

# Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante Humedales Artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, en Carapongo-Lurigancho

Jocelyn D. Torres Guerra\*, Jennifer S. Magno Vargas\*,  
Raquel R. Pineda Aguirre\*, Milda A. Cruz Huaranga

Recibido 10 de junio de 2015, aceptado 10 de agosto de 2015  
*Received: June 10, 2015 Accepted: August 10, 2015*

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación es determinar la eficiencia de las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis* en el tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales a escala piloto de flujo libre superficial (FLS) en el agua para riego de Carapongo-Lurigancho. Para su evaluación se midieron parámetros como: DBO (270 mg/l); Coliformes totales y Coliformes Termotolerantes (16x10<sup>7</sup> NMP/100ml), pH (7.8); Temperatura (21°C), Turbidez (130 UNT); los cálculos necesarios como las dimensiones, tiempo de retención hidráulica y velocidad de flujo del sistema son una adaptación de Crites y Tchobanoglous, llamado Small Decentralized Wastewater Treatment Systems. De acuerdo a la Categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales de los ECA para agua D.S. 002-2001.MINAM, los parámetros deben ser: DBO (15ml/L), Coliformes totales (5 000 NMP/100ml) y Coliformes Termotolerantes (1000 NMP/100ml), pH (6.5-8.5). La efectividad del sistema de humedales un 80% de remoción, mientras que para a la determinación de eficiencia de las especies, *Cyperus Papyrus* tiene mayor remoción en la calidad de DBO y turbidez un 77% mayor a *Phragmites Australis*, mientras ésta un 30 % mayor en la remoción Coliformes totales y Coliformes Termotolerantes.

**Palabras clave:** Humedales, *Cyperus Papyrus*, *Phragmites Australis*, eficiencia, flujo libre superficial

\* Estudiantes de Ingeniería Ambiental. Universidad Peruana Unión – Lima.

## ABSTRACT

The objective of this research is to determine the efficiency of the species *Cyperus Papyrus* and *Phragmites Australis* for wastewater treatment utilizing Constructed Wetlands at pilot scale of free surface flow (FLS) in water for watering Carapongo-Lurigancho in Lima, Peru. For evaluation, we measured parameters as BOD (270 mg / l); Total coliforms and thermotolerant coliforms (16x10<sup>7</sup> NMP / 100ml), pH (7.8); Temperature (21 °C) Turbidity (NTU 130); the necessary calculations as the dimensions, hydraulic retention time and flow velocity of the system are an adaptation from Crites y Tchobanoglous called Small Decentralized Wastewater Treatment Systems. According to Category 3: Watering vegetables and animals drinking water from RCTs for water D.S. 002-2001.MINAM, parameters should be: BOD (15ml / L), total coliforms (5000 MPN / 100ml) and thermotolerant coliforms (1000 MPN / 100ml), pH (6.5-8.5). The effectiveness of the wetlands system 80% removal, while for efficiency determination of the species, *Cyperus Papyrus* has higher quality removal of BOD and turbidity 77% higher than *Phragmites Australis*, while it increased by 30% in the Total coliforms and thermotolerant coliforms removal.

**Keywords:** Wetlands, *Cyperus Papyrus*, *Phragmites Australis*, efficiency, free surface flow

## INTRODUCCIÓN

Existe una gran coacción sobre los recursos hídricos a nivel mundial. Según la UNESCO (2003) el 69% del agua dulce disponible en el planeta se destina a la agricultura, representa el 23% a la industria y el 8% a la utilización doméstica. La mala distribución temporal y espacial o la degradación determinan la actual entre la oferta existente y la creciente demanda de agua. Somos un país en desarrollo y enfrentaremos una mayor competencia por el acceso al agua en las próximas décadas, debido al crecimiento demográfico, nuevos hábitos de vida y el desarrollo urbano e industrial sin una adecuada planificación. Así, la búsqueda de fuentes alternativas de agua, sobre todo para la agricultura, sector que demanda un mayor porcentaje.

Por otra parte, la disposición final de las aguas residuales producidas por las distintas actividades humanas (domésticos e industriales) representa un problema cuando se trata de grandes urbes. El agua residual constituye una fuente alternativa importante para el riego de los cultivos, pero por otro lado, su uso para este fin, sin un adecuado tratamiento, puede constituirse a su vez en un problema mayor, por todos los riesgos que esto supone. En efecto, se han registrado a nivel mundial, muchos casos de brotes de enfermedades, casos de intoxicaciones masivas y se ha propiciado la degradación de diversos cuerpos de agua.

Según la UNESCO (2003) el uso del agua va en aumento en relación con la cantidad

disponible. Los seis mil millones de habitantes del planeta ya se han adueñado del 54% del agua dulce disponible en ríos, lagos y acuíferos subterráneos. En el 2025, el hombre consumirá el 70% del agua disponible. Esta estimación se ha realizado considerando únicamente el crecimiento demográfico. Sin embargo, si el consumo de recursos hídricos per cápita sigue creciendo al ritmo actual, dentro de 25 años el hombre podría llegar a utilizar más del 90% del agua dulce disponible, dejando sólo un 10% para el resto de especies que pueblan el planeta.

La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal construido porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario en el éxito o fracaso del humedal. Mientras la hidrología de un humedal construido no es muy diferente que la de otras aguas superficiales y cercanas a superficie, difiere en aspectos importantes como los pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento. Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie de agua y pérdida a través de la transpiración de las plantas). La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, primero, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces, y rizomas y, segundo, bloqueando la exposición al viento y al sol.

El agua residual es toda combinación de líquidos que transportan diferentes residuos con diversos parámetros que proceden de múltiples lugares donde se incorporan aguas subterráneas, superficiales y pluviales; el agua residual urbana existen parámetros que permiten cuantificar y normalizar el nivel de contaminación de estas las cuales son físicos (temperatura, agua, color y turbidez) y químicos (principalmente sólidos, materia orgánica, nutrientes, PH, alcalinidad, dureza, cloruros y grasas). Con el paso de los años ha aumentado la cantidad de aguas residual como también la concentración de contaminantes de acuerdo al crecimiento poblacional.

La problemática de las aguas residuales conlleva a una serie de consecuencias que dificultan o imposibilitan la vida como es la elevada presencia de microorganismos patógenos que favorece el crecimiento de enfermedades que afectan la salud humana como (el cólera, la disentería, el tífus, etc.). El elevado contenido de materia orgánica ya que esta facilita la actividad microbiana y con la aparición de olores desagradables e implica una disminución del nivel de oxígeno disuelto que dificulta la vida acuática. Los sólidos en suspensión que provocan acumulación que dificulten y modifiquen el curso natural de las aguas superficiales. Los nutrientes facilitan el crecimiento e plantas acuáticas y si este es descontrolado provoca la eutrofización y con ella la muerte de peces y plantas. Las trazas de metales o compuestos tóxicos si se produce un aumento significativo de su concentración por acumulación es letal. (Joaquim Comas, 2008).

