
Modelado de humedales artificiales empleando parámetros de calidad de agua

Modeling of artificial wetlands using water quality parameters

Iruaika Arias Hernández¹

Belkis Coromoto Sulbarán Rangel²

Fecha de recepción: Abril de 2017

Fecha aprobación: Junio de 2017

Para citar este artículo: Arias Hernández, I., & Sulbarán Rangel, B. (2017). Modelado de humedales artificiales empleando parámetros de calidad de agua. *Tecnogestión*, 14(1).

Resumen

En este artículo se presentan los resultados del modelado de un sistema de humedal artificial usando parámetros de calidad de agua. Ya que uno de los recursos naturales más importantes para el progreso y desarrollo de la vida en cualquier comunidad humana es sin lugar a dudas el agua, debido a esto, durante los últimos años los esfuerzos de investigación relacionados con su disponibilidad y accesibilidad han ido en aumento, particularmente en lo que concierne al tema de tratamiento y purificación. Aunque existen diversas tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales, se tiene el inconveniente que es costosa y poco accesibles; por ello, se busca encontrar alternativas de tratamiento de aguas residuales amigables con el medio ambiente, tratando de imitar los procesos de la naturaleza, tal es el caso de los humedales artificiales. La

depuración que se lleva a cabo en estos sistemas es gracias a procesos de remoción físicos, químicos y biológicos, lo que los hace sistemas complejos. Esta clase de sistemas son difíciles de entender, por lo que su modelado es de vital importancia para una mejor planeación antes de llevar a cabo su construcción de manera física.

Palabras clave: Humedales artificiales, aguas residuales, modelado, calidad de agua

Abstract

One of the most important natural resources for the progress and development of life in any human community is undoubtedly water. Due to this, during the last years research efforts related to its availability and accessibility have been increasing, particularly as regards the subject of treatment and purification. Although there are several technologies for the treatment of wastewater, there is the disadvantage that they are

¹ Ingeniero Industrial. MSc. en Ciencias en Ingeniería para el Agua y la Energía, Profesor de asignatura de la Universidad de Guadalajara Centro Universitario de Tonalá.

² Ingeniero Forestal. MSc. en Ciencia de Productos Forestales y Doctorado en Ciencias de Materiales, Especialista en tecnologías sustentables. Profesor Investigador Asociado de tiempo completo en la Universidad de Guadalajara Centro Universitario de Tonalá. Belkis.sulbaran@academicos.udg.mx. Autor para correspondencia.

expensive and not very accessible. For this reason, we seek to find alternatives to treatment of waste water friendly to the environment, trying to imitate the processes of nature; such is the case of artificial wetlands. The purification carried out in these systems is due to physical, chemical and biological removal processes, which makes them

Introducción

El agua es un elemento vital para toda especie animal, vegetal y seres humanos. Aproximadamente el 70% de la composición de la materia viva es agua, es el componente que está en mayor proporción en los seres humanos, del 50 al 70% del peso de una persona es agua, es tan importante que no existe ningún tejido del organismo que no la contenga. La mayoría de la vida que se conoce en este planeta no existiría sin este recurso, sin embargo, la manera en que el ser humano ha hecho uso de este valioso recurso, ha causado un efecto nocivo en el ambiente, y aunque el planeta tiene la capacidad de purificar el agua, el grado de contaminación es tal que ya no es suficiente (Hui Li y col., 2017).

La cantidad de agua que existe en el planeta no ha cambiado a través del tiempo, lo que ha cambiado es el ciclo hidrológico, la calidad y con ello la disponibilidad (García & Martínez, 2015). Desafortunadamente, el agua potable limpia es escasa, aunque la tierra está compuesta de 70% de agua. Sólo el 3% de agua dulce está disponible y de esa cantidad, sólo el 0,06% es fácilmente accesible. (Ahuja, 2017). Actualmente el 40% de la población mundial es afectadas por la escasez de este recurso, debido principalmente a que el agua no tiene la calidad necesaria para su consumo o porque la economía no permite el acceso por la infraestructura, cualquiera que sea el motivo de la

complex systems. These kinds of systems are difficult to understand, so their modeling is vital for better planning before carrying out their physically construction.

