

Tratamiento de aguas residuales domésticas empleando humedales construidos

Domestic wastewater treatment using constructed wetlands

***Marisel Núñez¹, Paola Flores², Alexandra Vera³,
Carmen Cárdenas², Ever Morales⁴***

Resumen

Los efluentes originados en Isla de Toas son dispuestos sin tratamiento, lo que podría ocasionar problemas a los cuerpos de agua receptores. Se propone el uso de humedales construidos, utilizando Mangle, para el tratamiento de las aguas residuales. Se empleó un sistema compuesto por dos fosas plantadas (SH) y dos sin plantar (SC), alimentadas desde un tanque elevado, con mezcla de agua residual y agua de la laguna Las Tabletas. Se evaluó DBO, DQO, SST y SSV, NTK, $N-NH_4$, $N-NO_2$, $N-NO_3$, P_T , CT y CF. En el caso de la remoción total (considerando entrada al tanque elevado y salida en SH y SC), SH resultó más eficiente para los parámetros P_T , SST y DQO; mientras que SC lo fue para NTK, NH_4 , SSV y CT. La remoción de DBO se mantuvo para ambos tratamientos. No hubo diferencia significativa. En las remociones parciales (considerando la salida del tanque elevado y salida del humedal construido), SH fue más eficiente para NTK, NH_4 y DQO;

Recibido: 14/03/2015 Aceptado: 04/04/2015
Autor para correspondencia: marisel2506@gmail.com

¹ Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt (UNERMB), Programa Ingeniería y Tecnología, Costa Oriental del Lago de Maracaibo, Zulia, Venezuela.

² Universidad del Zulia (LUZ), Facultad de Agronomía, Maracaibo, Zulia, Venezuela.

³ Centro de Investigación del Agua (CIA), Universidad del Zulia (LUZ), Facultad de Ingeniería, Maracaibo, Zulia, Venezuela.

⁴ Laboratorio de Organismos Fotosintéticos, Facultad de Ciencias, Universidad del Zulia, Maracaibo, Zulia, Venezuela.

mientras que SC lo fue para PT, SST, SSV, DBO Y CT. No hubo diferencia significativa entre ambos tratamientos. A excepción de los valores de SST y DQO medidos a la entrada, las medias obtenidas de los diferentes parámetros se mantuvieron dentro de la norma nacional para vertido a los cuerpos de agua.

Palabras clave: aguas residuales, humedales construidos, mangle.

Abstract

The wastewater of Toa Island are disposed without treatment, which could cause problems for receiving water bodies. Using constructed wetlands is proposed, using mangrove, for the treatment of wastewater. A system consisting of two tanks planted (SH) and two unplanted (SC), fed from an elevated tank, with a mixture of wastewater and water of the Tabletas lagoon. BOD, COD, TSS and VSS, TKN, $\text{NH}_4\text{-N}$, N-NO_2 , $\text{NO}_3\text{-N}$, PT, CT and CF was evaluated For the complete removal (considering the elevated tank entry and effluent of SH and SC), SH was more efficient for PT, TSS and COD parameters; while SC was for NTK, NH_4 , SSV and CT. BOD removal was maintained for both treatments. There was no significant difference. In partial removal (considering the effluent of the elevated tank and constructed wetland effluent) SH was more efficient for NTK, NH_4 and COD; while SC was for PT, SST, SSV, BOD and CT. There was no significant difference between the two treatments. Except for TSS and COD, the means values measured at the entrance from the different parameters remained within the national standard for discharge into water bodies.

Keywords: wastewater, constructed wetlands, mangrove.

