

Tratamiento de Aguas Residuales en Humedales Artificiales Mediante el Uso de Pasto Vetiver (Chrysopogon Zizanioides)

Luis K. Santana Laboy, EIT, CAPM
Maestría en Ingeniería Civil
Christian A. Villalta Calderón, Ph.D.
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad Politécnica de Puerto Rico

Abstract - *This research work aims to conduct a study on the treatment of wastewater from a population, using constructed wetlands. The wastewater used for the experiment comes from the Regional Wastewater treatment plant located in the municipality of Caguas, facility that belongs to the Puerto Rico Aqueduct and Sewage Authority (PRASA). In this study were compared different alternatives of wastewater treatment using artificial wetland, each one with its own parameters and characteristics, this way the alternative that best suit the needs of this study will be obtained. This project seeks to expand the knowledge about the various ways in which waste water can be treated, also to serve as a starting point in the study of alternatives that may help us to treat these waters, using existing technologies that do not compromise the welfare of our ecosystem and also obtaining results in compliance with the quality standards established by law.*

Key Terms – *Humedal de Flujo Subsuperficial, Humedales Artificiales, Pasto Vetiver, Tratamiento de Aguas Residuales,*

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales es un tema de suma importancia ya que busca controlar la contaminación y por lo tanto es necesario buscar alternativas que permitan mejorar la calidad de estas aguas que serán descargadas en fuentes naturales. Esto conlleva una serie de procedimientos que como fin buscan eliminar los contaminantes por medio de procesos físicos, químicos y biológicos, obteniendo un producto final inofensivo al medio ambiente.

En este proyecto se estará utilizando las aguas servidas de la planta de tratamientos Regional de Caguas. Las aguas serán procesadas por los humedales artificiales que contienen el pasto vetiver (*chrysopogon zizanioides*) diseñado específicamente para llevar a cabo este proyecto, tomando como guía, parámetros de diseño encontrados en estudios sobre la construcción de humedales.

JUSTIFICACIÓN

Durante las pasadas décadas la alternativa del tratamiento de aguas residuales utilizando humedales artificiales ha tomado auge. Esta tecnología se adapta a las condiciones del medio ambiente sin alterar su entorno, ya que se utiliza las mismas plantas que se pueden encontrar en zonas aledañas. Debido a las grandes ventajas que se tiene con esta tecnología, como los bajos costos, la facilidad en operación y mantenimiento y los grandes niveles de remoción que se obtienen, se debe estudiar más a fondo la viabilidad de implementar estos sistemas. Mediante este estudio se pretende aumentar los conocimientos acerca de estas tecnologías, en específico la utilización del pasto vetiver en el tratamiento de las aguas residuales y así poder comenzar con una propaganda que sugiera la utilización de estos sistemas como alternativas al tratamiento tradicional de aguas residuales que es llevado a cabo en las plantas de tratamiento. Inicialmente se pudiera comenzar con la implementación a pequeña escala para luego extrapolar a plantas Regionales que traten aguas de varios municipios.

MARCO TEÓRICO

Las aguas residuales son el producto final que se genera en cada uno de los hogares luego de darle los usos necesarios a las aguas que le son distribuidas para su uso diario. Antes de estas ser desechadas el agua pasa por un ciclo de procesos que las lleva a cada uno de los hogares. Procesos como la captación, producción y la distribución son los procesos primordiales que se llevan a cabo antes de poder los clientes consumir las aguas que serán expulsadas hacia los sistemas de alcantarillado, para luego ser procesadas en las distintas plantas de tratamiento regionales. Generalmente las aguas son clasificadas en dos tipos, la primera son las aguas negras, estas son las aguas residuales provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. El segundo grupo son las aguas grises, estas son las aguas residuales provenientes de tinas, duchas, lavamanos y lavadoras, aportadoras de DBO, sólidos suspendidos, fósforo, grasas y coliformes fecales.

El proceso de recolección de las aguas usadas es posible gracias a sistemas de alcantarillado que transportan las aguas desechadas hacia su destino. Es ahí en donde se realizan los distintos procesos de tratamiento para poder obtener unas aguas residuales capaces de ser descargadas al hábitat natural sin alterar las condiciones existentes en las que se encuentra el mismo. Todas las descargas de aguas residuales tienen que cumplir con una serie de parámetros que son establecidos en base a la caracterización de las aguas que son tratadas y estos parámetros son monitoreados continuamente por las agencias reguladoras para que no se esté generando ningún tipo de daño al ecosistema impactado.