Keywords: Artificial wetlands, wastewater, modeling, water quality

escasez no es posible el óptimo desarrollo económico y social, así como la dificultad de garantizar el recurso sin comprometer a las generaciones futuras (García & Martínez, 2015; Gonzalez-Villarreal y col., 2016)

Aunque todo ser humano tiene derecho al agua la quinta parte de las personas en el mundo carecen de acceso a recurso hídrico con calidad adecuada, y se estima que el 80% de la población mundial va a tener problemas de escasez de agua para el año 2025 (Gonzalez-Villarreal y col., 2016; Padilla, 2016). Se hace necesario pensar sobre los problemas del agua y sus soluciones. La asociación mundial del agua menciona que el agua debe tener un fin y no dejar que se desperdicie, ese fin debe ser reconocido y socialmente aceptable, no debe ser mal usada y el uso debe ser razonable comparada con otros usos (Gonzalez-Villarreal y col., 2016). Una vez que se le da uso al agua se añaden componentes que afecta sus características, causando en ella algún grado de contaminación, lo que la vuelve no apta o perjudicial para el consumo humano o de otras especies, así como dañina para el medio ambiente si es vertida sin tratamiento. La solución no es dejar de hacer uso del agua, si no lo que se puede hacer, es tratar el agua ya utilizada de manera eficiente y de esa manera, cuidar el abastecimiento tanto de futuras generaciones así como de la actual (García & Martínez, 2015).

En 2010 la Organización de las Naciones Unidas publicó como resolución el derecho humano al agua y al saneamiento, en esta resolución se menciona que existen más de 2,600 millones de personas que no tienen acceso a saneamiento básico, y que cada año fallecen aproximadamente 1.5 millones de niños menores de 5 años, esto a consecuencia de enfermedades relacionadas con el agua y saneamiento. Existen diferentes métodos convencionales de tratamientos de aguas residuales, sin embargo, la mayoría generan altos costos tanto de instalación como mantenimiento, además de que se necesita de personas altamente calificadas. Por esas razones es necesario tomar medidas alternativas para que las personas que carezcan de este derecho puedan acceder a él. Los sistemas de tratamiento, como los humedales artificiales, son una excelente alternativa si se dispone de terreno, ya que sus principios se basan en imitar los procesos de la naturaleza. Los costos de instalación, operación y mantenimiento van muy por debajo de los costos de métodos convencionales no requieren de energía eléctrica, además de ser estéticamente agradables (Nivala y col., 2013; Zurita-Martínez y col., 2011).

Los humedales artificiales son tratamientos que emulan los fenómenos que ocurren espontáneamente en la naturaleza, producen efluentes de buena calidad, al mismo tiempo que presentan bajos costos de operación y mantenimiento y no requieren personal altamente capacitado (Tejeda y col., 2017).

Estos sistemas son basados en la fitodepuración, (Fito=planta, depuración=limpiar, purificar) de las aguas residuales por medio de complejos procesos físicos, químicos y biológicos. En los humedales artificiales la fitodepuración se basa en plantas macrófitas, estas plantas viven y se desarrollan en un medio con agua. Los humedales

artificiales son sistemas alternativos para depurar aguas residuales generalmente se usan como tratamiento secundario. Se deben construir en terrenos previamente impermeabilizados, de lo contrario se corre el riesgo de contaminar el suelo utilizado o mantos freáticos. Los humedales artificiales se pueden clasificar de manera general en humedales de flujo subsuperficial y en humedales de flujo superficial. Luego se subdivide de acuerdo al tipo de planta y a la dirección de flujo vertical u horizontal (Bojorges y col., 2017).

En los sistemas de humedales artificiales intervienen complejas reacciones, así como diferentes procesos físicos, químicos y biológicos. Con el fin de entender estos sistemas se ha hecho uso de diferentes herramientas de simulación, control y modelación. Los modelos matemáticos nos ayudarán a entender el comportamiento de fenómenos, procesos, reacciones, entre otros, sin necesidad de llevarlos a cabo, ahorrando tiempo y dinero. Actualmente los modelos tienen la capacidad para resolver una gama de condiciones, con módulos adicionales para resolver otros fenómenos como áreas de terreno necesarias para la depuración, caudales, tiempos de retención, esto partiendo de parámetros de calidad de agua de entrada y salida. El objetivo general de esta investigación fue modelar un sistema de humedales artificiales partiendo de parámetros como demanda biológica de oxígeno (DBO_5), sólidos totales suspendidos, contenido de nitratos y fósforo, parámetros de aguas residuales tipo domésticas.

