

Evaluación de un modelo piloto integrado para postratamiento del efluente del RAP utilizando *Spirodela sp.*

Evaluating an integrated pilot model for post-treatment of RAP effluent using *Spirodela Sp.*

Yolanda Gamarra Hernández* , Juan Forero Sarmiento** , Oscar Quintero Higuera*** ,
Fredy Rueda Villamizar*** , Fernanda Aguilar Acevedo***

RESUMEN

Los sistemas integrados de tratamiento de aguas residuales buscan la disminución de materias orgánicas y nutrientes, además de la reutilización de los subproductos generados en el proceso. Para complementar la eficiencia de remoción de nutrientes del actual tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga se construyó un modelo piloto integrado con *Spirodela sp.*, el cual fue evaluado para medir la eficiencia en remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo), coliformes totales y fecales, con diferentes alturas de lámina de agua; los resultados reportaron eficiencias hasta de 77.07% para nitrógeno amoniacal, 97.10% fósforo total, 98.56% coliformes fecales y 96.4% coliformes totales.

Palabras clave: aguas residuales, tratamiento biológico, remoción de nutrientes.

ABSTRACT

Integrated residual water treatment systems try to reduce organic matter and nutrients and reuse by-products generated during the process. An integrated pilot model was constructed with *Spirodela sp.* to complement the Bolivariana University's current residual water treatment plant's efficiency in removing nutrients. This was evaluated for its efficiency in removing nutrients (ammoniacal nitrogen and phosphorus) and total and faecal coliforms using different depths of water. 77.07% efficiency was obtained for ammoniacal nitrogen, 97.10% for total phosphorus, 98.56% for faecal coliforms and 96.4% for total coliforms.

Key words: biological treatment, residual water, nutrient removal.

INTRODUCCIÓN

La Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga utiliza para el tratamiento de sus aguas residuales un Reactor Anaerobio de Flujo a Pistón (RAP); el uso de este tipo de tratamiento genera algunos inconvenientes, dentro de los cua-

les se pueden mencionar: generación de olores, limpieza difícil y deficiencia en la remoción de nutrientes (Metcalf, 1998). Con el fin de plantear una posible solución a las fallas mencionadas, se realizó un estudio a escala de laboratorio para evaluar la remoción de nitrógeno amoniacal y fósforo total, el cual reportó eficiencias del 95% (Gamarra, 2000).

Recibido: Septiembre 13 de 2004 Aprobado: Mayo 18 de 2005

* Licenciada en Biología, Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Correo electrónico: ygamarra@upbbga.edu.co, yogahe@hotmail.com

** Ingeniero Civil, Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga. Correo electrónico: fforero@upbbga.edu.co.

*** Estudiantes de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

El presente estudio plantea el escalado del sistema a un Modelo Piloto Integrado (MPI) para remoción de nitrógeno amoniacal, fósforo total, coliformes totales y fecales, utilizando diferentes alturas de lámina de agua; la evaluación de esta tecnología permitirá establecer los parámetros de diseño para implementarla a escala real.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología del presente estudio se basó en los resultados obtenidos en un trabajo preliminar denominado Reactor a Flujo Continuo con *Spirodela sp.* (RFCS), desarrollado a nivel de laboratorio (Gamara, et ál., 2000), que permite implementar a escala piloto el diseño de un sistema de tratamiento secundario para mejorar la calidad del agua residual, como se describe a continuación.

ETAPA I. Diseño hidráulico y construcción de la planta piloto con *Spirodela sp.* (PPS), aplicando los resultados del RFCS

Partiendo de los parámetros hidráulicos del efluente del RAP (caudal, carga hidráulica, carga volumétrica) y los resultados obtenidos en el RFCS para el tiempo de retención y rango de alturas (10 - 80 cm), se realizó el diseño hidráulico y electromecánico de la PPS.

Aprobados los diseños y planos se inició el proceso de excavación y construcción de las estructuras en concreto y la instalación de otras estructuras requeridas, como la bomba sumergible, tanque elevado, tuberías de conducción, válvulas de control, mangueras flexibles y soportes metálicos, para apoyar los reactores biológicos.

El suministro para la PPS se hizo en dos fases: la primera a presión desde el tanque de almacenamiento subterráneo hasta el tanque elevado, con nivel constante para asegurar caudal constante a los reactores; la segunda desde el tanque elevado hasta la entrada de los reactores biológicos.

El diseño hidráulico y construcción de la PPS se basó en las ecuaciones fundamentales de la hidráulica de tuberías a presión (Bertolotti, 1990) para establecer las necesidades de cabeza hidráulica y suministrar caudal constante a los reactores, y la

capacidad del sistema de bombeo para impulsar hasta la cota del tanque elevado el caudal a tratar.

El tanque subterráneo se construyó en mampostería reforzada y la placa para la ubicación de los reactores en concreto reforzado de 4000 psi. Los reactores biológicos se elaboraron en fibra de vidrio y las tuberías de conexión y evacuación en PVC presión RDE 21 de 1" y ½" pulgada de diámetro.

ETAPA II. Montaje y arranque de la PPS

Para el montaje de la PPS se instalaron ocho reactores: cuatro pares que funcionan simultáneamente y en paralelo, con tiempo de retención hidráulica de 24 horas por cada reactor. Cada par de reactores evalúa una altura de lámina de agua específica y sólo un reactor de cada par contiene plántulas de *Spirodela sp.*

Los sistemas lagunares aerobios deben tener, para países tropicales, una altura de lámina de agua generalmente no superior a un metro para prevenir la generación de zonas anóxicas y el consiguiente desprendimiento de malos olores (Romero, 2000), y una altura superior a 10 centímetros para optimizar los costos de inversión. A partir de esta información se diseñaron ensayos con cuatro alturas de lámina de agua, en el rango de 10 y 100 cm, como se muestra en la figura 1.