PARÁMETROS IMPORTANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS USADAS

Al igual que cualquier producto tiene que cumplir con ciertos parámetros de calidad para comprobar su cumplimiento con los estándares establecidos, de igual manera las aguas residuales

procesadas en las plantas de tratamiento también tienen una serie de parámetros que deben cumplir. Los parámetros de cumplimiento en Puerto Rico y Estados Unidos son establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) para cada una de las plantas que pretenden realizar descargas de aguas tratadas en algún cuerpo receptor. Existe una gran variedad de parámetros de cumplimiento ya que los mismos son en base a la caracterización de las aguas a ser procesadas y de donde se pretenda llevar a cabo las descargas, por lo que a diferencia de las aguas potables que tienen parámetros establecidos por sectores, las aguas residuales presentan parámetros de cumplimiento particulares a cada situación.

Demanda Química de Oxígeno (COD)

La demanda química de oxígeno [3] es un parámetro que mide la susceptibilidad de las sustancias a ser oxidadas por medios químicos en una muestra líquida. Aunque principalmente pretende medir el grado de contaminación y la concentración de la materia orgánica, en ocasiones sufre interferencia por la presencia de sustancias no oxidables. Esta medida es presentada en unidades de miligramos por litro (mg/l), también conocida como partes por millón (ppm), lo cual nos indica la cantidad de masa de oxígeno consumida por litro de solución.

Sólidos Suspendidos Totales (TSS)

El término de Sólidos Suspendidos Totales o TSS se refiere a un parámetro que se utiliza en la calidad y el tratamiento de aguas residuales. Por medio de estos se indica la cantidad de sólidos que se encuentran presentes, en suspensión y que se pueden separar por medios mecánicos utilizados en el tratamiento de aguas. Debido a la gran variedad que se encuentra en cuanto al tamaño que presentan estas partículas, existe diferentes tiempos de sedimentación que dependen del tamaño peculiar de la partícula. Así mismo como se tiene los tiempos de sedimentación categorizados de acuerdo al tipo de partícula, también los sólidos suspendidos totales pueden ser divididos en diferentes

clasificaciones (ver Figura 1) que nos ayudan a determinar con qué tipo de sólido estamos trabajando y las características que presentan estos.

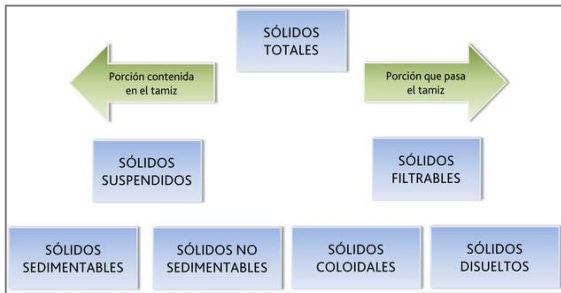


Figura 1
Clasificación de Sólidos Totales [5]

Nitrógeno

El nitrógeno [3] es de suma importancia en las aguas residuales ya que se necesita para el crecimiento de los microorganismos. Si el agua residual no contiene suficiente nitrógeno pueden ocurrir problemas por deficiencia de nutrientes durante el tratamiento. Por otro lado también el nitrógeno es un contribuyente especial para el agotamiento del oxígeno y la eutrofización de las aguas cuando se encuentra en elevadas concentraciones. En las aguas residuales el nitrógeno se encuentra en 4 formas [3] básicas: nitrógeno orgánico, amonio, nitrito y nitrato. A medida que se estabiliza el agua se van generando nitritos y posteriormente nitratos por la oxidación, que luego al final, es la suma de estos que conforma el nitrógeno total. Aguas residuales suelen [3] contener entre 30 a 100 mg/L de nitrógeno total y 5 a 20 mg/L de nitrógeno amoniacal

Fósforo

El fósforo es otro componente del agua residual importante para los microorganismos. El fósforo, al igual que el nitrógeno, es un elemento esencial para el crecimiento biológico. En el agua residual el fósforo se encuentra en [2] 3 formas: orto fosfatos solubles, poli fosfatos inorgánicos y fosfatos orgánicos. El fósforo total es calculado mediante la suma de los compuestos de las tres formas de fósforo. Las aguas residuales domésticas cuentan [2] con entre un 5 - 15% de fosfatos que son sedimentables (mayormente orgánicos).

Humedales Artificiales

Un humedal artificial es una alteración hecha por el hombre, en la que se crea una zona de la superficie terrestre que se encuentra temporera o permanentemente inundada. Estos, naturalmente sirven como sistemas de tratamiento acuáticos en los cuales mediante la utilización de plantas y animales se puede llegar a obtener un tratamiento de las aguas depositadas en estos. Principalmente un humedal está compuesto por un sustrato o material granular que sirve de soporte a la vegetación y permite la fijación de las bacterias que interviene en la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes presentes en las aguas a tratar. Por otro lado también se encuentra la vegetación, que principalmente está compuesta por macrófitas emergentes que contribuyen a la oxigenación, a la eliminación de nutrientes por absorción/extracción y al desarrollo de la comunidad bacteriana. Los seres vivos, junto a procesos físicos y químicos, son capaces de depurar el agua eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y en algunos casos productos tóxicos, es por esto que los humedales figuran como uno de los medios más productivos en el mundo.

