

Tratamiento de aguas residuales de tipo especial generadas por el Laboratorio de Suelos del Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA), utilizando humedales artificiales

Treatment of Wastewater generated by the Soil Laboratory of Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA), using artificial wetlands

*Ana Yaneth Valencia Rodríguez¹
Marcia Lizeth Barrera de Calderón¹
Miguel Angel Hernández Martínez¹
Mario Ernesto Parada Jaco²

Abstract

*The pollution of rivers and the lack of wastewater treatment are common problems in developing countries. This situation occurs both with wastewater from domestic activities and from commercial, industrial and service activities, including analytical laboratories. The latter offer a great contribution in the development of scientific research, evaluation of compliance with regulations and other areas of knowledge. Its operation requires the use of different chemical substances cataloged as contaminants of water and soil, its discharges are usually characterized by low flows with high pollutant loads, many times without treatment. With the objective of evaluating an efficient and low cost alternative for the treatment of wastewater from analytical laboratories, an artificial wetland was built consisting of two stages of subsurface flow planted with *Phragmitesaustralis*, and a third of superficial flow seeded with *Typhaangustifolia*. Samples of water were taken at the entrance and exit of the wetland, during the months of November and December 2013, and January and June 2014. With this system the COD pollutants, suspended and settleable solids, metals, phosphates, sulphates, chlorides, sodium and Total chromium were removed on average higher than 60%. An increase of 2.7 ppm of dissolved oxygen was observed, as well as a significant change in the pH of the treated water (5.84). Although high percentages of removal were obtained, parameters such as sulfates and iron remain high with respect to Salvadorean regulations, so it is recommended to continue research on other treatments for these contaminants.*

Keywords: Artificial wetland, *Phragmitesaustralis*, Analytical laboratories, *Typhaangustifolia*, wastewater.

¹Escuela de Posgrado y Educación Continua, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador.

²Laboratorio, Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal.

*Autor correspondiente: Ana Yaneth Valencia Rodríguez. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de El Salvador. Autopista Norte, Final 25ª Av Norte, Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador. Tel. +50322252572.
Email: anayanethval@gmail.com

Resumen

La contaminación de los ríos y la falta de tratamiento de aguas residuales son problemas comunes en los países en desarrollo. Esta situación ocurre tanto con las aguas residuales de actividades domésticas como de las provenientes de actividades comerciales, industriales y de servicios, entre ellas los laboratorios analíticos. Estos últimos ofrecen un gran aporte en el desarrollo de investigaciones científicas, evaluación de cumplimiento de normativas y otras áreas del conocimiento. Su funcionamiento requiere la utilización de distintas sustancias químicas catalogadas como contaminantes del agua y suelo, sus descargas suelen caracterizarse por caudales bajos con altas cargas contaminantes, muchas veces sin tratamiento. Con el objetivo de evaluar una alternativa eficiente y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales provenientes de laboratorios analíticos, se construyó un humedal artificial conformado por dos etapas de flujo subsuperficial sembradas con *Phragmitesaustralis*, y una tercera de flujo superficial sembrada con *Typha angustifolia*. Se tomó muestras de agua a la entrada y salida del humedal, durante los meses de noviembre y diciembre 2013, y enero y junio 2014. Con este sistema los contaminantes DQO, sólidos suspendidos y sedimentables, metales, fosfatos, sulfatos, cloruros, sodio y cromo total fueron removidos en promedio superior al 60%. Se observó incremento de 2.7 ppm de oxígeno disuelto, así mismo se produjo cambio significativo en el pH del agua tratada (5.84). Aunque se obtuvo altos porcentajes de remoción, parámetros como sulfatos y hierro se mantienen elevados respecto a la normativa salvadoreña, por lo que se recomienda continuar investigaciones sobre otros tratamientos para estos contaminantes.

Palabras claves: Agua residual, humedal artificial, laboratoriosanalíticos, *Phragmitesaustralis*, *Typha angustifolia*.

Introducción

La evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales provenientes de laboratorios analíticos se hace necesaria porque son efluentes con cargas contaminantes muy elevadas y su efecto en los cuerpos receptores podría afectar su biodiversidad debido a su contenido de contaminantes altamente tóxicos y perjudiciales a la vida humana y ecosistemas acuáticos, además, esta contaminación puede ingresar a las aguas subterráneas.

En muchos países del mundo se han utilizado humedales artificiales para depuración de aguas residuales, por ejemplo: En España, Andreo(2014), evaluó la eficacia del proceso de depuración de aguas residuales domésticas mediante un sistema híbrido de humedales plantados con *P. australis*. Obteniendo cumplimiento de los parámetros exigidos por la legislación española durante el primer año.

En México, se han realizado también diversos trabajos de investigación en cuanto a tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales, tal es el caso de Gutiérrez *et al.* (2003) en Morelos, estableció un sistema secuencial de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, en el cual se instalaron tres módulos utilizando *T.domingensis* en el primer contenedor, *P. australis* en el segundo y mezclando ambas en el tercero. Las aguas tratadas correspondían a las generadas en el Centro de Investigación en Biotecnología (CEIB) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Se obtuvo disminución en los contaminantes, dándose mayor remoción en el último humedal (combinación de ambas especies). Los parámetros como sólidos sedimentables, suspendidos totales, fósforo, demanda química de oxígeno (DQO) y metales como arsénico, cromo, mercurio, níquel, zinc no rebasaron los límites establecidos en la Norma.