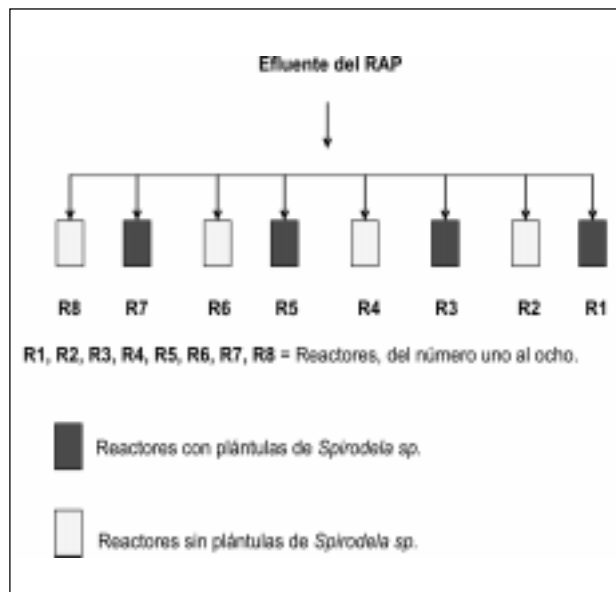


Figura 1. Esquema de la PPS

Para el arranque de la PPS se trasladó el cultivo madre de *Spirodela sp.* desde el RFCS hasta los reactores 1, 3, 5 y 7 para su adaptación a condiciones ambientales del sistema en marcha, durante un período de 5 meses. Esta etapa del estudio fue fundamental y las condiciones de campo abierto corresponden a características especiales, donde predominan los vientos con velocidades menores de 3 m/s, temperatura ambiente máxima de 32 °C y mínima de 14 °C, con fotoperiodos de 12 horas; adicionalmente, las plántulas hacen una adaptación al ataque de ácaros y establecen un equilibrio con las algas que crecen por el contacto de la luz solar con las aguas residuales, en los reactores a campo abierto.

ETAPA III. Determinación de la eficiencia de la PPS variando la altura de la lámina de agua

Para la evaluación de la eficiencia de la PPS en el montaje experimental se analizaron los resultados obtenidos con relación al crecimiento y desarrollo de las plántulas (Caicedo, 1996) a diferentes alturas de lámina de agua con las siguientes condiciones:

- Cuatro alturas diferentes de lámina de agua: 10 cm, 20 cm, 40 cm y 80 cm.
- Remoción de nitrógeno amoniacal, DBO₅, fósforo total y sólidos totales para cada altura.
- Condiciones atmosféricas existentes: precipitaciones, intensidad solar, temperatura y vientos.

El tiempo de retención hidráulica de cada uno de los ocho reactores de la PPS fue de 24 horas;

los caudales y las alturas utilizadas para cada par de reactores son constantes para todos los ensayos y los valores correspondientes a estos datos se muestran en la tabla 1.

El caudal total de agua residual tratada en los ocho reactores de la PPS fue de 1440 litros/día y en los reactores 1, 3, 5 y 7 con *Spirodela sp.* de 720 litros/día. El control del flujo que entraba a cada reactor se reguló utilizando el tanque elevado, con cabeza hidráulica constante respecto del nivel de lámina de agua de los reactores, y por válvulas de control de caudal. El punto de muestreo del efluente de la PPS está localizado en el vertedero de salida de cada reactor y el del afluente en la tubería de entrada, lo que permite un análisis comparativo de los resultados.

Para esta evaluación se realizaron cinco ensayos, tomando muestras para cada uno de los ocho reactores y el afluente del sistema (efluente del RAP), para un total de 45 muestras, nueve por cada ensayo. Los parámetros evaluados y el método utilizado en cada caso son: pH (potenciometría), nitrógeno amoniacal (titulación), DBO₅ (winkler modificado), sólidos totales (gravimetría), fósforo total (ácido ascórbico). Las muestras se analizaron en el Laboratorio de Aguas de la UPB Bucaramanga, según los métodos estándar para análisis de aguas (Apha, 1998).

ETAPA IV. Análisis de toxicidad y concentración de tolerancia del efluente de la PPS en un bioindicador. Análisis de coliformes en el efluente de la PPS. Ensayos de toxicidad

Los organismos seleccionados para los bioensayos fueron peces, conocidos comúnmente

Tabla 1. Caudales y alturas evaluadas.

# REACTOR	1	2	3	4	5	6	7	8
PLANTAS	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO
CAUDAL (mL/min)	33.3		66.6		133.3		266.7	
ALTURA (cm)	10		20		40		80	

como Guppys (*Lebistes reticulatus*), los cuales fueron seleccionados teniendo en cuenta su importancia ambiental como bioindicadores, distribución geográfica (presentes en la quebrada Menzuly), tamaño, facilidad de manejo en condiciones de laboratorio y moderada tolerancia a las sustancias tóxicas presentes en las aguas residuales (Escobar, 1983). Las concentraciones de las diluciones para los ensayos definitivos se determinaron a partir de pruebas preliminares (Apha, 1998) y pruebas de búsqueda, que permitieron definir las concentraciones y valores límites para el bioensayo (Ramírez, 1999).