Los objetivos básicos del tratamiento de aguas residuales son proteger la salud;

para cumplir con dichos objetivos es necesario conocer las características de las aguas residuales a tratar. De acuerdo con diferentes estudios y caracterizaciones se ha determinado que la cantidad total de excrementos humanos húmedos es aproximadamente de 80-270 g por persona al día, que la cantidad de orina es de 1-1,3 Kg por persona al día y que un 20% de la materia fecal y un 2,5% de la orina son material orgánico putrescible. Por consiguiente el agua residual doméstica cruda es olorosa, ofensiva y un riesgo para la salud. Si se arrojan aguas residuales a un río o cuerpo de agua, en exceso de la capacidad de asimilación de contaminantes del agua receptora, este se verá disminuido en su calidad y aptitud para usos benéficos por parte del hombre (Romero, 2004).

Además se ha determinado que el agua residual doméstica típica está compuesta mayoritariamente por: Proteína 50%, Sacarosa 8%, Celulosa 8%, Aceite y detergentes 10%, Almidón 24%. También contiene micro y macronutrientes en diferentes concentraciones; cada uno de estos compuestos tiene un aporte diferente para la DQO total de dicha agua residual.

Los humedales artificiales se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales como las aguas domésticas, urbanas, industriales, de drenaje de extracciones mineras, escorrentía superficial agrícola y urbana, tratamiento de fangos convencionales mediante deposición superficial en humedales de flujo sub superficial donde se deshidratan y mineralizan. (García et al., 2004).

La utilización de humedales artificiales para el tratamiento de aguas servidas por el volumen creciente de residuos biológicos y químicos que son arrojados a la red aguas superficiales, desde este punto de vista y teniendo en cuenta que la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales es muy costosa. Estos sistemas purifican el agua mediante remoción del material orgánico (DBO), oxidando el amonio, reduciendo los nitratos y removiendo fósforo. Los mecanismos son complejos e involucran oxidación bacteriana, filtración, sedimentación y precipitación química (Cooper et al., 1996). (Fernández et al., 2004).

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante. En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual (Reed en Kolb, 1998) y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos (Huen Kolb, 1998).

Los sustratos en los humedales construidos incluyen suelo, arena, grava, roca, y materiales orgánicos como el compost. Sedimentos y restos de vegetación se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de estos sistemas. El sustrato, sedimentos, y los restos de vegetación son importantes por varias razones ya que soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal. La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del

agua a través del humedal. Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato, proporciona almacenamiento para muchos contaminantes. La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos, y es una fuente de carbono, que es la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal. Las características físicas y químicas del suelo y otros sustratos se alteran cuando se inundan; en un sustrato saturado, el agua reemplaza los gases atmosféricos en los poros y el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible y aunque se presenta dilución de oxígeno de la atmósfera, puede darse lugar a la formación de un sustrato anóxico.

los factores más importantes para el rendimiento del tratamiento son: Proporcionar una amplia oportunidad para el contacto del agua con la comunidad microbiana, con la capa de residuos de vegetación y con el sedimento; Asegurar que el flujo alcance todas las partes del humedal; Mantener un ambiente saludable para los microbios; Manteniendo un crecimiento vigoroso de vegetación.

Los humedales artificiales son sistemas de Fito depuración de aguas residuales, que consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas (*Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*) sobre un lecho de grava impermeabilizado, la acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente. (Stearman et al., 2003).

Los humedales tienen tres funciones básicas que les confieren atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento (Lara, 1999).

Los humedales de Flujo Libre Superficial (FLS); son aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera, sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga, en algunos casos, el agua se pierde completamente por evapotranspiración y percolación en el humedal; se usan normalmente para tratamiento avanzado o terciario.

Las macrófitas están adaptadas a crecer bajo condiciones de suelos saturados por agua, porque tienen desarrollado un sistema de grandes espacios aéreos internos. Estos sistemas internos les permiten la provisión de aire bajo condiciones de suelo saturado con agua desde la atmósfera hacia las raíces y rizomas. En algunas especies este sistema ocupa más del 60% del volumen total del tejido (Brix en Kolb, 1998).

Las macrófitas poseen varias propiedades que hacen de ellas un importante componente de los humedales construidos. Entre estas propiedades, los efectos físicos

como la estabilización de la superficie de los humedales construidos y la prevención de taponamientos de la matriz son muy importantes.

Además, proveen buenas condiciones para la filtración física y una superficie grande para el crecimiento microbiano adjunto. Otra de sus propiedades es la transferencia de oxígeno a la rizósfera, aunque las estimaciones sobre la cantidad de esta transferencia de oxígeno varían en un amplio rango.

*Cyperus Papyrus*, (papiro) pertenece a la familia Cyperaceae, llega a tener una altura de 0.5 a 1.5 m con una profundidad radical de 0.2 – 0.4 m, posee una densidad de plantación de 5 m<sup>2</sup>, se caracteriza por su absorción de metales pesados, el papiro se multiplica principalmente a través de sus rizomas, de las que brotan nuevos troncos a intervalos regulares. Produce también semillas que pueden ser transportadas por el viento. Tolera temperaturas de 20 a 33°C, y tiene un pH entre 6 - 8,5. (Perez, Alfaro y Agüero 2012), señalan que en un estudio realizado en Cosa Rica mostro una eficiencia de remocion de carga organica en porcentajes promedio del 91% para el caso de DBO y 72% para el caso del DQO, asi mismo en cuanto a nutrientes, se obtuvo una remocion promedio del 75% para el fosforo soluble y un 73% en solidos totales.

*Phragmites Australis*, (carrizo) pertenece a la familia Poaceae, llega a tener una altura de 1.5 a 3 m con una profundidad radical de 0.7 – 0.8 m, absorbe contaminantes tales como plomo y zinc, contiene rizomas que penetran vertical y profundamente, en el sustrato o fango del humedal, por ello el efecto oxigenador es potencialmente mayor, germinan en aproximadamente 5 días en condiciones de humedad a 20-24°C, el carrizo es una planta que produce mucha biomasa, y tiene un pH entre 2 – 8. (Izaguirre 2006) señala que los resultados de un estudio realizado en México en el cual se utilizó *Phragmites australis* como sustrato, tuvo una efectividad de remoción del 88,5% para DBO<sub>5</sub>, 87,4 % DQO, 89% sólidos suspendidos, 73,6% nitrógeno orgánico y 99% coliformes fecales, cabe resaltar que pesar de su efectividad uno de los factores más importantes que hay que tener en cuenta con este tipo de especies es que no elimina al fosforo, pues no produce adsorción. (Hidalgo y Montano 2005).

Tomando como referencia los estudios nombrados anteriormente, para el presente trabajo se tomaron como plantas sustrato el carrizo y el papiro, debido a su eficiencia en el remocion de DBO, DQO, coliformes fecales y solidos totales para un mejor resultado en la obtencion de aguas tratadas, asi mismo poseen un buen margen de pH y temperatura.

