

Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas

Phytoremediation with artificial wetlands for the treatment of swine wastewater

Recibido: 01-07-10 Aceptado 19-10-10

SERGIO ADRIÁN ARIAS MARTÍNEZ¹,
FERNEY MAURICIO BETANCUR TORO²,
GONZALO GÓMEZ ROJAS³,
JUAN PABLO SALAZAR GIRALDO⁴,
MARTA LUCÍA HERNÁNDEZ ÁNGEL⁵

Resumen

Este artículo es el resultado de la investigación aplicada en la búsqueda de soluciones a problemas ambientales a través de tecnologías sostenibles. Consistió en el diseño e implementación de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales de la unidad productiva de cerdos del Centro de los Recursos Naturales Renovables La Salada, basado en un ensayo piloto de fitorremediación. El propósito del proyecto es evaluar la efectividad de los humedales para reducir la carga contaminante como sistemas económicos de tratamiento en las granjas porcícolas en Colombia.

Palabras clave: Fitorremediación, humedales artificiales, tratamiento de aguas residuales, sector pecuario, tecnologías de tratamiento alternativo; ambiental; tecnologías limpias.

Abstract

This article is the result of applied investigation looking for the solution of environmental problems through sustainable technologies, and consisted in the design and implementation of a system of artificial wetlands to treat wastewater from pig production unit of the Centre Renewable Natural Resources "La Salada", based on a pilot essay of phytoremediation. The purpose of the project was to evaluate the effectiveness of wetlands to reduce the pollutant load, as economic systems of treatment for hog producers in Colombia.

Key words: phytoremediation; constructed wetlands; wastewater treatment; livestock; alternative treatment technologies; environmental; clean technologies

Introducción

El desarrollo de la industria porcícola en Colombia es desde hace tres décadas una de las actividades agropecuarias de mayor importancia en la producción y comercialización de ganado porcino con un gran impacto en la generación de fuentes de trabajo para aquellos granjeros y agricultores que ven en esta actividad una fuente de sustento económico para sus familias.

La producción porcícola genera en desarrollo de sus actividades diversos problemas y el tratamiento de las aguas residuales uno de ellos, pues su mal manejo produce el deterioro de los suelos cuando son regados con estas cau-

^{1,2} Técnico y Tecnólogo en Control Ambiental del SENA.

³ Ingeniero Forestal de la Universidad Nacional. Profesional del Centro de los Recursos Naturales Renovables La Salada – SENA.

⁴ Geólogo, especialista en Evaluación del Impacto Ambiental y candidato a PhD en Ingeniería ambiental de la Universidad de Antioquia. Profesional del Centro de los Recursos Naturales Renovables La Salada – SENA.

⁵ Ingeniera Química de la Universidad Nacional. Especialista en Ingeniería Ambiental y MsC en Ingeniería Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana. Coordinadora del Laboratorio de Servicios tecnológicos del Centro de los Recursos Naturales Renovables La Salada.
Autores para correspondencia: mhernandez@sena.edu.co; jpsg050@gmail.com

sando con ello la contaminación de aguas subterráneas y superficiales por escorrentía. La carga orgánica presente en estas aguas origina una variación en las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo y del agua, lo cual suscita un desequilibrio ecológico que difícilmente se puede remediar en el corto plazo. Otro de los impactos ambientales generados son los malos olores que de ellas y de los campos regados se desprenden como producto de la descomposición de las excretas porcinas. Por esta razón se hace necesario contar con un sistema de tratamiento factible de construir en zonas rurales que permita la remoción de contaminantes y a su vez cumplir con la legislación ambiental sobre vertimientos líquidos.

En la búsqueda de una solución al problema de contaminación de los suelos y de las fuentes de agua por las descargas de las aguas residuales porcinas del Centro de los Recursos Naturales Renovables La Salada y de casos similares en el departamento de Antioquia, este trabajo de investigación se planteó como objetivo la selección y evaluación de las especies vegetales nativas, con vistas a diseñar e implementar un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales producto de la explotación de la actividad porcina.

Dentro de las tecnologías que se utilizan en el mundo para el tratamiento de las aguas residuales porcinas los humedales artificiales ocupan un lugar importante ya que con ellos se busca aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos que se presentan al interactuar entre sí el agua, el medio filtrante, las plantas, los microorganismos y la at-

mósfera. Ello conlleva la remoción de sólidos suspendidos por sedimentación y filtración, a la biodegradación de la materia orgánica a partir de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos y a la eliminación de microorganismos patógenos por sedimentación, filtración y la acción depredadora de otros organismos, además de que se logra la remoción de metales pesados por precipitación y absorción, y una disminución de los hidróxidos y sulfuros. Estos módulos para el tratamiento de aguas residuales pecuarias constituyen igualmente una solución económicamente viable.

Fitorremediación

Las técnicas de fitorremediación se caracterizan por ser una práctica de limpieza pasiva y estéticamente agradable que aprovechan la capacidad de las plantas y la energía solar para el tratamiento de una gran variedad de contaminantes del medio ambiente (EPA, 1996). En esta técnica las plantas actúan como trampas o filtros biológicos que descomponen los contaminantes y estabilizan las sustancias metálicas presentes en el suelo y agua al fijarlos en sus raíces y tallos, o metabolizándolos tal como lo hacen los microorganismos para finalmente convertirlos en compuestos menos peligrosos y más estables, como dióxido de carbono, agua y sales minerales (Peña, 2001).