De acuerdo con las características del agua residual, las sustancias tóxicas y las condiciones del agua en el efluente de los reactores podrían presentar nitritos, amoníaco, detergentes, bajas concentraciones de oxígeno disuelto, grasas y otras sustancias típicas de aguas residuales que han sido tratadas, pero siguen siendo nocivas para el desarrollo de la vida de organismos sensibles a la contaminación.

Para evaluar la toxicidad aguda y determinar la CL_{50} se realizaron montajes estáticos por duplicado, con una duración de 96 horas (Gómez, 1999). Las muestras del agua residual para los ensayos fueron tomadas en el efluente de cada uno de los ocho reactores y el afluente de la PPS; de cada muestra se prepararon 5 diluciones, depositadas en recipientes plásticos con capacidad de 500 mL cada uno y 10 individuos neonatos para cada dilución.

Para el ensayo de toxicidad con los efluentes de los reactores y el RAP se realizó un ensayo preliminar con cinco concentraciones (1%, 3.2%, 10%, 32% y 100%), con el fin de determinar el rango físico-químico en el que se desarrollaría el ensayo; para los reactores con *Spirodela sp.* las concentraciones seleccionadas fueron de 10%, 18%, 32%, 56% y 100%, y para los reactores sin *Spirodela sp.* del 1%, 3.2%, 10%, 32% y 100%; el análisis de los datos se realizó empleando la transformación probit para encontrar la concentración media letal (CL_{50}) en cada uno de los ensayos, los cuales fueron monitoreados haciendo conteo de los organismos muertos cada 24 horas.

Coliformes totales y fecales

Para la determinación de coliformes se utilizó la técnica de tubos múltiples (ICONTEC, 1996). El

diseño metodológico establecido se hizo a partir de cinco pruebas para el efluente de cada uno de los ocho reactores y el afluente del sistema; en el procedimiento se utilizaron cinco tubos por dilución con concentraciones de 0.1, 0.01 y 0.001, para el efluente de los ocho reactores y diluciones de 0.01, 0.001 y 0.0001 para el afluente, los cuales fueron inoculados e incubados a 37 °C durante un período de 24-48 horas para la posterior lectura de resultados (Vásquez and Ballhaus, 1998).

Se utilizó como medio de cultivo el Fluorocult LMX, el cual permite la identificación simultánea de coliformes totales y *E. coli*. En la interpretación de los resultados positivos para coliformes totales el caldo vira a una tonalidad verde azulado (reacción X-GAL), y para *E. coli* se presenta una fluorescencia azul clara, utilizando una lámpara U.V (reacción MUG); para confirmar la lectura de *E. coli* se adiciona reactivo Indol por goteo, según KOVACS, y una coloración rojo cereza del medio de cultivo confirma la presencia de *E. Coli* (Apha, 1998).

ETAPA V. Evaluación de resultados del MPI

En el análisis estadístico de los datos se realizaron pruebas t, con cada uno de los parámetros evaluados para comparar los promedios de los tratamientos con *Spirodela sp.* vs. sin *Spirodela sp.*, además se efectuó un análisis de varianza de los tratamientos con *Spirodela sp.* y la correspondiente prueba de comparaciones múltiples de Scheffé, para establecer si existen o no diferencias, dependiendo de la altura de la lámina de agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ETAPA I. Diseño hidráulico y construcción de la planta piloto con *Spirodela sp.* (PPS), aplicando los resultados del RFCS

De acuerdo con el estudio de diseño, la PPS utilizó ocho reactores de fibra de vidrio, con dimensiones 0.8 m de largo y 0.6 m de ancho cada uno; en el diseño experimental los reactores fueron distribuidos por pares, cada par con diferente altura de lámina de agua (10 cm, 20 cm, 40 cm, 80 cm), y para manejar el caudal, cada uno tenía un vertedero de entrada y salida y tres tabiques transversales al flujo, para impedir la formación de zonas muertas y regular la línea de flujo (Bertoletti, 1990). Además se

instaló un sistema de suministro permanente con una bomba sumergida y dos tanques, uno subterráneo para succión y otro elevado para mantener la carga hidráulica constante.

Para la captación del afluente de la PPS se diseñó un pozo que conectó la tubería de la acometida y ajustó la cota de entrada de la misma con un diámetro de 6". El tanque de succión, con capacidad de 3 m³, estaba provisto de un cárcamo para la bomba, una tubería de limpieza y un vertedero lateral de excesos; además un tanque de suministro con un dispositivo para graduar el caudal de salida y un flotador eléctrico para regular el llenado.

Para finalizar esta etapa se construyó el tanque de succión, instalando a cada par de reactores la acometida para la captación del afluente de la PPS, el sistema de bombeo, el tanque elevado, las tuberías y válvulas que suministraban el agua.

ETAPA II. Montaje y arranque de la PPS

Para el correcto funcionamiento hidráulico de la PPS se nivelaron las cotas de entrada y salida de los ocho reactores y se hizo el proceso de adaptación del cultivo madre de *Spirodela sp.* a las características del agua residual del efluente del RAP, adicionando agua residual del efluente del RAP en soluciones que se incrementaban cada 24 horas, a partir de un porcentaje inicial del 20% hasta lograr sobrevivencia y reproducción de las plántulas, con

una concentración del 100% de agua aplicada proveniente del efluente del RAP. Una vez adaptadas, las plántulas muestran hojas de color verde oscuro, raíces firmemente adheridas al cuerpo de la plántula y duplican su masa en un acelerado proceso de reproducción en un periodo de tres días (Caicedo, 1996).

