

**APLICACIÓN TECNOLÓGICA DE LAS MACROFITAS A LA DEPURACIÓN DE  
AGUAS RESIDUALES CON LA AYUDA DE MICROORGANISMOS**

**MAGDA LILIANA VALERO ALVARADO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2006**

**APLICACIÓN TECNOLÓGICA DE LAS MACROFITAS A LA DEPURACIÓN DE  
AGUAS RESIDUALES CON LA AYUDA DE MICROORGANISMOS**

**MAGDA LILIANA VALERO ALVARADO**

**Monografía para Optar al Título de  
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director**

**LUDDY PATRICIA NIETO ESTEVEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2006**

## RESUMEN

**TITULO: APLICACIÓN TECNOLÓGICA DE LAS MACROFITAS A LA DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES CON LA AYUDA DE MICROORGANISMOS \***

**AUTOR: MAGDA LILIANA VALERO ALVARADO**

**Palabras Clave:** tratamiento de aguas residuales, plantas acuáticas, macrófitas, microorganismos, fitorremediación.

### **DESCRIPCIÓN:**

La contaminación del agua es un serio problema ambiental que se ha originado debido al creciente desarrollo industrial y urbano que tiene como resultado la adición de componentes externos, al ciclo natural de la misma, que han modificado su calidad a un grado tal que se restringe o impide su utilización normal.

Hoy es prioridad desarrollar tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales que permitan controlar el creciente deterioro del medio ambiente a un costo bajo o moderado y en lo posible que cumplan con criterios como recuperación de los recursos, fácil operación y mantenimiento.

El tratamiento utilizando plantas macrófitas, con ayuda de microorganismos se ha presenta como una excelente alternativa frente a los tradicionales métodos ofreciendo la posibilidad de remover sustancias contaminantes como metales pesados, hidrocarburos, sustancias radiactivas y materia orgánica y en algunos casos producir materiales útiles.

El resultado principal de la revisión documental fue confirmar la viabilidad de usar macrófitas como parte del tratamiento secundario o terciario de las aguas residuales, ya que desde el punto de vista ambiental y económico presenta muchas ventajas atractivas, entre las que se destacan que son sistemas relativamente sencillos de construir, de operar, no requieren para su funcionamiento de grandes insumos de energía o maquinaria ni de personal especializados, existe una amplia disponibilidad de estas especies especialmente en el trópico, con capacidad para resistir a medios altamente contaminados, absorber los contaminantes y crecer manteniendo un crecimiento relativamente acelerado.

---

\* Monografía para optar al Título de “Especialista en Ingeniería Ambiental”

## SUMMARY

**TITLE: TECHNOLOGICAL APPLICATION OF MACROPHYTES TO THE PURIFICATION OF RESIDUAL WATER WITH MICROORGANISMS CONTRIBUTION\***

**AUTHOR: MAGDA LILIANA VALERO ALVARADO**

**Keywords:** residual water treatment, macrophytes, aquatic plants, microorganism, phytoremediation.

### **DESCRIPTION:**

The contamination of the water is a serious environmental problem that has been originated on the growing urban and industrial development that has as a result on the addition of external components, to their natural cycle, that have modified its quality to such a degree that is restricted or impedes its normal utilization.

Today is priority to develop sustainable technologies for the residual water processing that allow control of growing deterioration of the environment to a low cost or moderate and if is possible, to comply with criteria such as recovery of the resources and easy operation and maintenance.

The processing using macrophyte plants, with aid of microorganisms has been introduced as an excellent alternative instead the traditional methods, offering the possibility to remove contaminants like heavy metals, hydrocarbons, radioactive substances, organic matter and in some cases to produce useful materials.

The main result of the documentary revision, was to confirm the viability to use macrophytes as part of the secondary or tertiary processing of the residual water; since the economic and environmental point of view presents many attractive advantages, such as, they are relatively simple systems to build, to operate, they do not require for its operation of large supplies of energy or machinery neither of personnel specialized, and exists extensive availability of these species, especially in the tropic, with great capacity to resist to media highly contaminated, to absorb the contaminants and to grow maintaining a relatively rapid growth.

---

\* Monograph to apply for the academic qualification of "Environmental Engineering Expert"

# TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1. FUNDAMENTOS TEORICOS.....</b>	<b>3</b>
1.1 BIORREMEDIACIÓN.....	3
1.2 FITORREMEDIACIÓN.....	7
1.3 PLANTAS MACROFITAS.....	10
1.4 ESPECIES MACROFITAS.....	11
1.4.1 <i>Macrófitas de aguas profundas</i> .....	12
1.4.2 <i>Flotantes</i> .....	12
1.4.3 <i>Oxigenadoras</i> .....	13
1.4.4 <i>De ribera o margen (palustres)</i> .....	14
1.5 TECNICAS TRADICIONALES DE DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES.....	16
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>2. ACCION DEPURADORA DE LAS PLANTAS ACUATICAS.....</b>	<b>20</b>
2.1 ESTRUCTURA DE UN MACRÓFITO.....	20
2.2 CAMINO DEL OXÍGENO EN EL MACRÓFITO.....	22
2.3 TRANSFERENCIA DEL OXÍGENO DEL MACRÓFITO AL AGUA.....	22
2.4 DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO) Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) DEL AGUA.....	23
2.5 OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA RADICULAR Y FOLIAR DEL MACRÓFITO.....	24
2.6 ALTURA DE LÁMINA DE AGUA ÓPTIMA PARA EL SISTEMA FLOTANTE.....	24
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>3. TECNOLOGÍAS BIOLÓGICAS QUE USAN MACROFITAS PARA DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES EN EL MUNDO.....</b>	<b>25</b>
3.1 DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS FLOTANTES.....	26
3.2 DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS ENRAIZANTES.....	29
3.3 APLICACIONES GENERALES DE LAS MACROFITAS.....	30
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>4. TECNOLOGÍAS BIOLÓGICAS QUE USAN MACROFITAS PARA DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA.....</b>	<b>40</b>
4.1 FUNCIONAMIENTO DE LA PTAR INDUSTRIAL DEL ICP.....	44
4.2 ANALISIS DE RESULTADOS PTARI.....	50
4.3 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS.....	51
4.4 ANALISIS DE RESULTADOS PTARD.....	53
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>57</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Metabolismo Microbiano .....	5
<b>Figura 2.</b> Tipos de fitorremediación .....	8
<b>Figura 3.</b> Macrófitas de aguas profundas.....	12
<b>Figura 4.</b> Macrófitas flotantes .....	13
<b>Figura 5.</b> Macrófitas oxigenadotas .....	14
<b>Figura 6.</b> Macrófitas de ribera (palustres) .....	15
<b>Figura 7.</b> Esquema de un proceso de lodos activados .....	18
<b>Figura 8.</b> Secuencia de tratamientos para aguas residuales .....	19
<b>Figura 9.</b> Corte de la base de un tallo de <i>Typha</i> spp., en el que puede observarse una amplia red de canales aeríferos. ....	21
<b>Figura 10.</b> Esquema del proceso de aireación de la rizosfera de las macrofitas emergentes. ....	22
<b>Figura 11.</b> Jacinto acuático.....	26
<b>Figura 12.</b> Lentejas de agua.....	28

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clases de Fitorremediación .....	9
<b>Tabla 2.</b> Ventajas y desventajas de la utilización de las lentejas de agua .....	39
<b>Tabla 3.</b> Resultados de afluentes y efluentes industriales reportados durante el segundo periodo del 2005 .....	47
<b>Tabla 4.</b> Resultados de Cationes.....	48
<b>Tabla 5.</b> Resultados de Aniones .....	49
<b>Tabla 6.</b> Resultados de afluentes y efluentes domésticos reportados durante el segundo periodo del 2005 .....	52

## INTRODUCCION

La contaminación del agua es un serio problema ambiental de nuestro tiempo. Al igual que otras formas de contaminación, se ha originado debido al creciente desarrollo industrial y urbano ocurrido especialmente durante las dos últimas décadas.

Esta contaminación resulta de la adición de componentes externos, al ciclo natural de la misma, que han modificado su calidad a un grado tal que se restringe o impide su utilización normal.

Hoy día es prioritario desarrollar tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales que permitan controlar el creciente deterioro del medio ambiente a un costo bajo o moderado y en lo posible que cumplan con criterios como recuperación de los recursos y fácil operación y mantenimiento.

A nivel industrial, especialmente en el campo petrolero, la recuperación de aguas con altos contenidos de hidrocarburos y agentes químicos contaminantes que se generan durante los procesos, mantenimiento y limpieza de las unidades, se ha convertido en uno de los grandes e importantes retos.

El tratamiento utilizando plantas macrófitas, como el jacinto acuático con ayuda de microorganismos tales como bacterias y hongos, se ha venido presentando desde hace algún tiempo como una excelente alternativa frente a los tradicionales métodos desarrollados por el hombre además de ofrecer la posibilidad de remover sustancias contaminantes y producir materiales útiles. Esta técnica, desarrollada como un tratamiento secundario o terciario alternativo de aguas residuales especialmente industriales, ha demostrado ser eficiente en la remoción de una amplia gama de sustancias como metales pesados e hidrocarburos; sin embargo, poco se sabe de los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas, quizás más por desconocimiento que por su factibilidad.

Las plantas, en asociación con las bacterias, degradan la materia orgánica y acumulan minerales y nutrientes presentes en las aguas residuales para convertirlos en biomasa fácil de cosechar sobre la superficie del agua, la cual puede ser usada como excelente fuente de proteína, fertilizante o fuente de energía.

El fundamento de esta técnica se basa en que muchos de los compuestos xenobióticos son semejantes a los naturales y por tanto, factibles de degradación o inertización. No obstante existen compuestos más complejos, difíciles de degradar debido a su mayor estabilidad en su estructura química, distinta a las de

compuestos naturales, pero incluso los que tienen estructuras similares suelen contener modificaciones que los hacen muy estables, de manera que las capacidades degradativas de los seres vivos actúan más lentamente.

Las plantas al formar un manto flotante sobre la superficie acuática, mantienen sumergido el sistema radicular, los rizomas y bases de los tallos. La parte sumergida presenta una gran superficie específica sobre la cual se fija una abundante flora microbiana, cuyo crecimiento se favorece por el oxígeno que bombean las hojas hacia dicha zona. El conjunto formado por las raíces y microorganismos actúa como filtro que separa la materia orgánica disuelta y demás compuestos minerales (fósforo y nitrógeno entre otros) que son absorbidos principalmente por las plantas. Periódicamente, la biomasa flotante puede ser retirada fácilmente y utilizarse para fines energéticos o industriales.

Con el desarrollo de esta monografía se busca presentar un completo estado del arte en el cual se desglose el papel de las plantas macrófitas en conjunto con microorganismos en la degradación de compuestos xenobióticos en aguas residuales, su importancia desde el punto de vista ambiental, los factores y mecanismos que afectan el proceso de degradación, así como las técnicas que actualmente se emplean.

Se espera que la información aquí presentada sirva de respaldo a futuros estudios que, valiéndose de la experimentación, permitan confirmar las conclusiones a las que se ha llegado.

# CAPÍTULO I

## 1. FUNDAMENTOS TEORICOS

### 1.1 BIORREMEDIACIÓN

La biorremediación es el proceso en el que se emplean organismos biológicos para resolver problemas de contaminación medioambiental con el fin de atacar algunos contaminantes específicos tales como los pesticidas clorados que son degradados por bacterias, o bien, de forma más general como en el caso de los derrames de petróleo que se tratan empleando varias técnicas, incluyendo la adición de fertilizantes para facilitar la descomposición del crudo por las bacterias. [1]

Al contrario de la biodegradación, que se produce naturalmente, la biorremediación es un proceso iniciado por el hombre generalmente con el propósito de subsanar el medio ambiente.

No obstante, no es posible tratar todos los contaminantes mediante el uso de la biorremediación; los metales pesados como el cadmio o el plomo no son absorbidos o captados fácilmente por los organismos. En el caso de la introducción de metales, como el mercurio en la cadena alimenticia, los procesos se tornan más complejos porque los organismos bioacumulan estos metales.

Sin embargo, hay una serie de ventajas en la biorremediación, como la posibilidad de emplearla en áreas a las que no se puede acceder fácilmente si no es mediante excavación. Por ejemplo, en el caso de los derrames de gasolina que contamina el agua subterránea, la biorrecuperación *in situ* de acuíferos requiere que el oxígeno, nutrientes y algunas especies específicas de bacterias sean añadidas a zonas contaminadas [2], en conjunto con compuestos formadores de oxígeno, con lo que se puede reducir significativamente la concentración del contaminante después de un determinado periodo de tiempo. Esto es mucho menos costoso que la excavación seguida del enterramiento en otra parte o incineración, y reduce o elimina la necesidad de bombeo y tratamiento, que es la práctica más normal.

Las ventajas de la biorremediación en industrias tradicionales como la textil, la del cuero y la del papel, como posibilidad tecnológica para limpiar el aire, el suelo y el agua contaminados han sido demostradas. En el sector energético, se quieren sustituir las tecnologías contaminantes que utilizan grandes cantidades de energía por procesos actualmente en desarrollo, como la biodesulfatación y el uso de

biodiesel o bioetanol; este potencial positivo todavía no está suficientemente explotado.

La degradación biológica de compuestos, es un proceso que permite a los microorganismos transformar formas orgánicas o inorgánicas para obtener la energía celular (Biotransformación) biodegradando los a compuestos más simples.

La biodegradación puede ser aprovechada por el hombre para obtener diferentes productos de utilidad que son inocuos o menos tóxicos que los compuestos que se metabolizan, por lo cual se puede emplear estas actividades microbianas en la biorremediación.

Históricamente, el compostaje fue una primitiva forma de biorremediación, donde los residuos derivados de la recolección domiciliaria (restos orgánicos, inorgánicos, residuos industriales, etc.) eran incluidos en contenedores para ser biodegradados por microorganismos.

La Biorremediación esta basada en el uso de organismos naturales o mejorados genéticamente para recuperar sitios contaminados y proteger el ambiente. El proceso de biorremediación puede clasificarse de acuerdo al organismo que efectúe la degradación del compuesto xenobiótico en los siguientes tipos:

- Biorremediación enzimática: las enzimas son estructuras biológicas que aceleran cambios químicos, induciendo reacciones de transformación química con un gasto energético mínimo y con una elevada velocidad de reacción. Las enzimas son producidas por células como resultado de los procesos que acompañan a la traducción de la información genética.

Mediante el uso de técnicas de biología molecular, se puede inducir la producción de enzimas en sistemas bacterianos con características genéticas que permiten una expresión del gen enzimático en forma constante. Con esto se logra obtener un sistema productor de enzima a gran escala, proceso éste biotecnológico. En la protección medioambiental, muchas empresas ofrecen tanto enzimas que degradan sustancias de importancia ambiental como sistemas bacterianos inmovilizados en determinados soportes (biofiltros).

