

## Removal of nitrogen and phosphorus by *Typha dominguensis* and *Lemna* sp. in laboratory scale constructed wetlands

Marisel Núñez S.<sup>1,2\*</sup>, Carmen Cárdenas de Flores<sup>2</sup>, Yoleivis Ramírez<sup>2</sup>,  
Sandra Rincón<sup>2</sup>, Luisa Saules<sup>2</sup>, Ever Morales Avendaño<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Ingeniería y Tecnología, Universidad Rafael María Baralt (UNERMB),  
Costa Oriental del Lago. \*[marisel2506@gmail.com](mailto:marisel2506@gmail.com)

<sup>2</sup>Centro de Investigación del Agua (CIA), Facultad de Ingeniería,

<sup>3</sup>Laboratorio de Microorganismos Fotosintéticos, Facultad de Ciencias,  
Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

### Abstract

The present work evaluated the function of the plants *Typha dominguensis* and *Lemna* sp in the removal of nitrogen and phosphorus from effluents of stabilization ponds, using laboratory scale constructed wetlands. The parameters TKN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N and COD were measured in five treatments: wastewater (AR), AR more substrate (ARS), ARS more *Lemna* sp (ARSL), ARS more *Typha dominguensis* (ARST) and ARS more *T. dominguensis* more *Lemna* sp (ARSTL). The results favored to ARST and ARSTL in removing of TKN (79 and 83%), NH<sub>4</sub>-N (93 and 93%), NO<sub>2</sub>-N (63 and 64%), NO<sub>3</sub>-N (45 and 51%) and COD (51 and 46%, respectively), while AR and ARS reached major percentages for the phosphorus (38 and 37%, respectively). *Lemna* sp don't develop as expected, which caused that this treatment reached the lowest removals. The results demonstrated the importance that *T. dominguensis* exercises in the processes occurring within wetlands; also was evident the activity that bacteria and microalgae performed in nutrient removal. *T. dominguensis* was efficient in removing of nutrients and organic matter present in water in treatment.

**Keywords:** Nutrients, *Typha dominguensis*, *Lemna* sp, constructed wetlands, ponds.

## Remoción de nitrógeno y fósforo a través de las plantas *Typha dominguensis* y *Lemna* sp. en humedales construidos a escala laboratorio

### Resumen

El presente trabajo evaluó la función de las plantas *Typha dominguensis* y *Lemna* sp., en la remoción de nitrógeno y fósforo de efluentes de lagunas de estabilización, utilizando humedales construidos a escala laboratorio. Se midió NTK, N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, fósforo total y DQO, en cinco tratamientos: agua residual (AR), AR más material de soporte (ARS), ARS más *Lemna* sp (ARSL), ARS más *T. dominguensis* (ARST), y ARS más *T. dominguensis* más *Lemna* sp (ARSTL). Los resultados favorecieron a los tratamientos ARST y ARSTL en la remoción de NTK (79 y 83%), N-NH<sub>4</sub> (93 y 93%), N-NO<sub>2</sub> (63 y 64%), N-NO<sub>3</sub> (45 y 51%) y DQO (51 y 46%, respectivamente), mientras que AR y ARS alcanzaron mayores porcentajes para el fósforo (38 y 37%, respectivamente). *Lemna* sp no se desarrolló en la forma esperada, lo que ocasionó que el tratamiento con esta planta alcanzara las menores remociones. Los resultados demostraron la importancia de *T. dominguensis* en los procesos que ocurren dentro de los humedales; también se evidenció la actividad

que bacterias y microalgas realizan en la remoción de nutrientes. La planta *T. dominguensis* fue eficiente en la remoción de nutrientes y materia orgánica presente en las aguas en tratamiento.