**Tabla 1.**

*Efectos de la plantas en un sistema de humedal*

Parte de la planta	Función en el sistema del Humedal FLS
Partes sobre el agua	Atenúan la luz solar previniendo crecimiento de algas Influencia en el microclima Acumulación de nutrientes Reducción de los efectos del viento en la remoción de sólidos suspendidos y transferencia de gases entre la atmosfera y el agua.
Parte sumergidas en el agua	Producción de oxígeno Efecto de filtro Reducción de la velocidad de la corrientes Anclaje para la bio-capa microbiana Absorción de nutrientes
Raíces y rizomas en el medio	Anclaje para la bio-capa microbiana Liberación de oxígeno Estabilización de la superficie del sustrato reviene el fenómeno de taponamiento en sistemas película Disminución de la erosión Aumento de la superficie para la formación de la biopelícula Toman el carbono, nutrientes, y elementos de traza y los incorporan a los tejidos de la planta. El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas. oxigena otros espacios dentro del substracto.
Hojas y rizoma caídas	Descomposición en el suelo, fuente de carbono para los microorganismos

Fuente: (Prasad, 2004)

La cubierta vegetal producida por la vegetación emergente da sombra a la superficie del agua, previene el crecimiento y persistencia del agua y reduce la turbulencia inducida por el viento en el agua que fluye por el sistema. Aún más importante son las porciones sumergidas de las plantas vivas, los ramales erguidos de las plantas muertas, y los detritos acumulados del crecimiento vegetal previo; éstas superficies sumergidas proporcionan el sustrato físico para el crecimiento de organismos perifíticos adheridos que son responsables por la mayoría del tratamiento biológico en el sistema. La lenta velocidad que se produce y el flujo esencialmente laminar proporcionan una remoción muy efectiva del material particulado en la sección inicial

del sistema. Es necesario destacar que la velocidad de remoción de los contaminantes está relacionada a la velocidad de crecimiento de las plantas y a la concentración del contaminante en el tejido de la planta donde para esto existen procesos de remoción física, son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes (Llagas y Guadapale, 2006). Este material particulado, caracterizado como sólidos suspendidos totales (SST), contiene componentes con una demanda bioquímica de oxígeno (DBO), distintos arreglos de nitrógeno total y fósforo total, y trazas de metales y compuestos orgánicos más complejos. La oxidación o reducción de esas partículas libera formas solubles de DBO al medio ambiente del humedal en donde están disponibles para la absorción por el suelo y la remoción por parte de las poblaciones microbianas y vegetales activas a lo largo del humedal.

El oxígeno está disponible en la superficie del agua, en microzonas de la superficie de plantas vivas y en superficies de raíces y rizomas, lo cual permite que se produzca actividad aeróbica en el humedal. Se puede asumir, sin embargo, que la mayor parte del líquido en el humedal FLS es anóxico o anaeróbico. Esta falta general de oxígeno limita la remoción biológica por nitrificación del amoníaco ( $\text{NH}_3/\text{NH}_4 - \text{N}$ ), pero los humedales FLS sí son efectivos en cuanto a la remoción de DBO, SST, metales y algunos contaminantes orgánicos prioritarios dado que su tratamiento puede ocurrir bajo condiciones aeróbicas y anóxicas. (EPA, 2000)

Los microorganismos pueden proporcionar una cantidad medible de contaminante captado y almacenado en sus procesos metabólicos, que desempeñan el papel más significativo en la remoción de compuestos orgánicos. Los descompuestos microbianos, sobre todo bacterias del suelo, utilizan el carbono (C) de la materia orgánica como fuente de energía, convirtiéndola a gases de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o metano ( $\text{CH}_4$ ). Esto proporciona un mecanismo biológico importante para la remoción de una amplia variedad de compuestos orgánicos. (Llagas y Guadapale, 2006).

Entre ventajas los humedales FLS proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos y electricidad. En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO.

Los humedales artificiales FLS pueden remover coliformes fecales del agua residual municipal, al menos en un orden de magnitud. Esto no siempre es suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección subsiguiente. La situación puede complicarse aún más debido a que las aves y otras especies de vida silvestre producen coliformes fecales. (Lara, 1999).

Para las dimensiones, tiempo de retención hidráulica y velocidad de flujo del sistema, la remoción de la DBO depende de la temperatura del agua, Debido a que las plantas vivas y los detritos representan una resistencia significativa al flujo por la fricción a lo largo del humedal, se deben considerar los aspectos hidráulicos en el diseño del sistema. (Chazarene y Merlín, 2004).



**Tabla 2:**

*Funciones de los elementos del proceso en humedales FLS*

Elementos del proceso	Principales funciones	Notas
Plantas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantener la capacidad hidráulica en el suelo</li> <li>• Suministrar oxígeno al suelo</li> <li>• Consumir nutrientes</li> <li>• Mantener bacterias</li> <li>• Estabilizan el substrato y limitan la canalización del flujo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para el desarrollo de raíces y rizomas</li> <li>• Demostrado principalmente en cañas (Phragmites Australis)</li> <li>• Sobre todo en periodo de crecimiento de las plantas</li> <li>• Cuando la necesidad de las plantas se satisface ya no los consume.</li> <li>• El recorte de plantas asegura la remoción de nutrientes.</li> <li>• Alrededor de las raíces o de las espigas</li> <li>• Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos</li> </ul>
Microrganismos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoción de DBO</li> <li>• Nitrificación/ desnitrificación</li> <li>• Remoción de SST</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pueden estar fijados en el suelo p la superficie</li> <li>• Buena eficiencia aun en invierno (disminuye cerca de un 25%)</li> <li>• Si se acierta en crear condiciones secuenciales aerobias y anaerobias</li> <li>• La eficiencia disminuye mucho en invierno</li> <li>• Eficiente cuando el medio es fino (arena)</li> </ul>
Suelos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoción de nutrientes (fosforo) y de ciertos metales por absorción</li> <li>• Mantener bacterias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es posible si el medio contiene parcialmente iones ferrosos, de aluminio u otros que puedan favorecer la absorción</li> <li>• En la medida que la capacidad de absorción se completa y se disminuye la remoción de nutrientes será eficiente en el largo plazo.</li> <li>• Un desarrollo muy grande de bacterias especialmente anaerobias pueden colmatar el lecho filtrante</li> </ul>

Fuente: (Llagas y Guadapale, 2006)