Por ejemplo, existe un amplio número de industrias de procesamiento de alimentos que producen residuos que necesariamente deben ser posteriormente tratados.

En estos casos, se aplican grupos de enzimas que hidrolizan (rompen) polímeros complejos para luego terminar de degradarlos con el uso de microorganismos. Un ejemplo lo constituyen las enzimas lipasas (que degradan lípidos) que se usan

junto a cultivos bacterianos para eliminar los depósitos de grasa procedentes de las paredes de las tuberías que transportan los efluentes.

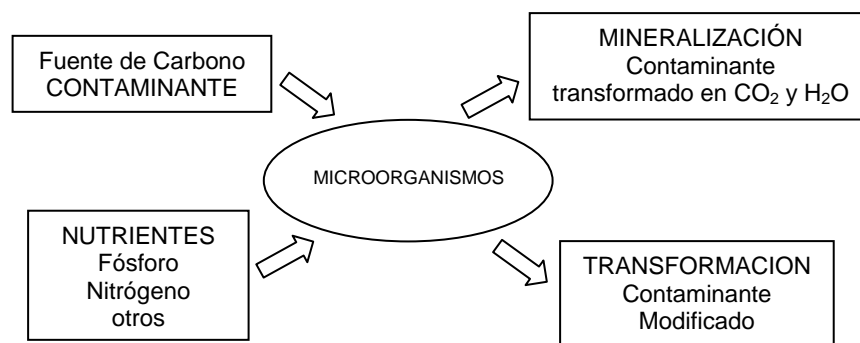
Otras enzimas que rompen polímeros utilizados de forma similar son las celulasas, proteinazas y amilasas, que degradan celulosa, proteínas y almidón, respectivamente.

Además de hidrolizar estos polímeros, existen enzimas capaces de degradar compuestos altamente tóxicos. Estas enzimas son utilizadas en tratamientos en donde los microorganismos no pueden desarrollarse debido a la alta toxicidad de los contaminantes. Por ejemplo, se emplea la enzima peroxidasa para iniciar la degradación de fenoles y aminas aromáticas presentes en aguas residuales de muchas industrias. [3]

- Biorremediación microbiana: la utilización de microorganismos que degradan o transforman diferentes compuestos nocivos en otros de menor impacto ambiental ha experimentado un gran desarrollo en años recientes.

Actualmente, tanto la microbiología ambiental como la genética bacteriana contribuyen al diseño de sistemas microbianos con capacidades metabólicas mejoradas y aumentadas. Existe la posibilidad del uso de bacterias con la propiedad de acumular o metabolizar metales pesados. Aunque las bacterias son las más empleadas en el proceso de biorremediación, también se han empleado otros microorganismos como hongos, algas, cianobacterias y actinomicetes para la degradación de compuestos tóxicos en el suelo.

Las actividades microbianas en el proceso de biorremediación se pueden resumir en el siguiente esquema:



Fuente: [www.porquebiotecnologia.com.ar](http://www.porquebiotecnologia.com.ar)

**Figura 1.** Metabolismo Microbiano

Los microorganismos ingieren contaminantes como fuente de carbono y algunos nutrientes como fósforo y nitrógeno. La digestión de estos compuestos en sustancias más simples como parte del metabolismo del microorganismo, puede resultar en la degradación del compuesto en forma parcial (transformación) o total a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O).

- Fitorremediación: Consiste en el uso de plantas verdes para contener, remover o neutralizar compuestos orgánicos, metales pesados o radionucleidos. Un ejemplo de la fitorremediación la constituye el uso de la especie *Thlaspi caurulencens* en suelos contaminados con Zinc y Cadmio. El uso de esta especie logra eliminar más de 8 mg/kg de cadmio y 200 mg/kg de zinc, representado estos valores el 43 y 7 por ciento de estos metales en un suelo agrícola, respectivamente.

En este sentido se ha comenzado a investigar plantas y especies arbóreas específicamente capacitados para retener metales pesados. Esta novedosa tecnología tiene muchas ventajas con respecto a los métodos convencionales de tratamientos de lugares contaminados: es una tecnología económica, posee un impacto regenerativo en los lugares donde se aplica y la capacidad extractiva se mantiene debido al crecimiento vegetal.

- Biolixiviación: Es la metodología de solubilización de metales a partir de matrices complejas utilizando la acción directa o indirecta de microorganismos.

En el caso de los minerales sulfurados de metales de transición, los microorganismos más frecuentemente usados son bacterias quimioautótrofas y mesófilas. El uso de estas especies de bacterias en aplicaciones industriales está asociado directamente a su carácter acidófilo y a los escasos requerimientos de nutrientes e infraestructuras necesarias (debido a que no requieren fuentes orgánicas de energía ni mantenimiento de temperaturas elevadas) lo que permite que el proceso sea económicamente factible para la recuperación de diferentes metales a partir de minerales.

- Biofiltración: Los biofiltros remueven y destruyen hidrocarburos aromáticos y alifáticos responsables de los olores de los gases procedentes de descarga de las corrientes del proceso, tanques de venteo, válvulas de seguridad, extracción en suelo con vapor, tratamiento de aguas residuales, etc.

Los biofiltros pueden ser un sustituto para los oxidantes catalíticos y térmicos, así como las unidades de carbón activado. Los costos de biofiltración son significativamente menores que los de otras tecnologías de control de

contaminación del aire. Los filtros son reactores biológicos de capa fija que actúan como oxidantes catalíticos a bajas temperaturas. Como el aire está cargado con contaminantes, fluye lentamente a través de los poros del medio biofiltrante, en donde los microbios residentes consumen los contaminantes y los oxidan generando CO<sub>2</sub> y agua. Los catalizadores son enzimas e hierro coloidal, aluminio, titanio y óxido de manganeso, aluminosilicato y cal superficial. Estos catalizadores son tan efectivos que no se requiere combustible o compuestos químicos. No se generan contaminantes secundarios o residuos.

## 1.2 FITORREMEDIACIÓN

La fitorremediación puede considerarse como el conjunto de métodos para degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos, radioactivos y petroderivados por medio de la utilización de plantas que tengan la capacidad fisiológica y bioquímica para absorber, retener degradar o transformar dichas sustancias a formas menos tóxicas.

Las bases conceptuales de la fitorremediación provienen de la identificación de plantas que hiperacumulan metales. Existen plantas que tienen esta capacidad intrínseca pero también pueden obtenerse plantas con estas capacidades por medio de técnicas de Ingeniería Genética. [4]

Ventajas de la Fitorremediación:

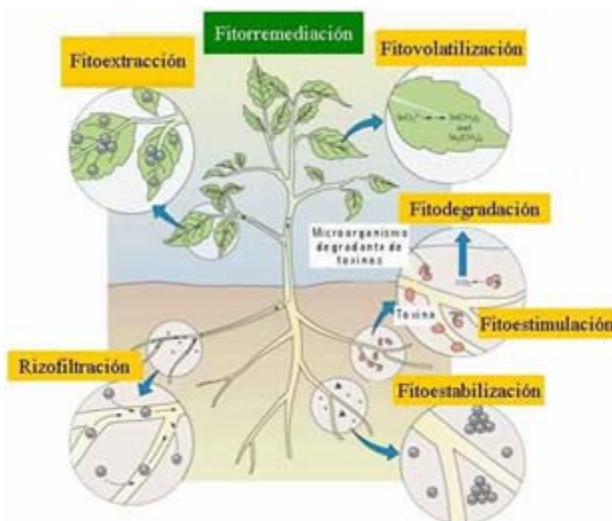
- Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo para depurar suelos y aguas contaminadas.
- Algunos procesos degradativos ocurren en forma más rápida con plantas que con microorganismos.
- Es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos.

Limitaciones de la Fitorremediación:

- El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o aguas poco profundas.
- La fitotoxicidad definida como la capacidad de un compuesto o elemento químico de provocar un daño temporal o permanente en una planta es una limitante en áreas fuertemente contaminadas.
- Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados en comparación con las tecnologías convencionales como las lagunas de sedimentación.
- La biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación.

- Se requiere comprender mejor la naturaleza de los productos de degradación (fitodegradación).

Las plantas pueden incorporar las sustancias contaminantes mediante distintos procesos que se representan en la siguiente ilustración y se explican en la tabla que continúa:



Fuente: [www.porquebiotecnologia.com.ar](http://www.porquebiotecnologia.com.ar)

**Figura 2.** Tipos de fitorremediación

Tipo	Proceso Involucrado	Contaminación Tratada
<b>Fitoextracción</b>	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (hojas y raíces)	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc
<b>Rizofiltración</b>	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc isótopos radioactivos, compuestos fenólicos
<b>Fitoestabilización</b>	Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a capas subterráneas o al aire.	Lagunas de deshecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.

<b>Tipo</b>	<b>Proceso Involucrado</b>	<b>Contaminación Tratada</b>
<b>Fitoestimulación</b>	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
<b>Fitovolatilización</b>	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)
<b>Fitodegradación</b>	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzono, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

Fuente: [www.porquebiotecnologia.com.ar](http://www.porquebiotecnologia.com.ar)

**Tabla 1.** Clases de Fitorremediación

Se conocen alrededor de 400 especies de plantas con capacidad para hiperacumular selectivamente alguna sustancia. En la mayoría de los casos, no se trata de especies raras, sino de cultivos conocidos. Así, el girasol (*Heliantus annuus*) es capaz de absorber en grandes cantidades el uranio depositado en el suelo. Los álamos (género *Populus*) absorben selectivamente níquel, cadmio y zinc.

También la pequeña planta *Arabidopsis thaliana* de gran utilidad para los biólogos es capaz de hiperacumular cobre y zinc. Otras plantas comunes que se han ensayado con éxito, como posibles especies fitorremediadoras en el futuro inmediato son el girasol, la alfalfa, la mostaza, el tomate, la calabaza, el esparto, el sauce y el bambú. Incluso existen especies vegetales capaces de eliminar la alta salinidad del suelo, gracias a su capacidad para acumular el cloruro de sodio.

En general, hay plantas que convierten los productos que extraen del suelo a componentes inocuos, o volátiles. Pero cuando se plantea realizar un esquema de fitorremediación de un cuerpo de agua o un área de tierra contaminados, se siembra la planta con capacidad (natural o adquirida por ingeniería genética) de extraer el contaminante particular y luego del período de tiempo determinado, se cosecha la biomasa y se incinera o se le da otro curso dependiendo del contaminante. De esta forma, los contaminantes acumulados en las plantas no se transmiten a través de las redes alimentarias a otros organismos.

### 1.3 PLANTAS MACROFITAS

Las plantas conocidas como Macrófitas o macrófitos son aquellas que pueden vivir en terrenos inundados de forma permanente o durante largos períodos de tiempo en condiciones de encharcamiento. También se conocen como plantas palustres y su porte alcanza cierta importancia, ya que se pueden encontrar especies entre los (30 - 120 cm.) en los juncos, (60-130 cm) en los esparganios, (120-240 cm) en las enneas y en los carrizos (160-320 cm). [5]

Estas plantas pueden encontrarse en terrenos inundados e inundables con láminas de agua de poca altura o humedales que soportan aportes de origen fluvial y con una dinámica de inundaciones de origen pluvial, que aportan importantes cantidades de materia orgánica e inorgánica, (es normal encontrarlas a las salidas de los efluentes de las depuradoras o en corrientes establecidas de aguas no tratadas del tipo urbano o ganadero) [5].

Las plantas acuáticas han sido consideradas por mucho tiempo como malezas, debido a que con frecuencia impiden o dificultan las actividades humanas: cubren grandes extensiones de embalses, obstaculizan la irrigación y la pesca, ocasionan problemas a la acuicultura e imposibilitan el transporte fluvial.

Sin embargo, muchas macrófitas acuáticas presentan tasas altas de crecimiento y de reproducción, lo cual favorece su capacidad de absorber sustancias disueltas en el agua y transformarlas en biomasa, con un consecuente efecto depurador del agua donde crecen. Esto ha conducido a evaluar su capacidad depuradora y la posibilidad de utilizarlas como parte de tratamiento de aguas residuales. El agua residual es todo efluente proveniente de actividades humanas, como la agricultura, la ganadería, la industria a las labores domésticas y su tratamiento hace referencia al proceso por medio del cual se eliminan del agua las sustancias disueltas y suspendidas que contiene, hasta que el efluente puede ser reutilizado con fines agrícolas, recreativos, o industriales, muy rara vez como agua potable o verterse a un cuerpo de agua con mínimo impacto para este. [6]

Teniendo en cuenta su morfología y fisiología, las macrófitas pueden clasificarse según la forma de fijación en:

#### 1. Macrófitas fijas al sustrato

Macrófitas emergentes: en suelos anegados permanentes o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos.

Macrófitas de hojas flotantes: principalmente angiospermas; sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos.

Macrófitas sumergidas: comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carofitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.

2. Macrófitas flotantes libres: Presentan formas muy diversas desde plantas de gran tamaño con roseta de hojas aéreas y/o flotantes y con raíces sumergidas bien desarrolladas a pequeñas plantas que flotan en la superficie, con muy pocas raíces o ninguna. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos pero muy ocasionalmente están sumergidos. [7]

#### 1.4 ESPECIES MACROFITAS

Las plantas acuáticas constituyen un grupo grande y diverso. Su tamaño y formas pueden variar desde la diminuta *Wolffia arrhiza*, cuyas hojas orbiculares son apenas visibles a simple vista (la mas pequeña de las angiospermas) hasta las especies de los géneros Juncos y scirpus, de grandes hojas lanceoladas que pueden tener dos o mas metros de altura.

Tienen también distintos modos de vida: algunas crecen enraizadas en los sustratos lodosos de las orillas de ríos y lagos, como las cañas, juncos y algunas especies de gramíneas (las llamadas emergentes); otras flotan libremente sobre el agua, con las raíces bajo el agua (flotantes) y otras permanecen completamente sumergidas.

A muchas de estas especies de macrófitas se les ha evaluado con el fin de determinar su eventual eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. Una de las mas estudiadas hasta del momento es el Jacinto Acuático "*Eichhornia crassipes*". Esta especie es considerada tradicionalmente una maleza incontrolable por su impresionante productividad. Se calcula que 10 plantas pueden producir 600.000 más en 8 meses. Sin embargo, esta planta ha resultado ser justamente una de las más eficientes en la remoción de nutrientes y materia orgánica del agua residual por su elevada tasa fotosintética.