Por otra parte, Alfaro de la T *et al.* (2009) realizaron el trabajo “Contribución de *Typha latifolia* a la Remoción de Cadmio y Plomo en un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial”, llevado a cabo en San Luis Potosí, México. Se concluyó que el humedal fue eficiente para la remoción de cadmio y plomo (más del 90%), además, se determinó que el material de soporte (grava y piñón 1:1) remueve 40mg/Kg de plomo y más de 30 mg/Kg de cadmio.

En Colombia, Zapata (2014) desarrolló un trabajo de investigación acerca de mitigación de la contaminación hídrica en la quebrada La Nutria, utilizando humedales artificiales. Se logró disminuir contenido de materia orgánica hasta un 98%, así como también eliminar grasas y aceites en un 47% y mejorar pH desde 13.6 a 4.5 utilizando especies macrófitas.

En El Salvador, también se ha iniciado la implementación de humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario, como por ejemplo el implementado en el Regimiento de Caballería (Argueta *et al.*,2008), en el cual se mejoró la calidad de las aguas residuales generadas en dicho regimiento y se reutilizaron para propósitos agrícolas. Las especies más eficientes para la descontaminación fueron *P.australis* y *T. angustifolia*. Se obtuvo como resultado que la carga de coliformes disminuyera hasta un 99% respecto a los valores iniciales, así también se mejoraron los parámetros fisicoquímicos como: temperatura, oxígeno disuelto, pH, ORP (potencial de óxido reducción), conductividad eléctrica y salinidad.

Considerando lo anterior, se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes químicos de aguas residuales, utilizando un sistema de humedal artificial con las especies *P.australis* y *T. angustifolia*. Las aguas residuales depuradas corresponden a las generadas por los procesos diarios de trabajo en un laboratorio de suelos con fines agrícolas, que se caracterizan por contener principalmente ácidos y álcalis fuertes, así como sustancias reductoras y oxidantes.

Los parámetros evaluados fueron: Demanda química de oxígeno (DQO), sólidos sedimentables (SSed), sólidos suspendidos totales (SST), oxígeno disuelto, bario, molibdeno, pH, calcio, magnesio, potasio, sodio, fosfatos, sulfatos, cloruros, nitratos, hierro, cromo total, cromo VI y temperatura. Por otra parte, la evaluación de estos sistemas de tratamiento en aguas residuales especiales, brinda aportes al conocimiento de los procesos físicos, químicos y biológicos presentes y permite obtener información sobre su eficiencia de remoción de los contaminantes antes mencionados, así como también dar cumplimiento a la normativa salvadoreña vigente relacionada a aguas residuales y contribuir a la reducción de la carga contaminante del cuerpo de agua cercano, el cual es el río Sucio, en el departamento de La Libertad.

Metodología

La investigación se llevó a cabo en un laboratorio de análisis de suelos con fines agrícolas, localizado en la zona de influencia del río Sucio, departamento de la Libertad, El Salvador. Dicho laboratorio genera un promedio de 80 litros semanales de aguas residuales (universo). La muestra la constituyó un total de ocho muestras al azar, de las cuales cuatro se muestrearon en el tanque de captación de la misma y cuatro en la salida del humedal artificial.

Inicialmente se realizó la selección de especies vegetales, considerando para ello *P.australis* y *T. angustifolia* debido a que han sido utilizadas en otros trabajos de investigación para depurar

aguas residuales y tienen amplia distribución en El Salvador. (Argueta, Quintanilla, 2008). Se colectaron los rizomas de estas especies en humedales naturales de la zona de San Diego, departamento de La Libertad, El Salvador, las cuales fueron sembradas en suelo del lugar de recolección contenido en bolsas plásticas de 9x12 pulgadas para desarrollo de raíces durante un mes.

Un humedal artificial combinando el flujo subsuperficial vertical y el flujo superficial fue construido para realizar el tratamiento de las aguas residuales (Figura 1). El agua residual fue colectada en bidones en el área de lavado del laboratorio y posteriormente depositada en un tanque de recolección con capacidad de 80 litros, el cual poseía un grifo que descargaba el contenido hacia la estructura 1 del humedal artificial.

Después del tanque de recolección, se instaló 3 depósitos plásticos de la siguiente forma: en los depósitos 1 y 2 (flujo subsuperficial) con dimensiones de 1 m. de largo, 0.5 m de ancho y 0.8 m de profundidad, se colocó material de soporte consistente en grava de 5mm (Figura 1). En ambos depósitos se sembró 4 plantas de *P.australis*(con suelo alrededor de cada rizoma), a un distanciamiento de 20cm. entre ellas y a una profundidad de 20 cm. En ambas estructuras no se observó agua en la superficie.

En el depósito 3 (flujo superficial) el cual tenía las mismas dimensiones que los depósitos 1 y 2, se sembró 4 plantas de *T. angustifolia* utilizando suelo como material de soporte, y el mismo distanciamiento y profundidad que la primera. Los depósitos fueron conectados entre ellos a través de tubo de PVC de media pulgada y 10 cm de largo (Figura 1). Al depósito 3 se le adaptó en su extremo final un tubo de PVC de media pulgada y 10 cm de largo, formando un sifón para evacuar el agua tratada y llevar a cabo la toma de muestras.