ETAPA III. Determinación de la eficiencia de la PPS, con diferentes alturas de la lámina de agua

Los resultados obtenidos para los parámetros evaluados son los siguientes:

Eficiencia en remoción de DBO₅

En cuanto a la eficiencia de los reactores respecto a este parámetro, ninguno presentó diferencias significativas, ni entre los reactores con la misma altura de la lámina de agua (R1-R2, R3-R4, R5-R6, R7-R8), ni entre los reactores con o sin *Spirodela sp.* (impares y pares, respectivamente), como se puede apreciar en la figura 2; sin embargo, en general los reactores con *Spirodela sp.* alcanzaron promedios de eficiencia más altos (R3, R5 y R7); la mayor eficiencia promedio (media aritmética) para los cinco ensayos de DBO₅ corresponde al reactor 5, con un valor de 70.17%, siguiéndole en su orden los reactores 6, 1, 3, 4, 7, 8, y con la menor eficiencia total el reactor 2 con un valor de 33.46%, como se muestra en la figura 2.

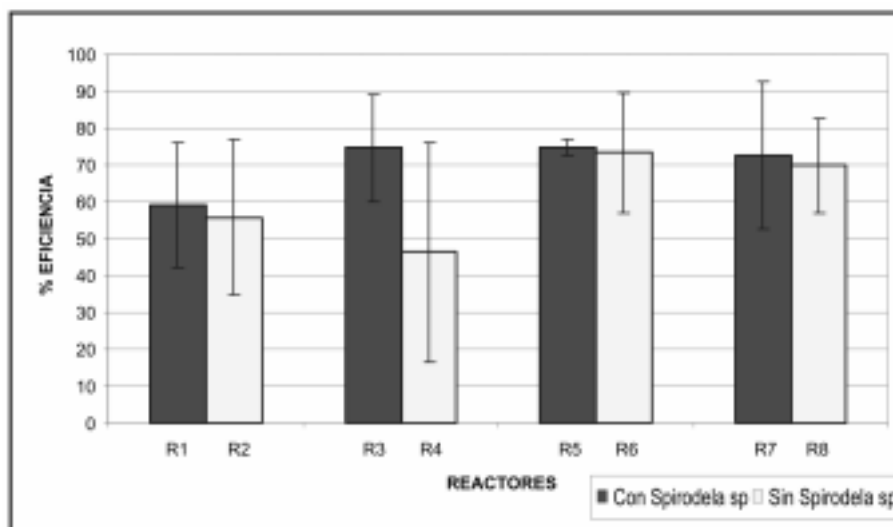


Figura 2. Eficiencia en remoción de DBO₅

Este resultado demuestra la eficiencia en el proceso de remoción para DBO_5 que se hace evidente en los reactores con *Spirodela sp.* y la forma como la profundidad del reactor puede afectar la capacidad de remoción a medida que se hacen cambios en la altura del reactor; es importante destacar que el caudal es constante a lo largo de todo el estudio y por tanto no tiene ninguna influencia sobre los resultados.

Variaciones de pH

Los reactores impares mostraron una fuerte tendencia al pH neutro; entre ellos no se encontraron diferencias significativas (ANOVA, $p < 0,05$), lo que podría relacionarse de manera directa con la actividad metabólica de las plántulas y de los microorganismos asociados que liberan residuos o metabolitos que puedan dar una respuesta a las alteraciones que se presentan en el sistema, con relación a la variación del pH. Los reactores pares registraron fluctuaciones en el pH más altas que los impares, aspecto que se confirma con las comparaciones entre tratamientos (con y sin *Spirodela sp.*), donde las tres primeras parejas muestran diferencias significativas ($p < 0,01$) como se observa en la figura 3.

Eficiencia en remoción de nitrógeno

La mayor eficiencia promedio en la remoción de nitrógeno amoniacal corresponde a los reactores 1 y 3, con valores por encima del 75% (77.07 y 76.06, respectivamente), que comparados con sus respectivas parejas de reactores (2 y 4) mostraron diferencias significativas, como se observa en la figura 4. La diferencia de resultados muestra de manera comparativa que en el tratamiento con *Spirodela sp.* se hace una absorción de nitrógeno y probablemente formación de nuevos compuestos y aminoácidos en la biomasa de las mismas. Como resultado de la prueba de comparación múltiple se encontró que los reactores 1, 3 y 5 no muestran diferencias entre ellos; sin embargo, el reactor 7 sí es diferente de los reactores 1 y 3.

Eficiencia en remoción de fósforo total

En los ensayos de remoción de fósforo total la mayor eficiencia promedio nuevamente la tienen los reactores 1 y 3, con 97.1% y 94.1%, como se muestra en la figura 5. La comparación de los dos tratamientos y sus respectivos resultados muestra diferencias significativas ($p < 0,01$) en la eficiencia de