Tipos de Humedales

Los humedales son sistemas de tratamiento poco profundos, construidos por el hombre, en el que se siembran plantas acuáticas que junto con los procesos naturales facilitan el tratamiento de aguas. Principalmente estos sistemas pueden ser divididos en las categorías [1] de humedales de flujo superficial (HFS), humedales de flujo subsuperficial (HFSS), humedales de flujo vertical (HFV) y humedales de sistemas híbridos (SH). Cada uno de estas categorías tiene sus respectivas características que hacen el humedal apto para situaciones específicas (ver Figura 2).

Por otro lado cada uno de estos humedales cuenta con características [4] de diseños diferentes. Es de esperarse que dado el caso que su funcionamiento no es similar, los [1] parámetros de diseño para cada uno de estos humedales sea

diferente también. Al igual que los procesos que se atacan en cada uno de los humedales, a continuación se pueden encontrar los parámetros de diseño (ver Figura 3) más críticos para poder confeccionar un humedal artificial que cumpla con su misión.

Contaminante	HFS	HFS5
Materia Organica	Reduccion de la DBO soluble por conversion biologica por efecto de bacterias aerobicas, facultativas y anaerobicas que crecen en la siperficie de las plantas. La DBO particulada se elimina por absorcion, por filtracion y por sedimentacion.	Reduccion por converison biologica por intervencion de bacterias facultativas y anaerobicas adheridas a las superficies de las plantas y el medio de relleno del humedal.
Materia en Suspensión	Filtracion y sedimentacion	Filtracion y sedimentacion
Nitrógeno	Proceso de nitrificacion/desnitrificacion asimilacion por las plantas y volatilizacion.	Nitrificacion/desnitrificacion asimilacion por las plantas y volatilizacion.
Fósforo	Reduccion por sedimentacion y por asimilacion por medio de las plantas y microorganismos.	Por filtracion, sedimentacion, adsorcion, por asimilacion por parte de las plantas y microorganismos.
Metales Pesados	Absorcion a las plantas, superficie y por sedimentacion.	Absorcion a las raices de las plantas y por sedimentacion.
Trazas de contaminantes orgánicos	Volatilizacion, absorcion, biodegradacion.	Absorcion, biodegradacion.
Patógenos	Muerte natural, depredacion, radiacion, UV, sedimentacion, secrecion de antibioticos de las raices de las plantas.	Muerte natural, depredacion, sedimentacion, secrecion de antibioticos de las raices de las plantas.

Figura 2
Características de Tratamiento por Sistema

Tipo Flujo	Horizontal	Subsuperficial	Vertical
Carga organica afluente	< 112 DBO ₅ kg ha ⁻¹ d ⁻¹	< 150 DBO ₅ kg ha ⁻¹ d ⁻¹	< 112 DBO ₅ kg ha ⁻¹ d ⁻¹
Carga hidraulica	< 5 cm d ⁻¹	< 5 cm d ⁻¹	< 5 cm d ⁻¹
Tiempo de retencion hidraulica	5 - 15 dias	> 5 dias	1 - 2 dias
Area especifica por PE	De 5 m ² a 20 m ² PE	De 5 m ² a 20 m ² PE	De 1 m ² a 5 m ² PE
Relacion largo/ancho	10:01	3:01	N/A
Profundidad	< 0.60 cm	< 0.60 m	> 1.00 m
Pendiente del fondo	< 0.1%	< 0.1%	N/A
Tipo de relleno	N/A	Arenas y gravas	Arenas y gravas
Vegetacion	Variable	Variable	Variable

Figura 3
Parámetros de Diseño para Humedales [6]

METODOLOGÍA

A continuación se detalla el proceso por el cual se escogió el tipo de planta y los parámetros utilizados para el diseño y creación del humedal.

Selección de Tipo de Planta

Según fue presentado previamente, existe un sinnúmero de plantas que pudieran utilizarse para llevar a cabo el proceso de tratamiento de aguas

residuales. Para poder tomar la decisión de cuál es la planta a utilizar, primero se analizó cada una de las características de las plantas disponibles, como su capacidad de remoción [1] de contaminantes, especificaciones necesarias para su buen crecimiento y reproducción, así como la disponibilidad y facilidad de conseguir la planta.

Para poder comparar la capacidad de remoción de contaminantes de cada uno de las plantas tomadas en consideración, se tomó la información recopilada de cada una y se comparó las unas con las otras. Luego de este ejercicio se determinó que cada una de las plantas guarda similitud en cuanto a las capacidades de remoción, por lo cual se deberá de estudiar más parámetros para ver cual planta resulta favorecida.

