

Importancia del nivel de oxígeno en la eficiencia de un humedal artificial con flujo subsuperficial vertical ascendente

Importance of the level of oxygen in the efficiency of an artificial wetland with subsuperficial vertical ascending flow

Augusto Batista ¹, Cesar Carreño ¹, Cristela Gaitán ¹, Nisbeth Núñez ¹, Erick Vallester ^{2*}

¹ Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, ² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá

Resumen Los sistemas de humedales artificiales son muy utilizados actualmente en muchos países como una forma de tratamiento secundario de aguas residuales. Esta técnica sirve para reducir los nutrientes como el fósforo y el nitrógeno que son los principales causantes de la eutrofización. En este artículo, se presentarán los resultados de la investigación sobre un modelo a escala de un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical ascendente. Esta investigación fue realizada en la Universidad Tecnológica de Panamá. El funcionamiento del modelo se enfoca en la eficiencia de remoción de concentraciones variables de nitrato (NO₃) (entrada y salida) y en cada punto de muestreo (entrada, tubo superficial, tubo medio, tubo profundo, salida) en el sistema, a diferentes niveles de oxígeno. Mediante la prueba de trazador químico de cloruro de sodio, se obtuvo el tiempo de retención hidráulico real de 23 horas. Este tiempo representa el lapso de tiempo que demoraría el agua sintética en recorrer los estratos para ser depurada.

Palabras clave Humedal artificial, microorganismos, nitrato, oxígeno disuelto.

Abstract Artificial wetland systems are currently widely used in many countries as a form of secondary treatment of wastewater. This technique is used to reduce nutrients such as phosphorus and nitrogen, which are the main cause of eutrophication. This article will present the results of a research on a scale model of an artificial upward vertical subsurface flow wet-land. This research was conducted at the Technological University of Panama. The model operation focuses on the removal efficiency of variable nitrate concentrations (NO₃) (input and output) and at each sampling point (inlet, surface tube, middle tube, deep tube, outlet) in the system, at different oxygen levels. By means of the chemical tracer test of sodium chloride, it was possible to obtain the actual hydraulic retention time of 23 hours. This time represents the lapse of time it takes for the synthetic water to move through all the layers and be purified.

Keywords Artificial wetlands, microorganisms, nitrate, dissolved oxygen.

* Corresponding author: erick.vallester@utp.ac.pa

1. Introducción

Los humedales naturales han estado mucho antes de que existiera la humanidad, por lo tanto, han brindado servicios ecológicos al medio ambiente durante largos periodos de tiempo. Debido al crecimiento poblacional de las personas y el interés económico, muchos de estos humedales naturales se han visto afectados de manera significativa. Donde según estadísticas globales, se conoce que un 64 al 71% de los humedales naturales en el Siglo XX han ido disminuyendo o han sido destruidos por la acción antropogénica [1].

Investigadores de diversos países como México, Nicaragua, Colombia, entre otros, han realizado estudios de humedales, donde se ha demostrado que estos ecosistemas son

esenciales para la depuración de aguas, cuna de diversidad biológica, control de erosión, y reducción de nutrientes.

Aprovechando que estos sistemas cumplen funciones ecológicas necesarias para la conservación del ambiente, científicos e investigadores han tomado como modelo a los humedales naturales para diseñar y construir humedales artificiales [2].

El sistema de humedales artificiales es ampliamente usado actualmente en muchos países como un sistema de tratamiento secundario para aguas residuales, con el fin de reducir los principales causantes de la eutrofización en cuerpos hídricos como el fósforo y el nitrógeno [3-4].

En Panamá aún no existen muchos estudios relacionados con el comportamiento de sistemas de humedales artificiales

de flujo subsuperficial vertical ascendente, por lo tanto, es de suma importancia generar nuevos conocimientos en este ámbito y sus aristas [5].

Esta investigación busca conocer cómo se comporta el oxígeno disuelto en diferentes partes del humedal artificial y si este parámetro químico tiene alguna influencia en la eficiencia para remover concentraciones de nitratos.