Metodología

Para el desarrollo experimental de esta investigación se establecieron cinco etapas para el modelado de un sistema de tratamiento de aguas

residuales por humedales artificiales empleando parámetros de calidad de agua, las cuales, pueden

resumirse en el diagrama de la Figura 1.

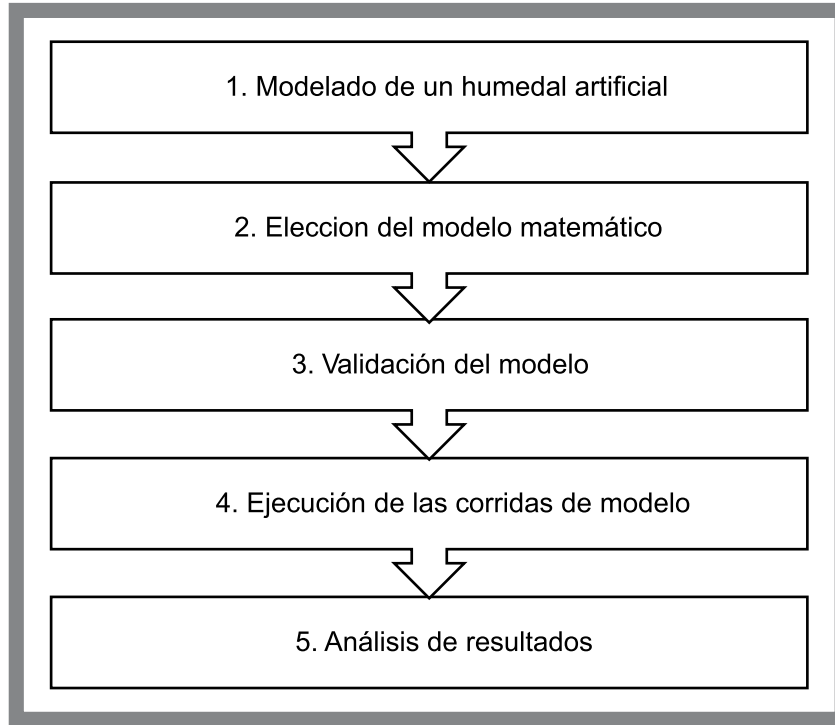


Figura 1. Etapas del desarrollo experimental

Para la modelación se usaron datos de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas y previamente evaluado y reportados por Martínez 2015 ver Tabla 1. El criterio que se tomó para la elección de estos parámetros fue con base en la Norma oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las

descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Los cálculos se realizaron por triplicado usando el programa de simulación computacional MatLab abreviatura de MATrix LABoratory, laboratorio de matrices y el paquete estadístico utilizado es la herramienta: Statistics and Machine Learning Toolbox™ del MatLab versión 2015.

Tabla 1. Datos de entrada del humedal usados en la modelación (Martínez, 2015)

Parámetro	Valor, unidad
Número de personas	4
Caudal medio	0.27 m ² /d
Profundidad del humedal	0.6 m
Porosidad	0.38
Temperatura	10.5 °C

El tamaño de un humedal artificial dependerá de las características del agua residual de entrada, y de los resultados que se quieren obtener. A continuación se muestran varios modelos según características de calidad de agua y de algunos contaminantes (Lara, 1999). Para la experimentación se usaron los modelos propuestos por (Langergraber & Šimůnek, 2005; Sherwood & Ronald, 1995), los cuales se listan a continuación:

1. Modelo según la demanda biológica de oxígeno (DBO₅)

Con el DBO₅ se estima la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de la materia orgánica del agua, mediante procesos biológicos aerobios, se suele referir al consumo en 5 días. El DBO₅ es una medida que se utiliza para medir el grado de contaminación de un agua residual. La Ec. 1 representa el modelo para determinar el área de un humedal.