En la fitorremediación se identifican varios tipos de procesos de remediación que varían según las partes de la planta que participan o los microorganismos que contribuyen con la degradación de los contaminantes, algunos de los cuales se presentan en la Tabla 1 que describe los procesos involucrados y los contaminantes que se pueden tratar.

Tabla 1. Procesos de fitorremediación

Tipo	Proceso involucrado	Contaminación tratada
Fitoextracción	Las plantas se usan para concentrar los contaminantes en las partes cosechables (principalmente la parte aérea).	Diversas aguas contaminadas con cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio y zinc
Rizofiltración	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar los contaminantes a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos.	Aguas contaminadas con cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc, isótopos radioactivos y compuestos fenólicos.
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes se usan para reducir su movilidad y evitar el pasaje a capas subterráneas o al aire.	Lagunas de deshecho de yacimientos mineros, aguas residuales. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos).	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc, aguas residuales agropecuarias.
Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican los contaminantes o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Aguas residuales agropecuarias, aguas con mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).
Fitodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Aguas residuales agropecuarias, Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzeno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

Fuente: (Reigosa, 2004)

Humedales artificiales

Los humedales son áreas que se caracterizan por tener un suelo saturado de agua y una comunidad viviente (plantas y animales) adaptados a la vida acuática o a un suelo saturado. El término humedal (*wetland*, en inglés) se usa para definir áreas que tienen tres componentes típicos (CIEMA, 2005):

- **Presencia de agua:** el área permanece inundada permanente o periódicamente con una profundidad menor de un metro.
- **Suelos característicos:** clasificados como hídricos.
- **Vegetación:** prevalecen las plantas macrófitas adaptadas a las condiciones hidrológicas y del suelo.

Existen dos tipos de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de aguas residuales: los de flujo superficial (*FWS – Free Water Surface*) y los de flujo subsuperficial (*SFS – Sub Surface Flow*). A continuación se explicará cada uno de ellos.

Humedal artificial de flujo superficial

Consiste en canales con la superficie del agua expuesta a la atmósfera y el fondo constituido por suelo relativamente impermeable, o con una cubierta impermeable, vegetación emergente y niveles de agua poco profundos que oscilan entre 0.1 y 0.6 metros (Ñique, 2004). El tratamiento se produce durante la circulación lenta del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación.

Este sistema se puede dividir, de acuerdo con el tipo de macrófitas (CIEMA, 2005), en:

- **Sistemas con macrófitas flotantes:** formados por grandes lagunas con bajos niveles de agua y provistas de plantas macrófitas que flotan libremente en la superficie. Sus raíces sumergidas tienen un buen desarrollo (Figura 1).

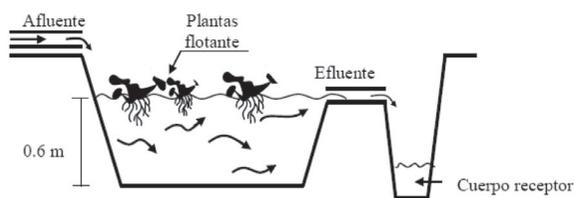


Figura 1. Humedal de flujo superficial con macrófitas flotantes (CIEMA, 2005)

- **Sistemas con macrófitas sumergidas:** compuestos por lagunas con bajo nivel de agua y plantadas con plantas macrófitas cuyo tejido fotosintético está totalmente sumergido. Estas plantas solo crecen bien en aguas que contienen oxígeno disuelto, por lo cual no se utilizan para aguas residuales con alto contenido de materia

orgánica biodegradable ya que la descomposición microbiana provoca condiciones anóxicas (Figura 2).

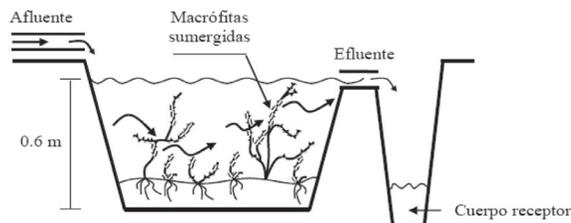


Figura 2. Humedal de flujo superficial con macrófitas sumergidas (CIEMA, 2005).

Humedal artificial de flujo subsuperficial

Este tipo de sistemas con macrófitas emergentes que consiste en un filtro biológico relleno de un medio poroso (por ejemplo piedra volcánica, grava), en el cual las plantas macrófitas se siembran en la superficie del lecho filtrante y las aguas residuales pretratadas atraviesan de forma horizontal o vertical el lecho filtrante, en estos sistemas el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio granular.

Estos humedales se clasifican a su vez en humedales artificiales de flujo horizontal y humedales artificiales de flujo vertical, según la manera como las aguas residuales pretratadas atraviesan el lecho filtrante.

- **Humedales de flujo horizontal**

En este tipo de humedal las aguas residuales fluyen lentamente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, en una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta la superficie de recolección del efluente (Figura 3).