2. Objetivos

- Conocer el comportamiento hidrodinámico del humedal por medio de trazador químico cloruro de sodio (NaCl).
- Evaluar la eficiencia de remoción de nitrato global y en cada punto de muestreo con respecto a los diferentes niveles de oxígeno.
- Observar la morfología de los microorganismos presentes en el sistema mediante la prueba de Tinción Gram.

3. Metodología

Esta investigación fue realizada como proyecto final de la asignatura de tratamiento de aguas residuales, donde las áreas de trabajo que se utilizaron fueron los laboratorios de sanitaria e hidráulica de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP). Se trabajó sobre un modelo a escala de humedal artificial de flujo subsuperficial vertical ascendente, el cual consiste en un reactor de acrílico, con lecho filtrante inerte, en ausencia de plantas. A este sistema se le suministró un agua sintética que simula un agua contaminada.

El humedal artificial utilizado tiene dimensiones de 1.20 m de longitud, 0.6 m de ancho y 0.68 m de profundidad. El sistema está conformado por una capa de grava grande, una segunda capa de gravilla y una capa final de manto de arena. El humedal también contiene 3 tuberías de PVC con diámetros de 3 cm, colocados a diferentes niveles de profundidad (Superficial, Medio y Profundo) [6]. (Ver figura 1).

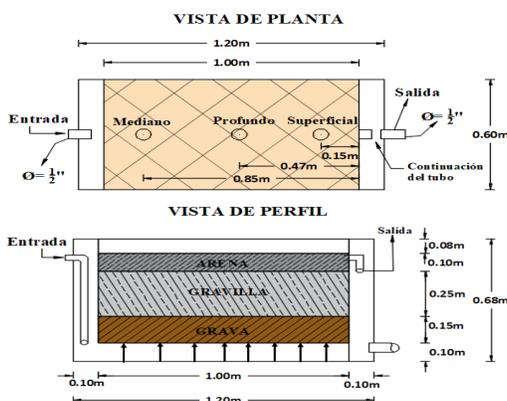


Figura 1. Vista de planta y perfil del humedal artificial.

El lecho filtrante del humedal está conformado por tres diferentes capas de material y sus respectivos espesores. La distribución de las capas está definida de la siguiente manera:

- Capa de grava: 0.15m
- Capa de gravilla: 0.25m
- Capa de arena: 0.10 m

El agua sintética estaba compuesta por concentraciones de nitrato (NO₃) que simulan un agua contaminada y metanol (CH₄O) como fuente de carbono.

Para determinar el comportamiento hidrodinámico se realizó una prueba de trazador químico de cloruro de sodio (NaCl), que consistía en colocar una solución de 250 ml de NaCl directamente en la sección profunda del reactor y agitarla manualmente durante 5 min con el fin de homogenizarla con el agua que se encontraba en esta sección. Este procedimiento se realizó mientras la válvula de control de flujo estaba cerrada para evitar que el agua fluyera dentro del sistema sin estar completamente mezclada. Después de esto, se abrió la válvula de control para dar inicio a la prueba [7].

Luego de obtener los datos de conductividad utilizando un medidor de conductividad (tabla 1) se procedió a realizar el cálculo para obtener el tiempo de retención real con la siguiente fórmula [8-9].

$$tr = \frac{\int_0^{\infty} Ct dt}{\int_0^{\infty} C dt}$$

tr = Tiempo de retención real.

C = Concentración que sale del reactor en el tiempo t.

t = Tiempo desde la adición de trazador en la entrada del reactor.

Producto de este procedimiento se obtuvo que el tiempo de retención hidráulico que fue de 23 horas, utilizando un caudal de 130 ml/min.

Se utilizó posteriormente el método de la curva de tendencia para determinar el tipo de flujo predominante dentro del sistema, basado en los criterios y condiciones [10] planteados en la parte de resultados (ver tabla 4).

Luego de haber realizado la prueba de trazador químico explicada anteriormente, se inició la etapa de aclimatación del sistema que radicaba en preparar agua sintética a base de una concentración de 140 mg/L de nitrato y 9 ml de metanol (CH₄O) por cada metro de agua que se agregaba. Cabe mencionar que el caudal utilizado durante el periodo de aclimatación y medición estuvo dentro del rango de 100 a 120ml/min.