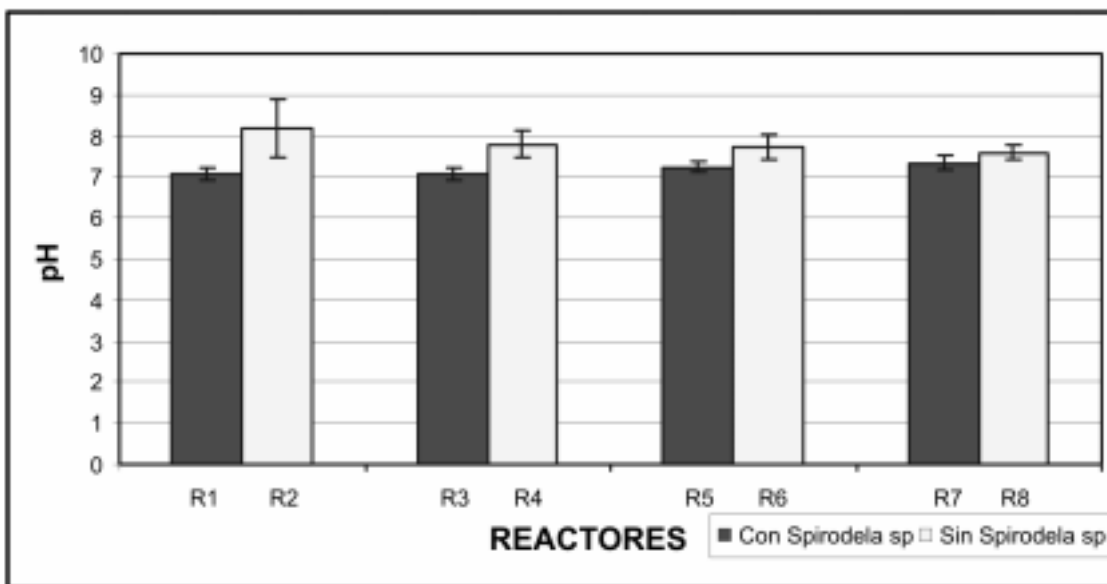


Figura 3. Valores de pH

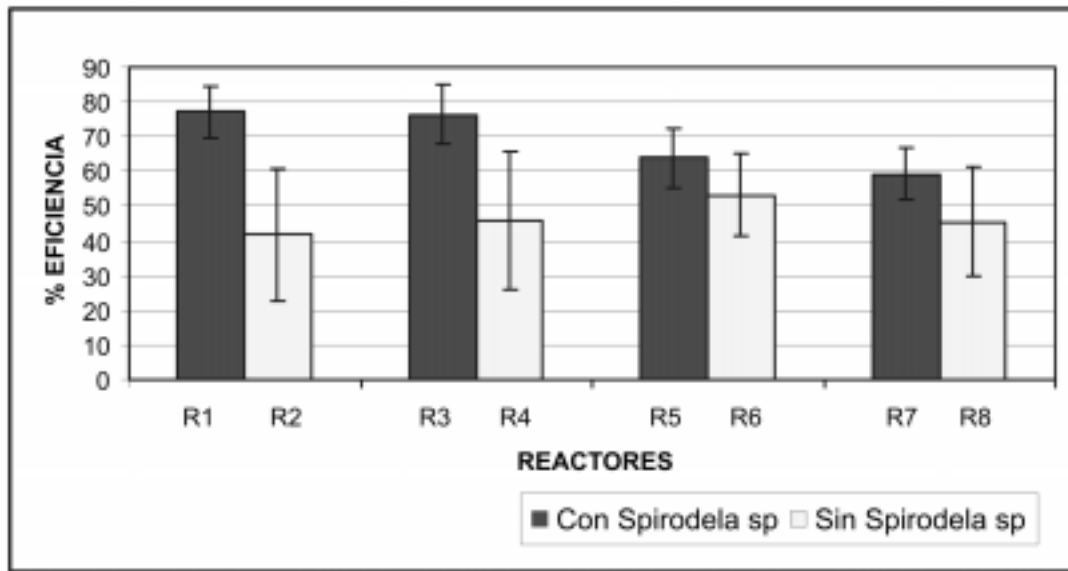


Figura 4. Eficiencia en remoción de N-NH₃

remoción de fósforo en los reactores con *Spirodela sp.*, probablemente relacionada con su actividad metabólica y la del consorcio microbiano asociado con las mismas, que dan como resultado la formación de compuestos y biomasa en las plántulas. La prueba de comparación múltiple mostró similitudes entre los reactores 1 y 3 que se diferencian notablemente de las dos últimas parejas 5 y 7.

Eficiencia en remoción de sólidos totales

Los resultados de la remoción para sólidos totales muestran que la mayor eficiencia promedio la tuvo el reactor 3 con 60.5% y la menor eficiencia promedio el reactor 2 con 23.87% (figura 6). Al comparar los dos tratamientos se hace evidente la relación directa entre la remoción de sólidos totales, la pre-