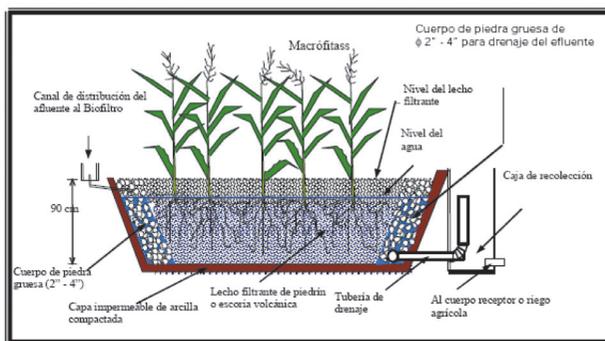


Figura 3. Humedal subsuperficial de flujo horizontal (CIEMA, 2005)

- **Humedal artificial de flujo vertical**

Aquí las aguas pretratadas se distribuyen de manera uniforme e intermitente sobre la superficie del lecho filtrante y luego percolan hacia la zona de recolección (Figura 4).

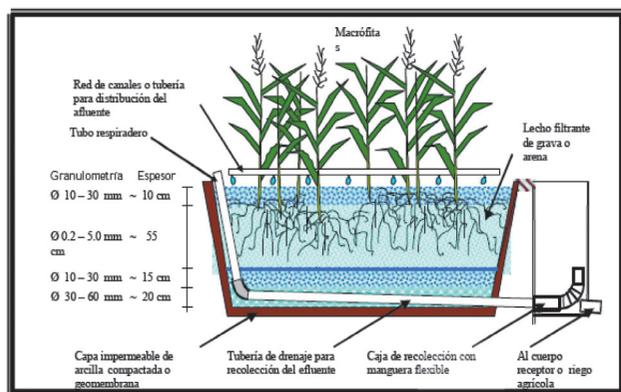


Figura 4. Humedal subsuperficial de flujo vertical (CIEMA, 2005).

Sistema experimentado

En la investigación se compararon los diferentes sistemas de humedales y por sus condiciones y ventajas se seleccionó el humedal subsuperficial de flujo horizontal. Dentro de las ventajas de estos humedales se tienen:

- Mínima presencia de plagas.
- Ausencia de malos olores en la zona de los lechos
- Facilidad de operación
- La condición de modular permite adicionar nuevas unidades de acuerdo con las características de las aguas residuales finales.
- Las aguas obtenidas se pueden usar nuevamente.

Estos humedales funcionan basados en mecanismos en los cuales las plantas juegan un papel importante al contribuir en la depuración de las aguas residuales junto con la función realizada por los microorganismos que se generan dentro de los medios filtrantes. Algunos de estos procesos son:

- La eliminación de los sólidos en suspensión por filtración a través de los medios sobre los cuales crecen las plantas y las raíces.
- La eliminación de materia orgánica por la acción de microorganismos, principalmente bacterias aerobias favorecidos por la aireación obtenida por las plantas a través de sus raíces. Solo en las zonas más profundas se presenta, después de llevar algún tiempo en operación, una zona anaerobia donde igualmente se dan procesos de degradación de la materia orgánica.
- La eliminación de nitrógeno que en el caso de las aguas porcinas es el principal contaminante. Esta se realiza por absorción directa por las plantas las cuales generan procesos de nitrificación-desnitrificación favorecidos por la existencia de zonas aerobias y anaerobias.
- La eliminación de fósforo se produce mediante la transformación directa que las plantas realizan y por los fenómenos de adsorción que efectúan los componentes del suelo.

- La eliminación de patógenos se da por adsorción sobre las partículas del sustrato así como por el efecto deletéreo que sobre los organismos patógenos ejercen los antibióticos producidos por las raíces de las plantas y por la acción depredadora de bacterias y protozoos.

Características de las excretas porcinas

Para realizar el diseño de un humedal es muy importante saber las características de las aguas objeto del proceso. A continuación se resaltan algunas de ellas:

Las aguas residuales de las porquerizas están formadas por heces fecales y orina mezcladas con el material utilizado como cama, residuos de alimento, polvo, otras partículas y una cantidad variable de agua proveniente de las labores de limpieza y por pérdidas desde los bebederos.

La orina representa aproximadamente el 45% de la excreta y las heces el 55%. El contenido de humedad de la excreta es de alrededor del 88% y el contenido de materia seca es del 12%. Cerca del 90% de los sólidos se excretan en las heces; la orina contiene el 10% de los sólidos.

La densidad de la excreta fresca es levemente menor de 1.0 (aunque son comunes las referencias de valores ligeramente superiores). El total de los sólidos tiene una densidad baja, de 0.84 kg/l. La excreta porcina contiene sólidos que flotan y sólidos que se sedimentan, además de sólidos en suspensión (Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2002).

Parámetros físico-químicos

Se ha estimado que se producen por día 0,25 kg de demanda biológica de oxígeno (DBO) y 0,75 kg de demanda química de oxígeno (DQO) por cada 100 kg de peso vivo. Por lo general, la DBO es un tercio de la DQO y cerca de un tercio de los sólidos totales (STT) en las excretas porcinas frescas (Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; 2002).

El pH varía entre 6 y 8. Cuanto más frescas sean las excretas, más neutro será su pH. El nitrógeno es el elemento de fertilización más importante debido a que el alimento suministrado a los cerdos contiene volúmenes altos de proteína. En las excretas, el nitrógeno total se compone principalmente de nitrógeno orgánico y amoniacal (TAN). Del nitrógeno total producido, el 60% está en forma amoniacal (TAN) y el 40% en forma orgánica (TON). La gran mayoría del nitrógeno de las heces fecales es orgánico mientras que la totalidad de la orina es amoniacal.