En numerosas investigaciones realizadas se ha demostrado que *Eichhornia Crassipes* puede eliminar hasta el 97% de materia orgánica expresada como DBO<sub>5</sub> y Sólidos Suspendidos, 99% de Nitrógeno y entre el 60-65% de Fósforo así como organismos patógenos, sustancias toxicas e incluso metales pesados. Las variaciones en la eficiencia de la remoción dependen de las condiciones climáticas y de las características de la laguna donde se encuentran los jacintos, como

profundidad, caudal, concentración del agua residual y tiempo de retención hidráulica. [6]

#### 1.4.1 Macrófitas de aguas profundas

Se conocen como Nenúfares, Flor de Loto. Se sitúan en las zonas profundas, desde 40 hasta 90 cm. Sus hojas dan sombra e impiden el desarrollo de algas que precisan el sol para proliferar, ayudando así a mantener el agua clara. Algunas de las especies que pertenecen a esta categoría se presentan a continuación.



*Nymphaea alba*  
(Nenúfar)



*Nymphoides peltata*  
(Ninfoides)



*Nymphaea hortorum*  
(Nenúfar)



*Nelumbo nucifera*  
(Loto, Nelumbo)



*Nymphoides indica*  
(Ninfoides)



*Nuphar lutea*  
(Nenúfar Amarillo)

Fuente: <http://www.chemedia.com>

**Figura 3.** Macrófitas de aguas profundas

#### 1.4.2 Flotantes

Como su nombre lo indica son aquellas que flotan en la superficie y sus raíces están sueltas dentro del agua en lugar de arraigadas en macetas o en el fondo. Algunas de estas especies se multiplican con gran rapidez lo que hace necesario

su remoción periódica. Algunas de las especies que pertenecen a esta categoría se presentan a continuación.



Fuente: <http://www.chemedia.com>

**Figura 4.** Macrófitas flotantes

### 1.4.3 Oxigenadoras

Estas plantas permanecen completamente sumergidas excepto las flores, que pueden salir a la superficie. Sus hojas absorben los minerales y el dióxido de carbono y esto dificulta el desarrollo de las algas.

Crecen muy rápidamente por lo que se debe controlar su desarrollo. Según la literatura encontrada lo más aconsejable es colocar una planta oxigenadora por cada 0,3 m<sup>2</sup> de superficie de estanque, siendo lo mejor una mezcla de varias especies. Algunas de las especies que pertenecen a esta categoría se muestran presentadas a continuación.



*Callitriche*  
(Bricio)



*Myriophyllum verticillatum*



*Ceratophyllum demersum*



*Vallisneria* spp



*Elodea canadensis*



*Ranunculus aquatilis*  
(Ranúnculo Acuático)

Fuente: <http://www.chemedia.com>

**Figura 5.** Macrófitas oxigenadotas

#### 1.4.4 De ribera o margen (palustres)

Las raíces están dentro del agua. La mayoría de estas especies pueden vivir sin agua permanente en sus raíces, pero necesitan bastante riego. Algunas de las especies que pertenecen a esta categoría se presentan a continuación



*Acorus calamus* 'Variegata'  
(Acoro, Cálamo Acuático)



*Iris pseudacorus*  
(Lirio Amarillo)



*Arum italicum*



*Iris sibirica*  
(Lirio)



*Caltha palustris*  
(Caltha)



*Lysichiton americanus*  
(Aro de Agua)



*Cyperus alternifolius*  
(Piragüitas)



*Pontederia cordata*  
(Pontederia)



*Cyperus papyrus*  
(Papiro)



*Typha latifolia*  
(Enea)



*Houttuynia cordata*  
'Chameleon'  
(Houtuinia)



*Xanthosoma violaceum*  
(Oreja de elefante)



*Iris laevigata*  
(Lirio japonés)



*Zantedeschia ethiopica*  
(Cala)

Fuente: <http://www.chemedia.com>

**Figura 6.** Macrófitas de ribera (palustres)

## 1.5 TECNICAS TRADICIONALES DE DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son aquellas que quedan como residuo de la actividad humana siendo de origen doméstico y de naturaleza industrial. Sin duda, el mayor volumen de aguas servidas corresponde a aquellas que son propias de la vida del ser humano como la limpieza, preparación de alimentos y necesidades fisiológicas.

El uso del agua potable en los hogares genera agua servida con alto contenido de materia que consume o demanda oxígeno, como la materia fecal, restos de alimentos, aceites y grasas; otra parte son detergentes, sales, sedimentos, material orgánico no biodegradable y también microorganismos patógenos. La materia orgánica biodegradable y algunas sales inorgánicas son nutrientes para los microorganismos. El correcto tratamiento de esta agua permite asegurar que cuando son vertidas, en muchos casos a los cuerpos de agua, como mar, lagos y ríos, no se produzca la contaminación de estas aguas naturales.

Para caracterizar estos residuos, se utiliza una serie de parámetros analíticos que determinan su calidad física, química y biológica. Estos parámetros son la turbidez, los sólidos suspendidos, el total de sólidos disueltos, la acidez y el oxígeno disuelto.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno que requieren los microorganismos para vivir, junto con la presencia de materia orgánica que les sirve de nutrientes, se emplea como medida de la cantidad de residuos que existen en el agua con carácter de nutrientes.

El proceso usual del tratamiento de aguas residuales domésticas puede dividirse en tres etapas: 1ª, tratamiento primario o físico; 2ª, tratamiento secundario o biológico y 3ª, tratamiento terciario que normalmente implica una cloración.

El tratamiento primario consiste en la remoción de sólidos insolubles como arena y materiales como grasas y espuma. El primer paso de la etapa inicial es la sedimentación y filtración de sólidos a través de rejillas.

La sedimentación separa tanto los sólidos decantables como aquellos que flotan. Durante esta decantación primaria existe la tendencia a que las partículas que flocculan formen agregados, hecho que puede ayudarse con la adición de compuestos químicos. El material que flota consiste en aceites, ceras, ácidos grasos y jabones insolubles que se conoce genéricamente como grasa.

El tratamiento secundario implica la descomposición y posterior floculación de la materia orgánica por medio de microorganismos. Este proceso biológico ocurre naturalmente, lo que puede asegurar que al ejecutarse en forma regulada, previene la contaminación de los cuerpos de agua en donde se descargan. El tratamiento biológico emplea, con diversas técnicas, la materia orgánica biodegradable de las aguas residuales domésticas, como nutrientes de una población bacteriana a la cual se le proporciona oxígeno y condiciones controladas para que crezca en un lugar en el cual este crecimiento no tenga influencia en el medio ambiente.

Para que esta transformación biológica sea eficiente, deben establecerse las condiciones adecuadas para el crecimiento bacteriano: temperatura 30-40°C; oxígeno 2 ppm; pH = 6.5-8.0, salinidad < 3.000 ppm. Para evitar la inhibición de este crecimiento es preciso la ausencia de sustancias tóxicas como son los metales pesados Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y otros, así como cianuros, fenoles y aceites.

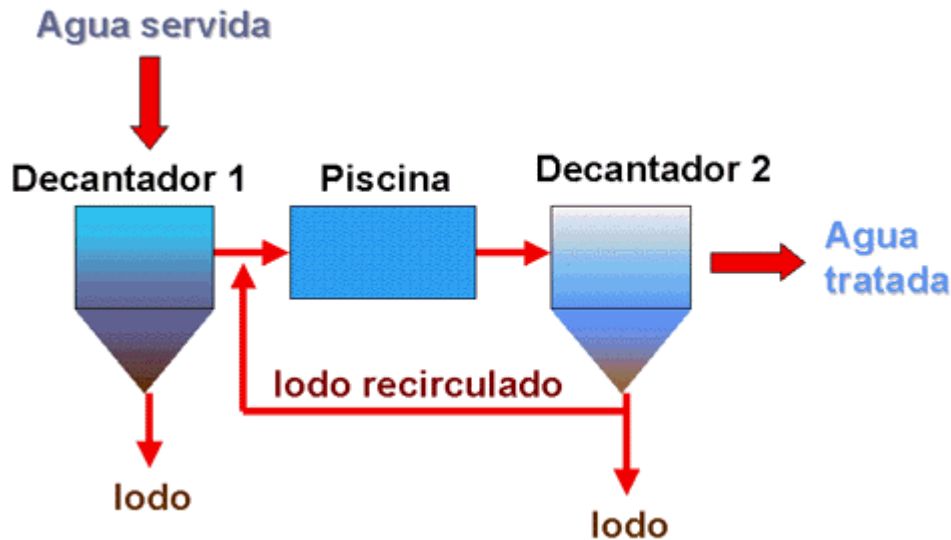
Los procesos de tratamiento biológico se pueden dividir según el estado en que se encuentren las bacterias responsables de la degradación. La biomasa bacteriana puede estar soportada sobre superficies inertes tales como rocas, escoria, material cerámico o plástico, de lecho fijo, o puede estar suspendida en el agua a tratar. En cada una de estas situaciones la concentración de oxígeno en el agua determina la existencia de bacterias aeróbicas, facultativas o anaeróbicas.

Los procesos aeróbicos con biomasa suspendida que más se aplican son los de lagunas aireadas y lodos activados.

Las lagunas aireadas, son embalses de agua servida que ocupan una gran superficie de terreno. El agua servida así dispuesta se oxigena mediante aireadores superficiales o difusores sumergidos para generar oxidación bacteriana. Estos dispositivos crean una turbulencia que mantiene la materia en suspensión. El tiempo de residencia normal de este proceso es de 3 a 6 días, tiempo en que las bacterias poseen un crecimiento acelerado, dependiendo de las condiciones climáticas y suponiendo una aireación suficiente. La separación de sólidos de este tratamiento se logra por decantación que demora de 6 a 12 horas. La calidad del efluente de este proceso es inferior al de lodos activados, cuya diferencia fundamental es que en el primero no hay recirculación de lodos.

En el proceso de lodos activados, al igual que el de lagunas aireadas, el agua servida aireada se mezcla con bacterias aeróbicas que se han desarrollado con anterioridad. Sin embargo, la mezcla del agua servida, previamente decantada, se agita por medio de bombas para que la materia esté en suspensión y en constante contacto con oxígeno en el interior de piscinas de concreto armado.

La materia orgánica degradada del agua servida flocula y posteriormente se decanta. La biomasa sedimentada se devuelve parcialmente al tratamiento biológico, para mantener una población bacteriana adecuada, y el resto se separa como lodo.



Fuente: <http://www.uc.cl/quimica/agua/tratamiento.htm>

**Figura 7.** Esquema de un proceso de lodos activados

Las ventajas principales de este proceso son el corto tiempo de residencia de la biomasa en las piscinas, que es de unas 6 horas, lo que permite tratar grandes volúmenes en espacios reducidos y la eficiencia en la extracción de las materias suspendidas. Sin embargo, la eficiencia en la eliminación de bacterias patógenas es baja.

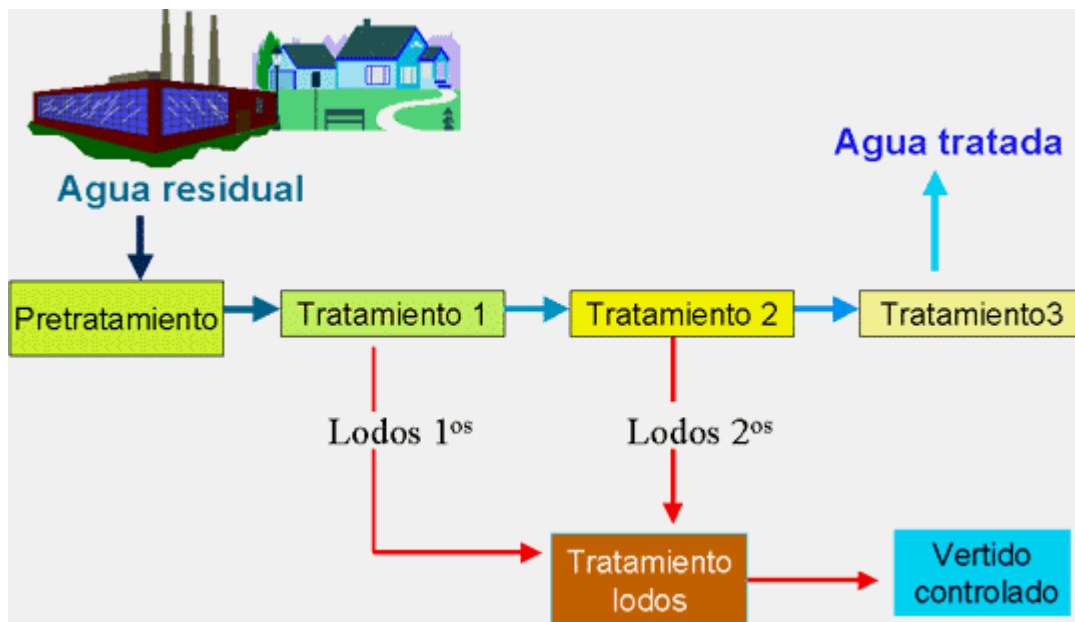
El agua tratada en un proceso de lodos activados o en lagunas aireadas puede servir para regadío si previamente se somete a cloración para desinfectarla. La cloración es parte del tratamiento terciario o avanzado que se emplea para lograr un agua más pura, incluso potable, si se desea. Los objetivos del tratamiento avanzado son eliminar la carga orgánica remanente de un tratamiento secundario, desinfectarla para eliminar microorganismos patógenos, eliminar color y olor indeseables, remover detergentes, fosfatos y nitratos residuales, que ocasionan espuma y eutrofización respectivamente.

Un problema sanitario importante que se deriva del tratamiento de aguas servidas es el manejo de los lodos provenientes de los tratamientos primario y secundario. Estos lodos son barros semisólidos que contienen de 0,5 a 5% de sólidos, por lo que no tienen valor económico y si perjuicio ambiental. Para convertir su materia

orgánica en sólidos estables, reducir la masa y volumen de agua y destruir las bacterias dañinas, el lodo se concentra por sedimentación y coagulación-floculación.

Este lodo, así concentrado, se puede tratar con cal como bactericida y exponerlo al sol para evaporar su agua, hacerlo pasar sobre filtros de arena, filtrarlo a vacío o centrifugarlo para eliminar parte importante del agua. Sin embargo, ninguna de estas técnicas es completamente satisfactoria por sus costos y problemas técnicos.

El lodo deshidratado puede disponerse en vertederos o incinerarlo si su contenido de material combustible es superior a 25%. Uno de los empleos más deseable de estos lodos es usarlo como fertilizante y acondicionador del suelo, aunque su composición limita este empleo.



Fuente: <http://www.uc.cl/quimica/agua/tratamiento.htm>

**Figura 8.** Secuencia de tratamientos para aguas residuales

## **CAPÍTULO II**

### **2. ACCION DEPURADORA DE LAS PLANTAS ACUATICAS**

Las lagunas de estabilización en donde operan simbióticamente grandes poblaciones de microalgas y bacterias en la degradación de materia orgánica, constituyen el método más común para tratar aguas residuales de pequeñas comunidades.