Mecanismos de remoción en humedales de materia orgánica (MO) sedimentable por las condiciones de baja turbulencia, mediante procesos de sedimentación y filtración; crecimiento microbiano en forma suspendida (fase líquida) o adherida (raíces y sedimentos). La MO puede ser degradada bajo condiciones aerobias o anaerobias. El Oxígeno requerido para la degradación aerobia puede ser tomado directamente de la atmósfera por las plantas y traslocado a la zona de raíces o puede ser difundido directamente desde la atmósfera. La oxidación de la MO soluble es realizada por bacterias heterotróficas son las principales responsables de la reducción de la DBO en el sistema. Un insuficiente abastecimiento del oxígeno limitará la oxidación

biológica, dando lugar a procesos anaerobios. Por el contrario si hay suficiente cantidad de Oxígeno, la oxidación aerobia, gobernará toda el proceso de oxidación de la materia orgánica (Paredes y Kuschik, 2001). La disponibilidad de oxígeno esta relacionada con la eficiencia en la transferencia de oxígeno atmosférico en los humedales tipo FLS y con el alcance de la penetración de las raíces y la eficiencia en la transferencia de oxígeno de estas raíces. La degradación anaerobia de la MO es un proceso en múltiples etapas que puede ser desarrollado por bacterias heterotróficas facultativas o anaerobias obligadas. En la primera etapa los productos finales primarios de la fermentación son ácidos grasos como ácido acético, butírico y láctico y gases; el ácido acético es un compuesto primario formado en muchos suelos saturados y en sedimentos presentes en humedales. Bacterias aerobias estrictas, tanto sulfato reductoras como metano generadoras, utilizan los productos finales primarios generando gas sulfhídrico y metano. (Paredes y Kuschik, 2001).

Medida de la concentración de ion hidrógeno en el agua, expresada como el logaritmo negativo de la concentración molar del ion hidrógeno. Aguas residuales en concentraciones adversas del ion hidrógeno son difíciles de tratar biológicamente, alteran la biota de las fuentes receptoras y eventualmente son fatales para los microorganismos. Aguas con pH menor de seis, en tratamiento biológico favorecen el crecimiento de hongos sobre las bacterias. A pH bajo el poder bactericida del cloro es mayor, porque predomina el HOCl; a pH alto la forma predominante del nitrógeno amoniacal es la forma gaseosa no iónica (NH<sub>3</sub>), la cual es toxica, pero también removible mediante arrastre con aire, especialmente a pH de 10,5 a 11,5. El valor de pH adecuado para diferentes procesos de tratamiento y para la existencia de la mayoría de la vida biológica puede ser muy restrictivo y crítico, pero generalmente es de 6,5 a 8,5. Las bacterias acidificantes son fácilmente adaptables, mientras que las generadoras de metano son más sensitivas y sólo trabajan en un rango de pH entre 6,5 y 7,5. Una sobreproducción de ácido por parte de las bacterias acidificantes puede resultar en un bajo pH, lo cual inhibe la acción del segundo grupo, originando compuestos olorosos en el humedal. La descomposición anaerobia es mucho más lenta que la aerobia, sin embargo, cuando el Oxígeno es un factor limitante y se tienen altas cargas orgánicas el principal proceso será anaerobio (Paredes y Kuschik, 2001).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. La DBO es el parámetro más usado para medir la calidad de aguas residuales y superficiales, para determinar la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, para diseñar unidades de tratamiento biológico, para evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento y fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras (Romero, 2004). Su reducción ocurre rápidamente por sedimentación y filtración de partículas en los espacios entre la grava y las raíces. La DBO soluble es eliminada por microorganismos aerobios o anaerobios que crecen en la superficie de la grava, raíces y rizomas de las plantas, pero el resto del lecho sumergido ocurre

por vías anaerobias: fermentación metánica y sulfato reducción. Las plantas y el suelo no tienen influencia directa en la remoción de la DBO pero en forma indirecta favorecen el crecimiento de microorganismos; además las plantas suministran una proporción de Oxígeno necesaria. (Lahora A, 2001).

La remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en humedales construidos es muy efectiva y más o menos rápida, alcanza remociones de alrededor de 90 a 95 %, es decir produciendo efluentes con concentraciones inferiores a 10 mg/L. Los mecanismos de remoción de SST ocurren por vías de sedimentación y filtración, gracias a la alta densidad de vegetación, pero para mantener los rendimientos de remoción es importante escoger bien el lecho filtrante y mantener la granulometría del medio filtrante entre 10 y 15 mm.

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (los tallos, raíces, y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión. Lo más importante en los humedales FWS es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degradan y se convierten en lo que hemos llamado restos de vegetación, que sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija que es la responsable de gran parte del tratamiento que ocurre.

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo. Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen. Toman el carbono, nutrientes, y elementos de traza y los incorporan a los tejidos de la planta. Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos. El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato. El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos. Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos, y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes. La actividad microbiana, Transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles; altera las condiciones de potencial redox del sustrato y así afecta la capacidad de proceso del humedal; y está involucrada en el reciclaje de nutrientes. Muchas especies bacterianas son facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales. Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y puede permanecer inactivos durante

años. La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados, y debe tenerse cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales.

Las principales vías de transmisión de enfermedades a los seres humanos desde el agua residual son: el contacto directo con el agua residual, transporte de aerosoles, cadena alimenticia, e inadecuado trato del agua de bebida.

La Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas, conocida en forma abreviada como Convenio de Ramsar, fue firmada en la ciudad de Ramsar (Irán) el 18 de enero de 1971. Su principal objetivo es «la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales, regionales y nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo». Hasta febrero de 2011, Perú lleva declarados un total de 13 sitios RAMSAR entre ellos el Humedal Lucre – Huacarpay- Cusco..

## **Materiales y Métodos**

### **Muestreo**

Para la interpretación de los resultados de análisis de laboratorio y su aplicación práctica es requisito fundamental realizar antes un buen muestreo del agua residual. El muestreo de agua se realizó usando botellas de vidrio, debido a que los análisis que se realizaron fueron específicamente análisis microbiológicos y determinación de la demanda de oxígeno, se usaron botellas de vidrio con la finalidad de evitar las reacciones secundarias entre los materiales de plástico y el agua. Debido a que el material de la botella es vidrio existe el riesgo de que se rompan, por esta razón, se dejó un espacio de 5cm de aire después de cerrar la botella.

El muestreo de agua se realizó en el paradero “Tres Tiendas” Carapongo – Lurigancho tomando como punto de muestreo el canal de riego de la margen izquierda. Se tomó la muestra sosteniendo la botella cerca de su base y sumergiéndola boca abajo, girando la botella hasta que el cuello apunte hacia arriba, dirigiéndose hacia la corriente. Se tomaron dos muestras de 650 ml, las cuales fueron llevadas al Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente de la Universidad Agraria la Molina, para la determinación de los análisis correspondientes.

### **Dimensiones del sistema**

Los cálculos como las dimensiones, tiempo de retención hidráulica y velocidad de flujo del sistema son una adaptación de Crites y Tchobanoglous, llamado Small Decentralized Wastewater Treatment Systems para para humedales artificiales a escala laboratorio; se usó como referencia la temperatura mínima promedio del mes de marzo de Ñaña- Lurigancho-SENAMHI; cantidad de afluente y la cantidad de la

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) inicial y cuanto se necesitaba reducir para cumplir los ECA para agua D.S. 002-2001. MINAM, Categoría riego de vegetales tallo bajo y alto y bebida de animales.