INTRODUCCIÓN

Las viviendas de Isla de Toas, Municipio Almirante Padilla, Estado Zulia, Venezuela, descargan las aguas residuales a la laguna Las Tabletas o al Lago de Maracaibo sin tratamiento previo. De continuar esta situación, la capacidad autodepuradora de estos cuerpos

de agua será superada, ocasionando así problemas ambientales y el consiguiente deterioro de la calidad de vida de la población. Problemas tales como restricción en el uso del agua, alteraciones en la flora y/o en la fauna acuática, apariencia y olor desagradables, entre otros, incidirían en las actividades socio-económicas de la

población, que depende en gran medida de la pesca y el turismo, por lo que se hace necesario un sistema de tratamiento que disminuya el impacto de las descargas de las aguas residuales y no ocasionen otros problemas al ecosistema. Una alternativa sostenible económica y ecológicamente lo constituyen los humedales construidos, por lo que se propone su uso para el tratamiento de las aguas residuales de Isla de Toas, utilizando una planta de importancia en el ecosistema lacustre del Lago de Maracaibo como es el Mangle Rojo (*Rhizophora mangle*), y de abundante presencia en la locación en estudio.

1. Se desconoce la existencia de trabajos previos relacionados con propuestas para el tratamiento de las aguas residuales originadas en Isla de Toas. La población desconoce otras opciones diferentes a las mencionadas para la disposición de sus efluentes domésticos; las descargas se realizan a través de pequeñas tanquillas a donde confluyen las aguas residuales de grupos de dos o tres viviendas en cada sector.

Con relación al uso de humedales construidos como tratamiento para las aguas residuales, se han realizado numerosos estudios a nivel mundial, demostrando ser

eficientes para distintos tipos de efluentes; sin embargo, no han sido frecuentes los estudios de tratamiento de aguas residuales que empleen vegetación de agua salobre (11). Regionalmente, se han realizado algunos trabajos en la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia (LUZ). Los mismos fueron orientados al uso de humedales para el pulimento de efluentes de lagunas de estabilización y para el tratamiento de aguas de producción de la industria petrolera. Los resultados mostraron un sistema eficiente para el pulimento de efluentes.

En cuanto al uso de Mangle, se conocen algunas experiencias foráneas que han empleado esta especie para el tratamiento de aguas residuales de la industria camaronera, dando resultados satisfactorios (14, 11). Los manglares se desarrollan mundialmente a lo largo de toda la franja tropical y subtropical, motivado a sus características que permiten su adaptación a condiciones hostiles donde otro tipo de vegetación no podría adaptarse satisfactoriamente; es por ello que estas especies han sido consideradas en estudios para la depuración y control de contaminantes (6). Sin embargo, es poco el conocimiento técnico que existe sobre el forestamiento exitoso con mangle,

así como la densidad de árboles necesaria para alcanzar un tratamiento suficiente (11).

La investigación se justifica desde el punto de vista ambiental ya que se evalúa una opción que permitiría el saneamiento no solo de los espacios lacustres de Isla de Toas, sino también de las aguas de la laguna Las Tabletas, cuerpos de agua receptores de las aguas residuales que se originan en la Isla, con los consiguientes beneficios para los habitantes, al mejorar la calidad de vida y las actividades turísticas. El sistema planteado es de tipo biológico, bajo costo de construcción, fácil operación y mantenimiento, que no solo permitiría el tratamiento de las aguas residuales sino que no ocasionaría impactos negativos al entorno, por considerarse tecnología verde.

El sistema experimental fue construido, operado y mantenido por la comunidad, ayudando a la formación técnica en el área de tratamiento de aguas residuales de los pobladores aledaños al mismo y a su concienciación sobre la problemática ambiental de su entorno al descargar las aguas residuales sin tratamiento previo.

El objetivo de la investigación fue evaluar el uso de humedales construidos, con implantación de plántulas de Mangle, para el tra-

tamiento de las aguas residuales originadas por las actividades domésticas de los habitantes de Isla de Toas, Municipio Almirante Padilla, Estado Zulia, Venezuela.