**Palabras clave:** Nutrientes, *Typha dominguensis*, *Lemna* sp, humedales construidos, lagunas.

## Introducción

Los tratamientos para aguas residuales no solo deben ser eficientes y económicos, sino además, desarrollarse en consonancia con el ambiente. Dentro de estas posibilidades se ubican los humedales construidos, los cuales han sido exitosos mundialmente para tratar diversos tipos de aguas residuales. En los procesos depurativos que se cumplen en estos sistemas, la función que la vegetación ejerce sobre la remoción de nutrientes ha sido cuestionada [1], debido a que la función principal recae en los procesos físicos y microbianos [2]. No obstante, para Koottatep y Polprasert [3], la absorción por parte de las plantas es el principal mecanismo de remoción de los nutrientes. Independientemente del papel que cumplen las plantas en la remoción de estos, está demostrado que ellas son muy importantes en los procesos depurativos a través de la oxigenación de la rizósfera, favoreciendo la formación y función de la capa microbiana [1, 4]. Mientras que la eficiencia de los humedales construidos en la remoción de DBO, DQO, SST y organismos fecales es alta, la remoción de nitrógeno en muchos sistemas de humedales es deficiente, debido principalmente a la ausencia de suficiente oxígeno que satisfaga las necesidades de los diferentes procesos para la transformación del mismo [5]. La experiencia con humedales construidos en Venezuela es escasa, haciéndose necesaria la investigación del comportamiento y la efectividad de las plantas autóctonas en la remoción de nitrógeno y fósforo en estos sistemas. El objetivo de este tra-

bajo fue evaluar la función de la planta emergente *Typha dominguensis* y de la planta flotante *Lemna* sp, en la remoción del nitrógeno y fósforo de los efluentes de las lagunas de estabilización del Centro de Investigación del Agua (CIA) de la Universidad del Zulia (LUZ), Maracaibo, Venezuela, utilizando para ello humedales construidos a escala laboratorio.

## Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo durante seis meses en el CIA de LUZ, donde funciona un sistema de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales domésticas, de donde se tomó el efluente para ser tratado en el sistema experimental compuesto de cinco tratamientos, según el diseño que se presenta en la Tabla 1.

Cada tratamiento se preparó por triplicado, en envases plásticos, con un diámetro de 0,50 m, altura de 0,30 m y una capacidad volumétrica de 0,059 m<sup>3</sup>. Las unidades experimentales, 15 en total, fueron protegidas de la lluvia por un techo de plástico transparente (Figura 1).

El material de soporte de los tratamientos ARS, ARSL, ARST y ARSTL fue arenisca friable de textura media a gruesa, clasificada como *Typic Haplargids*, con una profundidad de 0,15 m. La alimentación de las unidades se realizaba por carga, empleando en cada ocasión para cada unidad 0,02 m<sup>3</sup> de agua residual efluente de las lagunas de estabilización. Luego de 48 horas, se retiraba el agua residual remanente en cada uni-

Tabla 1  
Descripción del sistema experimental estudiado

Componentes del tratamiento	Nomenclatura
Agua residual	AR
Agua residual + material de soporte	ARS
Agua residual + material de soporte + <i>Typha</i>	ARST
Agua residual + material de soporte + <i>Lemna</i> sp	ARSL
Agua residual + material de soporte + <i>Typha</i> + <i>Lemna</i> sp	ARSTL

Material soporte = arenisca.

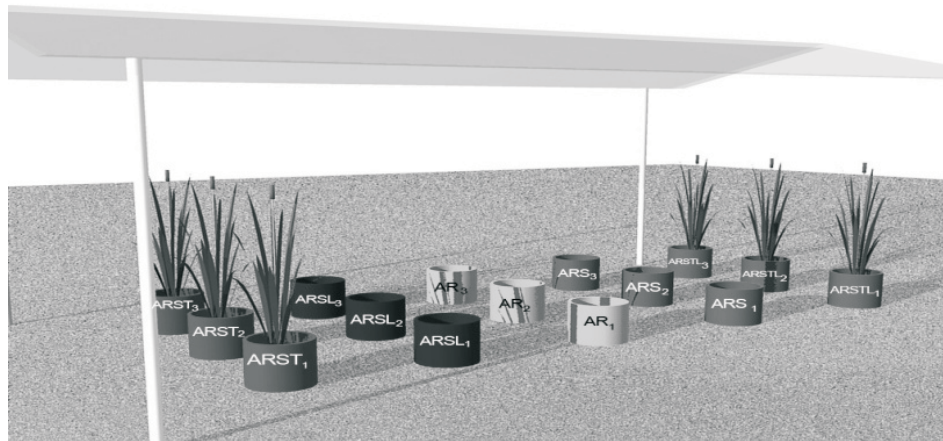


Figura 1. Esquema del sistema experimental estudiado.

dad y se colocaba una nueva carga. Las muestras se tomaban del agua de entrada a las unidades y de la salida de cada una de ellas, con una frecuencia de 2 ó 3 veces por semana, y analizadas de inmediato en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del CIA. Se determinaron los parámetros nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniacal ( $N-NH_4$ ), nitrito ( $N-NO_2$ ), nitrato ( $N-NO_3$ ), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total ( $P_T$ ) y pH (medido in situ). Los métodos utilizados para la determinación de cada parámetro son los descritos en la metodología de APHA [6]. Se realizó también un balance de masa para conocer la distribución del nitrógeno y del fósforo en los distintos elementos componentes de los sistemas. Para ello, se determinó la cantidad presente de dichos elementos en agua, plantas y material de soporte, al inicio del ensayo y una vez culminado el mismo.