Las plantas acuáticas pueden aumentar significativamente la eficiencia de éstas lagunas: no solo porque aportan oxígeno al agua, sino que absorben una amplia gama de sustancias, desde nutrientes en forma de amonio y nitratos hasta metales pesados y derivados de hidrocarburos. [6].

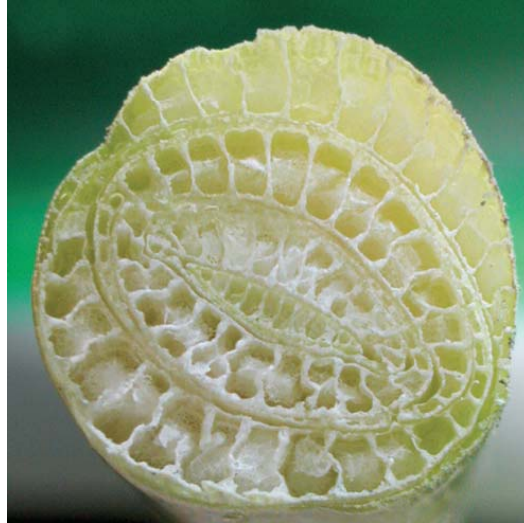
Estas plantas producen ciertos efectos físicos, químicos y biológicos que incrementan la eficiencia para la remoción de materia orgánica y de nutrientes: la densa masa de raíces de estas plantas constituye un soporte físico y un hábitat favorable para diversos organismos degradadores. Las hojas sobre la superficie forman una cubierta aislante en la interfase aire-agua que produce un efecto de quietamiento, reduciendo la turbulencia y la mezcla ocasionadas por el viento y aumentando con esto la sedimentación de la materia orgánica que se quiere eliminar. [6]

Al impedir la penetración de la luz, las plantas eliminan gran parte de la población de microalgas causantes de las altas concentraciones de sólidos suspendidos en los efluentes de las lagunas de oxidación y reducen significativamente las concentraciones de nutrientes en el agua residual, siempre y cuando la biomasa formada sea removida con frecuencia. Esto último constituye una herramienta de gran importancia para el control de la eutrofización es decir, el conjunto de transformaciones que sufre un cuerpo de agua léntico cuando recibe constantemente cantidades excesivas de nutrientes.

#### **2.1 ESTRUCTURA DE UN MACRÓFITO**

En las macrófitas sin tallo (juncos, enneas, esparganios) tanto las hojas como las raíces tienen una estructura formada por multitud de tubos de pequeña sección unidos lateralmente y compartiendo las paredes de éstos longitudinalmente. Estos tubos son huecos y continuos a lo largo de toda la longitud de la hoja. Se hallan cerrados transversalmente a tramos por una membrana del mismo tipo de material que el de la pared del tubo. La distancia entre las membranas que cierran el tubo

no suele ser de más de 10 veces el diámetro de éste (la sección transversal de una hoja se parece mucho a la de un panel de abejas).



Fuente: <http://www.macrophytes.info>

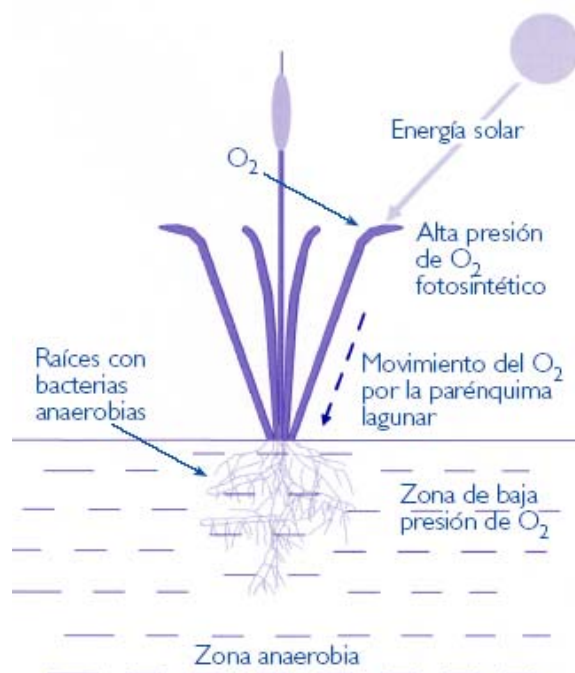
**Figura 9.** Corte de la base de un tallo de *Typha* spp., en el que puede observarse una amplia red de canales aeríferos.

Cada uno de los tubos que forman la hoja, al terminar en la cubierta de ésta, presenta una gran superficie de contacto con el exterior; es decir si se compara con su diámetro estaría del orden de más de 50 veces.

Tanto la cubierta exterior de cualquiera de las partes de la planta macrófito, es decir las hojas, rizomas, tallos, raíces, así como las paredes de los tubos que tiene la estructura del macrófito, es una membrana especializada en dejar pasar solo la molécula de oxígeno de una superficie a otra de las caras de la membrana, en función de la diferencia de la presión de saturación de oxígeno que se tenga entre las caras de ésta. El sentido de paso del flujo del oxígeno es siempre desde la superficie que tiene mayor presión a la de menor presión de oxígeno. La cantidad o caudal de oxígeno que pasa de un lugar al otro varía dependiendo de la diferencia de la presión.

Los macrófitos, por tanto, no pueden vivir enraizados a partir de una cierta profundidad, unos 70 cm dependiendo del grado de eutricación del terreno, el del agua y de la especie de la planta. La calidad del material que tiene la membrana de las plantas macrófitas no es igual en todas las especies, ya que sólo la transferencia del oxígeno se origina a partir de un cierto valor diferencial de las presiones entre las dos caras de la pared de la membrana. [5].

## 2.2 CAMINO DEL OXÍGENO EN EL MACRÓFITO



Fuente: <http://www.macrophytes.info>

**Figura 10.** Esquema del proceso de aireación de la rizosfera de las macrófitas emergentes.

Siempre el macrófito toma el oxígeno del aire que le rodea siendo las zonas emergidas de las hojas las únicas capaces de transferir oxígeno al interior de los orificios.

El oxígeno tiende a pasar de la superficie exterior de la hoja al interior de los tubos de ésta. La presión de oxígeno en los huecos es siempre menor que la del aire exterior (en los huecos o tubos sólo se tiene vapor de agua y oxígeno) por tener este último menos concentración de oxígeno. Así pues el oxígeno que pasa a la hoja en la zona que emerge del agua, empieza a distribuirse y equilibrarse entre todos los tubos colaterales y a lo largo de cada uno de ellos, descendiendo por éstos, hacia las raíces [5].

## 2.3 TRANSFERENCIA DEL OXÍGENO DEL MACRÓFITO AL AGUA

Cuando el oxígeno llega a la zona de la hoja sumergida, sucede que el agua en contacto con la pared de la hoja, demanda el oxígeno que está en los conductos

tubulares de esta zona, a causa de la DBO y DQO del agua, que hace que la presión de oxígeno sea menor en el agua que en el interior de los tubos, cediendo éstos parte del oxígeno que tienen hacia la zona de la demanda; no lo ceden todo, porque existe también una fuerte demanda, que les reclama el sistema radicular (sucede lo mismo que en un conducto o tubo que lleve agua; cuando éste se bifurca o se le añade otra tubería, el agua se reparte siempre entre ellos, hasta lograr que se equilibren las presiones entre las dos salidas) que normalmente tiene condiciones eutrificantes más severas que las de la lámina de agua que baña las hojas [5].

Los tubos que más oxígeno dejan son siempre los que están más próximos a la zona exterior, por lo que el reparto de oxígeno siempre tiende a ser menor en las hojas hacia el agua, que el que solicita la zona sumergida. De esta forma, el reparto de oxígeno es más equitativo y puede llegar mejor a las raíces (las raíces del macrófito suelen ser muy numerosas y finas, mientras que el número de hojas en relación con el de las raíces es pequeño y el grosor de éstas es grande con respecto al de la raíz).

El sistema radicular, con sus rizomas se provee del oxígeno que le transmiten las hojas. La cantidad de oxígeno que se emite por el sistema radicular está en función de la cantidad de oxígeno que les llega a la zona y de la presión entre los tubos y el medio según la demanda de cada lugar.

## **2.4 DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO) Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) DEL AGUA**

La reducción de la DBO y DQO se produce en toda la superficie del macrófito que esté en contacto con el agua (raíces, rizomas y en la zona de las hojas o tallos que estén sumergidos) pues de ella toman el oxígeno que necesitan los microorganismos que se alimentan de la DBO tanto disuelta como no disuelta.

Cuando las raíces del macrófito se entierran o se condensan el agua no pasa por sus raíces y se pierde entonces la capacidad regenerativa del agua en el filtro, al mismo tiempo que decae radicalmente el poder de reducción del sistema con respecto a la DBO y DQO. Tan sólo quedaría para la depuración del agua los tallos y las hojas que tengan sumergidos y al no absorber estos los componentes iónicos se pierde la capacidad de la reducción del nitrógeno, fósforo, iones, oligoelementos.

## **2.5 OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA RADICULAR Y FOLIAR DEL MACRÓFITO**

Es muy importante conseguir que la zona radicular tenga el máximo posible de la superficie de las raíces en contacto con el agua y que la zona sumergida de hojas y tallos sea la mínima para que aporte el máximo de oxígeno a la zona radicular.

Lo ideal es que el macrófito no tenga sumergido en el agua ninguna parte de las hojas o tallos, para que así pueda capturar del aire la cantidad máxima de oxígeno y que el sistema radicular presente al agua su máxima superficie, es decir que no pueda enterrar sus raíces en la tierra, de lo contrario la parte enterrada perdería la capacidad depurativa (la superficie de la raíz se envolvería de una fina capa de oxígeno entre ella y la tierra y perdería el contacto con el agua que se pretende depurar) y regenerativa del agua (los nutrientes y los iones los tomaría de la tierra en lugar del agua).

## **2.6 ALTURA DE LÁMINA DE AGUA ÓPTIMA PARA EL SISTEMA FLOTANTE**

La altura de la lámina de agua depende en primera instancia del tipo de macrófito a emplear y en segundo término del tipo de contaminación que tenga el agua residual a depurar. En algunas publicaciones se ha encontrado que en la mayoría de las veces la altura mínima del canal puede ser de unos 30 cm. y la máxima de 70 cm.

## CAPÍTULO III

### 3. TECNOLOGÍAS BIOLÓGICAS QUE USAN MACROFITAS PARA DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES EN EL MUNDO

La utilización de plantas acuáticas macrófitas ha sido desarrollada como un tratamiento secundario o terciario alternativo de aguas residuales y ha demostrado ser eficiente en la remoción de una amplia gama de sustancias orgánicas así como nutrientes y metales pesados. [8]; [9]. Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta, son tóxicos o venenosos en concentraciones bajas además de no ser fácilmente degradados por medios naturales, y son peligrosos porque tienden a bioacumularse. [9]

Se cree que el mecanismo que emplean las plantas para sacar del agua residual el contaminante es el siguiente: las plantas acuáticas, que constituyen la base de la tecnología de los wetland, tienen la propiedad de inyectar grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces, como se explicó con anterioridad. El aire que no es aprovechado por la especie y que ésta expelle es absorbido por microorganismos como bacterias y hongos que se asocian a la raíz y se encargan de metabolizar los contaminantes que entran al sistema. [8]; [9].

Al igual que las microalgas se ha comprobado que estas plantas acuáticas (macrófitas) son capaces de asimilar y descomponer nutrientes, materia orgánica e inorgánica. Presentan, desde luego, una serie de ventajas en su implementación que dependen del tipo de efluente a tratar y de las condiciones de operación, pero en general, el procedimiento consiste en establecer sistemas con especies flotantes, con especies sumergidas, o bien con especies enraizadas.

Según la literatura encontrada, los sistemas de tratamiento de aguas tipo wetland comprenden tres procesos distintos. Primero los residuos pasan por un decantador, para luego ser depositados en forma de líquido en el humedal artificial desde donde escurren bajo un lecho de piedras de cinco centímetros, en el que se plantan las especies acuáticas y que impiden la aparición de cualquier rastro de mal olor y la crianza de zancudos.

Finalmente, los líquidos son descargados en una laguna con plantas flotantes, que completan el proceso de depuración de las aguas servidas, removiendo parte del nitrógeno y el fósforo y dejándolas aptas para ser descargadas en cursos de agua o usadas para el riego. [9]; [10].

### 3.1 DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS FLOTANTES

Esta tecnología está siendo implementada como una de las alternativas más utilizadas actualmente, principalmente en Europa. Consiste en estanques o canales de profundidad que fluctúan entre los 0,4 a 1,5 m y que son alimentados con agua residual, en los que se desarrolla una especie flotante. Algunas de las especies que se pueden utilizar son: Jacinto acuático, Lenteja de agua y Azolla [9].

El jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*) es una de las especies acuáticas más estudiadas, debido a sus características depuradoras y facilidad de proliferación, especialmente en regiones tropicales y subtropicales.



Fuente: plantas.idoneos.com

**Figura 11.** Jacinto acuático

Esta planta obtiene del agua todos los nutrientes que requiere para su metabolismo, siendo el nitrógeno y el fósforo, junto a los iones de potasio, calcio, magnesio, hierro, amonio, nitrito, sulfato, cloro, fosfato y carbonato, los más importantes. Sus raíces pueden alojar microorganismos que asociados a ellas favorece su acción depuradora. En general, estas plantas son capaces de retener en sus tejidos una gran variedad de metales pesados (como Cadmio, Mercurio, Arsénico).

Su mecanismo de acción se cree es a través de la formación de complejos entre el metal pesado con los aminoácidos presentes dentro de la célula, previa absorción de estos metales a través de las raíces. [11]. Otro posible mecanismo sugiere que los microorganismos presentes en las raíces producen sólidos que floculan y luego sedimentan por gravedad. [8]; [9].

El jacinto acuático puede remover algunos compuestos orgánicos, tales como fenoles, ácido fórmico, colorantes y pesticidas y disminuir los niveles de DBO, DQO y sólidos suspendidos. [12].

También se han observado reducciones en la concentración de bacterias de los efluentes, por acumularse alrededor de las raíces, lo cual puede convertir a la biomasa en una fuente de contaminación, en cuyo caso se requiere un manejo cuidadoso en su cosecha.

En numerosas investigaciones realizadas con esta especie se ha demostrado que la *Eichhornia crassipes* puede eliminar del agua hasta el 97 % de materia orgánica (expresada como DBO y sólidos suspendidos), el 99 % de nitrógeno, y organismos patógenos, sustancias tóxicas e incluso metales pesados. [6]. La eliminación del fósforo está limitada por las necesidades de la planta y usualmente no excede del 50-70% del fósforo contenido en las aguas residuales. [13].