METODOLOGÍA

Se diseñó y construyó un humedal de tipo superficial en terreno de una vivienda en el sector El Hato de Isla de Toas. El sistema experimental constó de cuatro celdas, dos celdas plantadas con mangle rojo y dos celdas de control sin plantas. Las celdas se construyeron con paredes de bloques, y piso de concreto con malla electrosoldada, teniendo un tamaño de 1,4 m x 0,55 m cada una, para un total de 1,4 x 2,2 m. Se colocó en cada celda, como material de soporte, arena de los terrenos adyacentes al sistema experimental. Se sembraron 30 plántulas de mangle, de aproximadamente 30 cm de altura, en cada una de las dos celdas con plantas. Las mismas se irrigaban con agua desde un tanque elevado que actuó como sedimentador, por lo que, posteriormente al inicio de la toma de muestras, se consideró como parte del sistema experimental. El tanque de 600 litros recibía el agua residual a través de una bomba. Las dos celdas

restantes no fueron plantadas, actuando como controles.

El agua utilizada consistió en la mezcla del agua residual con agua de la laguna Las Tabletas, ya que la misma era tomada a la salida de la tanquilla de recolección del agua residual, donde ésta ya se mezclaba con el agua de la laguna; esta condición para la toma del agua a tratar se debió al poco volumen de aguas residuales generado por las viviendas, que no era suficiente para alimentar el sistema en estudio.

Semanalmente, durante un periodo de seis meses, se tomaron muestras del agua residual de entrada al sistema experimental y de salida del mismo, para un total de 6 muestras, distribuidas de la siguiente manera: una muestra correspondiente a la entrada al tanque elevado (E) (la evaluación en este punto fue durante los últimos tres meses, cuando se decidió incorporar esta muestra a evaluación), una correspondiente a la salida del tanque elevado (S) que representa la entrada al sistema de humedales, y cuatro salidas de éste último, correspondientes a dos para las fosas plantadas (SH), y dos para las no plantadas (SC). Se midió en el sitio pH, oxígeno disuelto, temperatura y salinidad, empleando para ello un equipo multiparamétrico Orion, modelo

5 Star Thermo. Las muestras para el resto de los parámetros se tomaban en envases plásticos, se refrigeraban y se trasladaban inmediatamente hasta laboratorio, donde se realizaban las pruebas de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendedos Totales (SST) y Volátiles (SSV), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), Nitrógeno Amoniacal (N-NH_4), Nitritos (N-NO_2), Nitratos (N-NO_3), Fósforo Total (P_T) y Coliformes Totales (CT). Todas las pruebas se determinaron empleando la metodología descrita en los métodos estándar para el análisis de aguas y aguas residuales de la APHA-AWWA-WEF (1999) (1).

Los resultados se sometieron a un análisis estadístico descriptivo calculando la media y desviación estándar para cada parámetro y cada tratamiento, y se compararon los valores de las mismas para SH y SC, a través de una prueba T para determinar si había o no diferencia significativa entre ellas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos para los diferentes parámetros analizados, a la entrada del tanque elevado (E), a la salida (S) del mismo y a la salida

*Tratamiento de aguas residuales domésticas empleando
humedales construidos*

TABLA 1
RESULTADOS DE LAS MEDIAS Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA LOS PARÁMETROS
ANALIZADOS EN E, S, SH Y SC Y REMOCIONES OBTENIDAS