El próximo paso fue verificar cuales son las condiciones de crecimiento y reproducción de las plantas. En esta categoría todas las plantas resultaron ser similares en cuanto a las condiciones en que debían de estar, así como en su facilidad de reproducirse. Donde único se pudo ver una diferencia fue en los tamaños de las plantas, ya que una gran parte de estas llegan a ocupar bastante espacio, lo que resultó ser un impedimento ya que se contaba con espacio limitado para llevar a cabo el experimento.

Por último se analizó la facilidad de conseguir las plantas, en la cual básicamente todas podían ser encontradas en Puerto Rico sin ningún problema. No obstante el pasto vetiver resultó ser más fácil de adquirir ya que por medio de viveros se conseguía el mismo bien cuidado y listo para ser sembrado, razón que al final tuvo mucho peso en la selección del pasto vetiver para llevar a cabo el estudio.

Selección del Tipo de Humedal

A la hora de la selección del tipo de humedal, al igual que en la selección de la planta se tomaron en cuanto varios factores para poder determinar cuál de los distintos humedales se acomodaría mejor a las necesidades del proyecto.

Se evaluaron los tres tipos de humedales (superficial, subsuperficial y horizontal) de acuerdo a la información que se encuentra en las tablas 1 y

2. Tomando en consideración que en la parte de remoción y los procesos que se llevan a cabo, todos los humedales tenían una información bastante parecida, la selección del humedal se basó principalmente en los parámetros de diseño del humedal. Finalmente tomando en cuenta las dimensiones, tipo de vegetación posible de sembrar y el tipo de relleno que se colocaría, se tomó la decisión de que el humedal más adecuado para utilizarse era el humedal de flujo subsuperficial (HFSS).

Características para el diseño

Para comenzar con el diseño primero se tuvo que determinar cuáles serán las dimensiones que se dará a las zonas de tratamiento (ver Figura 4). De acuerdo con lo establecido en las guías para el diseño de humedales artificiales, los humedales HFSS deben tener una razón largo/ancho de 3:1. Tomando la razón en cuenta y conociendo que las zonas deberán ser impermeables para evitar la filtración de las aguas, se optó por adquirir unas cajas plásticas de almacenar objetos.

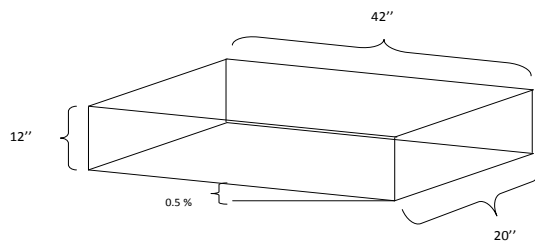


Figura 2
Dimensiones principales del humedal artificial

Dado que las medidas de la caja adquirida no cumplían con la razón de 3:1, se tuvo que comprar 2 cajas y colocarlas en serie para así poder atender ese parámetro de diseño. El otro parámetro que se tenía que verificar en cuanto al dimensionado de las zonas, era la altura, esta debía ser de aproximadamente unas 23", parámetro que no pudo ser alcanzado ya que la altura máxima que se encontró para estas cajas de almacenamiento fue de 12", factor que no debe afectar ya que la razón de 3:1 fue sobrepasada compensando esta pérdida.

El segundo aspecto que se trabajó en el diseño del humedal lo fue la proporción que se daría a los distintos tipos de relleno que se colocarían en los

envases. Según la mayoría de los estudios, se sugiere que en el fondo del envase se coloque un material grueso para que las aguas luego de ser procesadas puedan continuar un camino sin complicaciones. Luego de la base se debería colocar un material más fino el cual proveerá una traslación de agua más lenta promoviendo el contacto con los distintos elementos de las plantas. Por último, en la parte superior se sugiere colocar un tipo de tierra que beneficie las plantas y a la misma vez disminuya la velocidad en la que viaja el líquido por las áreas de tratamiento. De acuerdo con lo discutido, en los envases se vertieron una capa de grava gruesa en el fondo con una altura de 1", luego se realizó una mezcla de gravilla fina con arena, que sería colocada en el medio del envase con un espesor de 10" y por último se colocó tierra utilizada generalmente en la siembra, dándole un espesor de 1", para así completar las 12" de altura que tienen estos envases.

Por último, luego de haber determinado el dimensionado y la proporción del material granular, resta por determinar la forma en que se colocaran las plantas vetiver en las zonas de tratamiento. Según instrucciones incluidas en los paquetes que transportaron las plantas, se sugiere que al momento de sembrar las plantas en su destino, las mismas sean colocadas de manera tal que la separación que se encuentra entre cada una de las plantas sea mayor de 6", esto debido al tamaño que pueden llegar a alcanzar las raíces de estas plantas. El espaciamiento que se brindó para las plantas fue uno bastante parejo, de manera tal que la mayor cantidad de agua se encuentre en contacto con las raíces de dichas plantas, permitiendo las reacciones necesarias para que ocurra el tratamiento correspondiente de las aguas.