## Resultados y discusión

La Tabla 2 muestra los valores medios encontrados a la entrada y a la salida para cada uno de los parámetros analizados en cada tratamiento.

Los valores de entrada de NTK,  $N-NH_4$  y  $P_T$  disminuyeron en todos los tratamientos. Excepto para  $P_T$ , hubo diferencia significativa entre las medias obtenidas a la salida, lo cual indica que el tipo de tratamiento incide sobre la obtención de la calidad del efluente. La Tabla 3 presenta los valores medios para la remoción de cada uno de los parámetros. Hubo remoción en todos los pará-

metros, excepto para los casos de  $N-NO_2$  y  $N-NO_3$  en los tratamientos AS y ARSL, donde ocurrió un incremento de los valores reportados a la entrada, sin embargo, el aumento en los mismos no fue representativo al compararlos con los valores de NTK y  $N-NH_4$  (Tabla 2). El resultado del análisis de varianza (ANOVA), comprobó que existe diferencia significativa entre los valores medios de remoción para los distintos tratamientos, a excepción de la remoción de  $P_T$ . La aplicación de la prueba de Tukey determinó los subconjuntos homogéneos reflejados en la Tabla 3.

Los resultados para DQO muestran que los tratamientos con presencia de las plantas *T. domingensis* y *Lemna sp* fueron los más eficientes removiendo materia orgánica. La remoción de la materia orgánica es debida primordialmente a la descomposición por parte de los microorganismos adheridos a hojas, tallos, restos vegetales y al medio de soporte y a los microorganismos suspendidos en la columna de agua del humedal construido. Este proceso fue favorecido, probablemente, por la morfología de las raíces de la *T. domingensis* que habría proporcionado gran cantidad de área para la formación de la película biológica donde se ubicaban los microorganismos que realizan la descomposición de la materia orgánica y permitiría, además, que los sólidos quedaran atrapados entre las raíces. Para los tratamientos AR y ARS la presencia de microorganismos en el agua residual, aunado al tiempo de retención, habría permitido la ocurrencia de los diferentes mecanismos físico-químicos y biológicos a través de los cuales se alcanza la elimina-

Tabla 2  
Valores de los parámetros de los distintos tratamientos. Análisis de varianza (ANOVA) para los valores de salida y comparación a través de la prueba de Tukey

	NTK (mg/L)	N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	N-NO <sub>2</sub> (mg/L)	N-NO <sub>3</sub> (mg/L)	P <sub>T</sub> (mg/L)	DQO (mg/L)	pH (uníd.)
ENTRADA	14,80±3,24	10,56±2,80	0,037±0,039	0,08±0,03	2,94±0,43	248±53	7,39±0,33
AR	4,17±2,28 <sup>b,c</sup>	1,41±0,94 <sup>b</sup>	0,017±0,033 <sup>a,b</sup>	0,06±0,04 <sup>a</sup>	1,75±0,56 <sup>a</sup>	217±112 <sup>c</sup>	8,30±0,57 <sup>d</sup>
ARS	4,60±1,98 <sup>c</sup>	1,87±1,34 <sup>b</sup>	0,049±0,102 <sup>b,c</sup>	0,11±0,11 <sup>b</sup>	1,82±0,51 <sup>a,b</sup>	185±57 <sup>c</sup>	7,60±0,53 <sup>c</sup>
ARSL	6,21±2,76 <sup>d</sup>	3,31±1,85 <sup>c</sup>	0,070±0,094 <sup>c</sup>	0,13±0,11 <sup>b</sup>	2,04±0,44 <sup>b</sup>	154±46 <sup>b</sup>	6,94±0,37 <sup>b</sup>
ARST	3,13±1,89 <sup>a,b</sup>	0,72±0,34 <sup>a</sup>	0,006±0,005 <sup>a</sup>	0,04±0,02 <sup>a</sup>	1,82±0,38 <sup>a,b</sup>	125±64 <sup>a</sup>	6,54±0,35 <sup>a</sup>
ARSLT	2,57±1,87 <sup>a</sup>	0,75±0,33 <sup>a</sup>	0,006±0,004 <sup>a</sup>	0,04±0,01 <sup>a</sup>	1,88±0,66 <sup>a,b</sup>	134±58 <sup>a</sup>	6,34±0,29 <sup>a</sup>
ANOVA	p < 0,05	p < 0,05	p < 0,05	p < 0,05	p > 0,05	p < 0,05	p < 0,05