Parámetro	E	S	SH	% Remoción Parcial (Total)	SC	% Remoción Parcial (Total)
pH (unidades)	7,5±0,13	7,73±0,28	7,97±0,21	-	8,07±0,26	-
Conductividad (mS/cm)	23,1±10,61	19,23±9,66	19,51±10,52	-	19,23±9,66	-
OD (mg/l)	0,43±0,63	2,08±1,11	2,41±1,00	-	2,30±1,29	-
Cloruros *10 ³ (mg/l)	14,6±13,9	7,0±4,3	6,9±4,5	-	6,7±4,4	-
P _T (mg/l)	2,21±0,89	1,21±0,60	0,71±0,43	32±29 (74±15)	0,63±0,36	34±35 (68±24)
NTK (mg/l)	6,85±5,58	3,11±2,04	1,41±1,00	43±39 (76±13)	1,68±2,27	33±72 (79±19)
NH ₄ (mg/l)	5,78±4,67	2,70±1,93	1,22±1,20	46±40 (67±31)	1,19±1,35	43±56 (75±25)
NO ₃ (mg/l)	0,02±0,015	0,022±0,028	0,021±0,021	-	0,026±0,030	-
NO ₂ (mg/l)	0,03±0,023	0,074±0,087	0,065±0,065	-	0,058±0,066	-
SST (mg/l)	274±178	168±107	132±109	14±39 (26±25)	129±107	22±36 (20±34)
SSV (mg/l)	89±52	55±36	42±31	16±39 (21±45)	37±32	28±34 (25±44)
DQO (mg/l)	391±127	273±133	222±126	17±30 (35±25)	244±149	7±40 (24±27)
DBO (mg/l)	41±42	14±6	8±4	38±30 (69±19)	7±4	47±25 (68±33)
Coliformes Totales *10 ⁵ (NMP/100ml)	5,68±7,27	3,71±6,15	0,71±2,82	80±38 (87±19)	0,17±0,37	95±23 (97±29)

de las cuatro fosas del sistema experimental (SH y SC).

Las aguas residuales a la entrada del sistema, se caracterizaron por presentar condiciones de pH adecuado (entre 4 y 9), presencia de oxígeno y nutrientes para que se lleven a cabo las funciones biológicas; sin embargo, presentaron valores de conductividad y cloruros que expresan una importante salinidad en las mismas, y las posibles consecuencias como baja biodegradabilidad de la materia presente.

En términos generales, los resultados obtenidos definieron un tratamiento eficiente para la remoción de los parámetros estudiados, tanto para el sistema SH como para el SC. En el caso de la remoción total (determinada considerando el valor de E y la salida en SH o SC), el sistema con presencia de mangle (SH) resultó más eficiente que el sistema sin plantas (SC), para los parámetros P_T (74%), SST (26%) y DQO (35%); mientras que SC lo fue en el caso de NTK (79%), NH_4 (75%), SSV (25%) y CT (97%). La remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se mantuvo en el mismo orden para ambos tratamientos. No hubo diferencia significativa entre las remociones para ningún caso.

Considerando las remociones parciales, determinadas tomando la salida del tanque elevado (S) y salida en cada sistema, SH fue más eficiente para NTK (43%), NH_4 (46%) y DQO (17%); mientras que SC lo fue para PT (34%), SST (22%), SSV (28%), DBO (47%) y CT (95%). En ningún caso hubo diferencia significativa al comparar los resultados para ambos tratamientos.

Los valores medios a la entrada cumplieron con los establecidos en la normativa nacional sobre calidad de vertidos líquidos (República de Venezuela, 1995), a excepción de SST y DQO, cuyos límites están establecidos en 80 mg/l y 350 mg/l respectivamente, mientras que los valores medidos a la entrada fueron de 274 ± 178 para SST y 391 ± 127 para DQO.

Los resultados generales hacen suponer que los principales mecanismos de remoción de los elementos evaluados fueron mayormente de tipo físico-químico y bacteriológico, no dependientes de la presencia de la vegetación. Esta apreciación contradice lo señalado por algunos autores, quienes consideran fundamentales las funciones de la misma en los procesos que se dan en los humedales (2, 7). La presencia de la vegetación favorecería en todo caso, esos distintos procesos de remo-

ción que en el sistema se dan, llegando a compensar, inclusive, el trabajo que no se realiza ante la ausencia, por la misma presencia de la vegetación, de microorganismos como las microalgas, por ejemplo.

