados obtenidos en los muestreos encontrándose en este rango porcentual. Según lo descrito en el manual de depuración de aguas residuales urbanas de alianza por el agua la remoción de patógenos en los sistemas de humedales se encuentra entre 1 a 2 unidades logarítmicas, lo cual concuerda con los resultados obtenidos y representados la figura 5 (Alianza por el agua, 2008), se observó mayor eliminación de coliformes fecales (*E. coli*) comparados con los coliformes totales, lo cual se atribuye a la presencia de protozoos ya que son un grupo que cumplen esa función, dada la competencia para la consecución de materia orgánica con predilección de bacterias patógenas. Winkler, (2005).

Figura 5. Diagrama resultados microbiológicos



Fuente: Elaboración propia

La remoción de microorganismos patógenos como los coliformes fecales (*E.coli*) se presenta mediante procesos de sedimentación, filtración, radiación solar o depredación por parte de protozoarios En el sistema humedal – reactor se evidenció el crecimiento de protozoos, rotíferos, ciliados de vida libre y flagelados, además de microalgas que autores como Rabat (2016). y Jasper. et al. (2013) reportan la eliminación de patógenos debido a la depredación por parte de protozoos, además se ha observado como la eliminación de patógenos es dependiente del tiempo de retención. Además,



estos microorganismos contribuyen a la eliminación de materia orgánica y son bioindicadores del funcionamiento del sistema de tratamiento.

En los reactores se realizó seguimiento mediante microscopía óptica y contraste de fase, encontrando microorganismos bioindicadores como rotíferos, protozoos de vida libre como navícula, Zapata y González. (s.f). reportan afinidad en aguas orgánicamente contaminadas, ricas en nutrientes y pobres en oxígeno, que los hace ser tolerantes a medios contaminados, además de la microalga en estudio, lo cual permitió observar cómo *Chlorella vulgaris* se adaptó a las condiciones del sistema y al cambio de sustrato de BG-11 a el agua residual proveniente del humedal, mediante la técnica de peso seco se determinó aumento de la biomasa tal como se presenta en la tabla 4. Autores como Kumar et al., (2018) en estudios con microalgas para tratamiento de aguas residuales reportan una ganancia de biomasa por peso seco de 12.4% y 17.4%.

Tabla 4. Valores del peso en los reactores

Sistema de Reactores	Valores
Peso inicial del zuncho(g)	4,5
Desviación	± 0
Peso con biomasa (g)	5,15
Desviación	± 0,12
Peso seco (g)	0,65
Desviación	± 0,12
% de peso ganado	14,4

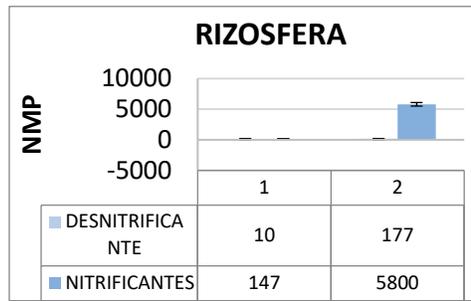
Fuente: Elaboración propia

Cuantificación de bacterias nitrificantes y desnitrificantes en el soporte y raíces de plantas.

Las muestras fueron analizadas mediante la técnica de NMP (número más probable), para estimar la cantidad de bacterias Nitrificantes y Desnitrificantes asociadas al material de soporte y la rizosfera, una vez realizado el recuento se detecta la presencia de los dos grupos, en un mayor número nitrificantes para el primer muestreo donde autores como Rodríguez y Toro, (2006) indican su óptimo rango de pH entre de 6.6 y 7.8 en la figura 8 se presentan los resultados encontrados en el recuento, y se evidencia el equilibrio con la presencia de bacterias desnitrificantes en el segundo muestreo.



Figura 8. Presencia de bacterias Nitrificantes y Desnitrificantes



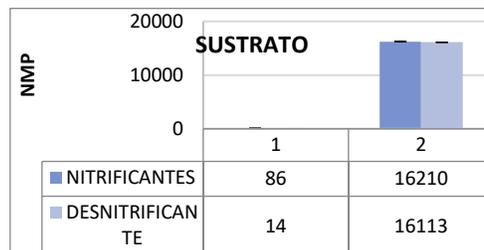
Fuente: Elaboración propia.