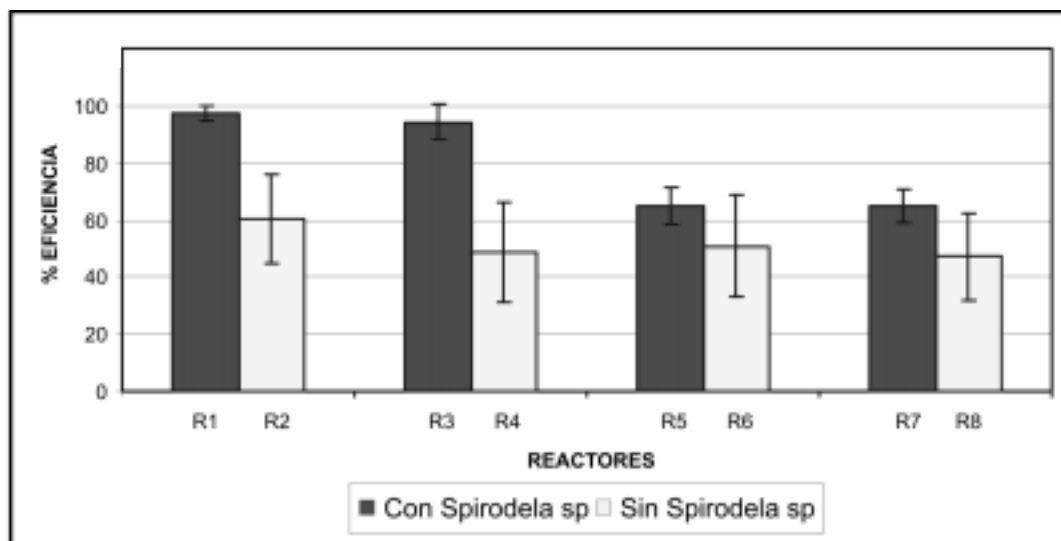


Figura 5. Eficiencia en remoción de fósforo total

sencia de *Spirodela sp.* y las diferentes alturas evaluadas en el estudio, especialmente en los primeros reactores (R1-R2 y R3-R4) que presentaron claras diferencias significativas ($p < 0,01$), en donde la remoción alcanzada en los tratamientos con *Spirodela sp.* fue más del doble comparada con el tratamiento contrastante, debido probablemente a una intensa actividad metabólica de las plántulas y los microorganismos asociados a las raicillas que hacen absorción directa de los sólidos orgánicos hidrolizados, sumado a la sedimentación de una porción de los sólidos, que hace evidente las diferencias en los valores de remoción para sólidos suspendidos entre los dos tratamientos. El análisis de varianza no mostró diferencias entre los tratamientos con *Spirodela sp.*

ETAPA IV. Análisis de toxicidad y concentración de tolerancia del efluente de la PPS en un bioindicador. Análisis de coliformes en el efluente de la PPS

Ensayos de toxicidad

Los ensayos de toxicidad realizados en cada uno de los reactores se desarrollaron teniendo concentraciones en los reactores con *Spirodela sp.* de 10%, 18%, 32%, 56% y 100% y de 1%, 3.2%, 10%, 32% y 100% para los reactores sin *Spirodela sp.*

De los resultados de la CL_{50} y el análisis estadístico realizado (probit), se encontró una relación directa entre la mortalidad de los organismos y las concentraciones evaluadas. En los reactores impares, la CL_{50} presentó valores más altos, comparados con los reactores pares sin *Spirodela sp.* (tabla 2). El reactor que presentó menor porcentaje de toxicidad fue el número 3, con una CL_{50} para 96 horas de exposición de 39.6% y la mayor toxicidad se reportó en el reactor 2, con CL_{50} para 96 horas de

REACTOR	CL_{50} 96
1	32
2	11.5
3	39.6
4	12
5	33
6	11.6
7	28
8	20

Tabla 2. Resultados CL_{50} a 96 horas

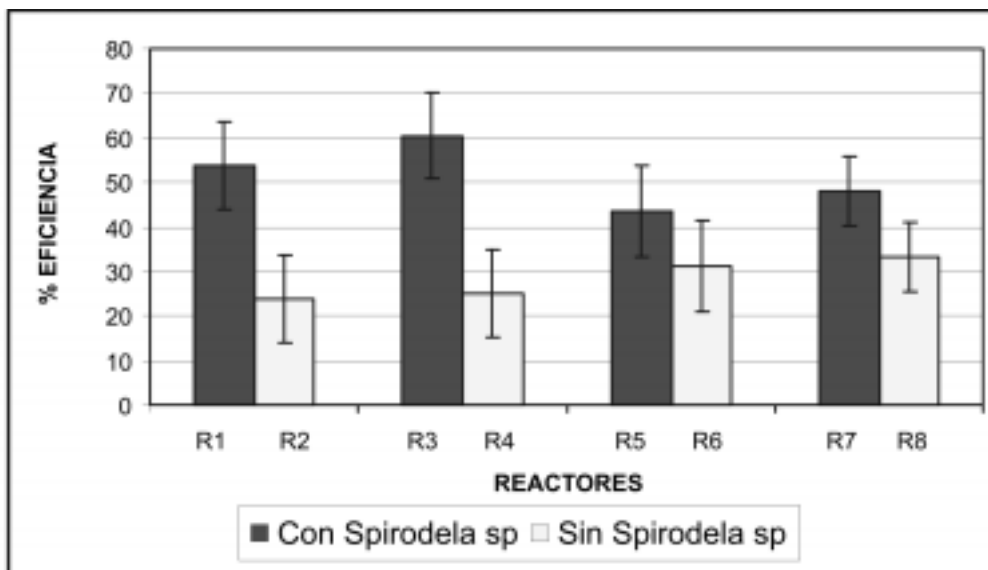


Figura 6. Eficiencia en remoción de sólidos totales

exposición de 11.5%. Los valores de CL_{50} de los reactores sin *Spirodela sp.* fueron muy cercanos, considerándose el reactor 8 con el menor porcentaje de toxicidad, con CL_{50} del 20%.

Los resultados de los ensayos de CL_{50} para los reactores sin plántulas (pares) muestran una elevada toxicidad, probablemente por las altas concentraciones de nitrógeno amoniacal y de algas cianofitas. Los reactores con plántulas (impares) presentan una menor toxicidad, debido a que las plántulas de *Spirodela sp.* asimilan el nitrógeno amoniacal e impiden la proliferación de algas, por el cubrimiento total del espejo de agua.

Al comparar los dos tratamientos, los resultados de la CL_{50} y el análisis estadístico realizado (Ramírez, 1999), se encontró una relación directa entre la mortalidad de los organismos (*Lebistes reticulatus*) y las concentraciones evaluadas. En los reactores impares, la CL_{50} presentó valores más altos, lo que significa menor toxicidad, comparados con los valores menores para los reactores pares sin *Spirodela sp.* (ver tabla 2). El reactor que presentó menor porcentaje de toxicidad fue el número 3, con una CL_{50} para 96 horas de exposición de 39.6%, y la mayor toxicidad se reportó en el reactor 2, con CL_{50} para 96 horas de exposición de 11.5%. Los valores de CL_{50} de los reactores sin *Spirodela sp.* fueron muy cercanos entre ellos.