Durante un mes, previo al inicio de la operación del sistema, las plantas fueron con agua del sistema de distribución interna para promover el desarrollo de raíces.El control de plagas e insectos y remoción de mala hierba fue manual con frecuencia semanal. Después de establecido el humedal se realizó pruebas de caudal con agua de chorro (40 mililitros por minuto) para determinar el tiempo de retención adecuado, el cual fue 4.7 días. Luego se recolectó el agua residual en bidones plásticos de cinco galones de capacidad, ubicados en el área de lavado del laboratorio, se trasladó al tanque de recolección para recibir un pre tratamiento antes de ser incorporada al humedal, el cual consistió en agregar soda caustica comercial hasta alcanzar pH entre 4.0 y 6.0.

Se realizó análisis físico químico al agua residual en el tanque de recolección y a la salida de la misma después de pasar por el depósito 3. Los parámetros analizados fueron: demanda química de oxígeno (DQO), pH, oxígeno disuelto, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos; la temperatura fue medida *in situ* en la entrada del agua (depósito 1) y a la salida del depósito número 3. Además, se analizó otros parámetros por la naturaleza del agua residual descargada por el laboratorio, tales como:cromo total, cromo hexavalente, fosfatos, hierro total, nitratos, sulfatos, cloruros, calcio, magnesio, sodio; bario y molibdeno.

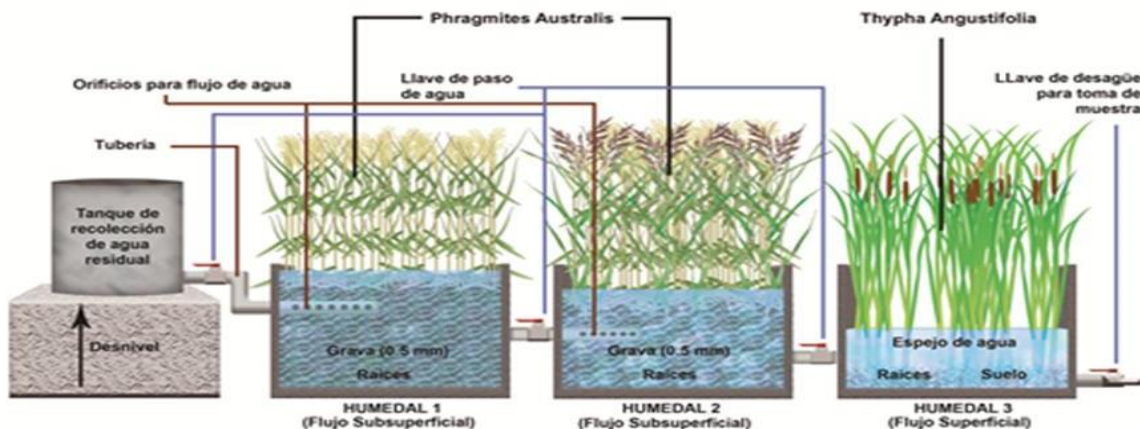


Figura 1. Humedal artificial de flujo subsuperficial y superficial sembrado con *P.australis* y *T. angustifolia*.

Los análisis de parámetros como pH, demanda química de oxígeno (DQO), oxígeno disuelto, sólidos sedimentables (SSed) y sólidos suspendidos totales (SST), se realizaron durante los meses de noviembre 2013, enero y junio 2014 para tener representación de muestras en época seca y época de lluvia. Los parámetros complementarios: Cromo total, cromo hexavalente, fosfatos, hierro total, nitratos, sulfatos, cloruros, calcio, magnesio, sodio, bario y molibdeno se analizaron en los meses de diciembre 2013, enero y junio 2014 para evaluar cómo evolucionan las concentraciones de estos contaminantes en el tiempo de inicio, a mediados y al final del ensayo y considerar época seca y época de lluvia. Los métodos analíticos implementados por los laboratorios en los cuales se realizaron las determinaciones corresponden a los recomendados por la APHA (1992).

Resultados y discusión

En la tabla 1, se resume los resultados de los parámetros analizados en cuatro jornadas de muestreo, realizadas entre los meses de noviembre 2013 y junio 2014 a la entrada y salida del humedal artificial. Considerando el porcentaje de remoción para cada parámetro y un porcentaje de remoción promedio final.

Los datos indican que a los 3 meses de establecido el humedal (enero) se obtiene mayor eficiencia en la remoción de DQO, lo cual puede deberse a que en esa etapa las plantas han madurado fisiológicamente y ya están en capacidad de remover mayor cantidad de este tipo de contaminante, siendo *P.australis* quien contribuye mayoritariamente a este proceso.

A los 8 meses de establecido el sistema, se manifiesta una disminución de eficiencia de remoción de DQO posiblemente porque el lecho de soporte y el sistema de raíces se ha saturado, lo que coincide con lo mencionado por Colín (2009) que menciona en algunas etapas los humedales artificiales no presentan reducción de DQO debido al arrastre de raíces o desprendimiento de la biopelícula formada alrededor de los rizomas que genera más compuestos orgánicos en el medio. También se observa que la contribución de *T. angustifolia* es poca para la remoción de DQO (solamente 7.6%), atribuyéndose a *P. australis* la mayor remoción de DQO relacionada directamente con la inyección de oxígeno al sistema con esta especie (4 mg/L).