Las variaciones en la eficiencia de la remoción dependen de las condiciones climáticas y de las características de la laguna en donde se encuentran los Jacintos, como profundidad, caudal, concentración del agua residual y tiempo de retención hidráulica.

Otras plantas flotantes como los Helechos acuáticos, (*Azolla caroliniana* y *Azolla filiculoides*), la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) o algunas de las llamadas lentejas de agua (*Lemna*, *Spirodela* y *Wolffia*) han demostrado ser eficientes también para tratar residuos domésticos e industriales y tienen sobre el jacinto la ventaja de que toleran mejor las bajas temperaturas, sus costos de cosecha son más bajos y el proceso para convertirlas en un subproducto útil tal como Biogás o para la alimentación animal es más fácil. [13].

También existen indicaciones de que las pérdidas de agua debidas a la evaporación en los sistemas de los jacintos de agua son 3-5 veces mayores que en las lagunas con superficie libre. [13].

Las lentejas de agua se cosechan mucho más fácilmente que el jacinto y las algas. Su contenido en proteínas es al menos del 20% en peso seco, mayor que el del jacinto aunque ligeramente menor que en las algas.

Las lentejas son unas diminutas plantas vasculares que flotan libremente en el agua. Existen cuatro géneros: *Spirodela*, *Lemna*, *Wolffia* y *Wolffiella*, presentan una morfología relativamente simple ya que no tienen hojas ni tallos verdaderamente definidos y se multiplican por reproducción vegetativa. Se caracterizan por un rápido crecimiento.



Fuente: <http://tabloide.eurofull.com>

**Figura 12.** Lentejas de agua

Los procesos de depuración que se dan en un sistema de lentejas de agua son similares a los que se producen en una laguna facultativa. Sin embargo, existen diferencias específicas entre ambos procesos. Las lagunas facultativas tienen zonas aerobias que alcanzan hasta un metro de profundidad, con un crecimiento de biomasa (algas) productoras de oxígeno disuelto a través de la fotosíntesis, que permite a las bacterias oxidar la materia orgánica presente en el agua residual. Pero el mayor inconveniente es la contaminación introducida por las propias algas como sólidos en suspensión en el efluente.

Sin embargo la zona aerobia de un sistema de lentejas de agua es de solo unos pocos centímetros de espesor. Esta zona aerobia incluye una capa de Lemnáceas en la superficie de la columna de agua que impide la penetración de la luz solar. Por lo que el oxígeno disuelto solamente proviene de la actividad fotosintética de las lemnáceas y de la difusión del oxígeno atmosférico, es decir, no hay crecimiento de microalgas en la laguna. [13].

La falta de actividad fotosintética debajo de la capa de plantas, crea condiciones anaerobias que descomponen la DBO presente en los sólidos en suspensión en forma de DBO soluble, con desprendimiento de productos gaseosos como  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ . Una de las ventajas más notables de los tratamientos con lentejas de agua está en que se utiliza el nitrógeno amoniacal en una forma directa (como ión amonio preferencialmente), aprovechando un recurso que normalmente puede escapar a la atmósfera a través de los procesos de nitrificación y desnitrificación. [13]; [14].

### 3.2 DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS ENRAIZANTES

Otro sistema utiliza plantas del tipo halófitas, que se caracterizan por vivir en aguas poco profundas arraigadas en el suelo, cuyos tallos y hojas emergen del agua, pudiendo llegar hasta los 2-3 m de altura. Las especies que son utilizadas con este fin son: Ciperáceas (ej. Junco de laguna), Gramíneas (ej. Hierba del maná, carrizo), Iridáceas (ej. Lirio amarillo, espaldaña fina), Juncáceas (ej. Juncos), Tifáceas (ej. Eneas, espaldañas).

Las especies del género Tifáceas toleran bajos pH y son capaces de acumular en sus tejidos altas concentraciones de metales pesados, por lo que se pueden usar en minería. [8]; [9].

En general, el sistema de tratamiento de aguas residuales consiste en el paso sucesivo del agua residual previamente decantada, por una serie de canales con lecho artificial de grava o arena en los que se desarrollan las plantas. Los canales deben ser de 2 - 4 m de ancho, 0.5 - 1 m de profundidad y 100 m de longitud, por los cuales el agua residual fluye horizontalmente inundando el sustrato.

Las gramíneas del género *Phragmites* sp y tifáceas como la *Typha* sp, son las plantas acuáticas más utilizadas, cosechándose sólo la parte aérea una vez al año. El sustrato debe reemplazarse cada 10-15 años ya que queda totalmente obstruido por lodos y residuos. Según [11] uno de los factores más importantes a tener en cuenta con este tipo de especies es que no se elimina el fósforo pues no se produce adsorción. [9].

Otro sistema de depuración con plantas enraizadas consiste en la creación de un sustrato poroso de alta conductividad hidráulica, en el cual se favorece la actividad microbiana y por lo tanto se optimiza la degradación de la materia orgánica del agua residual. Este sustrato está formado por el suelo rizomas-raíces, conjunto a través del cual el agua fluye, manteniéndose siempre su nivel por debajo de la superficie. Los canales se construyen con poca profundidad (0,5-0,6 m) y con pendiente del 2-8% para que el agua escurra. Su longitud es variable y depende del cálculo de las secciones.

Según [8], la especie acuática que mejor funciona en este tipo de tratamiento es *Phragmites* sp debido a su mayor profundidad de enraizamiento frente a sus similares. En el sistema de enraizamiento no se recomienda cosechar la biomasa en ningún momento, pues así se evita el daño a los rizomas y la compactación del suelo que causarían los equívocos de recolección del material.

Sin embargo un punto muy importante a tener en cuenta es la recuperación y usos de la biomasa, ya que si no se maneja adecuadamente puede transformarse en un problema. En la literatura [8]; [11]; [15], indican los posibles usos de los desechos vegetales que se generan en los sistemas de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas.

Ellos señalan que ésta se puede incorporar directamente como fertilizante sobre la tierra o mediante compostaje, o bien usarla en la manufactura de cartón (incorporación de fibras de jacinto acuático en la suspensión de fibras de celulosa), en la producción de combustible, mediante gasificación de la biomasa para la producción de biogás o como material absorbente de colorantes y metales pesados.

Sin embargo de acuerdo a lo encontrado por [16], es importante mencionar que las plantas acuáticas acumulan gran cantidad de metales pesados en sus tejidos como mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As), cromo (Cr), los cuales son liberados posteriormente al medio pudiendo causar problemas en el suelo y en la cadena alimentaria de los humedales. Esto implica la remoción de estas plantas después de un cierto tiempo a fin de no provocar problemas de contaminación en estos ecosistemas y de no afectar de este modo la recuperación de los humedales, pero no sin tener muy presente que tipo de disposición final se debe dar a estas plantas removidas. [9].

### **3.3 APLICACIONES GENERALES DE LAS MACROFITAS.**

La efectividad de las macrófitas como sistemas de depuración de aguas cargadas con nutrientes ha sido estudiada por varios investigadores. En la actualidad muchos sistemas de tratamiento de aguas residuales incorporan con éxito plantas acuáticas en su proceso de depuración.

El procedimiento más común es colocar una densa población de plantas flotantes en una laguna de oxidación y cosechar periódicamente una parte de la población, con el fin de mantenerla en su fase exponencial de crecimiento y en el máximo de su eficiencia. Esto es precisamente lo que se hace con los jacintos y lentejas de agua. En estados unidos, por ejemplo, existen numerosas lagunas con estas especies, que sirven para tratar aguas residuales de granjas o de ciudades pequeñas.

En los sistemas emergentes, el agua residual anega un sustrato (puede ser el suelo, grava o algún otro material inerte) que sirve de soporte a las plantas enraizadas en él. Los sistemas con grava denominados GHB (Gravel Hydroponic Beds) o filtros híbridos, combinan el efecto de las plantas que absorben los

nutrientes, actuando como filtros físicos que proporcionan hábitat para los microorganismos, formándose una densa capa microbiana que crece adherida al sustrato inerte y que degrada la materia orgánica presente en el agua.

Según [17], en Alemania se patentó hace algunos años un sistema que utiliza *Phragmites communis* y *Schoenoplectrus lacustris*, dos plantas emergentes, para tratar aguas residuales y en Holanda se utiliza un sistema en el cual las plantas se siembran directamente en zanjas en el suelo, siendo las especies utilizadas las *Phragmites communis* y *Juncos effusus*. El promedio de remociones de DBO y de bacterias coliformes totales y fecales en los dos sistemas alcanzan valores del 97, 86.7 y 99.9 % respectivamente. [6].

La técnica de la película nutriente (TPN) se ha utilizado también con algunas especies de gramíneas como el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) para el tratamiento de aguas residuales. En esta técnica, el agua forma una delgada película que pasa a través de las raíces de las plantas, las cuales actúan como un filtro físico y biológico.

Una de las aplicaciones más interesantes de las plantas acuáticas es el "biohome", desarrollado por la NASA, en Estados Unidos, en la década de los ochenta. El "biohome" que puede traducirse como "hogar vital", es un sistema cerrado que podría llegar a alojar a un ser humano y hacer posible su supervivencia en el espacio interestelar por un tiempo largo. La idea de este sistema implica la renovación completa del agua, puesto que no habría ningún suministro exterior. En los ensayos realizados por la NASA las excretas humanas producidas dentro del "biohome" son tratadas por medio de filtros híbridos que utilizan plantas emergentes (*Iris pseudacorus*, *Typha latifolia*, *Scirpus californicus*, *Panicum repens*, *Canna flaccida*, *Zantedeschia aethiopica*). El efluente de estos sistemas de tratamiento podría, después de un proceso de desinfección con luz ultravioleta, utilizarse en el baño y la cocina del "biohome". [6].

En otras investigaciones que se han realizado con plantas acuáticas macrófitas se han encontrado beneficios tanto económicos como ambientales bastante atractivos. En la publicación [9], recopilaron y analizaron los procesos y aplicaciones de los sistemas de depuración de aguas residuales con plantas acuáticas y su importancia en las distintas actividades industriales, mineras y domésticas. A continuación se presentan los resultados encontrados por estos investigadores.

En [18], investigaron el proceso de eutrofización en lagos poco profundos hallando que las comunidades de plantas sumergidas son reemplazadas por poblaciones densas de fitoplancton. Notaron que esto ocurre cuando hay una fuerte contaminación por altas concentraciones de fósforo y nitrato de amonio y que las concentraciones de fósforo reactivo no aumentan en la columna de agua cuando

existen plantas sumergidas, pero sí cuando las plantas fueron manualmente extraídas. Por otra parte los niveles de nitrato y amonio se mantuvieron bajos en presencia de estas plantas.

En [19], encontraron que la calidad del agua de los lagos puede mejorar notablemente después de la introducción de macrófitas acuáticas, aunque los resultados indicaron que previamente deben usarse plantas sumergidas como la *Potamogeton maackianus*, a fin de potenciar la estabilidad de la vegetación acuática.

En [20], estudiaron la composición de macrófitas ante distintos niveles de concentraciones de nutrientes en las aguas servidas domiciliarias. Sus resultados permitieron establecer que existe una correlación positiva entre la carga de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo. Inicialmente la experimentación se realizó con *Characeae*, cubriendo un 90% de cobertura en los cuatro estanques. Posteriormente, esta especie desapareció, siendo reemplazada por la especie *Elodea nuttallii* en todos los estanques. La tasa de transición mostró una correlación positiva con la concentración de los nutrientes. La *Elodea nuttallii* fue a su vez reemplazada por la especie *Lemna minor* en el estanque que recibió la mayor concentración de nutrientes. Luego de un tiempo se observó que la *Elodea nuttallii* permaneció estable hasta el término del estudio en los estanques que recibieron efluentes conteniendo concentraciones intermedias, con un patrón de crecimiento horizontal, y formando una densa biomasa superficial que abarcó el 100% del área de los estanques. En cambio, en el estanque con menor concentración de nutrientes la *Elodea nuttallii* mostró un patrón de crecimiento vertical y un cubrimiento superficial del 50% terminando el experimento.

En [21], estudiaron el efecto de la desnitrificación provocada por bacterias en un ambiente acuático con vegetación sumergida como agente removedor de nitrógeno. La especie utilizada en el estudio fue la *Potamogeton pectinatus*. Los resultados obtenidos permitieron establecer que este tipo de sistemas permite extraer  $190 \text{ mg N}_2 / \text{m}^2 \text{ h}$  como  $\text{NO}_3$  para una carga de  $2300 \text{ mg N}_2 / \text{m}^2 \text{ h}$  como  $\text{NH}_4^+$ . Los autores concluyeron que la vegetación sumergida puede aumentar significativamente la remoción de nitrógeno en ecosistemas acuáticos poco profundos, ya que contribuye al desarrollo de comunidades de bacterias desnitrificantes. En otra investigación, [22], encontraron que la vegetación tiene una fuerte influencia en la retención de nitrógeno en los wetlands, ya sea por absorción directa en los tejidos de las plantas o por desnitrificación provocada por microorganismos. Ellos trabajaron con las especies *Lythrum salicaria*, *Phragmites australis* y *Typha angustifolia*.

Por otra parte en [23], estudiaron el comportamiento de las macrófitas *Typha* sp y *Eleocharis* sp en un sistema de depuración de aguas residuales asociado con un reactor anaerobio. Los resultados luego de dos años de funcionamiento mostraron

que hubo una reducción entre el 90 a 97% de sólidos Suspendidos y entre 60 a 85% de la DQO, para un caudal de 200 l/d. Sin embargo pudieron evidenciar algunos problemas en el crecimiento de *Eleocharis* sp, cuando el caudal fue aumentado a 400 l/d, presentándose una reducción entre 73 a 97% de sólidos suspendidos y entre 67 a 97% de DQO. En las pruebas con 600 l/d, los sólidos suspendidos se redujeron entre 60 a 80%, mientras que la DQO entre 55 a 60%. [9]

En cuanto a los metales pesados que son una fuente de contaminación muy peligrosa, se han realizado un gran numero de estudios debido a que muchos de los residuos industriales contienen altas concentraciones de ellos. Según la información consultada los wetlands artificiales son efectivos para remover estos contaminantes de los efluentes industriales. En [24], estudiaron la efectividad de doce especies de macrófitas para extraer metales pesados de aguas residuales, encontrando que *Polygonum hydropiperoides* fue la que mejor se comportó.