El agua sintética suministrada se preparó en un tanque de mezcla de 300 L, donde esta fue enviada a un segundo depósito de mayor altura llamado tanque de suministro (200 L) por medio de una bomba no sumergible que trabajaba a un caudal de 30 L/min. Luego, el líquido descendió por gravedad a través de las tuberías de PVC. Como parte de este sistema de tubería, se encuentra una válvula que permite regular el caudal, un poco después se encuentra una bolsa de alimentación unida a la tubería, la cual contiene una mezcla de bisulfito de sodio y

difosfato de potasio que se añade al agua sintética por medio de goteo. En la parte baja de este tramo después de la bolsa de alimentación, se encuentra una válvula de muestreo de entrada. Por último, el líquido entra al humedal artificial para que se le dé su debido tratamiento.

Para lograr la formación de microorganismos y que estos realizaran los procesos de desnitrificación y nitrificación en el sistema, fue necesario reducir el oxígeno disuelto (OD) a valores menores de 3 mg/l, por lo tanto, se optó por utilizar una solución de bisulfito de sodio (solución que reduce el OD) en conjunto con difosfato de potasio (solución que regula el PH) a través de una bolsa de alimentación con un goteo aproximado de 20 - 30 gotas por minuto.

Luego de la aclimatación del sistema se realizaron mediciones periódicas en cinco puntos de muestreo (entrada, superficial, media, profunda y salida) para determinar los valores de NO₃ y OD respectivamente y verificar si el sistema estaba funcionando adecuadamente.

Después de obtener varios valores de NO₃ y OD, se procedió a preparar medios de cultivo (agar) para colocar pequeñas muestras de la solución sintética de los diferentes puntos a evaluar, y obtener un crecimiento de los microorganismos.

Para finalizar la investigación se utilizó el método de la tinción de Gram [11] con el objetivo de visualizar y determinar los microorganismos que crecen en el humedal artificial. Dado que estos microorganismos son los principales actores, que realizaron el trabajo de descomposición y reducción de nitratos en el sistema [11-12].

En la tabla 1 se detallan los equipos, métodos de análisis y los parámetros medidos a lo largo de la investigación.

Tabla 1. Equipos y métodos de análisis

Equipo y método de análisis	Parámetros medidos
Método – Trazador Químico	Tiempo de retención hidráulica (TRH)
Equipo: Multiparámetro YSI 556 MPS, Sensor ES-2 Electrical Conductivity +Temperature Decagon Em50 Data Logger	Conductividad
Equipo: Sonda LDO10101, Multiparámetro HQ40D HACH	Oxígeno Disuelto (OD)
Equipo: HACH Modelo IntelliCALTMISENO 318101 Multiparámetro HQ40D HACH	Nitrato (NO ₃)
Método – Volumétrico	Caudal (Q)
Método – Tinción Gram	Bacterias Gram Negativos y Positivos
Equipo: Microscopio	Morfología de Microorganismos

En la parte de resultados y discusión se utilizó el formato de fecha mostrado en la tabla 2, para mantener un orden simple y claro en la estructura de las tablas y gráficas.

Tabla 2. Formato de fecha

Fecha	Día
28-sept-2017	1
3-oct-2017	2
4-oct-2017	3
5-oct-2017	4
16-oct-2017	5
17-oct-2017	6
18-oct-2017	7
19-oct-2017	8

4. Resultados y discusión

4.1 Comportamiento Hidrodinámico tablas

Los resultados de trazador químico se obtuvieron midiendo el cambio de conductividad a lo largo de un periodo aproximado de 60 horas, con lo que se obtuvieron los resultados mostrados en la gráfica 1.



Gráfica 1. Comportamiento Hidrodinámico.

Mediante el análisis de la gráfica 1, se observa la duración total de la prueba del trazador y la variación de conductividad, respectivamente. El valor máximo de conductividad fue de 823 $\mu\text{S/cm}$ y se obtuvo en un tiempo de 10.25 horas.