La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos y sedimentables, puede asociarse a que las plantas van alcanzando mayor madurez fisiológica sobre todo en su sistema de raíces, y a esto se le suma el lecho de soporte, el cual contribuye en gran medida a retener este tipo de partículas, esto lo confirma Fernández *et al.* (s.f) sobre todo en los sistemas de flujo subsuperficial, debido al efecto del lecho de arena y grava.

En el caso de fosfatos a medida que el sistema tiene más tiempo de establecido, aumenta la eficiencia de remoción, porque las plantas para desarrollarse extraen mayor cantidad de fósforo asimilado en forma de fosfatos, aproximadamente 30 a 150 kg/ha/año (Fernández *et al.*, s.f) además la mayor eficiencia de remoción está relacionada a la época lluviosa, que aumenta la disponibilidad para las plantas, lo cual coincide con lo reportado por (Colín *et al.*, 2009).

El humedal artificial es eficiente para remover nitratos, sobre todo cuando las plantas han alcanzado cierta madurez fisiológica, ya que el nitrógeno es uno de los principales macronutrientes para la vida de las mismas, llegando a extraer aproximadamente 200 a 2500 Kg/ha/año. (Fernández *et al.* s.f). Esto puede estar relacionado también a que el aumento del oxígeno disuelto y una menor DQO (baja concentración de carbono) favorece los procesos de remoción de nitrógeno por nitrificación- desnitrificación (Lolmede *et al.*, 2000).

Sin embargo, al igual que los sulfatos y cloruros se observa una disminución del porcentaje de remoción al final del período evaluado, lo cual puede deberse a saturación del lecho donde se encuentra *T. angustifolia*, ya que se reportó disminución en la eficiencia de 24.8% para sulfatos y 12.1% para cloruros y nitratos en esta sección, es decir que este comportamiento significaría un retroceso en la remoción que ya había realizado *P. australis*. Esto podría asociarse a que el lecho donde se encuentra *T. angustifolia* tiene una porosidad inferior y por lo tanto se colmata más rápido.

El sistema de humedal en estudio es eficiente para la remoción de cromo total y la cantidad removida tiende a ser constante (Figura 2), sobre todo cuando las plantas están bien establecidas y desarrolladas (8 meses de establecimiento). Esto puede estar relacionado también a que gran parte del cromo total incorporado se transforma en cromo III por reacciones redox, el cual puede formar complejos con la materia orgánica del suelo que sirve de soporte al humedal (Mufarrege *et al.*, 2012). Así mismo Suárez *et al.* (2014) menciona investigaciones en las cuales se evaluaron *P. australis* y *T. latifolia* para remoción de cromo en la industria de curtiembres, alcanzando porcentajes de remoción mayores al 99% lo cual coincide con los resultados obtenidos en esta investigación.

Las cantidades de cromo VI generadas por el laboratorio de suelos no son significativas, pero lo poco que se origina, es removido eficientemente por el humedal artificial establecido, esto puede deberse a que el cromo VI es un agente oxidante fuerte y en presencia de materia orgánica, es reducido a cromo III (Mufarrege *et al.*, 2012), de manera que ésta es la forma predominante de encontrar este elemento en el humedal artificial. El cromo removido podría estar presente en el lecho de soporte y la vegetación, por lo cual debe tenerse especial cuidado con la disposición de lodos y vegetación generados en el mantenimiento del humedal ya que se pueden considerar como materiales peligrosos.

Tabla 1. Concentraciones en mg/L y porcentajes de remoción obtenidos en cuatro jornadas de muestreo durante la evaluación del humedal artificial