Para la determinación del tamaño del sistema biológico de filtración, se determinó la temperatura mínima del ambiente del sitio propuesto (21°C), con ello se calculó la constante de velocidad de reacción,  $KT$  (día<sup>-1</sup>) para DBO con la temperatura apropiada en 20°C ( $k_{20}$ ) varía dependiendo del sistema. Un valor  $K$  más grande indica la descomposición más rápida de DBO, debido a ello se utilizó un  $K_{20}$  de 1.1 día<sup>-1</sup>. El sistema tiene una constante de velocidad de 1.76 día<sup>-1</sup>.

Asimismo se calculó el tiempo de retención  $t$  por día, es decir el tiempo que el agua debe quedarse en el sistema para alcanzar el nivel de DBO deseado, teniendo a  $CO$  como la concentración de DBO que ingresa (270 mg/L), y  $C$  la concentración de DBO deseado en efluente (5mg/L) el cual dió como resultado 2 días de retención del agua residual en el sistema.

La carga de DBO por área  $L_{org}$  (g DBO/m<sup>2</sup>-día) Se calcula con el nivel de DBO (mg/L = g/m<sup>3</sup>) del agua influyente,  $d_w$  (m) que es la profundidad del sustrato, que puede ser típicamente de 0.7 m. Entre más profundo se encuentre el sustrato, mayor será carga que el sistema puede procesar, pero si el sustrato es demasiado profundo, las condiciones en el fondo llegan a ser anaeróbicas y pueden resultar en la eliminación reducida del DBO y de nutrientes.  $L_{org} = 29.4$  g BOD/m<sup>2</sup>-día, este número indica la masa de DBO por área por día que el sistema recibirá.

El área total de la planta de tratamiento se halla con el valor de caudal, el tiempo de retención, porosidad efectiva del sustrato (0.35 para arena y grava) y la profundidad del sustrato (0.7m tomando como referencia la mayor profundidad radicular de la planta Papiro) dándonos como resultado un área final del sistema de 1.84 m<sup>2</sup> necesaria para la reducción de DBO.

El cálculo del ancho de la planta de tratamiento se basó en el área total del humedal y la proporción, longitud/ancho, usando 2:1 como coeficiente dando como resultado: Largo 0.60 m, ancho 0.40 m y alto 0.30 m.

## **Montaje del sistema**

Se colocó una capa de arena gruesa de 5 cm de espesor en el fondo, una capa de grava encima y una capa de tierra de 5 cm de espesor, se incorporaron dos tubos, uno de entrada y otro de salida del agua. Las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis* fueron sembradas en el sistema dos semanas antes de realizar el análisis para su adaptación y estabilización en el medio, se trasplantaron plantas de humedal, 7 plantas de carrizo y 10 plantas de papiro, más un poco de tierra del lugar donde crecieron. La parte con la raíz se colocó aproximadamente 5 cm debajo de la capa de tierra del humedal, se saturó el humedal con agua hasta la superficie para mantener el suelo húmedo durante el periodo de retención, el agua efluente fue

recolectada a nivel del suelo. El sistema FLS requiere condiciones de flujo uniformes para alcanzar los rendimientos esperados. Esto se alcanza en sistemas de pequeño o moderado tamaño con tuberías de recolección perforadas que se extienden a lo ancho de toda la celda, tanto para la entrada como para la salida.

Un colector de entrada sobre la superficie permite el acceso para ajustes y control, por lo que se prefiere para muchos sistemas. Este colector generalmente consiste en una tubería plástica de 100 a 200 mm de diámetro.

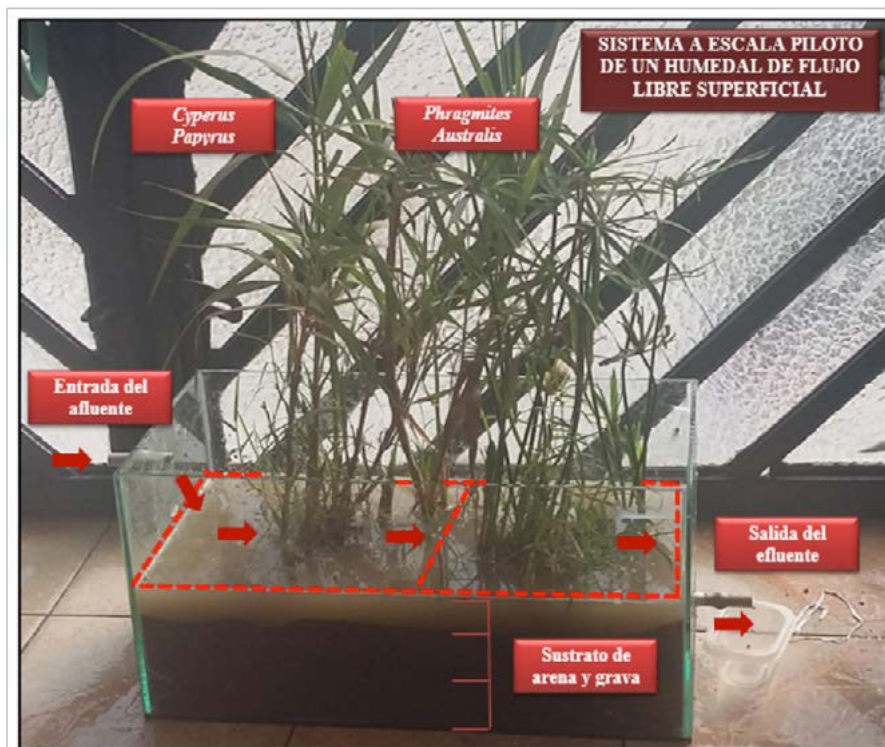


Figura 1. Montaje del sistema de humedal FLS a escala piloto

En la figura se puede apreciar el montaje del experimento la entrada del agua residual y la salida del agua después del tratamiento en el humedal con plantas emergentes *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, el sustrato de arena y grava.

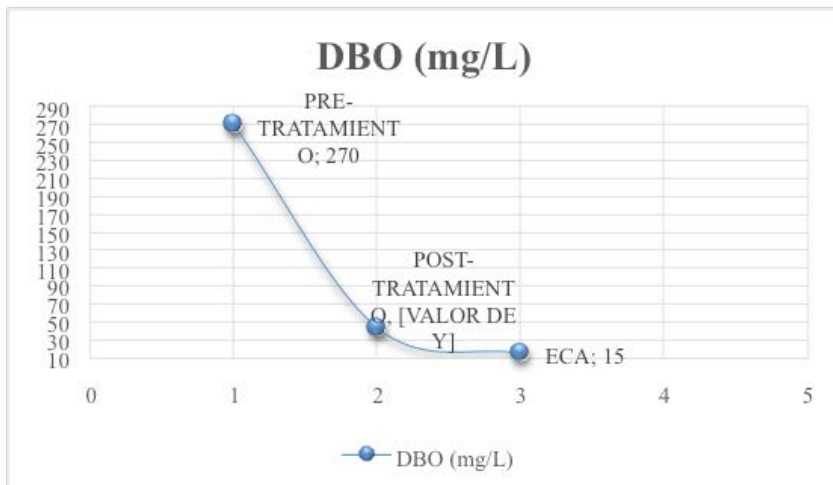
## Resultados y Discusión

### Remoción de DBO

Dentro de los parámetros establecidos para la reducción de DBO, se obtuvo una re-

moción de aproximadamente 84% de su valor inicial, esto confirma la eficiencia de los sistemas tipos FWS en la remoción de la materia sedimentable, se considera que el 50% de la DBO aplicada es removida en los primeros metros del humedal ya sea descompuesta aeróbica o anaeróbicamente, y dependiendo del oxígeno disponible con el que cuenta. El resto de la DBO continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema, esta actividad biológica puede ser aeróbica cerca de la superficie del agua en el humedal, pero la descomposición anaerobia prevalece en el resto del sistema.