A partir de los valores obtenidos en la prueba de trazador químico y los cálculos realizados, se determinó el tiempo de retención hidráulico real, el cual fue de 23 horas.

A continuación, se muestran las tablas y resultados obtenidos del método de la curva de tendencia, que forma parte del comportamiento hidrodinámico. En la tabla 3 se presentan los parámetros y valores obtenidos de la gráfica 1, los cuales son necesarios para determinar la tendencia del flujo usando el método de curva de tendencia.

Tabla 3. Parámetros y valores de método de la curva de tendencia

Parámetro	Descripción	Valor Obtenido (min)
Ti	Tiempo que aparece el trazador.	150
T0	Tiempo teórico de residencia.	1231
Tp	Tiempo en que se alcanza la concentración máxima.	615
Tc	Tiempo en que se alcanza la mitad de la concentración máxima.	1200
Tb	Tiempo en que se alcanza un décimo de la concentración máxima.	2832
Tm	Tiempo en que pasa la mitad del trazador.	1167
Tf	Tiempo completo en donde pasa toda la solución del trazador.	4170
E	Excentricidad de la curva; $e = [(Tf - Tp) - (Tp - Ti)] / T0$.	2.51

En la tabla anterior se pueden ver los datos obtenidos de la gráfica resultante de la prueba de trazador químico, dichos datos son utilizados para determinar la tendencia del flujo dentro del sistema.

En la tabla 4 se muestran los criterios y condiciones que permitirán clasificar los resultados de cada criterio, estos criterios permiten determinar el comportamiento del flujo dentro del sistema según el método de curva de tendencia.

Tabla 4. Criterios y condiciones del método de la curva de tendencia

Criterio	Condiciones
Ti/T0	Ti/T0 = 0 flujo mezcla completa, Ti/T0 = 1 flujo pistón y Ti/T0 < 0.3 puede existir corto circuito
Tp/T0	Tp/T0 = 0 flujo mezcla completa, si Tp/T0 = 1 y Ti/T0 > 0.5 predomina flujo de pistón
Tc/T0	Tc/T0 = 0.69 flujo de mezcla completa
Tb/T0	Tb/T0 = 2.3 flujo mezcla completa
Tm/T0	Tm/T0 < 1 Corto circuito, Tm/T0 > 1 acumulación indeseada de trazador
E	E > 2.3 flujo mezcla completa o E = 0 flujo tipo pistón

En la tabla 5 se presentan los resultados de cada criterio obtenidos mediante los datos expuestos en la tabla 3 y el análisis correspondiente de acuerdo con las condiciones dadas en la tabla 4, los cuales permitieron determinar la tendencia del flujo del sistema.

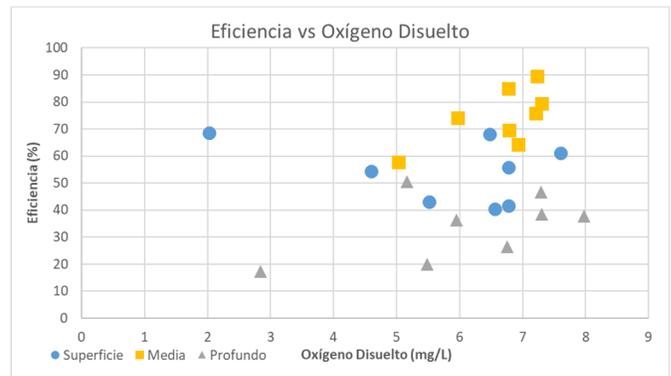
Tabla 5. Resultados de la curva de tendencia

Criterio	Resultado	Análisis
Ti/T0	0.12	Predomina flujo de mezcla completa.
Tp/T0	0.50	Predomina flujo de pistón.
Tc/T0	0.97	Tiende a mezcla ideal.
Tb/T0	2.30	Mezcla completa.
Tm/T0 < 1	0.95	Corto circuito o zona muerta.
E > 2.3	2.51	Flujo mezcla completa.