AR: agua residual. ARS: agua residual + material de soporte. ARSL: ARS+*Lemna* sp. ARST: ARS+*T. dominguensis*. ARSTL: ARS+*T. dominguensis* + *Lemna* sp. Valores con la misma letra en una misma columna no difieren significativamente entre sí, valores con diferente letra difieren significativamente entre los mismos (p≤0,05).

Tabla 3  
Medias de remoción (%), análisis de varianza (ANOVA) y comparación a través de la prueba de Tukey

Tratamiento	Remoción NTK	Remoción N-NH <sub>4</sub>	Remoción N-NO <sub>2</sub>	Remoción N-NO <sub>3</sub>	Remoción P <sub>T</sub>	Remoción DQO
AR	71±16 <sup>b</sup>	86±9 <sup>b,c</sup>	34±90 <sup>b</sup>	30±36 <sup>b</sup>	38±24 <sup>a</sup>	13±14 <sup>a</sup>
ARS	67±15 <sup>b</sup>	81±15 <sup>b</sup>	(-) <sup>b</sup>	(-) <sup>a</sup>	37±20 <sup>a</sup>	21±17 <sup>a</sup>
ARSL	56±20 <sup>a</sup>	65±21 <sup>a</sup>	(-) <sup>a</sup>	(-) <sup>a</sup>	30±17 <sup>a</sup>	36±16 <sup>b</sup>
ARST	79±11 <sup>c</sup>	93±3 <sup>d</sup>	63±49 <sup>b</sup>	45±22 <sup>b</sup>	36±18 <sup>a</sup>	51±19 <sup>c</sup>
ARSTL	83±10 <sup>c</sup>	93±4 <sup>c,d</sup>	64±54 <sup>b</sup>	51±22 <sup>b</sup>	34±29 <sup>a</sup>	46±17 <sup>b,c</sup>
ANOVA	p<0,05	p<0,05	p<0,05	p<0,05	p>0,05	p<0,05

AR: agua residual. ARS: agua residual + material de soporte. ARSL: ARS+*Lemna* sp. ARST: ARS+*T. dominguensis*. ARSTL: ARS+*T. dominguensis* + *Lemna* sp. (-): no hubo remoción. Valores con la misma letra en una misma columna no difieren significativamente entre sí, valores con diferente letra difieren significativamente entre los mismos (p≤0,05).



ción de la DQO, siendo para estos casos mucho menor al compararla con los resultados obtenidos para T y TL.

Los sistemas más eficientes removiendo nitrógeno en sus diferentes formas, fueron los tratamientos con presencia de la planta emergente *T. dominguensis*, no existiendo diferencia significativa entre los valores medios de remoción alcanzados para los tratamientos ARST y ARSTL. Las remociones alcanzadas para NTK y N-NH<sub>4</sub> por los tratamientos AR y ARS, sin diferencia significativa entre ellas, fueron inesperadas. Así como también, lo fue el valor medio de remoción para N-NH<sub>4</sub> en el caso del tratamiento ARSL, ubicándose con el menor porcentaje de remoción. La diferencia en el comportamiento de los tratamientos AR y ARS estuvo marcada por los resultados obtenidos para los parámetros N-NO<sub>2</sub> y N-NO<sub>3</sub>, donde hubo remoción en el caso de AR e incremento para ARS, como también ocurrió para el tratamiento ARSL. Las remociones alcanzadas para NTK y N-NH<sub>4</sub> en los tratamientos AR y ARS harían suponer que la actividad de los microorganismos (bacterias, algas, hongos, microinvertebrados, entre otros), aunado al tiempo de retención, serían factores importantes en la remoción de N. Esta actividad comprende procesos de nitrificación, absorción por las algas y volatilización. En estos casos, la superficie libre habría permitido buena aireación, que junto a la alta densidad de microalgas presentes, crearían las condiciones que permitieron la ocurrencia de estos procesos [7]. Los resultados para ARST y ARSTL demuestran que la presencia de la vegetación incrementó la remoción de N en sus diferentes formas en comparación con los sistemas no plantados, y además que, en los sistemas plantados, la presencia de microalgas es disminuida, por lo que la acción de bacterias y plantas alcanzaría mayor importancia. La presencia de la especie *T. dominguensis* favorece la oxigenación del sistema a través de sus raíces, lo que provee mejores condiciones para la nitrificación [7]. Las remociones de NTK y N-NH<sub>4</sub> alcanzadas por el sistema ARSL fueron las más bajas entre todos los tratamientos, situación inesperada ya que esta planta ha sido comúnmente utilizada para el tratamiento de aguas residuales, por su capacidad de remoción de nutrientes relacionada a su rapidez de crecimiento [8]. *Lemna* sp, tuvo lento crecimiento debido posiblemente a la competencia