Coliformes totales y fecales

Las más eficientes remociones de coliformes totales y fecales se reportaron en los reactores con *Spirodela sp.* En la figura 7 se observa que todos los reactores con plántulas presentan diferencias significativas respecto de los reactores sin plántulas ($p < 0.01$), mientras que en la figura 8 solamente se aprecian diferencias entre los reactores 1-2 y 3-4 ($p < 0.05$); los dos últimos (R5-R6 y R7-R8) no muestran diferencias, aunque los promedios de los tratamientos con plántulas son mayores.

El reactor con las mejores eficiencias para coliformes fecales fue el número 1, con un promedio en remoción de 98.56% y para coliformes totales de 96.44%; el reactor 3 fue el que reportó la mejor eficiencia para coliformes totales con un promedio de 96.49%, en contraste con el reactor 8 que presentó las mínimas eficiencias con un promedio de 45.12% para coliformes totales y de 30.24% para coliformes fecales, como se muestra en las figuras 7 y 8.

Los análisis de varianza y las pruebas de comparación múltiple arrojaron los siguientes resultados: para la remoción de coliformes fecales los reactores R1, R3 y R5 no presentaron diferencias significativas, mientras que R1 y R3 sí son diferentes de R7 ($p < 0.01$), esto se observa en la figura 7.

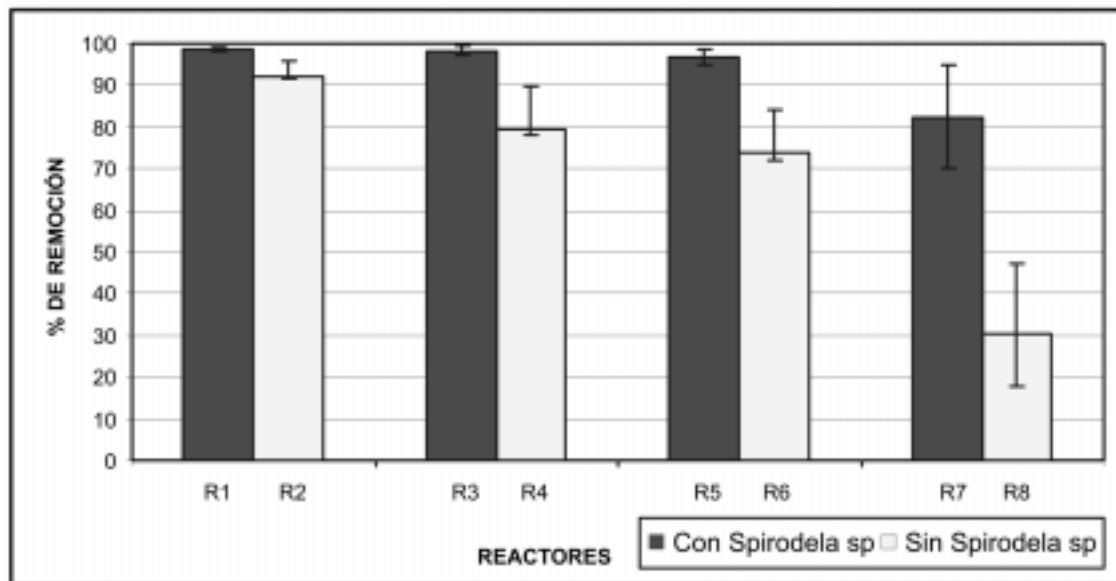


Figura 7. Eficiencia promedio en remoción de coliformes fecales

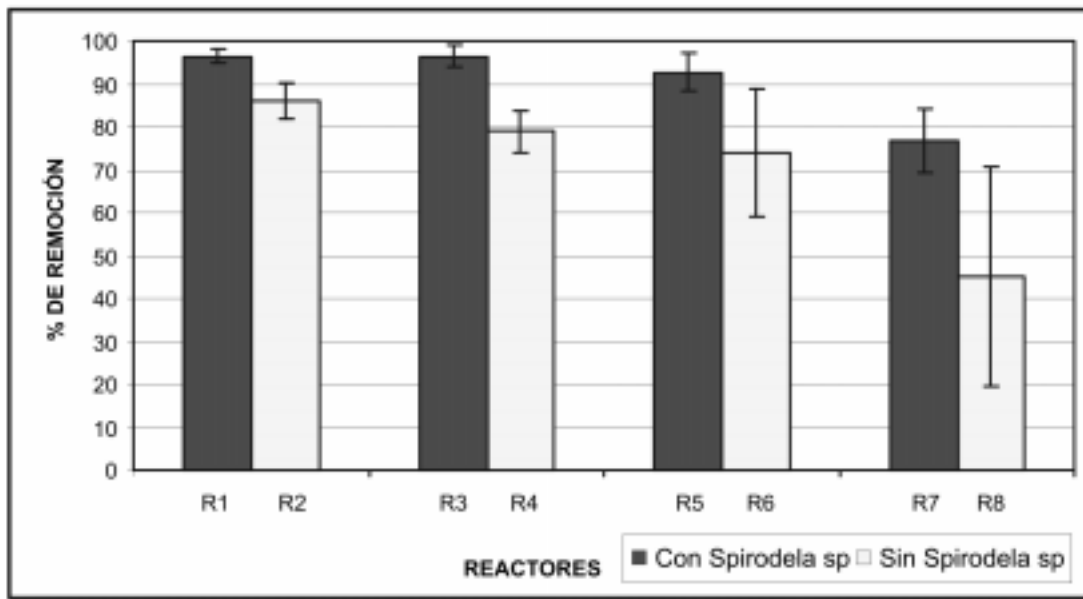


Figura 8. Eficiencia promedio en remoción de coliformes totales

Por otra parte, para la remoción de coliformes totales, los reactores R1, R3 y R5 no presentaron diferencias entre ellos, pero sí lo hicieron frente a R7 ($p < 0.001$) (figura 8).