Por otra parte en [25], estudiaron la efectividad de la especie acuática *Lemma gibba*. Los resultados mostraron que aguas residuales con concentraciones de hasta 20 mg/l de  $Fe^{3+}$ , 20 mg/l de  $Zn^{2+}$  y de menos 30 mg/l de  $Al^{3+}$  no afectan el rendimiento de *Lemma gibba* como purificador. Por otro lado, concentraciones de cromo superiores a 0,1 mg/l y de cobre mayor a 1 mg/l producen efectos negativos en el rendimiento de esta especie acuática estudiada.

A su vez, [26], demostraron que *Phragmites australis* es capaz de tolerar soluciones de hasta 1 mg /ml de Zn y 10 mg /ml de Pb en aguas residuales contaminadas con metales pesados.

Por su parte, [27], estudiaron la capacidad de extracción de cadmio de algunas plantas macrófitas flotantes durante los periodos más fríos del año y descubrieron que *Salvinia herzogii*, *Pistia stratiotes*, *Hydromistia stolonifera* y *Eichhornia crassipes* fueron muy eficientes. No obstante, la especie que mejores resultados presentó fue *Pistia stratiotes*, destacándose por su gran desarrollo. Esta especie fue capaz de mantener su capacidad de remoción del cadmio, aunque se manifestaron algunos síntomas de toxicidad a concentraciones entre 4 y 6 mg/l. Los investigadores notaron que la mayor concentración del contaminante se localizaba en las raíces de las plantas.

En [28], encontraron que las especies *Spartina alterniflora* y *Phragmites australis* son capaces de acumular plomo en sus tejidos. Ellos señalan que la mayor concentración del metal se encontró en las hojas de *S. alterniflora*, en cambio la especie *P. australis* concentra el plomo en sus tallos, razón por la cual la *P. australis* resulta ser mejor para su posterior manejo y disposición, pues el tallo soporta mejor la descomposición que los tejidos de las hojas y demora más en

liberar el metal antes de ser enterrado o quemado, siendo más seguro para el medio ambiente.

En [29], realizaron un estudio para determinar el nivel de bioacumulación de mercurio en plantas acuáticas, tanto en compartimientos sedimentados como en columna de agua. Ellos encontraron que *Elodea densa*, *Ludwigianatans*, *Lysimachia nummularia* e *Hydrophila onogaria*, todas plantas macrófitas enraizantes, acumulan grandes cantidades de mercurio en las hojas y tallos cuando este metal está en forma orgánica, sin embargo esta bioacumulación fue 10 veces mayor cuando la vía de contaminación fue a través de los sedimentos en vez de la columna de agua.

En este mismo sentido, en [15], indican que la especie *Sphagnum* spp. también es capaz de retener el mercurio en sus tejidos, sin embargo, resaltan que si esta biomasa no es adecuadamente manejada puede liberar el mercurio contenido en las células a formas más móviles, tales como metilmercurio (MeHg) y de ahí pasar a los peces y luego a los humanos, causando un problema ambiental mucho mayor.

Otro de los elementos altamente peligrosos y contaminantes es el Arsénico, para el cual en una reciente investigación registrada en [30], encontraron que la fitofiltración con helechos puede purificar el agua que ha sido contaminada con él. En los Estados Unidos, un equipo de científicos encontró que las especies de helechos llamadas *Pteris vittata* pueden aspirar el arsénico fuera del agua contaminada, reduciendo los niveles de arsénico de 200 mg/l cerca de 100 veces en un lapso de 24 horas. A diferencia de otras estrategias para la remoción de arsénico, la fitofiltración no produce un lodo químico rico en arsénico, el cual es difícil de disponer. En su lugar, exprimiendo en prensas la savia de las plantas se remueven tres cuartos de arsénico, que pueden ser extraídos para aplicaciones industriales.

En investigaciones realizadas por la Universidad del Sur de Alabama, 2002, se encontró que los wetlands artificiales para tratar aguas residuales domiciliarias, permiten obtener una buena remoción de DBO, coliformes fecales y amonio. Estos sistemas pueden incluir especies ornamentales, que además de embellecer el entorno, mantienen el aire libre de malos olores y atraen a insectos polinizadores y aves. Los sistemas pueden ser diseñados para viviendas domiciliarias, así como las aguas lluvias en los parques públicos.

Con respecto a la depuración de efluentes industriales con sistemas artificiales tipo "wetland", [31], condujeron una investigación con dos especies de macrófitas; *Typha* spp y *Scirpus lacustris* para tratar aguas subterráneas contaminadas con petróleo y nitrato. En tres meses de estudio, los resultados mostraron que hubo una remoción de PAH (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos) entre 98,8 y 1914

mg/m<sup>2</sup> d. Los análisis mostraron que el 0,4% de PAH quedó retenido en el sustrato. La eficiencia de remoción del nitrato fue 91% y del nitrito 97%.

En otra investigación conducida en [32], se demostró que los wetlands artificiales a base de *Typha latifolia* plantada sobre un lecho arenoso y un tiempo de retención hidráulico de 48 h, pueden reducir hasta un 80% la DBO y 95% el NH<sub>3</sub>-N contenido en efluentes provenientes de una refinería de petróleo. En este mismo sentido, en [33], encontraron altas tasas de remoción de nitrógeno en su forma amoniacal en wetlands artificiales especialmente construidos para esos propósitos. Por su parte, Gasiunas *et al.* (2005) lograron tasas de remoción para nitrógeno total y fósforo de 37-44% y 2 mg/l, respectivamente, en aguas residuales domiciliarias.

En cuanto al selenio se ha encontrado que *Potamogeton crispus* y *Ruppia maritima*, ambas especies sumergidas, son capaces de acumular altas concentraciones en sus rizomas, mientras que al probar especies de macrófitas para remover selenio de aguas residuales industriales, se encontró que la mayoría de ellas tienen un gran potencial para volatilizar y acumularlo. Dentro de sus resultados se destacan la *Myriophyllum brasiliense* Camb, *Juncus xiphioides*, *Typhalatifolia* y *Scirpus robustus*.

Con respecto a la minería, también se han realizado estudios para tratar de solucionar los problemas ambientales de gran impacto que tienen sus efluentes ácidos. En ese sentido en [34], señalan que este tipo de efluentes ha impactado fuertemente a lo largo de más de 3200 km de curso de ríos en el oeste de Virginia, Estados Unidos. Debido a esto, ellos estudiaron la efectividad de dos poblaciones de macrófitas *Scirpus cypericus* (L.), por ser muy abundante en wetlands naturales de la región y construyeron un sistema artificial. Los resultados indicaron que el pH del agua residual aumentó de 2,8 (típico del efluente) a 4 ó más, encontrándose que el crecimiento de las plantas era mejor cuando el pH era superior a 4. En general las plantas mostraron bajo potencial para atrapar metales pesados, pues se afectaba la raíz. Una población mostró un mayor crecimiento aéreo sugiriendo una mayor habilidad para crecer en este tipo de ambientes. Los autores concluyeron que hay un potencial para probar distintos genotipos de *S. cypericus* para aumentar el rendimiento en la depuración de aguas residuales de actividades mineras.

En este mismo sentido, en [35], compararon la efectividad de dos tipos de wetland (uno artificial y otro natural), que contenían especies de *Typha latifolia*, *Juncus effusus* y *Scirpus cypericus* para tratar los efluentes ácidos de actividades mineras. Ellos encontraron que los wetland artificiales aceptaron mayores cargas de contaminantes y tuvieron mayores eficiencias en la remoción de Mn, Zn, Cu, Ni, B, y Cr. Por su parte, en [36], determinaron la remoción de nutrientes por parte de las macrófitas *Typha domingensis* Pers. y *Persicaria pensylvanica* en un wetland

marino natural, donde se recibieron efluentes de actividades agrícolas y aguas residuales ya tratadas por sistemas de depuración secundarios. Los resultados permitieron concluir que el sistema funcionó bastante bien como receptor de aguas residuales, donde ambas especies de macrófitas resultaron efectivas en atrapar N, P, Cu, y Fe. Al comparar ambas especies, se observó que *T. domingensis* concentraba mayores niveles de contaminantes que *P. pensylvanica*.

En [37], evidenciaron que las plantas acuáticas pueden absorber sustancias radiactivas, como es el caso de *Eleocharis dulces* que tuvo un buen crecimiento en wetlands artificiales especialmente construidos para tratar efluentes de minas de uranio, encontrando que la planta acumula grandes cantidades de uranio en sus raíces. Sin embargo, hacen especial énfasis en indicar que no todos los sistemas acuáticos naturales deben ser vistos como alternativas válidas de ser usados como sistema depurativos de aguas residuales.

En otra investigación se determinó durante 10 años la efectividad de un sistema natural de 8,3 ha, donde predominaban las macrófitas *Typha* sp. y *Sphagnum* spp., en el tratamiento terciario de los efluentes de una planta de aguas residuales. Los datos obtenidos mostraron que el pH del agua purificada aumentó de 4,2 a 6,7. Por su parte, este sistema permitió remover el 37% del nitrógeno y el 17% del fósforo proveniente de la planta de tratamiento, valores considerados de poco impacto. Después de algunos años, la cobertura con *Sphagnum* spp se redujo considerablemente. Los autores concluyeron que este tipo de ecosistemas no constituye una buena alternativa para ser usado como tratamiento terciario de aguas residuales.

Por su parte, en [38], sugieren que entre los factores que influyen el establecimiento y desarrollo de macrófitas del género gramíneas están la luz, la velocidad del flujo y la carga hidráulica y además que el establecimiento de plantas acuáticas en zonas pantanosas dependerá de los cambios de oxígeno durante el día y del pH, definiendo la biomasa que se desarrolla posteriormente y su consecuente productividad neta. Esto ya que los cambios en el pH del suelo en los wetlands pueden afectar la retención y liberación de los metales pesados.

Este tipo de tratamientos como los wetland están siendo actualmente experimentado en Chile para el tratamiento de aguas residuales de los planteles lecheros, porcinos, avícolas, mataderos, agroindustrias, vitivinícolas, que se caracterizan por sus altas cargas de materia orgánica, sólidos en suspensión, DBO, DQO, nutrientes y en caso de la agricultura, residuos de pesticidas.

Los sistemas de macrófitas en flotación (sistema FMF) que se utilizan tanto en pequeños sistemas para la regeneración de lagos u otros medios de agua dulce y la depuración de las aguas residuales urbanas de viviendas unifamiliares, como para la depuración de las aguas de grandes colectividades; la depuración de

aguas industriales, la eliminación de contaminantes en efluentes eutrofizados, e incluso las aguas prepotables. En estos sistemas no hay necesidad de cloración posterior. Se basan en la creación de varios canales impermeabilizados donde se colocan plantas del tipo enneas (espedañas), carrizos o juncos en flotación, haciendo pasar el agua residual por el entramado de raíces que se forman bajo el agua, que sirven de soporte a numerosos microorganismos que reciben el oxígeno directamente de la macrófita sin necesidad de aireación. En estas condiciones los microorganismos degradan la mayor parte la materia orgánica y las plantas absorben por su sistema radicular los nutrientes minerales eutrofizantes. Existen ya varias instalaciones de este tipo en España, principalmente en algunos aeropuertos.

Estos sistemas son reconocidos como los de mayor rendimiento como tratamiento secundario, debido a que estos sistemas son los que presentan mayor superficie radicular en contacto con el agua residual por unidad de superficie de plantación, lo que indica directamente que la degradación de la materia orgánica se efectúa por los microorganismos adheridos a dicha superficie radicular y que siempre están bañados por el agua que se quiere depurar.

Los sistemas de macrófitas emergentes colocados en flotación (sistema FMF), en los que la rizosfera de las macrófitas está totalmente bañada por el agua residual de forma permanente y sin posibilidad de reducción del flujo hidráulico, tienen una gran capacidad de depuración efectiva y permanente, algo que no ocurre con los sistemas de flujo superficial. Esto se ha podido comprobar experimentalmente con el funcionamiento del sistema FMF situado en el aeropuerto de Madrid-Barajas o en el sistema FMF instalado en el año 2000 en el aeropuerto de Reus, que sigue funcionando actualmente con plena efectividad. [39].

En México son tres los tipos de plantas acuáticas flotantes que tienen alto potencial de uso: el lirio acuático, las lemnáceas y las salvinias. El lirio acuático es el más utilizado para el tratamiento de aguas residuales. Su productividad está en función de la temperatura del aire, la disponibilidad de nutrientes (principalmente nitrógeno) y la densidad de la planta. Además ha sido utilizado no sólo para el tratamiento de efluentes municipales, sino también para la remoción de metales pesados. Los sistemas más conocidos son el lago de Texcoco y el de Jiquilpan, Michoacán. [40].

Las lemnáceas comprenden cerca de 35 especies y 4 géneros: *Spirodela*, *Lemna*, *Wolffiella* y *Wolffia*. El más utilizado para el tratamiento de efluentes es el género *Lemna*. De la *Lemna minor*, la biomasa obtenida después de cultivarla en efluentes municipales, se ha utilizado para la alimentación animal, aportando un contenido de proteína de 40 por ciento.

Por último, las salvinias comprenden cerca de 12 especies y han sido utilizadas para la remoción de zinc. La biomasa obtenida se reportó útil para la producción de biogás. Las salvinias se han utilizado muy poco en el tratamiento de aguas residuales, por ello son escasos los trabajos al respecto.

De igual forma en Cuba, un grupo de investigadores del Instituto superior politécnico realizó un estudio comparativo acerca de la capacidad depuradora de cinco plantas acuáticas flotantes sobre las aguas residuales. Para analizar el efecto depurador de las plantas se trabajó además con controles (sin plantas) los cuales funcionaron como lagunas de estabilización. Los resultados obtenidos demostraron que mediante el uso de estas plantas se pueden obtener eficiencias altas en la remoción de los contaminantes más comunes de las aguas residuales domésticas, siendo significativo las remociones en carga de nitrógeno entre 7 y 38 kg de NTK /Ha.d y cargas de fósforo entre 0,9 y 13 kg de Pt/Ha.d, observándose que el tamaño de la planta así como su sistema radicular influyen en la remoción de contaminantes. Las plantas utilizadas fueron: jacinto de agua, lemna, pistia, salvinia, azolla.

El jacinto de agua fue a planta más eficiente, lográndose remociones de hasta 70% en DBO con cargas orgánicas de 510 kg/m d y tan solo 1 día de tiempo de retención, mientras la azolla fue la de menor eficiencia. Al analizar la producción de biomasa de plantas, en [41], encontraron que para las condiciones climáticas de Cuba se obtienen altas velocidades de crecimiento para todas las plantas estudiadas, pudiéndose lograr además altos rendimientos en proteínas (en base al nitrógeno).

Por último ellos evaluaron la posibilidad de utilizar las plantas cosechadas en los sistemas de tratamiento y realizaron un estudio de la digestibilidad en cerdos, siendo las plantas estudiadas: jacinto de agua, lemna y azolla. Los resultados demostraron que estas plantas pueden ser utilizadas como complemento de la dieta de los animales, siendo la azolla la planta que presentó los mejores resultados seguida por la *Lemna* y por último el jacinto de agua. [41].