$$A_s = \frac{Q \ln(C_o) - \ln(C_e)}{K_T(y)(n)} \quad (Ec\ 1)$$

Dónde:

A_s = Área superficial del humedal (m²)

C_o = Concentración de DBO en el afluente (mg/L)

C_e = Concentración de DBO en el efluente (mg/L)

K_T = Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura (T)

$$K_T = K_{20}(1.06)^{T-20} \quad (Ec\ 2)$$

Para flujo superficial K₂₀=0.678día⁻¹

Para flujo subsuperficial K₂₀=1.104día⁻¹

Q= Caudal promedio en el sistema (m³/día)

y = La altura del lecho filtrante (m)

2. Modelos basados en el cálculo de caudal (Q)

El caudal es la cantidad de agua que fluye en un tiempo determinado. Para los modelos de simulación en humedales, se toma esta variable para predecir la cantidad de agua que por día será contaminada por un número de habitantes en una región determinada (Ec 3).

$$Q = \frac{\beta p D}{1000} \quad (Ec\ 3)$$

Dónde:

Q= Caudal medio diario en (m³/ día)

p= Población (habitantes)

D= La dotación en L/hab• día

β= La cantidad de agua de abastecimiento que se convierte en agua residual, expresada en tanto por uno.

3. Modelos basados en la nitrificación

Existen importantes razones para eliminar los compuestos de nitrógeno de las aguas residuales y evitar que lleguen a cuerpos de agua (Ramalho, 1996). El nitrógeno es un nutriente importante que contribuye para el proceso de la eutrofización. Los compuestos nitrogenados consumen el oxígeno disuelto que se encuentra en las aguas receptoras.

La presencia de amonio conlleva a que se formen cloraminas y tricloruro de nitrógeno por reacción con el cloro utilizado como desinfectante, estos compuestos pueden ocasionar malos olores y sabores en el agua. Al final del segundo período de crecimiento vegetativo, el sistema alcanza el equilibrio y la eliminación de nitrógeno se estabilizará. Además, el tiempo de retención hídrico puede variar pasados dos años debido principalmente al crecimiento de las raíces de las macrófitas, la acumulación de sólidos y la formación del biofilm (Martínez, 2015). La Ec 4 representa un modelo a partir del cual se puede predecir el área del humedal a partir de las concentraciones de compuestos nitrogenados en el efluente y afluente, caudal y temperatura.

$$A_s = \frac{Q \ln(C_o/C_e)}{K_T(y)(n)} \quad (Ec\ 4)$$

Dónde:

A_s = Área superficial del humedal (m²)

C_o = Concentración de NTK en el afluente (mg/L)

C_e = Concentración de amoníaco en el efluente (mg/L)

K_T Constante dependiente de la temperatura (d⁻¹)

$$0 \quad (0^\circ\text{C})$$

$$0.1367(1.15)^{T-10} \quad (1-10^\circ\text{C})$$

$$0.2187(1.048)^{T-20} \quad (+\text{ de } 10^\circ\text{C})$$

n = Porosidad del humedal

t = Tiempo de residencia hidráulico (d)

Q = Caudal promedio en el sistema (m³/día)

y = Profundidad promedio del sistema (m)

$$Q = \frac{(Q_o + Q_e)}{2} \quad (Ec\ 5)$$

Dónde:

Q_o = Caudal inicial

Q_e = Caudal de salida

4. Modelos basados en sólidos suspendidos totales

Los sólidos en suspensión pueden estar constituidos en parte por materia orgánica, algas o microorganismos, que son degradados dando como resultado productos gaseosos. Los humedales artificiales son altamente eficientes en la disminución de sólidos en suspensión, logrando por lo general valores por debajo a los 20 mg/L, ocurriendo en los primeros 5 metros de distancia de la entrada (LaHora, 2003).