Los resultados de la curva de tendencia (tabla 5) indican que el flujo del sistema tiende a comportarse como flujo de mezcla completa.

4.2 Eficiencia de los puntos muestreo en el reactor con relación al oxígeno disuelto

En la gráfica 2 se presenta una muestra de manera individual, sobre los valores de eficiencia de remoción de nitratos versus la variación de niveles de oxígeno medidos en los puntos de muestreo superficial. Media y profunda respectivamente.



Gráfica 2. Eficiencia de remoción vs niveles de oxígeno disuelto.

Del análisis de la gráfica 2 se observó que los valores mayores de eficiencia le corresponden al punto medio con valores alrededor del 60-90%, manteniendo niveles de oxígeno disuelto en el rango de 6 a 7.3 mg/L. Se concluye que este rendimiento es debido a que el agua tiene concentraciones menores de nitrato, producto del proceso de desnitrificación que se da en la parte profunda.

En el punto de muestreo profundo se aprecia que los niveles de eficiencia rondan alrededor del 20 al 50%, con niveles de 5 a 8 mg/L de oxígeno disuelto. Los valores de eficiencia en este estrato se ven afectado por las altas concentraciones de nitrato provenientes del tanque de suministro y por ende cuando se tomaron las muestras, las concentraciones de nitrato siempre mantuvieron valores altos.

Con respecto a la parte superficial, se observa que la mayoría de los valores de eficiencia se encuentran en el rango de 40 a 60%, manteniendo niveles 5.5 a 7.6 mg/L de oxígeno disuelto. Esto se debe a que en la parte superficial ocurre el proceso de nitrificación con mayor frecuencia, dado que se infiltra oxígeno por la capa superior de arena, la cual está directamente expuesta al medio ambiente.

4.3 Eficiencia global de remoción de nitrato

En sistemas de humedales artificiales se espera obtener una alta eficiencia de remoción de nitratos (entrada – salida), sin embargo, en las mediciones se dieron altos niveles de oxígeno disuelto en los sustratos de grava (punto profundo) y gravilla (punto medio) lo cual afecta el proceso de desnitrificación; esto

resulta en un bajo desempeño del sistema a la hora de reducir los nitratos.

La tabla 6 presenta los resultados de las concentraciones de nitratos y la eficiencia global de remoción en el sistema, y cabe mencionar que los siguientes valores fueron obtenidos en días diferentes.

Tabla 6. Concentración de nitrato y eficiencia global del sistema

Fecha	Entrada (mg/L)	Salida (mg/L)	Eficiencia
1	185	155	16.2
2	144	92	36.1
3	162	106	34.6
4	131	84	35.9
5	195	122	37.4
6	220	139	36.8
7	172	116	32.6
8	140	93	33.6

En la tabla 6 se aprecia que la eficiencia del humedal se encuentra alrededor del 30 a 40%, de acuerdo con los valores de nitrato en la entrada y salida (se consideró el tiempo de retención hidráulica real).

4.4 Observación de microorganismos

Para la observación de microorganismos en el humedal artificial se tomaron muestras de agua en los puntos de muestreo y mediante la utilización del microscopio a 100x. Se observó los microorganismos presentes dentro del sistema.

4.4.1 Algas

Se observó la formación de microalgas en el sistema, esto confirma la existencia de microorganismos que están degradando el nitrato, permitiendo la liberación de moléculas de nitrógeno molecular (N₂); elemento que utilizan las algas como alimento para su crecimiento.

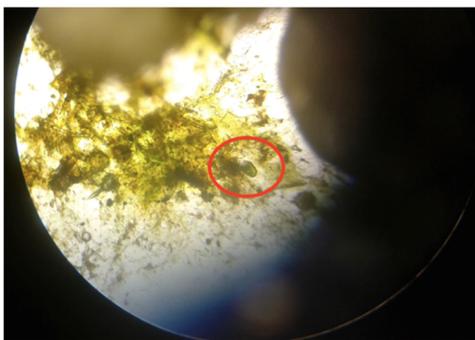


Figura 2. Vista de alga microscópica.