Las diferencias significativas en remoción de coliformes entre los reactores con y sin *Spirodela sp.*, según el análisis estadístico, se deben posiblemente a factores biológicos asociados con las plántulas, como son: productos metabólicos segregados por éstas, acción de los microorganismos asociados con las raíces y la presencia de oxígeno en el medio, generalmente proporcionado por las plántulas.

CONCLUSIONES

El MPI para el postratamiento del efluente del RAP mostró eficiencias que complementan el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga, mitigando el impacto que genera el efluente sobre su cuerpo receptor, disminuyendo la carga contaminante y cumpliendo la legislación vigente de vertimientos de aguas residuales (Dec. 1594 de 1984).

El reactor número uno (1), con altura de lámina de agua de 10 cm y con *Spirodela sp.* mostró la mayor eficiencia en la remoción de nitrógeno

amoniaco y fósforo total con un 77.07 % y 97.10% de remoción, respectivamente.

El reactor número tres (3), con altura de lámina de agua de 20 cm. y con *Spirodela sp.* mostró la mayor eficiencia conjunta en la remoción de los parámetros evaluados (DBO_5 , nitrógeno amoniacal, sólidos totales y fósforo total), obteniendo un 69.93% de eficiencia promedio, calculada aritméticamente.

La eficiencia promedio de la PPS fue de 98.56% en remoción de coliformes fecales en el reactor 1, y de 96.4% de coliformes totales en el reactor 3.

La menor CL_{50} sobre los bioindicadores estudiados (*Lebistes reticulatus*), utilizando el efluente de los ocho reactores biológicos fue de 39.6% para el reactor 3 con (*Spirodela sp.*); los reactores sin plántulas (pares) presentaron valores superiores.

El valor más alto en eficiencia para remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) se obtuvo en el tratamiento con plántulas, para el reactor número uno (1), con altura de lámina de agua de 10 cm. Sin embargo, al utilizar una altura de lámina de agua entre 20 y 40 cm en la construcción de un sistema de tratamiento secundario a escala real con *Spirodela sp.* se evidencian ventajas constructivas y económicas, relacionadas con la menor área requerida para

la laguna y porcentajes de eficiencia en remoción de nutrientes superiores al 60%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana - Seccional Bucaramanga, por el apoyo al desarrollo del presente estudio; al doctor Ricardo Restrepo Manrique del Instituto Colombiano del Petróleo por su asesoría en el planteamiento y desarrollo del trabajo; al personal técnico de la Universidad, por su colaboración en las diferentes actividades.

BIBLIOGRAFÍA

- Apha, 1998. *Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th Edition.
- Bertoletti, E. 1990. Estimativa da carga tóxica de efluentes industriales. *Ambiente*, 4(1): 54-61.
- Bonilla, A. 2000. Técnicas de Fitorremediación. *Residuos*. 55: 78-82.
- Caicedo, J. 1996. *Plantas acuáticas de la familia Lemnaceae para el postratamiento de efluentes anaeróbicos - efecto del NH₄⁺N en la producción de biomasa*. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería. Cali.
- Cetesb, 1992. *Procedimiento para utilizacao de testes de toxicidade no controle de efluentes líquidos*. Companhia de Tecnologia Saneamento Ambiental, Sao Paulo, Brasil.
- Escobar, J. 1983. Bioensayos y pruebas de toxicidad. *Curso Teórico Práctico sobre Control de Derrames de Hidrocarburos* (Barrancabermeja). Ponencia del I Curso Teórico Práctico sobre Control de Derrames de Hidrocarburos. Barrancabermeja.1: 1-17.
- Eweis, J. 1999. *Principios de biorrecuperación*. Madrid: McGraw Hill, 546.
- Gamarra, Y.; Quintero, O.; Rueda, F.; Aguilar, M. 2000. Viabilidad de la descontaminación del agua residual de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, utilizando un sistema terciario a partir de *Spirodela sp.* Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente, Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (VII, IV, Cartagena). Memorias VII Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente, IV Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- García, M. 2000. Macrófitos en la depuración de aguas residuales: función en la eliminación de bacterias. *Tecnología del agua: artículos técnicos*. 20(185): 50-54.
- Gómez, H. 1999. *Algunos métodos estadísticos para el estudio de poblaciones de organismos*. Facultad de Ciencias Agropecuarias, sede Medellín. Universidad Nacional de Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). 1996. *Guía técnica colombiana. Gestión ambiental. Agua. Guía para la realización de ensayos de toxicidad (bioensayos) en organismos acuáticos*. Santa fe de Bogotá.
- Mendenhall, W.; Beaver, R.; Beaver, B. 2002. *Introducción a la probabilidad y estadística*. México: Thomson. 618.
- Metcalf, Eddy. 1998. *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. III edición. Madrid: McGraw Hill.
- Ramírez, A. 1999. *Ecología aplicada: diseño y análisis estadístico*. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia.
- Romero, J. 2000. *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Vázquez, E.; Ballhaus, N. 1998. Remoción de microorganismos durante la depuración anaerobia de residuales de mataderos. *Tecnología del agua: artículos técnicos*. 18(180): 50-53.