Metodología desarrollada durante la investigación

A continuación se presenta la metodología con la cual se realizaron los procedimientos para el desarrollo del diseño

de un sistema piloto de fitorremediación con humedales artificiales para la remoción de contaminantes de las aguas residuales generadas en las explotaciones porcinas del Centro de los Recursos Naturales Renovables La Salada.

Caracterización las aguas residuales de la unidad productiva de cerdos del Centro

Para el desarrollo de este proyecto se tomaron durante un mes muestras compuestas conformadas por muestras simples (una por cada área de la explotación: ceba, levante, cría y reproducción) con las cuales se evaluaron las características mayores y menores presentadas para los diferentes parámetros en la explotación, entre los que se encuentran temperatura, pH, conductividad, oxígeno disuelto, DBO, DQO, sólidos totales (ST), sólidos suspendidos (SS), dureza total, dureza cálcica, acidez, alcalinidad, nitrógeno total, sulfatos, fósforo, zinc, manganeso, potasio, sodio, y una caracterización microbiológica para coliformes, mesófilos y hongos.

Selección de las especies vegetales y de los medios granulares con posibilidades de ser utilizados en el humedal artificial

La selección de las especies vegetales y de los medios granulares estuvo orientada a la búsqueda de información sobre algunas especies de plantas nativas en humedales de quebradas y ríos cercanos al Centro La Salada, que por sus características tuviesen potencial para ser utilizados en el proceso de fitorremediación en los humedales artificiales (Cerón y Vivas, 1995).

Los medios granulares fueron seleccionados teniendo en cuenta el costo de cada material, la disponibilidad en las zonas cercanas a los ensayos y las características de los terrenos donde se encontraban las plantas seleccionadas, con el fin de que estos no cambiaran mucho y fuera más fácil la adaptación de las plantas.

Evaluación del proceso de propagación y adaptación de las plantas a los medios de cultivo y al agua residual

Esta actividad se desarrolló por medio de un ensayo preexperimental con el cual se identificaron y seleccionaron tres especies de plantas y un medio de cultivo para el diseño y la construcción de la unidad piloto.

Este ensayo consistió en seleccionar cinco tipos de medios filtrantes, a saber: grava, verniculita, arena, arenón, cisco de arroz y diez plantas: matandrea, pasto pará, cebollita, coquito, flor amarilla (semilla), pasto taner, pontederiácea n° 1, pontederiácea n°2, coquito miniatura y flor moradita (semilla). Estas plantas se sembraron en macetas en los cinco tipos de medios filtrantes (todos por triplicado)

e inicialmente regadas con agua y una solución nutritiva que les permitiera la adaptación al medio. Posteriormente fueron regadas con las aguas residuales porcinas para identificar la capacidad de las especies nativas de adaptarse a cada medio filtrante y la utilización de las aguas residuales realizada (Fotos 1 y 2)



Foto 1. Ensayo preliminar



Foto 2. Proceso de siembra de plantas

Las aguas resultantes de cada planta fueron evaluadas en los diferentes parámetros para estimar los cambios obtenidos al pasar por cada planta y por cada medio filtrante.

En esta etapa se llevó a cabo una evaluación de las variaciones fisiológicas de las plantas.

Establecimiento de los parámetros físicos, químicos e hidráulicos útiles para el diseño y construcción de la unidad piloto

En esta etapa se aplicaron los resultados obtenidos en los ensayos anteriores los cuales permitieron seleccionar tres plantas y los medios filtrantes más adecuados. También se diseñó y construyó la unidad piloto de los humedales según los cálculos de los requerimientos mínimos de área,

marcando de este modo la diferencia con los sistemas de humedales artificiales convencionales sin que por ello se sacrifique la eficiencia del tratamiento.

El diseño se basó en el modelo para la remoción de DBO en humedales de flujo subsuperficial empleado por Sherwood C. y Reed (Lara, 1999).

Evaluación del comportamiento del agua residual durante el paso por la unidad piloto y determinación de la eficiencia y el porcentaje de remoción de los contaminantes

Las tres unidades piloto fueron montadas con los medios filtrantes seleccionados y al ser tres plantas las adaptadas su disposición se hizo en canecas con adaptaciones de tubería. En cada unidad piloto había una planta pero los medios filtrantes eran iguales en las tres unidades (Foto 3.).



Foto 3. Unidades del sistema piloto del humedal artificial

La experimentación de la unidad piloto se llevó a cabo con la adaptación de las plantas a las características y concentraciones del agua residual. Posteriormente se evaluó el comportamiento de la calidad del agua tratada por la unidad con diferentes tiempos de retención hidráulica, para lo cual se realizaron caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas en el laboratorio de servicios tecnológicos del Centro La Salada. Con los datos resultantes se estimó la eficiencia de remoción de los contaminantes.

Resultados

Caracterización del agua residual de la unidad productiva

Los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio se muestran en la Tabla 2, en la cual se pueden observar con mayor detalle las características físicas, químicas y microbiológicas del agua residual generada en la unidad productiva de cerdos del Centro de los Recursos Naturales Renovables La Salada.