Considerando la eliminación total del Nitrógeno para aguas residuales de origen doméstico, este compuesto se presenta en forma de amoníaco donde las bacterias nitrificantes consumen cantidad de este en su proceso de crecimiento, transformando en una forma diferente de nitritos a nitratos, los cuales finalmente se reducen en el proceso de desnitrificación (Winkler, 2005); el sistema entonces y de acuerdo a autores como Manga, Molinares y Arrieta, (2007) presenta eliminación biológica del nitrógeno contenido en el agua residual.

En la figura 9 se observa el comportamiento de los muestreos. Una vez hechos los recuentos se encontraron en la dilución 10^1 a 10^3 los grupos de bacterias, tanto para rizosfera y material de soporte; lo cual puede sugerir la formación de biopelículas, proceso que ocurre de 8 a 10 días indicando una maduración del sistema. Además, el análisis microbiológico no tiene en cuenta la cantidad de Nitrógeno sino la población microbiana y su actividad que permite la oxidación del nitrógeno a formas utilizadas por las plantas o devueltas a la atmosfera en forma de N_2 (Rodríguez y Toro, 2006).

El muestreo uno se realizó al día 30 de la puesta en marcha y el muestreo dos al día 90, teniendo en cuenta que autores como Rodríguez y Toro, (2006) en estudios obtenidos reportan el crecimiento óptimo de los dos grupos de bacterias al día 15 por ser el tiempo que requieren para desarrollar su maquinaria enzimática y reproducirse. Se encontró mayor número de nitrificantes comparadas con las de desnitrificantes en el primer muestreo de rizosfera.

Figura 9. Presencia de bacterias Nitrificantes y Desnitrificantes



Fuente: Elaboración propia.

Similares en los dos tipos de bacterias en el sustrato, autores como Pérez, Peña y Sanabria (2011) reportan datos similares para bacterias nitrificantes en humedales con *Heliconia Psittacorum* al relacionar los resultados fisicoquímicos y microbiológicos se encontró un equilibrio en la ecología



del sistema siendo similares los datos bacterias desnitrificantes y nitrificantes, al respecto González (2017) establece que las primeras realizan su proceso en valores de pH entre 6.5 y 7.5 tal como se observó en los datos obtenidos y Mefcalt y Eddy (1995) refieren una condición óptima de crecimiento a pH de 7 resultados que concuerdan con lo obtenido en este trabajo.

Conclusiones

El diseño y puesta en marcha del sistema humedal – reactor responde a las condiciones hidráulicas y ambientales de funcionamiento, sin generación de olores, ni presencia de vectores, además de la adherencia del alga en estudio.

En el sistema humedal – reactor se encontró una baja remoción de DQO posiblemente ligado a los compuestos que aportan a este parámetro se encontraban más en dilución que en suspensión, por lo cual no fueron retenidos o controlados por la estructura física y química del sistema. Sin embargo, para el Nitrógeno se evidencian remociones aceptables de acuerdo a lo planteado en la teoría para las remociones del compuesto.

Según los resultados se puede considerar un adecuado funcionamiento en el sistema humedal reactor para el tratamiento de aguas residuales domésticas, dada la eliminación de bioindicadores de contaminación fecal y la presencia de bacterias nitrificantes y desnitrificantes responsables de los procesos de nitrificación y desnitrificación para la eliminación de nitrógeno.

Referencias

Artículos de revistas

- Bedoya, J., Ardila, A., y Reyes, J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la institución universitaria colegio mayor de Antioquia, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30 (3), 275-283. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/370/37031522004.pdf>
- Belser, L., (1977) Nitrate reduction to nitrite, a possible source of nitrite for growth of nitrite-oxidizing bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*.
- Candela, R. (2016). *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones*. Recuperado de: <https://stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/12170/1/91541023.pdf>
- Kumar, M., Enamala, S., Chavali, M., Donepudi, J. Yadavalli, R. Kolapalli, B.... Kuppam, C. (2018). Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. *Elsevier*, 94, 49-68. Doi <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.012>
- Lizarazo, J. y Orjuela, M. (2013). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf>
- Marín, C., Solís, R., López, G., Bautista, R., y Romellón, M. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México. *Revista Iberoamericana de Las Ciencias*