Es de considerarse que el mangle presentó lento crecimiento y un prolongado periodo de adaptación, por lo que pudiera presumirse que el tiempo durante el cual se realizó la experimentación no fue suficiente para que la vegetación alcanzara su máximo potencial depurador. Otros estudios con mangle rojo (6), fueron realizados durante periodos sobre los 300 días, muy superior a los 180 considerados en este estudio. Adicionalmente, se desconoce la extensión y densidad arbórea necesaria de estos sistemas para un tratamiento suficiente de los efluentes (11). La supervivencia de la población sembrada estuvo en el orden del 60%.

La remoción de Pt en humedales se asocia a la adsorción y precipitación del fósforo en el material de soporte, por lo que esta capacidad es finita (8, 12), sin embargo, el sistema estudiado pareciera no haber alcanzado la saturación, al mantenerse la remoción durante el tiempo de estudio. Las medias de las concentraciones de Pt a la salida de

SH ($0,71 \pm 0,43$) y SC ($0,63 \pm 0,36$), y de las remociones alcanzadas, muestran que más que el contacto con el material de soporte, los microorganismos fotosintéticos y la vegetación habrían tenido un papel primordial en la remoción de Pt que hubo en el sistema experimental, al mantenerse en ambos casos las condiciones de contacto del agua en tratamiento con el material de soporte.

Para el caso de NTK y NH_4 , las remociones alcanzadas parecerían indicar que la presencia de mangle incrementó la remoción de nitrógeno, en comparación con el sistema no plantado. En SH la presencia de microalgas es disminuida, por lo tanto, la acción de bacterias y vegetación alcanzaría mayor importancia. Para el caso de SC, la presencia masiva de algas que llegaron a formar extensos tapices sobre la superficie del sistema, habría estado estrechamente vinculada con la remoción de nitrógeno (13, 10). Las concentraciones de NO_2 y NO_3 son mínimas en comparación con NTK y NH_4 , por lo que no son consideradas en la discusión.

La concentración de SST siempre disminuyó en ambos tratamientos con respecto a la entrada, sin embargo, en ninguno de los puntos evaluados (E 274 ± 178 , S 168 ± 107 , SH 132 ± 109 y SC

129±107) la concentración de SST estuvo por debajo del valor establecido por la normativa nacional sobre calidad de vertidos líquidos, establecido en 80 mg/l.

El agua residual presentó una relación SSV/SST de 0,32 a la entrada, manteniéndose a la salida de SH y disminuyendo hasta 0,28 a la salida de SC; este valor indica una baja cantidad de materia orgánica biodegradable, confirmado con la relación DBO/DQO discutida más adelante.

La remoción de DQO y DBO pareciera deberse principalmente a la actividad de los microorganismos presentes en los distintos componentes del tratamiento, más que a cualquier otra acción, y que en el caso del sistema SH, la película microbiana dispone de mayor área superficial donde formarse, por la presencia de las raíces y tallos de las plantas, con relación al área disponible en SC, lo que pudo haber incidido en la mínima ventaja de la remoción en SH sobre la de SC. En el caso de SC, la acción microbiológica en conjunción con el tiempo de retención, permitieron la remoción de la materia orgánica (3). El valor medio de DQO en E no cumple con el Decreto 883 (9), sin embargo, en SH y SC el valor medio disminuyó entrando en los límites de la norma.

La relación DBO/DQO fue de 0,1; 0,05; 0,04 y 0,03 en los casos de E, S, SH y SC respectivamente; estos valores son bajos lo cual indicaría que son aguas poco biodegradables, por lo que el tratamiento no alcanzaría el efecto deseado. Esto pudiera deberse a la presencia de contaminantes de difícil biodegradabilidad o a la dilución a la que el agua residual se encuentra sometida al mezclarse con el agua de la laguna Las Tablas. Estos valores bajos, no habituales en tratamientos biológicos, que requieren valores superiores a 0,5 para la fácil degradación por parte de los microorganismos (4), pudiera ser atribuible a la salinidad de las aguas, consecuencia de la cercanía de la desembocadura del lago de Maracaibo al Mar Caribe, y que incide directamente en la cantidad de sales inorgánicas disueltas en las aguas de la zona, que no pueden ser degradadas durante el tratamiento. Esta misma condición salina, por otro lado, contribuye a la desaparición de organismos coliformes totales y fecales (5), llegando estos últimos a no detectarse en SH ni SC.