Tabla 2. Resultados de los análisis físico-químicos y microbiológicos del agua residual de la unidad productiva

FISICOQUÍMICO		
Análisis	Unidades	Valor
Temperatura	°C	23
pH		8,12
OD	mg/l	0,25
Conductividad	ms/Cm	5,23
DBO	mg/l	116,1
DQO	mg/l	377,5
ST	mg/l	7476
SS	mg/l	3444
Dureza total	mg/l	35,6
Dureza cálcica	mg/l	28,8
Acidez	mg/l	16
Alcalinidad	mg/l	128
Nitrógeno total	mg/l	392
Sulfatos	mg/l	619,61
Fosforo	mg/l	116,2
Zinc (Zn)	mg/l	3.257
Fe (Hierro)	mg/l	2.776
Cu (cobre)	mg/l	0.475
Mn (manganeso)	mg/l	0.412
K (potasio)	mg/l	11.850
Na (sodio)	mg/l	6.423
MICROBIOLÓGICO		
Análisis	Unidades	Valor
Coliformes	UFC	>10000
Mesófilos	UFC	>10000
Hongos	UFC	113

Fuente: Los autores

Como se puede advertir son aguas con un alto contenido de materia orgánica, sólidos suspendidos, nitrógeno total, sulfatos y potasio entre otros.

Delimitación de especies vegetales y medios granulares

Las especies seleccionadas para la preexperimentación fueron identificadas y recolectadas en los humedales naturales ubicados en las laderas del río Aburrá en la vereda La Clara del municipio de Caldas, Antioquia (Tabla 3 y Figura 5).

Medios filtrantes

Los medios granulares fueron seleccionados por sus características y por la disponibilidad del material en la zona (Figura 6).

Tabla 3. Especies vegetales identificadas y evaluadas en la preexperimentación

NOMBRE VULGAR	FAMILIA	GÉNERO	ESPECIE
Matandrea	Zingyberaceae	<i>Hedychium</i>	<i>montana</i>
Pasto pará	Gramineae	<i>Brachiaria</i>	<i>mutica</i>
Cebollita	Cyperaceae	<i>Erioporum</i>	<i>schechzeri</i>
Coquito	Cyperaceae	<i>Cyperus</i>	<i>rotundus</i>
Flor amarilla (semilla)	Asteraceae	<i>Taraxacum</i>	<i>officinale</i>
Pasto taner	Gramineae	<i>Brachiaria</i>	<i>arrecta</i>
Pontederiácea N° 1	Pontederiáceae	<i>Heterantera</i>	<i>sp.</i>
Pontederiácea N°2	Pontederiáceae	<i>Eichhornia</i>	<i>sp.</i>
Coquito miniatura	Cyperaceae	<i>Garex</i>	<i>sp.</i>
Flor moradita (semilla)	Poligonaceae	<i>Peñigonun</i>	<i>sp.</i>

Fuente: Los autores.



Figura 5. Plantas evaluadas durante la preexperimentación.

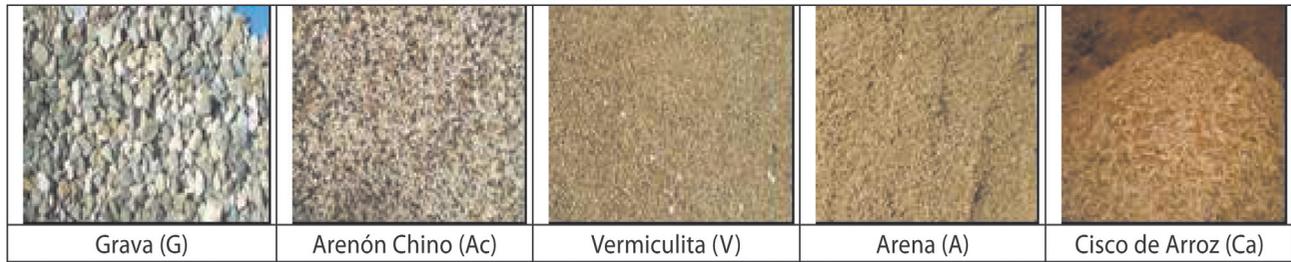


Figura 6. Medios granulares evaluados durante la preexperimentación

Resultados de la preexperimentación

En la Tabla 4 se pueden observar las plantas seleccionadas para el tratamiento. Se caracterizaron por tener mayor adaptabilidad al ambiente y el agua residual de cerdos.

Tabla 4. Plantas seleccionadas tras la preexperimentación

NOMBRE VULGAR	FAMILIA	GÉNERO	ESPECIE
Matandrea (M)	Zingiberaceae	<i>Hedychium</i>	<i>montana</i>
Pasto pará (P1)	Gramineae	<i>Brachiaria</i>	<i>mutica</i>
Pasto taner (P2)	Gramineae	<i>Brachiaria</i>	<i>arrecta</i>

Los mejores medios filtrantes seleccionados fueron la vermiculita y la arena. Sus ventajas son:

- Poseer mayor capacidad de retención hidráulica lo que favorece mayor remoción de la DBO.
- Ser los medios donde las plantas tuvieron mejor adaptación y desarrollo de raíz, tallo y hojas.
- Permitir una mayor retención y sedimentación de sólidos totales, gracias a la porosidad y el diámetro de los materiales filtrantes.