con la gran cantidad de microalgas presentes en las aguas en tratamiento, las cuales son más eficientes que la macrofita en la utilización de nutrientes a valores de pH > 7, disminuyendo así los nutrientes para el crecimiento de *Lemna* sp [9], y propiciando la reincorporación de nitrógeno al sistema con la muerte de la planta. En este tratamiento, el pH medio no superó 7 unidades, pero estuvo muy próximo a ese valor (Tabla 2). En el tratamiento ARSTL, *Lemna* sp alcanzó mejor desarrollo, favorecido, probablemente, por la rápida disminución de las microalgas debido al efecto de sombra por la presencia de la planta *T. dominguensis*. En este caso, la planta flotante habría tenido un papel importante en los excelentes porcentajes de remoción alcanzados por este tratamiento en los casos de NTK y N-NH<sub>4</sub>, y la diferencia de los mismos con respecto a los obtenidos por ARST. En ARSTL el valor medio para el pH se ubicó en 6,34±0,29, lo que también habría contribuido con la permanencia de *Lemna* sp al ubicarse dentro del rango de 4 a 7, reportado por Morales [9], como óptimo para la estimulación del crecimiento de esta planta. Los tratamientos ARST y ARSTL alcanzaron los valores de remoción más altos para N-NH<sub>4</sub>, forma predominante de N en las aguas de entrada al sistema experimental. Los valores de remoción de los tratamientos ARST y ARSTL, en comparación con el valor alcanzado por el tratamiento AR, deja un pequeño margen de remoción atribuible al efecto de la presencia de la vegetación, y confirmarían que los principales procesos serían los biológicos, donde, además de las bacterias, las microalgas cumplen una importante función. Sin embargo, en estos tratamientos, la densidad de la población de microalgas fue bastante disminuida ante la presencia de la planta *T. dominguensis*, la cual a través de su denso crecimiento ocasionó la disminución de la penetración de la luz a través del agua y la consecuente disminución de la actividad microalgal, de tal manera que se produjo un mayor margen de acción a la actividad removidora del N por parte de las plantas. En el caso del tratamiento ARSTL, el efecto descrito por la presencia de *T. dominguensis*, habría contribuido a que la planta flotante *Lemna* sp lograra establecerse con menos dificultad que en el caso del tratamiento ARSL. La remoción de N-NH<sub>4</sub> alcanzada por el tratamiento ARSL, pudo haber sido afectada por la competencia entre *Lemna* sp y las

microalgas, ocasionando que la materia vegetal muerta retornaba nitrógeno al agua, no permitiendo que el promedio de remoción alcanzara mayor valor. Los valores medios de  $\text{N-NO}_3^-$  y  $\text{N-NO}_2^-$ , a la entrada del sistema y a la salida de los diferentes tratamientos, fueron despreciables en comparación con los de  $\text{N-NH}_4$  y NTK. Los mayores porcentajes de remoción de estas formas de nitrógeno correspondieron a los tratamientos ARST y TL. Las remociones en el caso del tratamiento ARS fueron muy bajas con relación a los valores mencionados. Las formas de nitrógeno asimilables por las plantas son el  $\text{N-NH}_4$  y  $\text{N-NO}_3^-$ , razón que podría explicar las mayores remociones de éste último en los tratamientos ARST y ARSTL y sus diferencias con el tratamiento AR. La diferencia de remoción de  $\text{N-NO}_3^-$  entre los tratamientos ARSTL y ARST (6% a favor del primero), podría ser atribuida a la presencia de *Lemna* sp. La remoción de estas formas de N en el caso del tratamiento AR, confirmaría la contribución de las microalgas en el proceso depurativo, a través de la absorción de estos elementos, tal como ocurre en los tratamientos con lagunas de oxidación [10].