| Parámetro | nov-13 | | | dic-13 | | | ene-14 | | | jun-14 | | | | | | R (%) |
|------------------------------------|--------|------|-------|---------|--------|-------|---------|---------|-------|--------|--------|----------|--------|--------|-------|-------|
| | E | S | R (%) | E | S | R (%) | E | S | R (%) | E | S | R | S T.A. | R T.A. | R (%) | |
| | | | | | | | | | | | P.A | P. A (%) | | | | |
| DQO | 300 | 193 | 35.67 | * | * | * | 2134 | 268 | 87.44 | 5000 | 2020 | 59.6 | 1640 | 7.6 | 67.2 | 63.44 |
| SST | 5176 | 3568 | 31.07 | * | * | * | 676 | 68 | 89.94 | 112 | 0.2 | 99.82 | 0.2 | 0 | 99.82 | 73.61 |
| SSed | 200 | 0.2 | 99.9 | * | * | * | 0.4 | 0.2 | 50 | 9126 | 686 | 92.48 | 336 | 3.84 | 96.32 | 82.07 |
| OD | 7.2 | 7.2 | ** | * | * | * | 0.4 | 3.1 | ** | 6 | 10 | - | 8.3 | ** | ** | ** |
| Ba | * | * | * | 0.61 | 0.13 | 78.69 | 2.6 | 0.16 | 93.85 | * | * | * | * | * | * | 86.27 |
| Mo | * | * | * | 11.5 | 0.96 | 91.65 | 39.2 | 0.12 | 99.69 | 74.05 | * | * | 44.36 | * | 40.09 | 77.14 |
| pH | 8.45 | 6.61 | ** | 1.5 | 2.46 | ** | 1.45 | 3.14 | ** | 6.46 | * | * | 5.84 | ** | ** | ** |
| Ca | * | * | * | 2.34 | 418.5 | ** | 17.64 | 685 | ** | 887.5 | 138.8 | 84.36 | 159.73 | -2.36 | 82.00 | ** |
| Mg | * | * | * | 10.25 | 460 | ** | 12.25 | 337.5 | ** | 10.88 | 27.5 | - | 68.75 | ** | ** | ** |
| K | * | * | * | 587.5 | 81.05 | 86.2 | 270.63 | 51.25 | 81.06 | * | * | * | * | * | * | 83.63 |
| Na | * | * | * | 19000 | 767.5 | 95.96 | 4993.75 | 698.75 | 86.01 | * | * | * | * | * | * | 90.98 |
| PO₄³⁻ | * | * | * | 12296.3 | 1014.8 | 91.75 | 5557.5 | 810.6 | 85.41 | 771.75 | 8.24 | 98.93 | 15.95 | -1 | 97.93 | 91.7 |
| SO₂²⁻ | * | * | * | 40959 | 6682.1 | 83.69 | 4783.5 | 1347.24 | 71.84 | 2925.2 | 658.74 | 77.48 | 1384.3 | -24.8 | 52.68 | 69.4 |
| Cl⁻ | * | * | * | 2839.99 | 305.84 | 89.23 | 1223.38 | 257.78 | 78.93 | 1223.4 | 262.15 | 78.57 | 410.71 | -12.14 | 66.43 | 78.2 |
| NO₃⁻ | * | * | * | 145.62 | 89.11 | 38.81 | 1374.79 | 264.96 | 80.73 | 2076.3 | 317.16 | 84.72 | 569.39 | -12.14 | 72.58 | 64.04 |
| Fe | * | * | * | 490 | 130.9 | 73.29 | 186.3 | 27.63 | 85.17 | * | * | * | * | * | * | 79.23 |
| Cr total | * | * | * | 113100 | 10700 | 90.54 | 533.99 | 1.17 | 99.78 | 14.59 | 0.12 | 99.18 | 0.1 | 0.13 | 99.31 | 96.54 |
| Cr VI | * | * | * | 0.01 | 0.01 | 0 | 0.06 | 0.01 | 83.33 | * | * | * | * | * | * | 41.67 |
| T(°C) | 31 | 29 | * | 30 | 29 | ** | 31 | 28 | ** | 31 | * | * | 28 | ** | ** | ** |

*No se determinó ese parámetro durante ese periodo. **El comportamiento de ese parámetro no se puede medir como porcentaje de remoción debido a que tiene un comportamiento distinto. %R= Porcentaje de remoción. E=entrada de agua residual. S=salida de agua tratada. T.A: *Typha angustifolia*, P.A: *Phragmites australis*

Los resultados también indican que el humedal es eficiente para la remoción de bario, y que a medida transcurre el tiempo y las plantas van alcanzando madurez fisiológica aumenta la remoción de este contaminante por acción del sistema de raíces (Figura 2), ya que el bario genera precipitados que son atrapados por ellas, lo cual puede estar relacionado a la eficiencia mostrada por el humedal para remover sólidos sedimentables.

El humedal artificial establecido fue eficiente los primeros meses para remoción de molibdeno, pero por ser un oligoelemento, no es absorbido en cantidades significativas por las plantas (Fernández *etal*,s.f), por lo cual puede disminuir considerablemente su remoción por parte de las mismas al finalizar la investigación (Figura 2). La remoción de hierro se ve favorecida cuando el humedal artificial tiene mayor tiempo de establecido, ya que las plantas van alcanzando mayor madurez fisiológica (Figura 2) y lo utilizan para sus procesos enzimáticos. Sin embargo, este es un elemento que no lo utiliza la planta en grandes cantidades.

En el caso de sodio y potasio su comportamiento es similar, obteniéndose altos porcentajes de remoción, lo cual puede deberse a la capacidad que tienen las especies vegetales utilizadas para tolerar altas concentraciones de dichos contaminantes, considerando que fueron recolectadas en zona costera.

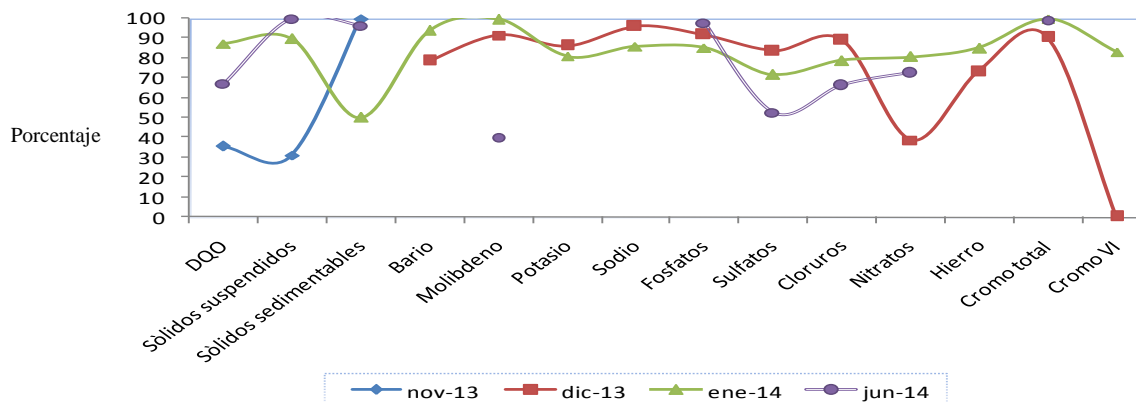


Figura 2. Porcentaje de remoción de contaminantes durante los meses de muestreo.