- Para humedales de flujo superficial (FS)

$$C_e = C_o(0.1058 + 0.0014(CH)) \quad (Ec\ 6)$$

- Para humedales flujos subsuperficial (FLS)

$$C_e = C_o(0.1139 + 0.00213(CH)) \quad (Ec\ 7)$$

5. Modelos basados en el fosforo

Las razones para eliminar el fósforo de aguas residuales y evitar que lleguen a cuerpos de aguas receptores es que el fósforo es un elemento importante que contribuye para el proceso de la eutrofización (Ramalho, 1996). La Ec 10 representa un modelo en el cual se estima el área del humedal partir de la concentraciones de fosforo en el efluente y afluente y el caudal.

$$A_s = \frac{(b)(Q)\ln(C_o/C_e)}{K_p} \quad (Ec\ 8)$$

Dónde:

A_s = Área superficial del humedal (m^2)

C_o = Concentración de fósforo en el afluente (mg/L)

C_e = Concentración de fósforo en el efluente (mg/L)

b = Factor de conversión 100 cm/m

Q = Caudal promedio del humedal ($m^3/día$)

Resultados

Se presentan los resultados generados por el modelo matemático de DBO_5 para humedales superficiales y subsuperficiales empleando parámetros de calidad de agua tomados de Martínez 2015, estos parámetros de salida son los esperados de un sistema de tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la modelación empleando parámetros de DBO_5

PARÁMETROS PARA EL MODELO			MODELADO	
			Humedal Superficial	Humedal Subsuperficial
			Área superficial del humedal (m^2)	Área superficial del humedal (m^2)
DBO_5 (mgO ₂ /L)	Entrada	446	114.93	684.71
	Salida	27		

Al procesar los datos se obtiene que para tener agua con una concentración de salida de DBO_5 de 27mg/L, se requiere construir un humedal superficial con un área de 114.93 m^2 y un caudal de 120 $m^3/día$, en promedio según análisis estadístico de tres repeticiones por parámetro. Es de recordar que los humedales de flujo superficial se caracterizan por que el agua está en contacto directo con la atmósfera al igual que la mayoría de los humedales naturales. Estos deben ser construidos sobre una superficie que debió ser impermeabilizada para que el agua con contaminantes pueda ser controlada y evitar así su contacto con los mantos freáticos. Generalmente consisten en canales de poca profundidad, con un

sustrato para las raíces de las plantas macrófitas emergentes (Vymazal, 2010). En el caso del cálculo del diseño del humedal subsuperficial, se observó que para las mismas condiciones se obtuvo un área menor de 684.71 m^2 y caudal de 120 $m^3/día$. Estos resultados van muy de acuerdo con lo reportado para humedales subsuperficiales, que a diferencia de los humedales artificiales de flujo libre superficial, el agua no está en contacto con la atmósfera, en su lugar, se encuentra el sustrato, donde se considera que se lleva a cabo las reacciones biológicas por la actividad de los microorganismos adheridos. Por tal razón, un humedal de flujo subsuperficial puede requerir menos terreno que uno de flujo libre para la misma

cantidad de agua residual a tratar (Button y col., 2016).

En el caso de los modelos de nitrificación, sólidos totales y fosforo los cálculos se realizaron sin tomar en cuenta el tipo de humedal y a diferencia

del modelo de remoción de DBO_5 , estos modelos calculan a parte del área y caudal, el tiempo de residencia hidráulico, que se refiere a los días en que se tardara el humedal en depurar el agua ver Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de la modelación empleando parámetros de calidad de agua para humedales superficiales

PARÁMETROS PARA EL MODELO			MODELADO	
			Área superficial del humedal (m ²)	Tiempo de residencia hidráulico (días)
Nitrógeno (mg/L)	Entrada	87	1605	9
	Salida	24		
Sólidos totales (mg/L)	Entrada	800	1550	6
	Salida	20		
Fosforo (mg/L)	Entrada	2000	8100	35
	Salida	500		

En la Tabla 3, se observa que con una entrada de agua con 87mg/L de nitrógeno se necesita construir un humedal de 1605 m², en comparación con el modelado hecho a partir de parámetro DBO_5 , es una extensión de terreno mucho más grande, esto es debido a que el nitrógeno es un contaminante difícil de eliminar y da origen a la nitrificación en el ciclo de nitrógeno en el suelo. La nitrificación es la oxidación biológica de amonio con oxígeno en nitrito, seguido por la oxidación de esos nitritos en nitratos (Zhang y col., 2017).