- Biológicas y Agropecuarias*, 5(10), 4-20. Recuperado de <http://www.ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/54>
- Molina, F., y Mejía, R. (2012). *Presente y futuro del tratamiento de aguas residuales municipales en el departamento de Antioquia: una mirada inicial*. Recuperado de http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/7734/1/MolinaFrancisco_2012_tratamientoaguasresiduales.pdf
 - Pérez, N., Peña, M., y Sanabria, J. (2011). Comunidades bacterianas involucradas en el ciclo del nitrógeno en humedales construidos. *Ingeniería y competitividad*. 11(2), 83-92. Doi: <https://doi.org/10.25100/iyc.v13i2.2676>.
 - Rabat, J. (2016). *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración*. (Tesis de maestría). Alicante. España.
 - RAS, (2017). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, título c sistemas de potabilización. Ministerio de Vivienda. Recuperado de: <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/Titulo%20C%20-%20Dic%204%202013.pdf>
 - Rodríguez, N., y Toro, C. (2006). *Estandarización del tiempo de incubación y concentración de CaCO₃, SO₄ (NH₄)₂ Y KNO₃ para la prueba del NMP con bacterias nitrificantes y denitrificantes usando como matriz compost*. (Tesis de grado). Bogotá. Colombia.
 - Salgado, I., Cruz, M., Durán, M., Oviedo, R., Carballo, M., y Martínez, A. (2010). Bacterias como herramientas potenciales en el mejoramiento de humedales artificiales para el tratamiento de aguas. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*. 41, 1-10. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181220509036>
 - Zapata, V., y González, M. (s.f). Observación y reconocimiento de algas y protozoos como bioindicadores en biotecnología ambiental. (Proyecto de investigación). Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Colombia.

Libros

- García, J., Morató, J., y Bayona, J. (2004). NUEVOS CRITERIOS PARA EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS. Una alternativa de bajo coste para el tratamiento de aguas residuales. *Centro de Publicaciones de Campus Nord*. Barcelona
- Manga, J., Molineras, N., y Arrieta, J. (2007). *Tratamiento de aguas residuales mediante sistemas de lagunaje*. Barranquilla (Colombia): Ediciones Uninorte.
- Metcalf & Eddy Inc. (1995). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid (España): Editorial McGraw-Hill.
- Winkler, M. (2005). *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. Balderas 95 (México, D.F): Editorial Limusa, S:A de C.V. Grupo Noriega Editores
- Acosta, J. (2001). *Ciudades del Conocimiento*. Panamericana formas e impresos, Bogotá, D.C., pp. 116.

Fuentes electrónicas

- Acodal. (2017). 70% de las aguas servidas en el país no son tratadas y generan contaminación. Medellín: ACODAL. Recuperado de <http://www.acodal.org.co/70-de-las-aguas-servidas-en-el-pais-no-son-tratadas-y-generan-contaminacion-acodal/>
- Alianza por el agua. (2008). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. Secretariado de Alianza por el agua, Ecología y Desarrollo. 1-264. Recuperado de <https://doi.org/Z-2802/08>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2015). *Cuarta Guía de Construcción Sostenible*. Medellín. Recuperado de



https://www.metropol.gov.co/ambiental/Documents/Construccion_sostenible/Guia-4-GCS4EdificacionesSostenibles.pdf

- EPA - Environmental Protection Agency. (septiembre de 2000). Folleto informativo de Tecnología de Aguas residuales. Washington, D.C., United States. Recuperado de https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs_00_024.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017). Colombia supera la meta en el tratamiento de aguas residuales en el país. Minvivienda. Recuperado de <http://www.minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/noticias/2017/diciembre/colombia-supera-la-meta-en-el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-el-pais>
- UNESCO. (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017 (Aguas Residuales el recurso desaprovechado). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Paris, Francia.

Sobre los autores

- **Kelly Leani Quintero García:** Ingeniero Ambiental, Especialista en Microbiología Ambiental, Magister en Desarrollo Sostenible del Instituto Tecnológico Metropolitano ITM. Profesor auxiliar Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Kelly.quintero@colmayor.edu.co
- **Joan Amir Arroyave Rojas:** Ingeniero Sanitario, Especialista en Construcción Sostenible, Magister en Desarrollo Sostenible del Instituto Tecnológico Metropolitano ITM. Profesor asistente Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Joan.arroyave@colmayor.edu.co
- **Andrea Anchila Arteaga:** Ingeniero Ambiental, Estudiante Especialización en Construcción Sostenible Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Profesor ocasional tiempo completo Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. andrea.anchila@colmayor.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