Construcción de los Humedales

Luego de haber determinado todos los componentes y parámetros que serían utilizados en la creación de las zonas de tratamiento solo restaba comenzar con la creación de los mismos. Como bien se menciona previamente, dos zonas de tratamiento serán construidas para así poder

cumplir con los parámetros de dimensionado que son sugeridos para este tipo de humedales.

Paso siguiente se comenzó a instalar las distintas capas que serán utilizadas en los humedales. Primero fueron vertidas las rocas que servirían de base y medio de transporte para las aguas ya procesadas, seguido por la grava fina mezclada con arena que sería la zona de mayor espesor y donde ocurriría la mayor parte del proceso de tratamiento y por último sería colocado la pequeña capa de arcilla en el tope de los envases, brindando un suelo que ayudaría al desarrollo de las plantas sembradas.

Por último, luego de haber colocado las distintas capas de suelo que formarían los humedales, resta por colocar el pasto vetiver en las zonas de tratamiento. La colocación del pasto fue llevada a cabo según las sugerencias que brindó el distribuidor. La cantidad de plantas que fueron incluidas en los humedales es la misma para ambas zonas, al igual que la configuración que se le dio al ser sembradas, por lo que teóricamente ambas zonas deben de tener las mismas características y capacidades de remoción.



Figura 5
Vista Final de Sistema de Tratamiento

Proceso de Tratamiento

El proceso para el tratamiento de las aguas fue realizado durante dos semanas consecutivas. Las muestras se recogieron el miércoles 8 de enero del 2014 y el 14 de enero del 2014 a las 6:00 AM, hora en que se realiza el muestreo de la planta y se obtuvieron 7 galones de muestras en envases individuales en cada ocasión (cada envase contenía

1 galón de aguas residuales). Las muestras fueron recogidas por los operadores de la planta según sus protocolos, en envases limpios y sellados, luego fueron transportadas al lugar del experimento y vertidas ese mismo día. Las muestras que no fueron vertidas se trataron de mantener a bajas temperaturas para que no fueran alteradas las propiedades originales.

A partir del 9 de enero del 2014 se comenzó diariamente a verter un galón de muestra de la planta de tratamiento para que pasara por el proceso en los humedales. Al cabo de tres días se comenzó a ver flujo de agua saliendo del primer humedal, acumulándose en el área de la salida, para luego poder pasar al segundo humedal por los canales que fueron construidos para el transporte de las aguas. Finalmente las muestras recolectadas de las aguas ya procesadas fueron tomadas en dos puntos y para dos fechas diferentes. Las primeras muestras se tomaron cuando se completó un ciclo de siete días de tratamiento y fueron tomadas en las áreas de salida de los humedales 1 y 2. Por otro lado la segunda ronda de muestras se tomaron al finalizar el segundo ciclo de 7 días (15 días luego de comenzado el proceso de tratamiento) y al igual que para la primera ocasión las muestras fueron tomadas en las áreas de salida de los humedales 1 y 2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de Parámetros y Eficiencia de Remoción

Luego de ser procesadas las aguas las mismas llegaron a los puntos de salida 1 y 2. De estas aguas es que se obtuvo la muestra para poder obtener los resultados de las remociones que se llevaron a cabo en los humedales. A continuación en la figura 6 se puede observar los distintos porcentajes de remoción que se vieron para cada uno de los parámetros.

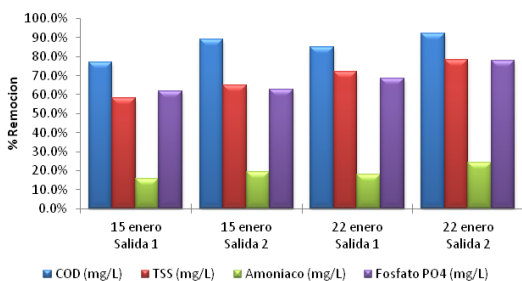


Figura 6
% Remoción de Parámetro/Día

En la gráfica podemos observar como el porcentaje de remoción del parámetro de COD fue el más alto de todos y el mismo osciló entre valores de 77% hasta un máximo de 92% para el último día de muestras. Por otro lado los porcentos de remoción de los parámetros de TSS y Fosfato son bastante parecidos y los mismos se encuentran entre un 58% y un 78% de remoción, ambos obteniendo la mayor remoción en la segunda salida del último día de las muestras. Por último el parámetro de amoniaco obtuvo los parámetros de remoción más bajos de todos ya que los mismos se encontraban entre el 16% y el 25% de remoción, siendo por mucho el parámetro que menos remoción obtuvo en los humedales.