La Tabla 4 muestra los resultados de las concentraciones medias de nitrógeno en las plantas *T. dominguensis* y *Lemna* sp a nivel de hojas y raíces, y en el material de soporte, para los tratamientos estudiados.

El análisis estadístico mostró que no hubo diferencia significativa en el contenido de nitrógeno de *T. dominguensis* en ARST y ARSTL ( $p = 0,996$ ), lo cual evidenció que la presencia de *Lemna* sp no afectó la capacidad de absorción de la planta emergente, ni la disponibilidad del nutriente. Por otro lado, no fue posible comparar la cantidad de nitrógeno presente en *Lemna* sp en ARSL, con el contenido de nitrógeno de esta misma planta en ARSTL, debido a que en éste había poca población de la misma y no se retiró para analizarla. En cuanto a la concentración en el material de soporte, el ANOVA indicó que hubo diferencia significativa entre las medias alcanzadas ( $p = 0,008$ ). Se aplicó la prueba de Tukey la cual ubicó dos subconjuntos homogéneos, en uno ARS, ARSL y ARSTL y en el otro ARSTL y ARST. La concentración de N medida en *Lemna* sp del tratamiento ARSL mostró la gran capacidad de la planta flotante para absorber nitrógeno del medio, superando ampliamente la capacidad de *T. dominguensis*. Sin embargo, la competencia con las microalgas ocasionó la decadencia de *Lemna* sp en las primeras semanas, lo cual retornó gran cantidad del elemento al sistema. Una vez cubierta el área por la planta flotante, ésta nunca fue cosechada ocasionando que el nitrógeno almacenado en el tejido de la planta, una vez que ésta completaba su ciclo de vida, retornaba al medio. Se realizó un balance de masa para conocer en qué proporción se encontraba el nitró-

Tabla 4  
Concentración de nitrógeno (mg/kg) en plantas y material de soporte en los humedales a escala laboratorio

Tratamiento	<i>Lemna</i> (mg/kg)	<i>Typha dominguensis</i>		Material de soporte (mg/kg)
		Hoja (mg/kg)	Raíz (mg/kg)	
ARS	-	-	-	268 (± 82)
ARSL	29500 (± 7859)	-	-	278 (± 39)
ARST	-	13431 (± 3671)	6891 (± 1998)	331 (± 31)
ARSTL	-	13833 (± 4018)	8157 (± 2694)	285 (± 42)

AR: agua residual. ARS: agua residual + material de soporte. ARSL: AS+*Lemna* sp. ARST: AS+*T. dominguensis*. ARSTL: AS+*T. dominguensis* + *Lemna* sp.

geno en cada uno de los componentes de los tratamientos estudiados. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Los resultados demostraron que a medida que aumentó el número de componentes de un sistema, se hizo más complejo el ciclo del nitrógeno, quedando para pérdidas por otros procesos que pudieran estarse dando dentro del mismo, un pequeño porcentaje (21% en el caso de ARST y 3% para ARSTL), comparado con aquellos sistemas donde el número de componentes fue mínimo, como sucedió con AR y ARS, donde el nitrógeno perdido fue de 75 y 71% respectivamente. En estos casos, el nitrógeno que no se reflejó en los componentes analizados, debería estar presente en el material adherido a la capa biológica formada en las bandejas y en el liberado a través de las reacciones de nitrificación y desnitrificación. Con relación al contenido de nitrógeno presente en hojas y raíces de *T. dominguensis*, los porcentajes retenidos alcanzaron el 65 y 84% del nitrógeno total, para ARST y ARSTL respectivamente. Estos resultados confirman la función de las plantas, en la retención de nitrógeno en humedales construidos, en condiciones de baja carga orgánica (0,075 g/m<sup>2</sup>/d), aguas en reposo y tiempo de retención adecuados. Estos valores fueron superiores a los reportados por Koottatep y Polprasert [3], para *T. angustifolia*, la cual concentró 43 % del nitrógeno en el sistema por ellos estudiado. En los tratamientos ARST y ARSTL, la

cantidad de nitrógeno en el material de soporte fue mayor que en los otros tratamientos, producto probablemente de la materia muerta, como *Lemna* y microalgas, que sedimentó y se adhirió al material de soporte. En el caso de ARSL, el porcentaje de nitrógeno retenido en la planta flotante fue mínimo, aunque su potencial de absorción fue elevado, 29500,20 ± 7859,48 mg/kg. Esto sería debido al escaso desarrollo que alcanzó la planta como consecuencia del problema de competencia con las microalgas, tal como ha sido indicado con anterioridad. Los resultados sugieren que bajo las condiciones en que se realizó el ensayo, la absorción que realizan las plantas es el principal proceso de remoción de nitrógeno de los humedales a escala laboratorio.