La parte media del humedal correspondiente a *P. australis* reportó un buen desempeño en la remoción de los contaminantes, sobre todo respecto a sólidos suspendidos y sedimentables, cromo total y fosfatos, esto puede estar relacionado con el porcentaje de oxígeno disuelto que esta especie inyecta al sistema, favoreciendo los procesos de descomposición y mineralización por parte de los microorganismos (Colínet *al*, 2009).

El calcio y el magnesio incrementan a la salida del humedal en comparación con la entrada del agua, esto puede deberse a la composición del lecho de grava y al contenido de ambos elementos en el suelo (Tabla 2) de manera que el agua con pH ácido reportada en los meses de diciembre y enero (2.46-3.14), puede disolver el calcio y magnesio contenido en este lecho de soporte por la

acción de los ácidos empleados en el laboratorio (Guerrero, 2001). Al final de la investigación puede decirse que disminuye el arrastre de estos elementos porque el pH incrementa a 5.84.

En lo referente a oxígeno disuelto, según lo observado, al inicio no detectó una inyección significativa de oxígeno al humedal artificial, posiblemente asociado con el desarrollo del sistema radicular de las plantas, pero a medida que éste se va desarrollando y las plantas maduran, dicho parámetro aumenta y se mantiene en valores que tienen a estabilizarse entre los 3 meses y 8 meses de establecido. Esto se debe a que principalmente *P. australis*, por ser planta acuática macrófita ha desarrollado mecanismos de aireación de sus tejidos lo cual consiste en pequeñas aberturas en hojas y tallos generando huecos interconectados, favoreciendo el intercambio gaseoso dentro de la planta y liberando oxígeno al medio. (Fernández *et al*,s.f).

Tabla2. Concentraciones en ppm de calcio y magnesio en el lecho de grava y suelo y en el agua residual a la entrada y salida del humedal artificial

| Elemento | Grava | Suelo H1a | Suelo H1b | Suelo H3a | Suelo H3b | AR no tratada M1 | Agua tratada M1 | AR no tratada M4 | Agua tratada M4 |
|----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Ca | 17490.8 | 140.0 | 760.0 | 3120.0 | 210.0 | 2.3 | 418.5 | 887.5 | 138.8 |
| Mg | 3349.4 | 23.0 | 13.0 | 78.0 | 47.0 | 10.3 | 460.0 | 10.9 | 27.5 |

H1a=Antes del paso de agua residual en humedal 1. H1b=Posterior al paso de agua residual en humedal 1. H3a=Antes del paso de agua residual por humedal 3. H3b=Posterior al paso de agua residual por humedal 3. AR: Agua residual. M1=muestreo 1(noviembre 2013). M4=muestreo 4 (junio 2014).

Así mismo, la contribución de oxígeno disuelto de *P.australis* (4 ppm) es un poco más alta que el aporte de *T. angustifolia* (2.3 ppm). Para el caso de temperatura, ésta osciló entre 28 y 31°C, lo cual contribuye a los procesos de remoción de contaminantes, ya que la incidencia de luz y temperatura ambiente son más favorables para el componente vegetal empleado (Luna, Aburto, 2014), contrario a lo que sucede en climas templados en los cuales disminuye la efectividad de depuración de los sistemas de humedales artificiales (Mena,2008).

Efecto del pH en el comportamiento de los contaminantes

Como muestra la figura 3, a medida aumenta el pH la remoción de sólidos sedimentables es mayor, no así para demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales. En el caso de demanda química de oxígeno, se confirmaría los resultados de Alzate (2015), en los cuales se menciona que a pH 6 se obtuvo porcentajes de remoción más bajas de materia orgánica. Para sólidos suspendidos totales, se obtuvo mayor porcentaje de remoción a pH ácido (menor a 6) probablemente debido a mayor disolución de algunos materiales (Alzate,2015).

Con respecto a bario y cromo VI se observa que con un pH mayor el porcentaje de remoción aumenta, en el caso de potasio, sodio y hierro se obtienen buenos porcentajes de remoción a pH ácidos, posiblemente porque permanecen en solución y se ponen disponibles para las plantas. Los

resultados también indican que no se observa relación directa entre fosfatos y el pH (Figura 3). En el caso de sulfatos y molibdeno se observa que con pH más bajo se logra mayor porcentaje de remoción que con pH más alto, contrario a lo expresado por Alzate (2015) en donde el mayor porcentaje de remoción de sulfatos se obtuvo a pH entre 5.0 y 6.0.

En cuanto a los nitratos, en experiencias anteriores se ha determinado que hay mayor acción de las bacterias nitrificantes con pH entre 7.5 a 8.6 (Metcalf, 1991) citado por Montoya *et al.* (2010), sin embargo, en los resultados obtenidos el mayor porcentaje de remoción, se obtiene con pH ácido. Según la figura 4, al aumentar el pH, aumentaría el oxígeno disuelto (Alzate, 2015). Lo cual coincide con los datos obtenidos, ya que según los resultados, a pH mayor el oxígeno disuelto es superior., es decir puede existir una relación directamente proporcional entre ambos parámetros.

A medida aumenta el pH la remoción de sólidos sedimentables es mayor, no así para demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales. En el caso de demanda química de oxígeno, se confirmaría los resultados de Alzate (2015), en los cuales se menciona que a pH 6 se obtuvieron porcentajes de remoción más bajas de materia orgánica. Para sólidos suspendidos totales, se obtuvo mayor porcentaje de remoción a pH ácido (menor a 6) probablemente debido a mayor disolución de algunos materiales (Alzate, 2015).