Demanda Química de Oxígeno (COD)

A continuación en las tablas 1 y 2 se puede observar las distintas concentraciones que se encontraron en los distintos puntos de salidas junto con los % de remoción que se encontraron para el parámetro de COD. Observando los datos se puede ver que el mayor porcentaje de remoción para ambas muestras se obtuvo en la salida 2, para la muestra del 22 de enero. Estos resultados eran de esperarse ya que para la salida 2 las aguas ya habían sido procesadas por el primer humedal y al entrar al segundo básicamente continuaría con el proceso de tratamiento dando un tiempo mayor de retención para que ocurriera la remoción. La concentración más baja que se obtuvo de los humedales fue tomada en la última muestra el día 22 de enero, en esta se obtuvo una concentración de 76 mg/L, lo que representa una remoción de 92% para el parámetro de COD.

Tabla 1
Salida 1 y 2 para el 15 de Enero (COD)

	Entrada	Salida 1	% Remocion 1	Salida 2	% Remocion 2
COD	949 mg/L	142 mg/L	85.0%	76 mg/L	92.0%

Tabla 2
Salida 1 y 2 para el 22 de Enero (COD)

	Entrada	Salida 1	% Remocion 1	Salida 2	% Remocion 2
COD	988 mg/L	227 mg/L	77.0%	108 mg/L	89.1%

Para poder realizar una comparación visual, en la figura 7 se puede ver una gráfica que compara las distintas concentraciones que se obtuvieron en las salidas, a distintos días de tomadas las muestras. En la gráfica se puede observar que para la primera salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 77% con un tiempo de retención aproximado de 3 días, así mismo en la segunda salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 89.1% con un tiempo de retención aproximado de 6 días, siendo estos valores los obtenidos durante la primera muestra que se tomó el 15 de enero de 2014. Por otro lado también se puede observar que para la primera salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 85% con un tiempo de retención aproximado de 3 días, así mismo en la segunda salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 92% con un tiempo de retención aproximado de 4 días, ahora siendo estos valores los correspondientes a las muestras tomadas el 22 de enero.

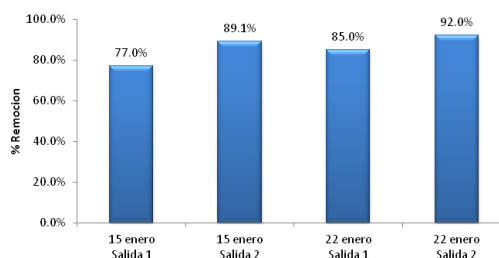


Figura 7
% Remoción por Día y Salida (COD)

Sólidos Suspendedos Totales (TSS)

Continuando con el próximo parámetro, en las tablas 3 y 4 se puede observar las distintas concentraciones que se encontraron en los puntos de salidas 1 y 2 junto con los % de remoción que se encontraron para el parámetro de TSS. Observando

los datos se puede ver que el mayor porcentaje de remoción para ambas muestras se obtuvo en la salida 2, también para la muestra del 22 de enero. Estos resultados coinciden con el parámetro anterior ya que se obtuvieron los mayores porcentajes de remoción en las muestras donde se tuvo una mayor retención en los humedales. La concentración más baja que se obtuvo de los humedales fue tomada en la última muestra el día 22 de enero, en esta se obtuvo una concentración de 186 mg/L, lo que representa una remoción de 78.1% para el parámetro de TSS.

Tabla 3
Salida 1 y 2 para el 15 de Enero (TSS)

	Entrada	Salida 1	% Remocion 1	Salida 2	% Remocion 2
TSS	960 mg/L	401 mg/L	58.2%	336 mg/L	65.0%

Tabla 4
Salida 1 y 2 para el 22 de Enero (TSS)

	Entrada	Salida 1	% Remocion 1	Salida 2	% Remocion 2
TSS	850 mg/L	238 mg/L	72.0%	186 mg/L	78.1%

De igual manera que el parámetro anterior, en la figura 8 se puede ver una grafica que compara las distintas concentraciones que se obtuvieron en las salidas, a distintos días de tomadas las muestras. En la grafica se puede observar que para la primera salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 58.2% con un tiempo de retención aproximado de 3 días, así mismo en la segunda salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 65% con un tiempo de retención aproximado de 6 días, siendo estos valores los obtenidos durante la primera muestra que se tomo el 15 de enero de 2014. Por otro lado también se puede observar que para la primera salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 72% con un tiempo de retención aproximado de 3 días, así mismo en la segunda salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 78.1% con un tiempo de retención aproximado de 4 días, ahora siendo estos valores los correspondientes a las muestras tomadas el 22 de enero.