En las últimas semanas de medición se pudo apreciar que dentro del reactor existía un crecimiento significativo, donde se podía apreciar a simple vista, algas de mayor tamaño (algas macroscópicas) flotando en la parte superficial del agua donde entraba el caudal suministrado y en la capa de arena del reactor.

4.4.2 Tinción Gram

De los resultados obtenidos en esta prueba, se lograron identificar cocos y bacilos tanto Gram Negativos como Gram Positivos. En la figura 3, se aprecia el crecimiento bacteriano en la muestra del punto de salida.



Figura 3. Muestra de Tinción Gram en la salida del humedal.

Se puede visualizar el crecimiento de bacterias Gram positivas (color morado), según su forma son bacilos y según su arreglo son diplobacilos.

5. Conclusiones

La eficiencia de un humedal artificial depende en su totalidad de la capacidad del sistema para lograr una concentración de nitrato menor en la salida que en la entrada, mediante los procesos del ciclo de desnitrificación. Esta reducción de nitrato depende principalmente de los niveles de oxígeno disuelto en las capas de piedra, grava y arena.

La prueba de trazador químico nos permitió obtener el tiempo de retención real, permitiéndonos tomar las muestras de nitrato y oxígeno disuelto en un tiempo determinado. De manera precisa y acorde al tiempo que demora el flujo en salir del sistema.

Observando el comportamiento hidrodinámico del sistema y el tiempo de retención, se detectó que existen problemas de funcionamiento hidráulico en el reactor que afectan negativamente la eficiencia del sistema.

Los niveles de oxígeno disuelto juegan un papel importante en la eficiencia de remoción de nitrato, dado que la falta de oxígeno en el sistema obliga a los microorganismos a realizar el proceso de nitrificación a un paso más acelerado.

Los resultados de eficiencia y oxígeno disuelto tienen un comportamiento variable debido a varios factores como las concentraciones iniciales de nitratos, cantidad suministrada de solución conformada por bisulfito de sodio y difosfato de potasio, recorrido interno del flujo a través del sistema y los procesos químicos y biológicos que suceden adentro del reactor.

AGRADECIMIENTO

A todo el personal de la UTP que nos brindó su apoyo y colaboración durante el transcurso del estudio.

REFERENCIAS

- [1] Ramsar 2015, Convención sobre los humedales, Nota informativa 7, Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: una recopilación de análisis recientes.
- [2] Dra. Martina Medina Nava, Humedales: Los Riñones del Mundo, Revista de Divulgación de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [3] Armando Rivas Hernandez & Diego Paredes Cuervo, Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua, Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. Morelia, Mochoacán, Mexico, 2014.
- [4] Sergio Adrián Arias Martínez et al, Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas, 19 de octubre de 2010.
- [5] Dr. Nelson Barranco, Tratamiento de aguas residuales mediante aguas artificiales en Chiriquí Grande, Bocas del Toro.
- [6] Licda. María del Rosario Núñez, "Evaluación de eficiencia de remoción de nitrato en un humedal construido a escala de laboratorio", La Plata, junio 2017.
- [7] Noelia Alasino et al, Comportamiento cinético e hidráulico de un humedal construido a escala real, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, mayo-junio 2015.
- [8] Diana Lucía Hincapié Marín, Cinética e hidrodinámica aplicadas, en condiciones ambientales locales, a humedales de flujo subsuperficial a escala piloto, Universidad Tecnológica de Pereira, mayo 2007.
- [9] J. M. Pérez Carrión, Análisis de flujo y factores que determinan los periodos de retención, capítulo 2, Lima, 1992.
- [10] Carlos Andrés Sabas Ramírez, Evaluación hidrodinámica de humedales construidos a escala de laboratorio, Universidad Tecnológica de Pereira, 2011.
- [11] Luís Esaú López Jácome et al, Las tinciones básicas en el laboratorio de microbiología, enero-marzo de 2014.
- [12] Eduardo Santambrosio et al, Tinción y observación de microorganismos, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Catedra de Biotecnología, Argentina, 2009.