Esta relación entre los dos medios filtrantes y las tres especies vegetales dieron diferentes porcentajes de remoción para los principales contaminantes del agua residual de la unidad porcícola (Figuras 7, 8 y 9).

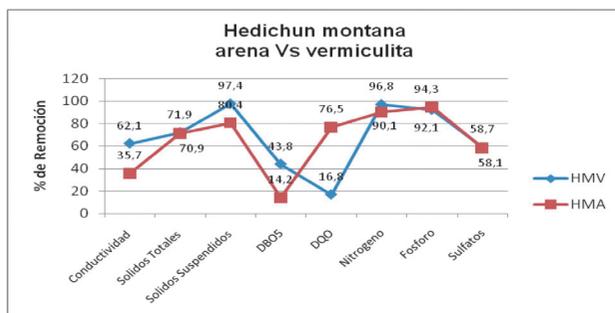


Figura 7. Remoción de contaminantes combinando la especie *Hedichun montana* (Matandrea) al comparar los medios arena (HMV - *hedichun montana* con vermiculita) vs vermiculita (HMA- *hedichun montana* con arena). Nótese para ambos medios la remoción de contaminantes como sólidos suspendidos (mayor al 80 %), nitrógeno (mayor al 90 %) y fósforo (mayor al 92 %).

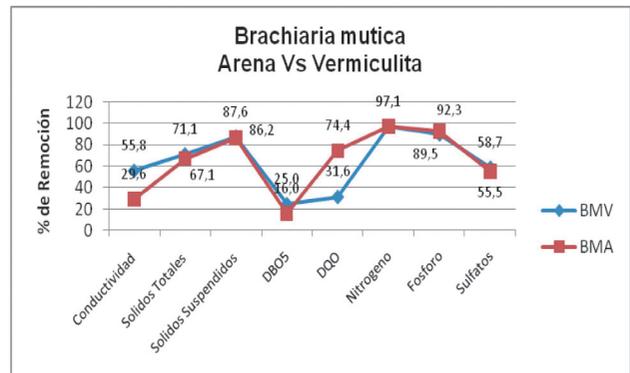


Figura 8. Remoción de contaminantes combinando la especie *Brachiaria mutica* (Pasto pará) al comparar los medios arena (BMA - *Brachiaria mutica* con arena) vs vermiculita (BMV - *Brachiaria mutica* con vermiculita). Al igual que con la especie *Hedichun montana*, para ambos medios se presenta una alta remoción de contaminantes como sólidos suspendidos (mayor al 86 %), nitrógeno (mayor al 97 %) y fósforo (mayor al 89 %).

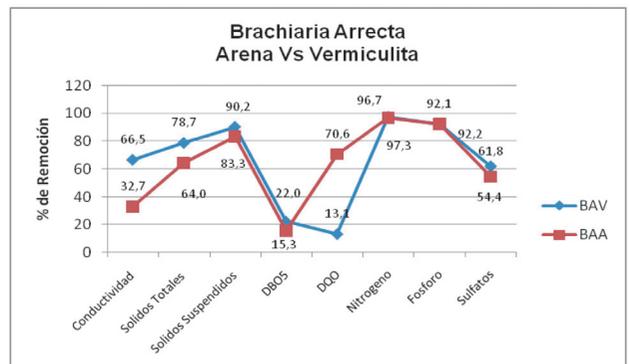


Figura 9. Remoción de contaminantes combinando la especie *Brachiaria arrecta* (Pasto taner), al comparar los medios arena (BAA - *Brachiaria arrecta* con arena) Vs vermiculita (BAV - *Brachiaria arrecta* con vermiculita). Al igual que con las especies *Hedichun montana* y *Brachiaria mutica* para ambos medios se presenta una alta remoción de contaminantes como sólidos suspendidos (mayor al 83 %), nitrógeno (mayor al 96 %) y fósforo (mayor al 92 %).

Diseño y construcción de la unidad piloto

El diseño y la construcción de la unidad piloto se hicieron según el modelo de Sherwood C. y Reed (Lara, 1999). A continuación se muestran las variables (Tabla 5) y los cálculos de diseño de la unidad piloto y del humedal (Fotos 4 y 5).



Foto 4. Construcción del humedal



Foto 5. Unidad piloto en funcionamiento

Tabla 5. Variables de diseño de la unidad piloto

DBO _a : 116.1 mg/l	n: 0.35 ks: 5000m ³ /m ² *día	
EDBO ₅ : 80%	Temperatura: 22°C	
DBO _e : 23.22 mg/l	Q:	K ₂₀ : 1.104d ⁻¹
SSt: 7476mg/l	L: 0.62m	
m: 0.001	W: 0.35	
y: 0.15 m	As:0.651m ²	

Notas:

KT: Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d-1.

T: Temperatura.

DBO: Concentración DBO₅ a la entrada al sistema.

EDBO₅: Eficiencia requerida de % remoción DBO₅ (Decreto 1594 de 1984).

DBO_e: Concentración DBO₅ a la salida del sistema.

Q: Caudal.

m: Pendiente.

y: Profundidad del humedal.

n: Porosidad.

w: Ancho.

L: Largo.