La presencia abundante de microalgas en SC, observada durante casi todo el periodo de estudio, habría contribuido en la remoción de los distintos elementos durante el proceso de tratamiento. En

el caso de SH, la presencia de microalgas estuvo muy disminuida por la presencia de la vegetación, por lo que podría suponerse que la presencia de mangle compensa la ausencia de microalgas.

CONCLUSIONES

El humedal construido sembrado con mangle rojo fue efectivo en la remoción de PT, SST, DQO, NTK, NH₄, SSV y CT de las aguas

residuales en tratamiento, no presentando diferencia significativa con los valores alcanzados por los sistemas sin plantar.

Los procesos que se dan dentro de los sistemas plantados y sin plantar, involucraron diferentes actividades donde procesos físico-químicos y biológicos se compensan ante los cambios de las diferentes condiciones dentro del sistema, y donde la vegetación mantiene funciones de sinergia

LITERATURA CITADA

- (1) APHA, AWWA, WPCF. (1999) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, 20 Edition.
- (2) Brix, H. (1994). Funtions of Macrophytes in Constructed Wetlands. Water Sci. Technol. Vol. 29, No. 4, 71-78.
- (3) Coleman, J., Hench, K., Garbutt, K., Sexstone, A., Bissonnette, G., Skousen, J. (2001). Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands. Water, Air, and Soil Pollution 128:283-295.
- (4) Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia, 776 pp.
- (5) De Luque, M., García, F., Palacio, C. (2011). Determinación del T90 en la Bahía de Santa Marta (Col.). Dyna, año 78, Nro. 167, pp. 122-131. Medellín.
- (6) Grosso, J., Sánchez, L., Avendaño D. y Restrepo, R. (2000). Retención de cloruros, bario y cromo en dos especies de Mangle *Avicennia Germinans* y *Rhizophora mangle* desarrolladas en aguas de producción de la industria petrolera mediante la técnica de cultivo hidropónico. CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro – Vol. 2 Núm. 1, Dic. 2000.
- (7) Kadlec, R., Knight, R. (1996) Treatment wetlands. CRC Press LLC. Boca Raton, Florida, USA.
- (8) IWA. (2000) Costructed Wetlands for Pollution Control. Processes, Performance, Design and Operation. International Water Assotiation (IWA) Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control. IWA Publishing, London, UK.
- (9) República de Venezuela (1995). Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Decreto 883. Gaceta Oficial Nro. 5021. Extraordinaria. Lunes, 18 de Noviembre de 1995. Venezuela, 7pp.

- (10) Romero R., J. A. (1999). Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño. Centro Editorial, Escuela Colombiana de Ingeniería. Santafé de Bogotá, Colombia.
- (11) Sánchez-Carrillo, S., Álvarez-Yépiz, J. (2008). Viabilidad de los manglares artificiales como sistemas de tratamiento de los efluentes camaronícolas en Latinoamérica. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 4 (1): 17-30.
- (12) Seo, D., Cho, J., Lee, H., Heo, J. (2005). Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland. Water Res. 39: 2445-2457.
- (13) Valderrama, L., Del Campo, C., Rodríguez, C., Bashan, L., Bashan Y. (2002). Treatment of recalcitrant wastewater from ethanol and citric acid production using the microalga *Chlorella vulgaris* and the macrophyte *Lemna minúscula*. Water Research 36, 4185-4192.
- (14) Zaldívar-Jiménez, A., Herrera-Silveira, J., Pérez-Ceballos, R., Teutli-Hernández, C. (2012). Evaluación del uso de los humedales de manglar como biofiltro de efluentes de camaroneras en Yucatán, México. Revista de Biología Marina y Oceanografía. Vol. 47, N°3: 395-405.