La Figura 2 ilustra la DBO a la entrada contra la DBO a la salida para el sistema de humedal establecido en el presente trabajo, el valor del efluente está por debajo del afluente pero no llega al establecido por el ECA- agua.



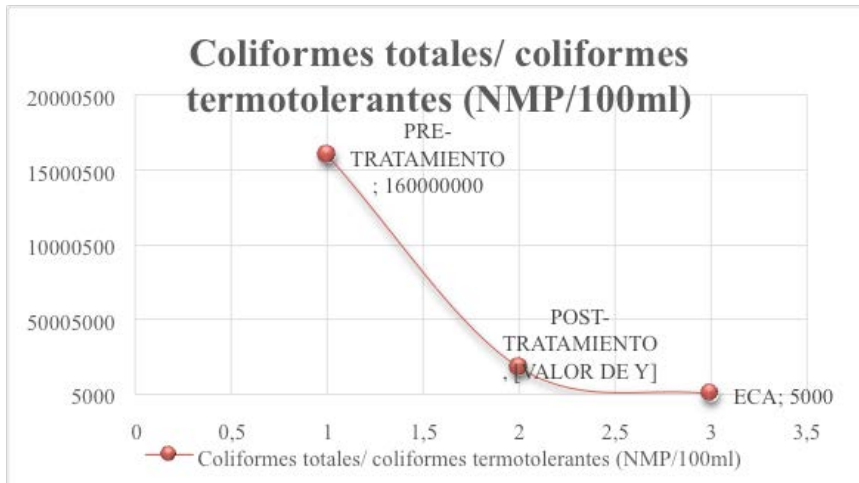
**Figura 2.** DBO de entrada contra DBO de salida y DBO establecido en el ECA – agua en humedal artificial piloto.

Se sabe que en climas cálidos, la remoción de DBO es más eficiente durante los primeros días es muy rápida es por ello que en este caso, la remoción fue de un aproximado del 84%, ya que el tiempo de retención fue de dos días, eliminando así el mayor número de DBO. De la misma manera en los días siguientes la remoción es limitada y se cree que está influida por la producción de DBO residual que se produce por la descomposición de los residuos de las plantas y otra materia orgánica natural presente en el humedal, esto hace que se produzca DBO dentro del sistema provenientes de fuentes naturales, por tanto, no es posible diseñar un sistema para una salida de cero DBO, independientemente del tiempo de retención que este posea.

### Remoción de Coliformes fecales

La remoción de Coliformes tuvo una efectividad 89%, con ello se puede decir que cumple con la capacidad normal de reducción dentro de los primeros días de retención, es decir se eliminó aproximadamente entre uno a dos logaritmos, los cuales no fueron suficientes para satisfacer los requisitos establecidos por el ECA – agua, < 500NMP/100 ml. Se puede decir que para lograr una reducción mayor a la obtenida es decir de 3 a 4 logaritmos es necesaria una retención de 14 días.

La Figura 3 ilustra la cantidad de Coliformes removidos por el humedal en un periodo de retención de dos días.



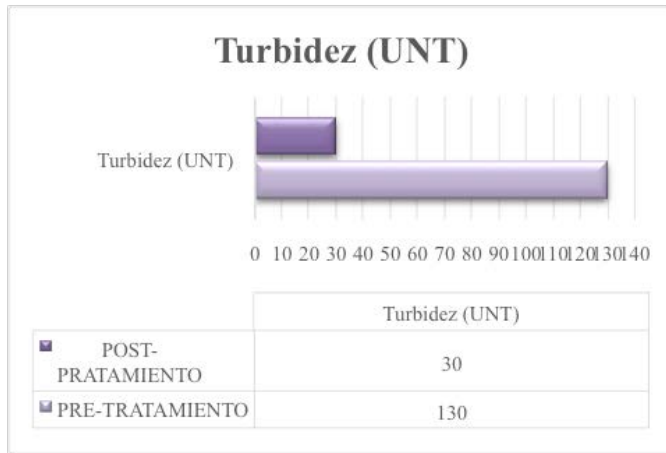
**Figura 3.** Coliformes Totales y Termotolerantes de entrada y salida en comparación a lo establecido por el ECA – agua en el humedal artificial piloto.

### Remoción de turbidez

El grado de turbidez de las aguas tratadas mediante el humedal artificial piloto muestra una reducción del 77%, esto se notó claramente por la transparencia del efluente en comparación con el afluente, esto se dio principalmente por las propiedades de adsorción que tiene las plantas utilizadas para el humedal.

En la Figura 4 se muestra la diferencia de la turbidez del efluente con la afluente en valores numéricos.



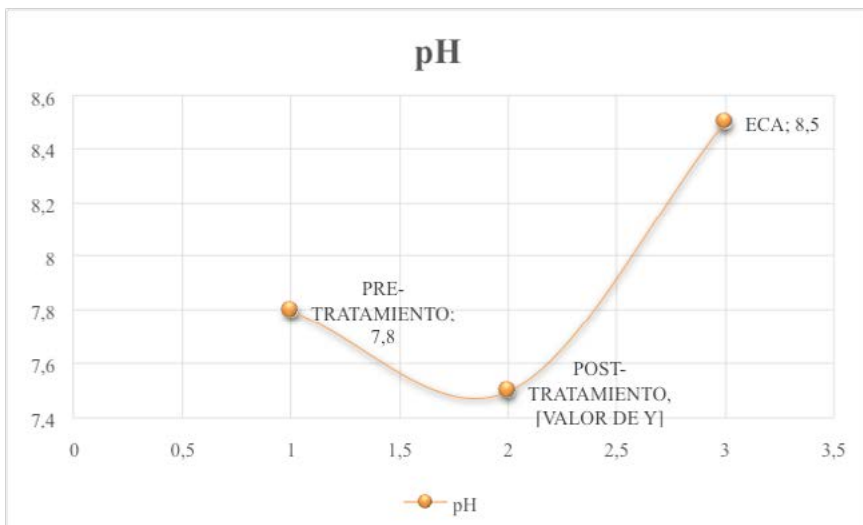


**Figura 4.** Reducción de turbidez pre y post tratamiento del humedal artificial a escala piloto.

### Reducción del pH

La reducción del pH dentro del humedal artificial fue aproximadamente de un 3%, a pesar de que no es una reducción considerablemente alta se puede decir que está dentro de los parámetros establecido por el ECA – agua que equivale a valores entre 6.5 – 8.5.