As: Área superficial.

$$kt = k_{20} * (1.60)^{(T-20)}$$

$$kt = 1.104 * (1.60)^{(22-20)}$$

$$kt = 2.83 \text{ d}^{-1}$$

$$As = \frac{Q \times (\ln DBO_a - \ln DBO_e)}{(kt) \times (y) \times (n)}$$

$$Q = \frac{As \times (kt) \times (y) \times (n)}{(\ln DBO_a - \ln DBO_e)}$$

$$Q = \frac{0.651 \times (2.83) \times (0.15) \times (0.35)}{(\ln 116.1 - \ln 23.22)}$$

$$Q = \frac{60l}{\text{día}}$$

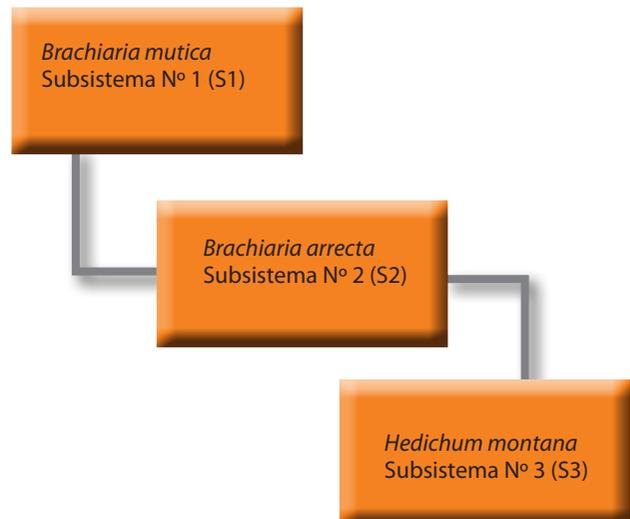
Tiempo de retención hidráulica TRH:

$$TRH = \frac{As \times y \times n}{Q}$$

$$TRH = \frac{0.651 \times 0.15 \times 0.35}{0.06}$$

$$TRH = 0.57 \text{ día} \times \frac{24h}{1 \text{ día}} = 13.68 \text{ h}$$

La unidad piloto está compuesta por tres subsistemas y en cada uno se ubica una especie de planta de la siguiente manera:



El escalonamiento se debe principalmente al comportamiento que tienen las plantas respecto de las concentraciones de los contaminantes del agua residual de cerdos, pues *Brachiaria mutica* (S1) posee un excelente desarrollo de raíces, tallos y hojas en presencia de aguas con alto contenido de microorganismos. *Brachiaria arrecta* (S2) no presenta cambios importantes en su morfología aunque tuvo un lento crecimiento. Finalmente *Hedychium montana* (3) se caracterizó por poseer un estado de estrés al estar en contacto con el agua residual, sin embargo la planta seguía con su desarrollo normal. El material filtrante de las tres unidades pilotos del humedal (S1, S2 y S3) está compuesto por capas de vermiculita, arena, arenón chino y grava, aumentándose el tamaño de la partícula a mayor profundidad (Figura 10)

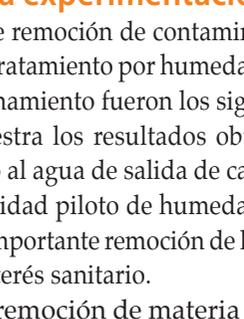
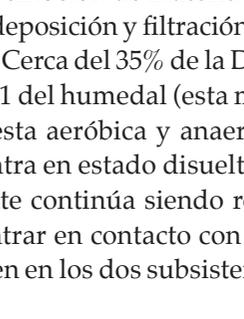
Vermiculita		20%
Arena		50%
Arenón Chino		10%
Grava		15%

Figura 10. Perfiles del material filtrante en los subsistemas de la unidad piloto de humedal artificial. Nótese las fracciones usadas de cada material.

Resultados de la experimentación

Los porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos en el sistema de tratamiento por humedales artificiales en un mes de funcionamiento fueron los siguientes:

La Figura 11 muestra los resultados obtenidos luego del análisis realizado al agua de salida de cada uno de los subsistemas de la unidad piloto de humedal artificial. En ella se advierte una importante remoción de los principales contaminantes de interés sanitario.

En el sistema la remoción de materia orgánica fue rápida gracias a la deposición y filtración en cada uno de los subsistemas. Cerca del 35% de la DBO aplicada es removida en el S1 del humedal (esta materia orgánica es descompuesta aeróbica y anaeróbicamente) y el resto se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal. Igualmente continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en los dos subsistemas siguien-

tes, donde al final del S3 se presenta una remoción superior al ochenta por ciento.

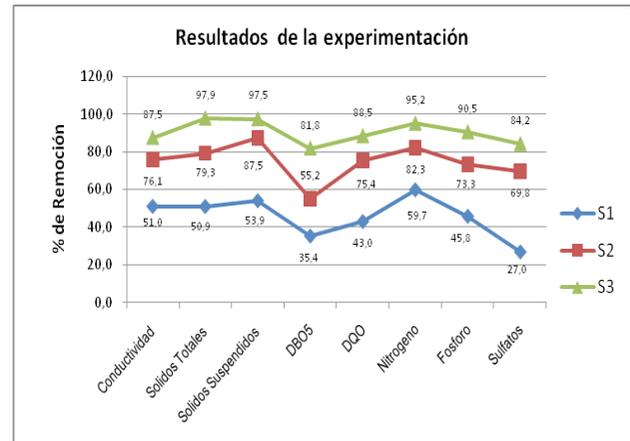


Figura 11. Porcentajes de remoción de contaminantes del resultado de la experimentación.