En cuanto a fósforo, hubo remoción de P<sub>T</sub> en todos los tratamientos, sin diferencia significativa entre los mismos (Tabla 3). La diferencia máxima fue de solo 8% entre el tratamiento AR, que obtuvo el más alto valor, y ARSL con el menor valor. La media de remoción alcanzada por AR podría explicarse por la cantidad de microbiota presente en este tratamiento, principalmente algas, las cuales realizan una rápida absorción del fósforo por su alta tasa de crecimiento [4]. Además, se adicionan los procesos de sedimentación, adsorción a la materia orgánica y precipitación química, que se dieron al comportarse este sistema como una pequeña laguna de estabilización [11]. La condición alcalina (pH medio

Tabla 5  
Contenido de nitrógeno (mg) en cada uno de los componentes de los tratamientos a escala laboratorio

Componente	AR		ARS		ARSL		ARST		ARSTL	
	NTK (mg)	%	NTK (mg)	%	NTK (mg)	%	NTK (mg)	%	NTK (mg)	%
Afluente	13488	100	13488	100	13488	100	13488	100	13488	100
Efluente	3350	25	3655	27	4779	35	1394	10	1097	8
Material de soporte	-	-	230	2	327	2	473	4	715	5
Planta: hoja	-	-	-	-	-	-	5398	40	6090	45
Planta: frondes	-	-	-	-	1215	9	-	-	-	-
Planta: raíz	-	-	-	-	-	-	3331	25	5315	39
Nitrógeno perdido	-	75	-	71	-	54	-	21	-	3

AR: agua residual. ARS: agua residual + material de soporte. ARSL: AS+*Lemna* sp. ARST: AS+*T.dominguensis*. ARSTL: AS+*T. dominguensis* + *Lemna* sp.

8,30±0,57) de AR, habría favorecido los procesos de precipitación del fósforo [7]. La remoción en ARS podría deberse al contacto directo con el material de soporte que facilita la adsorción del fósforo a elementos como hierro, calcio, aluminio y a la materia orgánica presente en el mismo [12]. Igualmente, participan en dicha remoción los procesos de sedimentación que se estuvieron favorecidos por la condición de reposo del agua en dicho tratamiento. Las condiciones de los tratamientos ARST y ARSTL fueron menos favorables para la remoción de  $P_T$ . El pH con cierta tendencia ácida ( $6,54 \pm 0,35$  para ARST y  $6,34 \pm 0,29$  para ARSTL) y el poco contacto del agua en tratamiento con el material de soporte, como consecuencia de la morfología de las raíces de la *T. dominguensis* que se esparcen sobre toda la superficie, explicarían la diferencia de remoción alcanzada por estos tratamientos con relación a AR y ARS. El tratamiento ARSL presentó las condiciones menos favorables para la remoción del fósforo. El pH cercano a la neutralidad y el reingreso de fósforo al sistema por la muerte de *Lemna* sp durante el inicio del estudio, pudieran explicar el valor alcanzado. El papel que los microorganismos cumplen dentro del ciclo de  $P_T$  en los humedales, también se ve afectado por el aumento del número de elementos que conforman el sistema, según se concluye del resultado del tratamiento AR con relación al resto de los tratamientos; la remoción de fósforo estaría más asociada a los procesos fisi-

cos de adsorción o sedimentación que a los procesos biológicos propiamente. La presunción acerca de que la remoción de fósforo estaría más asociada a los procesos físicos de adsorción o sedimentación que a los procesos biológicos propiamente, justificaría que las concentraciones medias de fósforo en el material de soporte (Tabla 6), se mantuvieran muy próximas entre sí, sin diferencia significativa entre las mismas ( $p = 0,910$ ). Una situación parecida fue reportada por Sakadevan y Bavor [13], quienes en un estudio utilizando sistemas con diferentes plantas, encontraron que la cantidad de fósforo acumulado en el material de soporte fue similar en todos los casos, presumiendo que dicha acumulación ocurría principalmente por procesos de adsorción, y no por factores como la carga, el tiempo de retención o la columna de agua.