En la Figura 5 se muestra la diferencia del nivel del pH, pre y post tratamiento comparadas con lo establecido por el ECA – agua.



**Figura 5.** Reducción del pH pre y post tratamiento dentro del humedal artificial a escala piloto

## Resultados 1

Los resultados obtenidos pre-tratamiento y post-tratamiento, fueron comparados con el ECA establecido por el Ministerio del Ambiente, se logró obtener una considerable remoción de los parámetros microbiológicos y de DBO, así como de turbidez, que se muestran en los valores obtenidos, para el DBO que tuvo un afluente de 270 mg/L, tuvo un efluente de 43 mg/L, para los Coliformes Totales y Termotolerantes se determinó un afluente de  $16 \times 10^7$  NMP/100ml y un efluente de  $176 \times 10^5$ , para el nivel de turbidez se estimó un afluente de 130 UNT y un efluente de 30 UNT, pH obtuvo una mínima remoción teniendo un afluente de 7.8 y un efluente de 7.5, la temperatura de pre y post tratamiento se mantuvo constante con un valor de 21° C.

## Resultados 2

Estadísticamente la remoción fue eficiente con respecto a los parámetros microbiológicos y DBO, esto confirma las estadísticas planteadas anteriormente por otros autores, los resultados obtenidos del post tratamiento fueron aproximadamente un 84% para el DBO, 89% para Coliformes totales y Coliformes Termotolerantes, 3% para pH y 77% para turbidez. Esto confirma el proceso de adsorción que tienen las dos especies usadas para dicho humedal, es necesario resaltar que no existe un cambio de temperatura específico ya que el humedal se mantiene a una temperatura constante.

## Resultados 3

Los resultados del proceso de remoción de parámetros microbiológicos y DBO, para las aguas residuales de Carapongo - Lurigancho se muestran a continuación:

**Tabla 1**

*Contraste del pre-tratamiento, post-tratamiento y ECA-agua para las aguas residuales de Carapongo – Lurigancho.*

PARÁMETRO	PRE-TRATAMIENTO	POST-TRATAMIENTO	ECA
DBO (mg/L)	270	43	15
Coliformes totales/ Coliformes Termotolerantes (NMP/100ml)	$16 \times 10^7$	$176 \times 10^5$	5000
pH	7.8	7.5	8.5
Temperatura (°C)	21	21	-
Turbidez (UNT)	130	30	-

## CONCLUSIONES

Se logró evaluar la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales de Carapongo-Lurigancho para riego mediante Humedales Artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*

A pesar de que la remoción de los parámetros microbiológicos y DBO fue efectiva y eficiente reduciendo en un aproximado del 80 al 89% en todos los parámetros, estos resultados aún no llegan a cumplir los ECA para el uso de riego de vegetales. Es por ello que para que la eficiencia de este humedal sea completamente efectiva, será necesario anteponer otro método de remoción, ya sea un tratamiento secundario para que así usando los humedales como tratamiento terciario la remoción de los parámetros nombrados anteriormente estén dentro del parámetro establecido.

Se puede obtener una DBO5 por debajo de 25 mg2/L, aunque no es posible bajar de una DBO de 7-10 mgO2/L, que parece proceder de residuos orgánicos del propio sistema y no del agua residual original.

Aunque se realizó un análisis después de un tiempo de retención menor a lo requerido para pruebas microbiológicas, se puede ver que los humedales artificiales son en general, capaces de una reducción de coliformes fecales de entre uno a dos veces con tiempos de retención hidráulica de 3 a 7 días que en muchos casos no es suficiente para satisfacer los requisitos de ECA (1000NMP/100 ml). Tiempos de retención superiores a 14 días serían necesarios para lograr reducciones de 3 o 4 veces CT y CF. Como resultado, la es necesario el complemento de alguna forma de desinfección final, adición de Hipoclorito de calcio. Sin embargo se hace necesario un estudio más prolongado, que permita determinar con mayor exactitud las tasas de remoción en cuanto a contaminación microbiológica.

Mejoran las cualidades organolépticas de las aguas residuales; ya que pese a las características del agua los efluentes de los sistemas en estudio no tenían ningún olor desagradable o color característico del afluente. Tampoco se desarrollaron olores fuertes en las instalaciones de los sistemas ni proliferación de vectores.

Representan una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas, ya que no tienen mayores requerimientos, ni personal calificado para su mantenimiento, y los costos de operación e implementación son bajos.

Los tallos y hojas sumergidas de las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, se degradan y se convierten en restos de vegetación y que junto a los sólidos sedimentables que contiene el agua residual, sirven como sustrato para el crecimiento de la biota, que es la responsable en gran parte de la depuración del agua.

## RECOMENDACIONES

Algunas limitaciones potenciales en humedales construidos es que son susceptibles a obstrucciones debidas a sedimentos que entran en los tubos y previenen el flujo. Esto puede ser prevenido instalando la malla fina o trampas recomendadas para sólidos grandes en la entrada del tubo.

Cuando se presentan eventos intensos de vientos y proliferación de algas, los picos de caudal influyen negativamente en la eficiencia de remoción de coliformes fecales. Puede causar que los sólidos que se asentaron previamente se liberen hacia las aguas de superficie. Esto debe ser evitado permitiendo que la salida este siempre abierta, y manteniendo el humedal en su nivel de agua natural.

Es probable que se formen pantanos en donde se acumule una pequeña capa de agua sobre la superficie del terreno y donde existía una capa de subsuelo relativamente impermeable que prevenga la filtración del agua en el subsuelo.

Las especies invasivas, es importante no introducir las especies de plantas de humedales que son compradas para los humedales construidos en viveros en humedales naturales. Algunas especies de plantas son más agresivas que otras y pueden dominar un humedal natural, matando las especies nativas. Es importante evitar esto para mantener la diversidad natural de las especies.

Se recomienda hacer cosechas cuando se observe que el humedal este en un estado de crecimiento avanzado para optimizar la absorción de nutrientes por parte de las plantas.

La aplicación de este modelo de humedal en otras zonas del país va a depender de la geografía del terreno, el cual dictará la forma general y configuración del humedal; la temperatura del lugar va de acuerdo con la estación, así en invierno la altura de los humedales generalmente tiene que ser incrementada para almacenar más calor en la columna de agua; la disponibilidad de las plantas para evitar la necesidad de aclimatación

En humedales de FLS, el agua debe cubrir todas las partes de la superficie del humedal, debe ser verificado periódicamente para asegurar que el agua se está moviendo a través de todas las partes del humedal y que el aumento de residuos no ha bloqueado caminos de flujo, y no se han desarrollado áreas de estancamiento que aumentan la probabilidad de mosquitos. Deben verificarse flujos y niveles de agua regularmente. Deben verificarse los humedales SFS para ver que no se está desarrollando flujo en la superficie.