También se encontró en la literatura que en [41], los investigadores estudiaron la remoción del Cromo(III) en sistemas discontinuos con residual sintético, utilizando el jacinto de agua. Los experimentos efectuados se realizaron en recipientes de cinco litros de capacidad, en los que se añadió cuatro litros de disolución de cromo(III), obtenida por dilución madre (preparada por reducción  $K_2Cr_2O_7$  en medio ácido con sacarosa) con agua corriente, produciéndose disoluciones con pH entre 4-6. La velocidad de absorción del cromo(III) por parte del Jacinto se determinó por peso de masa seca de la planta. Durante los experimentos se encontró que la cantidad de cromo (III) removido es de 2.32mg de cromo (III)/gr de planta seca, siendo este valor superior para el caso de las plantas jóvenes. La remoción de cloro lograda mediante el uso del jacinto acuático en 24h fue de

79.2% como valor promedio, sin embargo, a las 5 h de comenzado el proceso se había logrado una remoción del 63.3% lo que representa casi el 80% del Cr(III) total removido. Por otra parte, ellos pudieron determinar que la velocidad de absorción del Cr(III) por la planta va disminuyendo a medida que esta lo va acumulando y por encima de 5mg de Cr(III) se disminuye en más de 5 veces. [42].

Por su parte, en [13], recopilaron en un artículo publicado en la revista Tecnología del agua en 1998, las posibles ventajas y desventajas de utilizar la lenteja de agua como sistema de depuración de aguas residuales de bajo coste según las recomendaciones de Landolt y Kandeler en 1987. Estas se presentan resumidas a continuación.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Toleran un alto contenido de nutrientes en el agua residual (Spolyrrhiza es capaz de crecer en soluciones con 1gr de N2 /l y 1.5gr P/l)	Detienen su crecimiento a bajas temperaturas. Fuera de las regiones tropicales y subtropicales las aguas residuales se deben calentar durante el invierno.
Son capaces de absorber y desintegrar sustancias tóxicas y reducir el contenido de algunos patógenos.	Viven solamente en una fina capa sobre la superficie del agua; por lo que se necesitan grandes áreas para obtener buenos rendimientos.
Son capaces de acumular metales pesados	Cuando las aguas residuales contienen metales pesados, no se pueden emplear las plantas en la alimentación o fertilización ya que en el proceso de depuración se produce una acumulación de los metales en el cultivo.

**Tabla 2.** Ventajas y desventajas de la utilización de las lentejas de agua

En la literatura se ha encontrado una gran variación con respecto a los niveles óptimos de nitrógeno amoniacal para el crecimiento de la lenteja de agua. En [43], reportan que *Lemnaceae* puede soportar niveles hasta de 375 mg/l de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. Lueoent, 1980 en experimentos con *Spirodela polyrrhiza*, *Lemna monir*, *Lemna gibba* y *Lemna minúscula*, encontró como rango óptimo de nitrógeno 14-350mg/l (50% como nitrógeno amoniacal) a pH=5.5. Wildschut, 1984 y Oron, 1986 en experimentos con *Spirodela polyrrhiza* reportan como nivel óptimo de nitrógeno amoniacal 50mg/l a pH neutro y encontraron que a 200mg/l de nitrógeno amoniacal se presentaba un efecto inhibitorio en el crecimiento. [14].

## CAPÍTULO IV

### 4. TECNOLOGÍAS BIOLÓGICAS QUE USAN MACROFITAS PARA DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA

En los últimos años la depuración de las aguas tanto domésticas como Industriales, han alcanzado los primeros lugares en las prioridades de las empresas y entidades gubernamentales para implementar programas de saneamiento ambiental.

En Colombia se han realizado ya diversos trabajos en esta área, pero aún el tratamiento de aguas residuales utilizando plantas acuáticas no puede considerarse un campo de investigación como tal aunque paradójicamente, es en el trópico donde estos sistemas se muestran más promisorios, debido a la ausencia de estaciones climáticas que favorecen su operación.

En países templados, donde se ha desarrollado la mayor parte de las investigaciones, las bajas temperaturas y la mayor intensidad de la radiación solar en el invierno destruyen periódicamente todo el material vegetal y hacen necesario el reiniciar el proceso cada año. Además, la posibilidad de encontrar especies potencialmente utilizables para el tratamiento de aguas residuales es mucho mayor en el trópico, en razón de su mayor diversidad biológica.

Dentro de la bibliografía consultada, los estudios realizados hasta el momento en Colombia pueden citarse, [44] y [45] quienes utilizaron varias especies de pastos con la técnica de la película nutriente para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Por su parte en [46], estudió varias especies de pastos para el tratamiento de plantas residuales del beneficio del café y la utilización de *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes* para el tratamiento de los efluentes de una industria de metales y en [6], se utilizó *Eichhornia crassipes* y *Limnobium laevigatum*, para el tratamiento de aguas residuales agroindustriales.

La Dra Julia Caicedo de la Facultad de Ingeniería de la universidad del Valle lideró un proyecto de investigación en donde se determinó en condiciones controladas de laboratorio, el efecto de diferentes concentraciones de nitrógeno amoniacal en la tasa de crecimiento y producción de biomasa de la *Spirodela palyrhiza* a un nivel de pH similar al encontrado en un efluente anaeróbico. La principal conclusión a la que llegó fue que a concentraciones superiores de 50 a 200mg/l de  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  se reduce el crecimiento de la *Spirodela palyrhiza* (lenteja de agua) y que a 400mg/l ya se observan efectos letales en la planta. [14].

Por su parte, en la Universidad Tecnológica de Pereira, se llevo a cabo un estudio en el cual se monitoreo un sistema combinado de laguna de estabilización y laguna con jacinto de agua con el objetivo de cuantificar la reducción de la DBO, nutrientes y sólidos en un agua residual piscícola, provenientes del cultivo y procesamiento de truchas.

Este estudio fue liderado por la Dra. Alba Domínguez en la Industria Pez fresco de Pereira. Los parámetros analizados fueron demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniacal ( $NH_3-N$ ), fósforo total (PT), Sólidos suspendidos totales (SST), oxígeno disuelto (OD) y pH. Ella determinó que las características de las aguas residuales correspondientes a las del procesamiento de las truchas se asemejaban a un residual domestico bruto, lo cual le permitió determinar la factibilidad del tratamiento.

Antes de pasar a los tanques donde se encuentra la planta, los cuerpos de agua fueron sometidos a un tratamiento anaerobio, donde intervienen bacterias que no necesitan oxígeno para sobrevivir, las cuales descomponen los sólidos. Esta descomposición libera nutrientes que son utilizados por la planta para su crecimiento, la cual a su vez puede ser utilizada como forrajeo para el cultivo de los peces.

Las conclusiones más importantes a las cuales llegó fueron que un sistema integrado de laguna de estabilización y laguna con jacinto es un sistema que contribuye al tratamiento de las aguas residuales piscícolas y a la producción de biomasa ya que las eficiencias en las remociones logradas fueron superiores en la laguna que se encontraba totalmente cubierta con plantas siendo significativa la remoción de SST. Esto demuestra que la presencia de las plantas impide el crecimiento de las algas y genera un efluente mas claro, ya que al flotar libremente sobre la superficie de la masa de agua, forma una densa capa que no dejan pasar la luz. En el sistema combinado se obtuvieron porcentajes de remoción de 63% para la DBO, 61% para la DQO, 49% para el PT, 54% para el  $NH_3-N$  y 15% para los SST. [47].

Con la ayuda de diferentes formas de desinfección que utilizan cloro, ozono o luz ultravioleta, las aguas obtenidas a través de esta técnica pueden ser utilizadas en áreas con recursos limitados, lo que representa una alternativa económicamente favorable.

Los sistemas de tratamiento con plantas acuáticas son relativamente sencillos de construir y de operar y no requieren para su funcionamiento de grandes insumos de energía o maquinaria ni de personal especializados. Esta es otra razón por la cual podría considerarse la posibilidad de utilizarlos como solución alternativa para muchos problemas de contaminación acuática en el país. En muchos casos, el

deterioro de las fuentes por vertimiento de residuos líquidos en Colombia obedece a falta de recursos económicos, técnicos o humanos para poner en marcha los sistemas convencionales. Por otra parte la operación de múltiples sistemas pequeños como estos, que traten vertimientos puntuales puede ser menos costosa y más fácil de manejar que un gran proyecto para la recuperación de un cuerpo de agua deteriorado.

El Instituto Colombiano del Petróleo de Ecopetrol se ha destacado por sus altos logros tecnológicos, mediante arduas investigaciones con proyectos encaminados a preservar el medio ambiente, con los que se busca neutralizar de manera eficiente el impacto que generan los desechos propios de la actividad del manejo y procesamiento de los Hidrocarburos.

Algunos de los trabajos de investigación mas interesantes en este campo los han realizado los Ingenieros Retrepo y Cardeñosa [48], quienes estudiaron a nivel laboratorio la utilización del *Eichhornia crassipes* como sistema de tratamiento de las aguas con altos contenidos de cloruros procedentes de campos de producción de petróleo, dando respuesta a una necesidad creciente de esta industria para el manejo de sus aguas efluentes.

Los jacintos acuáticos fueron colocados en recipientes con diferentes concentraciones de cloruros, con el fin de evaluar su capacidad de remoción y su comportamiento con el tiempo. Entre los resultados mas exitosos se destaca la remoción entre el 20% y 29% a los 7 días y un máximo de 48% a los 14 días de ensayo para soluciones de concentraciones controladas de NaCl. Los ensayos realizados con aguas residuales de un campo de producción, presentaron remociones de 15% a los 7 días y de 37% a los 14 días, encontrándose en el mismo rango de las soluciones preparadas a escala laboratorio. Este estudio de igual forma permitió determinar el límite de tolerancia de cloruros para el jacinto encontrándose que la concentración debe ser menor o igual a 5000mg/L Cl, en soluciones puras de NaCl (en agua destilada).

A nivel industrial, [12], lideró una investigación que involucraba la utilización del jacinto acuático dentro del tratamiento de las aguas residuales de la (PTAR), del complejo industrial de Barrancabermeja. Esta agua contienen los contaminantes de los afluentes emanados de los procesos de destilación y ruptura catalítica, drenaje de tanques, colectores aceitosos, unidad de balance y lavado de intercambiadores de calor. Dentro de los resultados obtenidos en este estudio, el Jacinto acuático demostró facultades en la remoción de fenoles hasta un límite de concentración de 20ppm, cuya bioacumulación se realiza en las hojas y en una menor proporción en los tejidos del tallo. También pudo determinar que los procesos metabólicos desarrollados en el vegetal, transforman los fenoles en otros compuestos no tóxicos. Sin embargo, señala que el tratamiento de aguas residuales industriales con Jacinto acuático exige un manejo y control constante

del vegetal, ya que a medida que transcurre el tiempo, las hojas mas viejas son renovadas por nuevas, cayendo al agua e iniciándose un proceso de putrefacción el cual incrementa la concentración de materia orgánica al sistema con el consiguiente aumento de la demanda, desequilibrando el ciclo.

Por otra parte desde hace alrededor de 2 años, el Instituto Colombiano del Petróleo ICP, implementó la utilización de las macrófitas *Eichhornia crassipes* y *Spirodela* como parte del tratamiento terciario de sus aguas aceitosas y domésticas dentro de un proyecto de mejoramiento ambiental, en conjunto con procesos microbiológicos con los que se han alcanzando excelentes calidades de agua efluente para ser vertidas en forma segura a los cuerpos de aguas del entorno, sin generar ningún daño ni impacto ambiental.

Por medio de monitoreos semanales de DBO<sub>5</sub>, DQO, Sólidos disueltos, suspendidos y totales, grasas y aceites y fenoles se caracterizan los afluentes industriales que provienen de las plantas piloto y los laboratorios. El tratamiento se realiza mediante un proceso microbiológico en el cuál inicialmente las bacterias reductoras, consumen el hidrocarburo proveniente de las agua afluentes y excretan un lodo de fácil remoción y que no genera contaminación.

El efluente ya tratado se deposita por un periodo de tiempo establecido, dentro de unas piscinas en donde fluye a través de los biofiltros en los que se encuentran las especies *Eichhornia crassipes* y *Spirodela palyrhiza*. Esta parte de tratamiento final o terciario, utilizando plantas macrófitas es un sistema que con la ayuda de bacterias, algunas de las cuales se encuentran libres y otras adheridas a sus raíces, permite remover o atrapar algunos contaminantes como es el caso de los metales pesados y lograr la degradación total de los hidrocarburos remanentes, garantizando de esta forma que las condiciones físico-químicas en el agua efluente las hace aptas para su posterior vertimiento.

Experimentalmente se ha encontrado que estas plantas, en asociación con las bacterias, degradan la materia orgánica y acumulan minerales y nutrientes presentes en las aguas residuales para convertirlos en biomasa fácil de cosechar sobre la superficie del agua y que puede llegar a ser reutilizada en el sistema.

A continuación se presentan algunos resultados obtenidos durante el 2005 y algo del funcionamiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales e Industriales, con el propósito de ilustrar los beneficios del tratamiento combinado utilizado.

## **4.1 FUNCIONAMIENTO DE LA PTAR INDUSTRIAL DEL ICP.**

Esta planta esta diseñada para efectuar un tratamiento microbiológico de los afluentes, ya que se basa en el principio de lodos activados con aireación extendida, en el cuál son retiradas grandes cantidades de materia orgánica expresadas como DBO<sub>5</sub> y DQO, sólidos suspendidos, sedimentables, grasas, aceites.

- **Tratamiento Primario:**

### **Tanque de Homogenización.**

Este proceso se inicia en el tanque de homogenización donde son recibidas las aguas industriales generadas en plantas piloto y laboratorios del ICP cuyo caudal promedio está entre 48 y 100 m<sup>3</sup>/día.

En este tanque se realizan controles permanentes del pH y la temperatura para garantizar la efectividad y confiabilidad de los procesos posteriores. Los agentes neutralizantes más utilizados son el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Soda Cáustica Tipo Comercial, Cal hidratada Esta última se utiliza con frecuencia por sus características de coagulante- floculante de los lodos contenidos en el agua afluente industrial y además actúa como secuestrante de algunos metales, mejora el color del agua y como coagulante de grasas y aceites, además se consigue con facilidad en el mercado y a bajos costos.