Para el modelo de sólidos suspendidos totales, se tomó en cuenta los habitantes y los litros por

habitante por día. En los resultados de la Tabla 3, se observa que al igual que para el nitrógeno, el modelo calcula un área de terreno de 1550 m² y 6 días de residencia hidráulica, extensión de terreno más grande que en el caso del parámetro DBO_5 . Los sólidos totales indican la cantidad de sólidos, presentes en la suspensión, 800 mg/L es un valor alto de entrada por lo que se recomendaría primero separados por medios mecánicos, como por ejemplo la filtración o la centrifugación del líquido para que sea más eficiente el humedal sin necesidad de construir el humedal en una gran extensión de terreno.

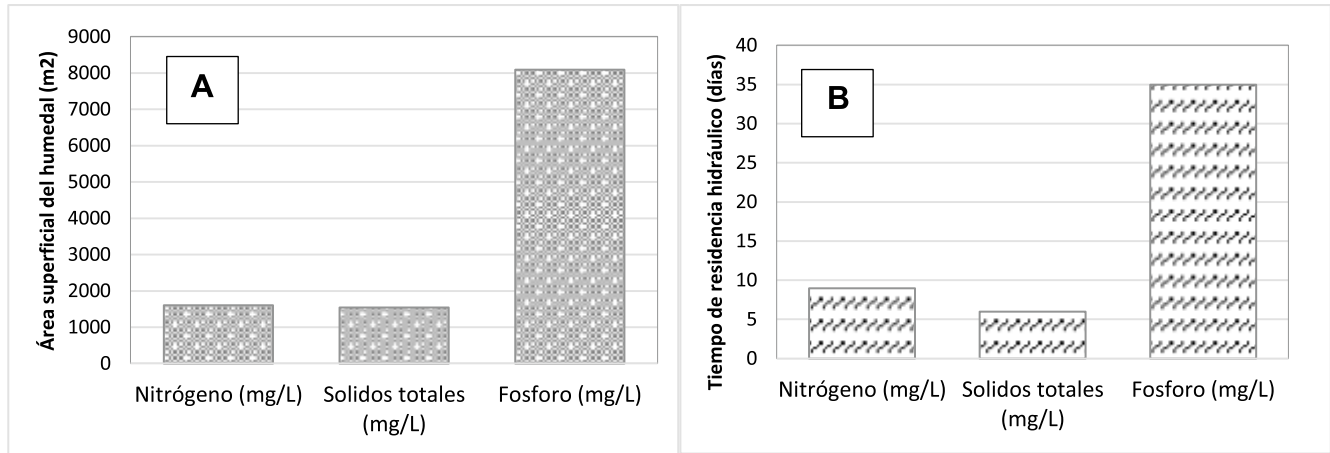


Figura 2. Resultados del modelado para: A) Área superficial del humedal para eliminar nitrógeno, solidos totales y fosforo y B) Tiempo de residencia hidráulica en día necesarios para eliminar nitrógeno, solidos totales y fosforo

Otro indicador importante que se utilizó para modelar el humedal fue el fósforo. El fósforo es un componente habitual de las aguas naturales, pero también existen fuentes humanas de fosfatos, provenientes de la industria o de las aguas servidas, e incluso de la agricultura. Las cantidades excesivas de fosfatos en aguas naturales llevan a desequilibrios ecológicos por la eutrofización y gran descenso de los niveles de oxígeno, por lo que se encuentra limitada su descarga a dichos cuerpos (Haibo Li y col., 2013). Como se observa en la Figura 2, el fosforo es un contaminante difícil de eliminar por tanto el modelo nos indica que para una entrada de 2000mg/L se debe construir un humedal de 8100 m² y que para depurar el agua de este contaminante se necesitaría 35 días de retención hidráulica.