Al momento de culminar el estudio a escala laboratorio, los tratamientos AR, ARS, ARS L y ARST habían disminuido al mínimo la capacidad para la remoción del fósforo. Mientras que, en el caso de ARSTL ya había incremento del mismo. Esta etapa coincide con los menores valores de entrada reportados durante el estudio, lo cual indicaría la saturación de los distintos sistemas.

## Conclusiones

Los resultados de la investigación demostraron que la planta *Typha dominguensis* cumple

Tabla 6  
Concentración de fósforo total (mg/kg) en plantas y material de soporte en los humedales a escala laboratorio

Tratamiento	<i>Lemna</i> (mg/kg)	<i>Typha dominguensis</i>		Material de soporte (mg/kg)
		Hoja (mg/kg)	Raíz (mg/kg)	
AS	-	-	-	78 (± 24)
ARSL	294 (± 64)	-	-	79 (± 15)
ARST	-	343 (± 39)	165 (± 55)	79 (± 27)
ARSTL	-	338 (± 54)	166 (± 81)	83 (± 15)

AR: agua residual. ARS: agua residual + material de soporte. ARSL: AS+*Lemna* sp. ARST: AS+*T. dominguensis*. ARSTL: AS+*T. dominguensis* + *Lemna* sp.



un papel importante en los procesos depurativos dentro de los humedales construidos a escala laboratorio, siendo efectiva en la remoción de nitrógeno, fósforo y DQO, sin embargo, no fue eficiente en la remoción de fósforo. La importancia del contacto agua-material de soporte y la función de los microorganismos para la remoción de este elemento fue evidenciada. En el caso de *Lemna* sp su desarrollo se limita en aguas ricas en microalgas. Los diferentes componentes de un humedal construido (agua, material de soporte y vegetación) cumplen importantes y distintas funciones dentro de los procesos depurativos que en ellos se realizan.

### Referencias bibliográficas

1. Brix, H. "Do Macrophytes Play a Role in Constructed Treatment Wetlands?". *Water Science and Technology*. 35:5, (1997) pp. 11-17.
2. Gersberg, R. M., Gearheart, R. A. y Ives, M. "Pathogen Removal in Constructed Wetlands". En: Hammer, D. A. (Ed.). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*, Chelsea, MI: Lewis Publishers, Inc., (1989) pp. 431-445.
3. Koottatep, T., Polprasert, C. "Role of plant uptake on nitrogen removal in constructed wetlands located in the tropics". *Water Science and Technology*, Vol. 36 N° 12, (1997) pp. 1-8.
4. Kadlec, R., Knight, R. (1996). "Treatment wetlands". CRC Press LLC. Boca Ratón, Florida, USA.
5. Greenway, M. "Nutrient content of wetlands plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia". *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35, N° 5, (1997) pp. 135-142.
6. APHA, AWWA, WPCF. (1999) "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 20 Edition.
7. Prystay, W., Lo, V. "Treatment of greenhouse wastewater using constructed wetlands". *J. Environ. Sci. Health*. Vol. 36, N° 3, (2001) pp. 341-353.
8. Tripathi, B. D., Upadhyay, A. R. "Dairy effluent polishing by aquatic macrophytes". *Water, Air and Soil Pollution*, n. 143, Nros. 1-4, (2003) pp. 377-385.
9. Morales, N., Arévalo, K., Ortega, J., Briceño, B., Andrade, C., Morales, E. "El pH y la fuente nitrogenada como moduladores del crecimiento de la macrófita *Lemna* sp". *Revista de la Facultad de Agronomía-LUZ*. Vol.23, N° 1, (2006) p.70-83.
10. Gopal, B. "Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials and problems". *Wat. Sci. Tech.* Vol. 40, No. 3, (1999) pp. 27-35.
11. Peng, J., Wang, B., Wang, L., Cao, R. "Performance of a combined system of ponds and constructed wetlands for wastewater reclamation and reuse". En *Communications of common interest. 6<sup>th</sup> International Conference on Waste Stabilisation Ponds and 9<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems*. Avignon, France, (2004) pp. 189-196.
12. Healy, M., Cawley, A. M. "Wetlands and Aquatic Processes. Nutrient Processing Capacity of a Constructed Wetland in Western Ireland". *J. Environ. Qual.* (2002) 31:1739-1747.
13. Sakadevan, K., Bavor, H. J. "Nutrient removal mechanisms in constructed wetlands and sustainable water management". *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 40, N° 2 (1999) pp. 121-128.

Recibido el 19 de Mayo de 2010

En forma revisada el 23 de Mayo de 2011