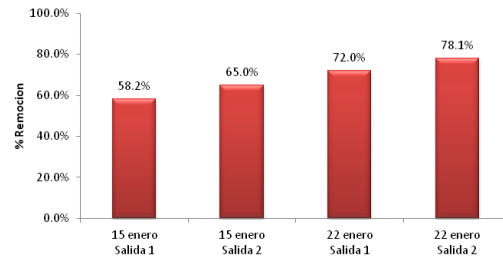


Figura 8
% Remoción por Día y Salida (TSS)

Fósforo

El próximo parámetro lo es el fósforo, pero en este caso el mismo fue medido como fosfato (PO₄) el cual representa aproximadamente un 80% del fosforo total. Similar a los parámetros anteriores en las tablas 5 y 6 se puede observar las distintas concentraciones que se encontraron en los puntos de salidas 1 y 2 junto con los % de remoción que se encontraron para el parámetro de fosfato. Observando los datos se puede ver que el mayor porcentaje de remoción para ambas muestras se obtuvo en la salida 2 en la muestra del 22 de enero. Estos resultados continúan con el patrón de obtener los mayores porcentajes de remoción en las muestras donde se tiene una mayor retención en los humedales. La concentración más baja que se obtuvo de los humedales fue tomada en la última muestra el día 22 de enero, en la cual se obtuvo una concentración de 1.9 mg/L, lo que representa una remoción de 78% para el parámetro de fosfato.

Tabla 5
Salida 1 y 2 para el 15 de enero (Fosfato)

	Entrada	Salida 1	% Remocion 1	Salida 2	% Remocion 2
Fosfato	12.8 mg/L	4.9 mg/L	62%	4.8 mg/L	63%

Tabla 6
Salida 1 y 2 para el 22 de enero (Fosfato)

	Entrada	Salida 1	% Remocion 1	Salida 2	% Remocion 2
Fosfato	8.6 mg/L	2.7 mg/L	69%	1.9 mg/L	78%

Por otro lado, en la figura 9 se puede ver una grafica donde se están comparando las distintas concentraciones que se obtuvieron en las salidas de los humedales, a distintos días de ser tomadas las muestras. En general se puede ver un patrón de remoción que aumenta con el pasar del tiempo, en

este caso a diferencia del parámetro COD, el mismo es constante. Observando los valores se puede ver como los porcentos de remoción son bastante similares a los obtenidos en el parámetro de TSS en la figura 26. En la grafica se puede observar que para la primera salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 61.7% con un tiempo de retención aproximado de 3 días, así mismo en la segunda salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 62.5% con un tiempo de retención aproximado de 6 días, siendo estos valores los obtenidos durante la primera muestra que se tomo el 15 de enero de 2014. Por otro lado también se puede observar que para la primera salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 68.6% con un tiempo de retención aproximado de 3 días, así mismo en la segunda salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 77.9% con un tiempo de retención aproximado de 4 días, ahora siendo estos valores los correspondientes a las muestras tomadas el 22 de enero.

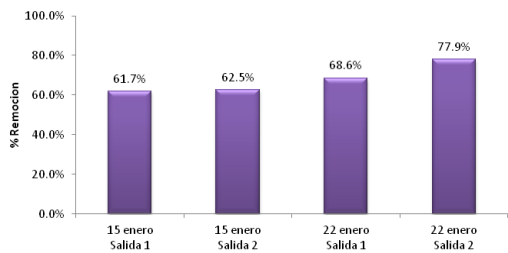


Figura 9
% Remoción por día y salida (Fosfato)

Nitrógeno

Como ultimo parámetro tenemos el nitrógeno que similar al parámetro de fosforo no se mide en su forma total, en este caso el mismo fue medido como amoniac (NH₃) el cual representa aproximadamente un 75% del nitrógeno total en las aguas residuales. Similar a los parámetros anteriores en las tablas 7 y 8 se puede observar las distintas concentraciones que se encontraron en los puntos de salidas 1 y 2 junto con los % de remoción que se encontraron para el parámetro de amoniac. Observando los datos se puede ver que el mayor porcentaje de remoción para ambas muestras se

obtuvo en la salida 2 en la muestra del 22 de enero. Estos resultados continúan con el patrón de obtener los mayores porcentos de remoción en las muestras donde se tiene una mayor retención en los humedales. La concentración más baja que se obtuvo de los humedales fue tomada en la última muestra el día 22 de enero, en la cual se obtuvo una concentración de 13 mg/L, lo que representa una remoción de 24.4% para el parámetro de nitrógeno, siendo este parámetro el que menos remoción obtuvo dentro los humedales.