Conclusiones

El modelado de un sistema de tratamiento de agua por humedales artificiales permitió estimar las características de uno real que por problemáticas de tiempo, recursos o seguridad son difíciles de estimar. En esta investigación se logró evaluar diferentes modelos matemáticos realizados a partir de parámetros de calidad de agua, como fueron DBO₅, solidos totales, fosfatos y nitrógeno, parámetros que se encuentran regulados por normas nacionales como internacionales y obtener como datos de salida las medidas necesarias para la construcción de humedales artificiales que sea eficiente en la remoción de esos parámetros. Con esta implementación se obtuvieron resultados similares a los estudios presentados con anterioridad y con un alto grado de confiabilidad. Los cálculos se realizaron para cada uno de los modelos matemáticos basados en variables de calidad de agua, por lo cual representa una alternativa ideal para diseñar

humedales.

Comprendido el comportamiento de los modelos matemáticos, se puede aplicar el conocimiento adquirido a una situación real. Los beneficios obtenidos con el modelado de un humedal es que no es necesario gastar recursos para mejorar el diseño que, si se hiciera en un sistema real, lo que

permite economizar recursos para trabajo futuro. Con el modelado se ahorra tiempo, valioso recurso que se puede utilizar en otras tareas mientras que el programa se encarga de hacer el diseño del humedal. Sirve como punto de partida en investigaciones futuras y permite ver el comportamiento sin interferir en el mundo real.

Referencias Bibliográficas

- Ahuja, S. (2017). Chapter One - Overview: Sustaining Water, the World's Most Crucial Resource *Chemistry and Water* (pp. 1-22): Elsevier.
- Bojorges, T., Xitlalli, Á., Hernández Razo, N.A., Urquieta, F., Aseret, A., & Zurita Martínez, F. (2017). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(1), 37-47.
- Button, M., Rodriguez, M., Brisson, J., & Weber, K.P. (2016). Use of two spatially separated plant species alters microbial community function in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 92, 18-27.
- García, G.M., & Martínez, P.C.C. (2015). Escenario del agua en México. *CULCyT*(30).
- Gonzalez-Villarreal, F., Aguirre-Diaz, R., & Lartigue, C. (2016). Perceptions, Attitudes, and Behaviors towards the Water Supply System of the Mexico City. *TECNOLOGIA Y CIENCIAS DEL AGUA*, 7(6), 41-56.
- LaHora, C. (2003). *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La edar de los gallardos (Almería)*. Paper presented at the Ecología, manejo y conservación de los humedales.
- Langergraber, G., & Šimůnek, J. (2005). Modeling variably saturated water flow and multicomponent reactive transport in constructed wetlands. *Vadose Zone Journal*, 4(4), 924-938.
- Lara, B.J.A. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. (Master), Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Li, H., Li, Y., Gong, Z., & Li, X. (2013). Performance study of vertical flow constructed wetlands for phosphorus removal with water quenched slag as a substrate. *Ecological Engineering*, 53, 39-45.
- Li, H., Yang, Z., Liu, G., Casazza, M., & Yin, X. (2017). Analyzing virtual water pollution transfer embodied in economic activities based on Gray Water Footprint: A case study. *Journal of Cleaner Production*.
- Martínez, P.A. (2015). *Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas*. (PhD), Universidad de Murcia, España.
- Nivala, J., Headley, T., Wallace, S., Bernhard, K., Brix, H., van Afferden, M., & Müller, R.A. (2013). Comparative analysis of constructed wetlands: the design and construction of the ecotechnology research facility in Langenreichenbach, Germany. *Ecological Engineering*, 61, 527-543.

- Padilla, A.M.G. (2016). Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Jequetepeque, Perú. *SCIENDO*, 17(2).
- Ramalho, R.S. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. España: Reverté.
- Sherwood, R., & Ronald, C. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*: Mc Graw Hill.
- Tejeda, A., Torres-Bojorges, Á.X., & Zurita, F. (2017). Carbamazepine removal in three pilot-scale hybrid wetlands planted with ornamental species. *Ecological Engineering*, 98, 410-417.
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental science & technology*, 45(1), 61-69.
- Zhang, M., Luo, P., Liu, F., Li, H., Zhang, S., Xiao, R., . . . Wu, J. (2017). Nitrogen removal and distribution of ammonia-oxidizing and denitrifying genes in an integrated constructed wetland for swine wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 104, Part A, 30-38.
- Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O.A., & Rodríguez-Sahagún, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe1), 139-150.