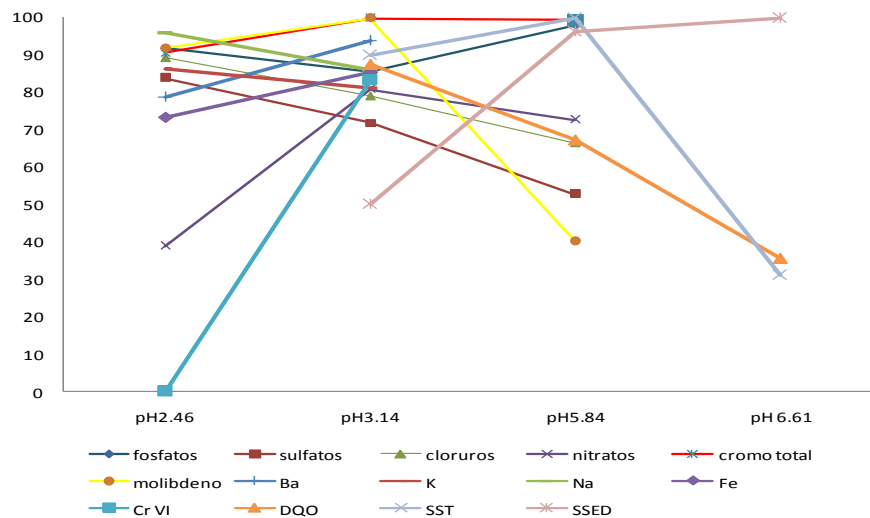


Figura 3. Relación entre porcentaje de remoción y pH para los contaminantes

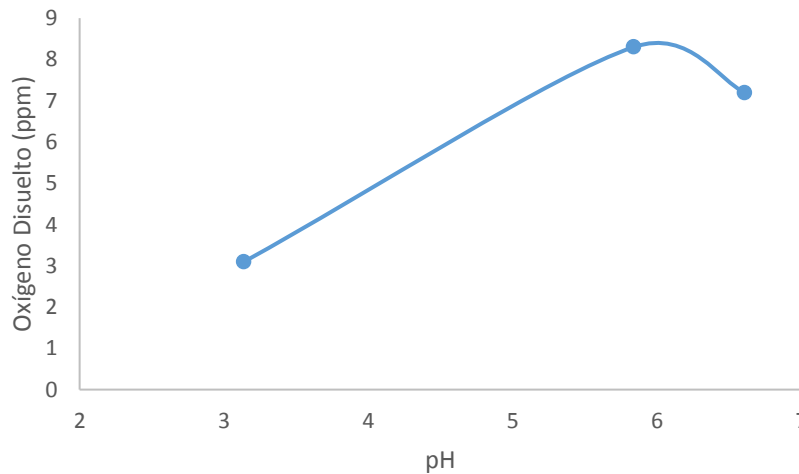


Figura 4. Comportamiento de oxígeno disuelto respecto al pH a la salida del humedal

Conclusión

El humedal artificial en estudio mostró una alta eficiencia de remoción en la mayor parte de contaminantes presentes en aguas residuales generadas en el laboratorio analítico. En promedio la eficiencia de remoción fue para DQO de 63.4%; sólidos sedimentables, 82.1%; sólidos suspendidos totales, 73.6%; bario, 82.27%; molibdeno, 77.14%; potasio, 83.6%; sodio, 90.98%; fosfatos, 91.70%; sulfatos, 69.4%; cloruros, 78.2%; nitratos, 64%; hierro, 79.23%; y cromo total, 96.54%. La alta eficiencia de remoción de cromo se considera uno de las mayores ventajas del tratamiento, ya que es un contaminante de alto riesgo para la salud y fue removido a concentraciones inferiores al límite máximo permisible establecido en la normativa salvadoreña para descarga a cuerpos receptores.

En cuanto a las diferencias entre *P. australis* y *T. Angustifolia*, la primera demostró mejores resultados que la segunda, específicamente para sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, nitratos, fosfatos y cromo total. Esta planta inyecta suficiente oxígeno al sistema para remover el hasta un 59.6% de DQO y aumentar la concentración de entrada de oxígeno en el humedal hasta 4 ppm, debido a las características morfológicas de esta especie vegetal. Esta condición la convierte en una planta idónea para ser utilizada en tratamientos de aguas residuales de tipo especial por medio de humedales. Esta condición aerobia representa una ventaja en el control de olores desagradables. Ambas especies demostraron tolerancia a pH muy ácido de hasta 2.46, sin presentar deterioro visible en su salud.

Pese al uso tradicional de los humedales artificiales como tratamiento terciario, se demostró en esta investigación el buen funcionamiento que presentan estos sistemas para el tratamiento de aguas residuales con alta carga contaminante y poco caudal. Sin embargo, se requiere seguir investigando su combinación con otras tecnologías y períodos más prolongados, cuyos resultados fortalezcan el conocimiento de estos bondadosos sistemas.