El nitrógeno orgánico que entra en el humedal está típicamente asociado con la materia orgánica del agua residual y con algas. La remoción inicial de estos materiales como sólidos suspendidos es más o menos rápida, gran parte del nitrógeno orgánico sufre descomposición o mineralización y se convierte en nitrógeno amoniacal en el agua (Lara, 1999). Por lo tanto la remoción del nitrógeno se encuentra asociada con la remoción de sólidos suspendidos SST la cual en el S1 presenta una tasa superior al 50% y en nitrógeno del 59%. Posteriormente en los S2 y S3 merced a procesos de amonificación seguidos de nitrificación microbiana y desnitrificación se alcanza una remoción de nitrógeno superior al noventa por ciento.

El fósforo presentó una remoción del 90%. De este total el 75% se fijó en el lecho filtrante y el resto fue asimilado por las plantas.

En la Figura 12 se observa el agua de salida en cada uno de los subsistemas del humedal artificial objeto de la experimentación.



Figura 12. Agua de salida de los subsistemas. De izquierda a derecha: agua de entrada, agua tras el tratamiento en el sistema S1, agua tras el tratamiento en el sistema S2 y finalmente agua tras el tratamiento S3.

Conclusiones

Las plantas que se seleccionan para los humedales artificiales deben estar acordes con el clima y las características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas que se van a tratar debido a la presencia de componentes que hacen difícil la sobrevivencia de las plantas y del sistema de filtro biogeoquímico.

La cascarilla de arroz fue descartada para ser empleada en la unidad piloto como medio granular en tratamientos de agua residual por incidir negativamente en la calidad del efluente, ya que presentó elevados niveles de color (> 65 Pt-Co) y olor (característico de agua residual en descomposición anaerobia).

Los medios filtrantes deben ser inertes y poseer condiciones que no aporten nutrientes, color o cambios en los parámetros fisicoquímicos de las aguas tratadas. Los humedales artificiales demuestran nuevamente ser una excelente alternativa para el tratamiento de aguas residuales producto de las actividades del sector pecuario, las cuales se caracterizan por poseer un alto contenido de materia orgánica.

Los humedales artificiales al combinar medios filtrantes y diferentes tipos de plantas logran las remociones de DBO₅ y SST en las cantidades exigidas por la norma ambiental (mínimo un 80 %) siempre y cuando se realicen las pruebas piloto. En las condiciones ambientales de La Salada las plantas seleccionadas dieron los resultados esperados para las aguas residuales de la unidad porcina, lo cual es un indicativo de que en cada región se deben ensayar plantas de la zona, los medios filtrantes y los caudales de entrada con el fin de definir el sistema más óptimo. No existen sistemas estándar para todas las aguas residuales y para todas las zonas rurales de Colombia, por tanto se debe contar con el apoyo de los aprendices e instructores del Sena conocedores del tema, o de profesionales de las

ciencias sanitarias y ambientales con vistas a conseguir los mejores resultados.

En futuras investigaciones se deben estudiar en detalle todos los procesos que ocurren entre las raíces, el agua residual, los microorganismos y el material filtrante.

Referencias

- CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE (CIEMA). Tecnología sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Proyecto ASTEC SUCHER & HOLZER. Austria - Nicaragua. Managua, Nicaragua: 2005. 43 p.
- CERÓN VIVAS, A. Y ROJAS SÁNCHEZ, P. Uso de macrófitas en depuración de aguas residuales. Santiago de Cali, Colombia, 1995, 114 p. Trabajo de grado (Ingeniero Sanitario). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Programa académico de ingeniería sanitaria.
- EPA 542-F-96-025. Guía del ciudadano: medidas fitocorrectivas [en línea]. Estado Unidos, 1996. Disponible en <http://www.epa.gov/swertio1/download/remed/spanphyt.pdf>
- LARA BORRERO, J. A. Depuración de aguas residuales Municipales con humedales artificiales. Barcelona, España, 2009, 122 p. Trabajo final (Titulo Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental). Universidad Politecnica de Cataluña. Instituto Catalan de Tecnologia. Disponible en: <http://sites.google.com/site/humedalesartificiales/7-diseno-hidraulico>
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PORCICULTORES. Guía ambiental para el subsector porcicola. Colombia. 2002, 102p. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/documentos/porc%C3%ADcola.pdf>
- ÑIQUE ÁLVAREZ, M. Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. Perú, Sociedad Peruana de Gestión Ambiental [en línea]. Disponible en: http://www.geocities.com/sociedadpga/publicaciones/anoInro1/humedales_tratamiento_aguas.htm [Citado 25 Mar 2004]
- PEÑA, C. Toxicología ambiental: evaluación de riesgos y restauración ambiental [en línea]. Estados Unidos, 1996-2001. Disponible en: <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/c4-3-1-1.html> [Last update: 7 Jun 2001]

Nos emociona
cuando lo que
llevamos
emociona

www.4-72.com.co

472
¡Es tu correo!