Tabla 7
Salida 1 y 2 para el 15 de Enero (Amoniac)

	Entrada	Salida 1	% Remocion 1	Salida 2	% Remocion 2
Amoniac	17 mg/L	14.3 mg/L	15.9%	13.7 mg/L	19.4%

Tabla 8
Salida 1 y 2 para el 22 de Enero (Amoniac)

	Entrada	Salida 1	% Remocion 1	Salida 2	% Remocion 2
Amoniac	17.2 mg/L	14.1 mg/L	18.0%	13 mg/L	24.4%

Finalmente, en la figura 10 se puede ver la grafica donde se están comparando las distintas concentraciones que se obtuvieron en las salidas de los humedales, a distintos días de ser tomadas las muestras. Observando los valores se puede ver claramente como los porcentos de remoción obtenidos para el parámetro de amoniac son los más bajos en su totalidad, presentando porcentos que no representan ni la mitad de los que se obtuvieron con los demás parámetros. En la grafica se puede observar que para la primera salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 15.9% con un tiempo de retención aproximado de 3 días, así mismo en la segunda salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 19.4% con un tiempo de retención aproximado de 6 días, siendo estos valores los obtenidos durante la primera muestra que se tomo el 15 de enero de 2014. Por otro lado también se puede observar que para la primera salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 18% con un tiempo de retención aproximado de 3 días, así mismo en la segunda salida se obtuvo un porcentaje de remoción de 24.4% con un tiempo de retención aproximado de 4 días, ahora siendo estos valores los correspondientes a las muestras tomadas el 22 de enero.

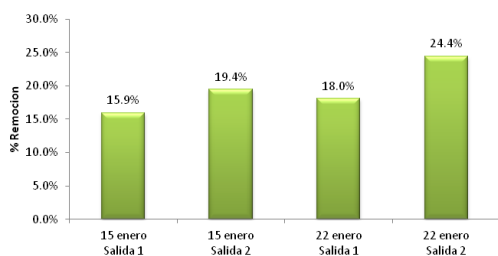


Figura 10
% Remoción por Día y Salida (Amoniaco)

CONCLUSIONES

Tomando en cuenta los resultados generales de los sistemas se puede ver que la utilización de estos humedales en el tratamiento de aguas residuales puede llegar a ser una alternativa muy efectiva. Con excepción del parámetro de amoníaco que obtuvo unos porcentajes de remoción sumamente bajos (24.4%), esto posiblemente a causa del diseño del humedal o hasta del poco tiempo que se le dio a las plantas para crecer y adaptarse a los envases, los demás parámetros obtuvieron porcentajes bastante aceptables (Fosfato 77.9%, TSS 78.1% y COD 92%), lo que nos da una idea de las capacidades que tiene este sistema para la remoción de estos contaminantes. El parámetro de COD fue el que más remoción obtuvo con un 92%, seguido de los TSS con un 78.1%. Observando a fondo los resultados se puede ver que los mayores porcentajes de remoción que se obtuvieron fueron siempre en el punto de salida 2, lo que nos indica que a mayor tiempo que las aguas estén en contacto dentro del humedal ocurre una mayor remoción de contaminantes, esto debido a que existe más tiempo para que ocurran las reacciones químicas, adsorción, absorción, junto con otros procesos que permiten que se lleven a cabo las remociones.

Estudiando más a fondo estos sistemas y realizando algunas modificaciones para que sean más eficientes, se podría llegar a considerar estos sistemas como substitutos o complementos de los sistemas convencionales que se utilizan al momento para el tratamiento de aguas residuales, esto tomando en cuenta que la inversión de construcción

es mucho menor, el costo de mantenimiento y operación también resulta ser menor que sistemas convencionales, al igual que la necesidad de supervisión en las operaciones sería mínima en comparación con los sistemas actuales por lo que considero y según los resultados obtenidos en este experimento que un proceso como este debería ser puesto en un proyecto piloto para ver cuán viable sería llevar a cabo el tratamiento de aguas residuales mediante esta alternativa.

Siendo el agua uno de los recursos más importantes de nuestro medio ambiente es importante tener un ciclo en que la misma sea utilizada al máximo mediante tecnologías eficientes y eco-amigables.

REFERENCIAS

- [1] Arias, C. A. et al., "Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, No. 13, Julio, 2003, pp. 17-24.
- [2] Ronzano, E. et al., "Eliminación de Fósforo en las aguas residuales", *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua*, Universidad de Salamanca, España, 2003.
- [3] Sánchez, D., "Depuración de aguas residuales de una población mediante humedales artificiales", *Tesis de Maestría*, Universidad Politécnica de Catalunya, Catalunya, España, 2010.
- [4] Yocum, D., "Manual de diseño: Humedal construido para el tratamiento de las aguas grises por biofiltración", *Manuscript submitted for publication, Environmental Science and Management*, University of California, Santa Bárbara, California, 2013.
- [5] *Urgarbi Blog*, 4 de 5 de 2014. Recuperado el 4 de 5 de 2015 de: <http://www.urgarbi.eu/es/blog/1/>.
- [6] *Humedales Artificiales*, 4 de 5 de 2014. Recuperado el 4 de 5 de 2015 de: <http://humedalesconstruidos.wordpress.com/vcvc/>.