Referencias bibliográficas

- Alfaro de la T, M; García, R; Loredó, R. MX. (2009). Contribución de *Typha latifolia* a la remoción de cadmio y plomo en un humedal artificial de flujo subsuperficial (en línea). México. Consultado 13 ago. 2013
Disponible en:
<http://www.smbb.com.mx/congresos%20smbb/queretaro11/TRABAJOS/trabajos/IV/carteles/CIV-22.pdf>
- Alzate, E.(2015). Influencia del pH y el tipo de macrofitas en la remoción de materia orgánica y cadmio de un drenaje sintético de minería de carbón, por medio de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto. Tesis Maestría. Colombia, Universidad de Antioquia. 73 pp. Disponible en:<http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/5744>
- Andreo, P. (2014). Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas (en línea). Consultado 15 oct. 2018. Disponible en:
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/286327/TPAM.pdf;sequence=1>
- APHA (American Public Health Association, USA), AWWA (American Water Works Association, USA), WPCF (Water Pollution Control Federation, USA). (1992). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, España, Díaz de Santos, S.A. 1714 pp.
- Argueta Portillo, Q; Quintanilla, R. (2008). Asesoría en Suelos, Producción y Mantenimiento de Plantas en Construcción de Humedales Artificiales para Tratamiento de Aguas Servidas. San Andrés, El Salvador, CENTA. 46 pp.
- Colín, A; Ortiz, M; Romero, M; Sánchez, E. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la carga orgánica (en línea). México. Consultado 12 de jul. 2013. 12 pp. Disponible en:<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37012012004&idp=1&cid=247333>
- Fernández, J; De Miguel, E; De Miguel, J; Curt, M. s.f. Manual de fitodepuración, filtros de macrófitas en flotación. (en línea). España. 129 pp. Consultado oct. 2018. Disponible en:
<https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%EDtulos%20Manual/Cap%EDtulos%201%20a%202.pdf>
- Guerrero, C. (2001). Rocas calizas: Formación, ciclo del carbonato, Propiedades, aplicaciones, distribución y perspectivas en la Mixteca Oaxaqueña. (en línea). México. 14 pp. Consultado 02 de oct. 2018. Disponible en:http://www.utm.mx/edi_anteriores/pdf/ensayo1t14R.pdf
- Gutiérrez Osorio, A; Ortiz Hernández, M; Sánchez Salinas, E; Ortega Silva, M. (2003). Tratamiento de Aguas Residuales por medio de la instalación secuencial de Humedales Artificiales (en línea). Edo. de Morelos, MX. 10 p. Consultado 13 ago. 2013. Disponible en:
http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EC/TAC-52.pdf
- Lolmede, Ph; Jacome, A; Vidart, T; Tejero, I. (2000). Tratamiento de Agua Residual con Elevado Contenido de Nitratos Utilizando Reactores Biomembrana Aireados (en línea). Valencia, España. Consultado 01 dic. 2018. Disponible en:<https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/2847/2852>
- Luna-Pabello, V; Aburto-Castañeda, S (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón (en línea). D.F, México. Consultado 02 oct. 2018. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1405888X14703183>
- Mena, J. 9º Congreso Nacional del Medio Ambiente. (2008). Depuración de Aguas Residuales con Humedales Artificiales: Ventajas de los Sistemas Híbridos (en línea). Consultado 12 de jul. 2013. Disponible en:http://www.conama9.org/conama9/download/files/CTS/2643_JMena.pdf
- Metcalf; Eddy. (1991). Ingeniería de Aguas Residuales, volumen 1. Tratamiento, vertido y reutilización. Tercera Edición. McGraw Hill Interamericana de España. Madrid. Disponible en:
http://www.academia.edu/35963101/Ingeniería_de_aguas_residuales_Volumen_1_3ra_Edición_-_METCALF_and_EDDY-FREELIBROS.ORG.pdf
- Montoya, J; Ceballos, L; Casas, JC; Morató, J. (2010). Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. (en línea). Antioquia, Colombia. 8 p. Consultado 02 oct. 2018. Disponible en:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1794-12372010000200007
- Mufarregge, M. (2012). Tolerancia y eficiencia de *Typhadomingensis* Pers. en la retención de metales y nutrientes de efluentes industriales. Tesis ph.D. Ciencias Biológicas. Argentina, Universidad Nacional del Litoral. 177 pp. Disponible en:<http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/406>

- Suárez, A; Agudelo, R.(2014).Tratamiento de agua residual procedente de la industria de curtiembres mediante humedales subsuperficiales usando *Zantedeschiaaethiopica*. Colombia (en línea). Consultado 12 oct. 2018. 6 pp. Disponible en: <http://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/download/300/237/>
- Zapata, A. (2014). Humedales artificiales; una propuesta para la mitigación de la contaminación hídrica de la quebrada La Nutria, de los cerros orientales de Bogotá D.C (en línea). Manizales, Colombia. Consultado 12 dic.2018. Disponible en:http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/1930/Zapata_Palacio_Aura_Raquel_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Revisores sugeridos

- Arq. Kevin Antonio Zepeda, MSc.Fondo de Inversión Social para el Desarrollo Local (FISDL). kevinzepeda@yahoo.com. Maestro en Gestión Ambiental.
- Ing. Juan Carlos Fuentes, MSc. Universidad de San Carlos de Guatemala. jcfuentes24@gmail.com. Maestro en Hidrología y Recursos Hidráulicos.
- Ing. Marvin Eduardo Merida Cano. Universidad de San Carlos de Guatemala. mmerida.serviciosambientales@gmail.com. Maestro en Ciencias en Ingeniería Sanitaria.