Mientras las plantas del humedal pueden tolerar cambios temporales en la profundidad del agua, debe tenerse cuidado de no exceder los límites de tolerancia de las especies usadas durante periodos largos de tiempo. La profundidad del agua puede aumentarse durante los meses fríos aumentando así el tiempo de retención y prote-

giendo contra las heladas. La cubierta vegetal en los diques debe mantenerse para desarrollar una capa de tierra buena con sistemas de raíz extensos que resisten a la erosión.

La vegetación debe ser inspeccionada regularmente y deben quitarse las especies invasoras. Los herbicidas no deben usarse excepto en circunstancias extremas, y sólo entonces y con cuidado extremo, dado que pueden dañar severamente la vegetación emergente.

Los mosquitos son comunes en los humedales naturales y pueden esperarse en humedales artificiales. La mejor manera de evitar problemas con mosquitos en los humedales artificiales es crear condiciones en el humedal que no sean atractivas a los mosquitos o que no conduzcan al desarrollo de larvas. Lugares abiertos con agua estancada son un excelente hábitat para los mosquitos, y los nutrientes del agua estancada, son ideales para el desarrollo larval. Cuando el agua está en movimiento se minimiza el riesgo de desarrollo de mosquitos.

El control de mosquitos con insecticidas, aceites, y agentes bacterianos como es a menudo difícil en humedales artificiales; el uso de insecticidas en humedales artificiales con cantidades grandes de materia orgánica es ineficaz porque la materia orgánica los adsorbe y porque se diluyen rápidamente o son degradados por el agua que viaja a través del humedal. Los tratamientos químicos deben usarse con cautela porque se corre el riesgo de contaminar el humedal y el cauce receptor.

La supervisión es una herramienta operacional importante que proporciona datos para mejorar el rendimiento del tratamiento, identifica problemas, documenta la acumulación de sustancias potencialmente tóxicas antes de que sean bio-acumulables, determina el cumplimiento de los requisitos reguladores.

El aumento de los sedimentos acumulados así como de la capa de residuos, disminuye la capacidad de almacenamiento de agua, afectando la profundidad de está en el humedal y posiblemente alterando los caminos de flujo. Los sedimentos, la capa de residuos, y la profundidad del agua deben verificarse de vez en cuando. Si el agua residual pudiera contener contaminantes tóxicos, como pesticidas o metales pesados, deben analizarse los sedimentos una o dos veces al año para supervisar el aumento potencial de estos contaminantes en los sedimentos del humedal.

## Referencias

- Andrés, P., Rodríguez, R. (2008). *Evaluación y prevención de riesgos ambientales en Centroamérica*. Girona España: Documenta Universitaria
- Angarita, S. (2008). *Hipótesis de optimización en humedales de flujo subperifical en el tratamiento de agua residual urbana- énfasis en la retención de metales*. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Arias, M., Salazar, J. (2010). *Fitorremediación con humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales porcinas*.
- Artero, I., Quisque M., (2012), *Desarrollo de un micro humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario*.
- Benavides, M. (2014). *Fitorremediación, Departamento de Química Biológica Facultad de Farmacia y Bioquímica*. Universidad de Buenos Aires IQUIFIB. CONICET
- Billmeyer, Engineering. (2000). *Wastewater Technology Fact Sheet Free Water Surface Wetlands*. United States Environmental Protection Agency
- Celis, J., Sandoval, M., Junod, J. (2005). *Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas*.
- Centro de las nuevas tecnologías del agua (2011). *Tecnologías no convencionales para la depuración de las A.R.U*
- Contreras, A., Pedrique, F., Bracho, N., Fernández, P. (2008) *Evaluación del potencial de remoción de nutrientes de un humedal artificial, Maracaibo- Venezuela*.
- Convenio de Ramsar, (2008). *Plan de acción para la conservación y uso sustentable de humedales alto andinos*
- Escalante, F. (2008). *Proposición de un sistema de caracterización de humedales degradados susceptibles de regeneración hídrica mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos*.
- Estrada, I. (2010). *Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (hafss) para remoción de Metales pesados en aguas residuales*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Forero, I. (2010). *Estudio del comportamiento de humedales artificiales de flujo sub-superficial en la planta experimental de Carrión de los céspedes*. Sevilla, España.
- Gorga, M. (2005). *Biorremediación aplicable humedales artificiales, instituto juvenilia - Mar de plata*.
- Herrera, S., Rodríguez, L. (2011). *Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial con PHragmites, para el tratamiento de aguas residuales de la empresa colombo italiana de curtidos LTDA*.
- Lab. de Ingeniería Sanitaria (LIS), (2013), *estudio y diseño del sistema de tratamiento terciario mediante humedal artificial*. Área diseños de ingeniería laboratorio de ingeniería sanitaria facultad de ingeniería Universidad Nacional de la Plata.
- Lahora, A. (2005). *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales; la edad de los gallos (Almería)*.

- Lara, J. (1999). *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales* [tesis de maestría], Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Máster en ingeniería y gestión ambiental.
- Llagas, W., Gomes, E. (2006). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la USMSM*
- Mena, J. (2006). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos*. Congreso nacional del medio ambiente.
- Minchola, J. (2013). *Constructed wetlands for treating domestic wastewater in the Barrick mine*. Universidad Nacional de Trujillo. Peru.
- Mogollon, M. (2005). *Caracterización fisicoquímica de los humedales artificiales*. Universidad de Pamplona.
- Montoya, J., Ramírez, J. (2010). *Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la guadua angustifolia kunth*. Universidad tecnológica de Pereira.
- Montoya, J., Ceballos, L., Casas, J., Morato, J., (2010). *Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas*
- Morales, C. (2007). *Oxidación del efluente de un humedal artificial de flujo vertical para reusó en agricultura*
- Morales, F. (2011). *Evaluación de canna sp. y heliconia sp. para el tratamiento de aguas servidas mediante un humedal artificial a escala piloto*.
- Otalora, A. (2011). *Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de caño gandul*. Universidad Nacional de Colombia
- Red Nacional de Jardines Botánicos (2008). *Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviado de rellenos sanitarios*
- Sánchez, R. (2011). *Evaluación del humedal artificial de la hostería Cuicocha, utilizado para el tratamiento de aguas residuales domesticas*
- Sernanp (2008). *Humedales en areas protegidas, fuentes de vida y desarrollo*. (Ministerio del Ambiente).
- Setty, K. (2012). *Manual de construcción: humedales construidos para el tratamiento de aguas negras*. Bren school of environmental science and management, university of California, Santa Barbara.
- Silva, A. (2005). *Humedales Artificiales*. Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, E., Sanabria, A. (2012). *Optimización del humedal artificial subsuperficial para tratamiento de aguas residuales*. Programa de especialización en ingeniería ambiental.
- Zamora, F., Santiago, E. (2010). *Diseño de un humedal artificial para tratamiento del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Las Arenitas*. Mexicali, Baja California.