### **Separador API (Aceite-Agua) y Barrelos**

En este sistema se separa la mayor cantidad de grasas, aceites, hidrocarburos existentes en el agua industrial, aprovechándose la diferencia de densidades entre los aceites y el agua. Esta separación se realiza a baja velocidad que se presenta en el separador y por la operación continua de un “rastrillo” que transporta lentamente las capas de hidrocarburo a los desnatadores. Al terminar el recorrido, el “rastrillo” se sumerge levemente para realizar un barrido de los lodos que venían con el agua de alimentación al separador. Tanto los lodos como la nata de hidrocarburo retirada del agua, son enviados a un tanque de almacenamiento, denominado tanque de Slop.

- **Tratamiento Secundario:**

### **Reactor**

El agua libre de grasas, aceites y en su mayor parte de sólidos suspendidos pasa al bioreactor donde se realiza un tratamiento biológico con lodos activados de

aireación extendida. Los microorganismos existentes dentro del reactor digieren la materia orgánica presente en el agua y excretan lodos no contaminantes y de fácil retiro en el filtro que está después de los tanques de sedimentación. El control permanente del pH, permite asegurar la supervivencia de las bacterias.

### **Sedimentador**

Consisten en dos tolvas ubicadas en la parte posterior de cada reactor. El agua llega del reactor a los tanques de sedimentación a través de un canal colector donde los sólidos depositados en cada sedimentador son recolectados en las tolvas. La función básica del sedimentador es separar de las aguas residuales tratadas los lodos activos. Estos lodos son recirculados mediante bombas hacia el reactor. El agua tratada pasa al filtro por rebose en donde se realiza el tratamiento terciario.

- **Tratamiento Terciario:**

### **Filtración.**

Por ser un sistema de tratamiento industrial, la planta cuenta con proceso de filtración rápida por gravedad conformado por capas de arena y carbón activado soportados en un lecho de grava con el fin de atrapar cualquier contaminante que no haya sido removido en los anteriores tratamientos tales como: sólidos, turbiedad, bacterias, lodos.

### **Tanque de almacenamiento Efluente**

En este tanque se deposita el agua tratada la cual sirve a la vez para el retrolavado del filtro, de los sistemas de las plantas y para riego. Estos tanques cuentan con un criadero de peces que sirven como bioindicadores que permite observar la calidad del efluente. De allí el agua tratada es enviada por reboce al sistema de Biofiltros naturales conformados por *Eichhornia crassipes* y *Spirodela palyrhiza*. Esta etapa del proceso permite retirar los hidrocarburos y contaminantes metálicos remanentes en el agua antes de descargarla a la quebrada chorro grande.

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos durante el segundo periodo del 2005. Los análisis realizados a los afluentes y efluentes fueron: DBO<sub>5</sub>, DQO, Fenoles, Grasas y Aceites. Para dar cumplimiento al decreto 1594/84 estos análisis deben presentar un porcentaje de remoción del 80% en el efluente.

La Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga como autoridad Ambiental exige un reporte semestral los cuales evalúan las condiciones en las que se vierten los residuos líquidos generados en el ICP luego de su tratamiento hacia los cuerpos de agua.

	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
<b>PARAMETROS</b>						
DBO <sub>5</sub> AFLUENTE mg O <sub>2</sub> /L	54.67	34.93	21.45	25.77	30	24.97
DBO <sub>5</sub> EFLUENTE mg O <sub>2</sub> /L	2.13	1.16	5.14	<2.0	6.83	<2.0
<b>% REMOCION</b>	<b>96.10</b>	<b>96.67</b>	<b>76.03</b>	<b>&gt;92.23</b>	<b>77.23</b>	<b>&gt;91.99</b>
<b>Dec. 1594/84</b>	<b>&gt;20</b>	<b>&gt;20</b>	<b>&gt;20</b>	<b>&gt;20</b>	<b>&gt;20</b>	<b>&gt;20</b>
DQO AFLUENTE	181.17	87.58	201.61	134.16	92.67	90.02
DQO EFLUENTE	25.02	5.67	22.96	23.23	16.76	15.35
<b>% REMOCION</b>	<b>86.18</b>	<b>93.52</b>	<b>88.35</b>	<b>82.68</b>	<b>81.91</b>	<b>82.94</b>
<b>Dec. 1594/84</b>	<b>&gt;20</b>	<b>&gt;20</b>	<b>&gt;20</b>	<b>&gt;20</b>	<b>&gt;20</b>	<b>&gt;20</b>
FENOL AFLUENTE mg /L	0.056	0.086	2.68	0.16	0.140	0.065
FENOL EFLUENTE mg /L	<0.01	0.033	0.051	0.11	0.131	<0.01
<b>% REMOCION</b>	<b>&gt;82.14</b>	<b>61.62</b>	<b>98.09</b>	<b>31.25</b>	<b>6.42</b>	<b>&gt;84.61</b>
<b>Dec. 1594/84</b>	<b>&gt;80</b>	<b>&gt;80</b>	<b>&gt;80</b>	<b>&gt;80</b>	<b>&gt;80</b>	<b>&gt;80</b>
SÓLIDOS SUSP. TOTALES AFLUENTE	20000	4371.8	1420	1958	1944	8782
SÓLIDOS SUSP. TOTALES EFLUENTE	140.6	162.4	189	245	198	160.2
<b>% REMOCION</b>	<b>99.29</b>	<b>96.28</b>	<b>86.69</b>	<b>87.48</b>	<b>89.81</b>	<b>98.17</b>
<b>Dec. 1594/84</b>	<b>&gt;50</b>	<b>&gt;50</b>	<b>&gt;50</b>	<b>&gt;50</b>	<b>&gt;50</b>	<b>&gt;50</b>
GRASAS Y ACEITES AFLUENTE mg/L	288814	160000	8639	1443	58800	375000
GRASAS Y ACEITES EFLUENTE mg/L	10.8	3.52	<1.4	<1.4	<1.4	1.89
<b>% REMOCION</b>	<b>99.9</b>	<b>99.9</b>	<b>99.98</b>	<b>&gt;99.9</b>	<b>99.9</b>	<b>99.99</b>
<b>Dec.1594/84</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>

**Tabla 3.** Resultados de afluentes y efluentes industriales reportados durante el segundo periodo del 2005

PARAMETRO	UNIDADES	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	DEC. 1594/84
CROMO AFLUENTE	µg/L	8.81	8.06	9.55	10.78	20.63	12.68	
<b>CROMO EFLUENTE.</b>	<b>µg/L</b>	<b>8.49</b>	<b>11.42</b>	<b>8.87</b>	<b>13.99</b>	<b>19.24</b>	<b>2.64</b>	<b>0.5mg/l</b>
NIQUEL AFLU.	µg/L	3.30	0.9010	4.67	3.31	2.848	20.11	
<b>NIQUEL EFLU.</b>	<b>µg/L</b>	<b>2.19</b>	<b>0.9480</b>	<b>1.13</b>	<b>1.38</b>	<b>2.837</b>	<b>12.60</b>	<b>2 mg/l</b>
BARIO AFLU.	µg/L	24.56	22.22	18.94	40.29	42.93	60.84	
<b>BARIO EFLU.</b>	<b>µg/L</b>	<b>21.62</b>	<b>20.96</b>	<b>24.69</b>	<b>56.13</b>	<b>44.90</b>	<b>51.56</b>	<b>5 mg/l</b>
PLOMO AFLU.	µg/L	0.929	<0.083	1.63	1.23	<0.083	3.18	
<b>PLOMO EFLU.</b>	<b>µg/L</b>	<b>0.1820</b>	<b>&lt;0.083</b>	<b>&lt;0.083</b>	<b>0.17</b>	<b>0.191</b>	<b>0.32</b>	<b>0.5 mg/l</b>
CADMIO AFLU.	µg/L	0.1760	<0.019	0.19	0.57	0.081	0.54	
<b>CADMIO EFLU.</b>	<b>µg/L</b>	<b>0.1510</b>	<b>&lt;0.019</b>	<b>0.0380</b>	<b>0.041</b>	<b>0.065</b>	<b>0.062</b>	<b>0.1 mg/l</b>
ARSENICO AFLU	µg/L	<0.10	<0.1	<0.1	-	0.144	2.716	
<b>ARSENICO EFLU</b>	<b>µg/L</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>&lt;0.1</b>	<b>&lt;0.1</b>	<b>-</b>	<b>&lt;0.1</b>	<b>2.61</b>	<b>500 mg/l</b>
MERCURIO AFLU.	µg/L	<0.60	<0.6	0.6	-	<0.6	1.0	
<b>MERCURIO EFLU.</b>	<b>µg/L</b>	<b>&lt;0.60</b>	<b>&lt;0.6</b>	<b>&lt;0.6</b>	<b>-</b>	<b>&lt;0.6</b>	<b>&lt;0.6</b>	<b>20 mg/l</b>
VANADIO AFLU.	µg/L	5.098	<3.704	9.55	4.20	<7.26	4.41	
<b>VANADIO EFLU.</b>	<b>µg/L</b>	<b>&lt;4.0</b>	<b>&lt;3.704</b>	<b>8.87</b>	<b>&lt;3.70</b>	<b>&lt;3.7</b>	<b>&lt;3.7</b>	<b>100 mg/l</b>

Tabla 4. Resultados de Cationes

PARAMETRO	UNIDADES	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	Dec.1594/84
CLORUROS AFLUENTE	mg Cl <sup>-</sup> /L	9.92	8.95	8.09	15.42	8.72	18.50	
<b>CLORUROS EFLUENTE</b>	<b>mg Cl<sup>-</sup>/L</b>	<b>7.65</b>	<b>11.60</b>	<b>10.30</b>	<b>13.04</b>	<b>10.98</b>	<b>10.34</b>	<b>250</b>
SULFATOS AFLUENTE	mg SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> /L	11.89	8.99	4.14	13.65	19.9	38.76	
<b>SULFATOS EFLUENTE</b>	<b>mg SO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L</b>	<b>9.25</b>	<b>10.08</b>	<b>12.25</b>	<b>59.63</b>	<b>20.5</b>	<b>33.32</b>	<b>400</b>
NITRATOS AFLUENTE	mg NO <sub>3</sub> /L	<0.08	2.13	<0.142	<0.142	1.01	<0.629	
<b>NITRATOS EFLUENTE</b>	<b>mg NO<sub>3</sub>/L</b>	<b>0.701</b>	<b>2.55</b>	<b>&lt;0.142</b>	<b>2.37</b>	<b>&lt;0.142</b>	<b>&lt;0.629</b>	<b>10</b>
NITRITOS. AFLU.	mg NO <sub>2</sub> /L	<0.02	<0.02	0.120	<0.004	<0.004	<0.0629	
<b>NITRITOS. EFLU.</b>	<b>mg NO<sub>2</sub>/L</b>	<b>0.05</b>	<b>&lt;0.02</b>	<b>&lt;0.004</b>	<b>&lt;0.004</b>	<b>&lt;0.004</b>	<b>&lt;0.0629</b>	<b>1</b>
N.AMONIACAL. AFLU.	mg NH <sub>4</sub> /L	0.39	0.40	1.29	1.0	0.867	1.07	
<b>N.AMONIACAL. EFLU.</b>	<b>mg NH<sub>4</sub>/L</b>	<b>0.22</b>	<b>0.01</b>	<b>0.923</b>	<b>1.01</b>	<b>1.03</b>	<b>0.983</b>	<b>20</b>

**Tabla 5.** Resultados de Aniones

## 4.2 ANALISIS DE RESULTADOS PTARI

De los resultados presentados en la tabla 3 es importante resaltar que en cuanto al retiro de materia orgánica en términos de  $\text{DBO}_5$  y DQO, el % de remoción durante el periodo presentado estuvo entre el 76% y el 96.7% para el  $\text{DBO}_5$  y entre 82% y 94% de DBO, lo cuál es prueba del óptimo funcionamiento del sistema biológico de tratamiento con biofiltros de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, dando cumplimiento al decreto 1594/84.

También se aprecia que a pesar de que el afluente que llega a la PTARI presenta una alta carga de grasas y aceites, la eficiencia de la planta para el retiro de los mismos es bastante alta, reportándose porcentajes de remoción cercanos al 100%. El porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales alcanzó valores hasta del 99.9 %.

Con respecto a la remoción de fenoles y teniendo en cuenta que la concentración de ingreso al sistema es baja, se obtienen biodegradaciones que alcanzan niveles hasta del 98%. Es importante tener en cuenta, que concentraciones muy bajas de ingreso dificultan el proceso de degradación biológica del fenol, la cinética de degradación de este compuesto es rápida a concentraciones altas con remociones totales al final del tratamiento. Sin embargo, cuando los niveles de ingreso son inferiores a 2 ppm, la velocidad de degradación es muy lenta y la remoción es mínima. Para el tratamiento biológico de la PTARI ICP estos datos son satisfactorios ya que los niveles de salida se encuentran dentro del rango permitido para este compuesto.

De estos resultados se puede apreciar el nivel de eficiencia alcanzado por la PTARI en cuanto a eliminación de materia orgánica, sólidos, grasas y aceites, garantizando una excelente calidad en el agua efluente, la cual cumple con las normas establecidas por la CDMB y protegiendo primordialmente al medio ambiente.

En cuanto a elementos como Níquel, Cromo, Bario, Plomo, Cadmio, Mercurio y Vanadio, se puede apreciar que en todos los casos las remociones obtenidas hacen que los valores de salida sean inferiores a los niveles máximos permisibles, que establece el decreto 1594/84 para vertimiento de efluentes a cuerpos de agua, siendo el Plomo y el Vanadio los elementos que presenta las remociones mas altas.

Por otra parte la remoción de Cloruros, Sulfatos, Nitratos, Nitritos y Nitrógeno Amoniacal alcanza valores muy altos lo cual hace que el efluente presente valores bastante por debajo de lo exigido, dando a si cumplimiento en la norma 1594/84 sobre vertimientos líquidos en cuerpos de agua.

### **4.3 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS.**

Es un sistema muy sencillo el cual esta basado en un tratamiento secundario con lodos activados de aireación extendida. A la PTARD son vertidas las aguas residuales generadas en el restaurante, cafeterías y baños de las diferentes áreas del ICP. El agua a tratar fluye hacia el reactor donde se lleva a cabo el proceso de biodegradación para luego pasar al sedimentador y por ultimo ser vertida a la quebrada presentando excelentes características físico-químicas.

#### **Reactor**

En el reactor se lleva a cabo el tratamiento microbiológico, con lodos activados que degradan la materia orgánica disuelta y coloidal en sólidos sedimentables. Durante este proceso metabólico el pH tiende a disminuir por esta razón es necesario hacer un monitoreo permanente. Como agente neutralizante se utiliza cal hidratada. Las condiciones adecuadas de pH, temperatura, tiempo de residencia y nivel de oxígeno disuelto favorece el proceso de biodegradación.

#### **Barrelos y Sedimentador.**

El agua pasa del reactor a este sistema que cumple dos funciones, una de ellas es favorecer la sedimentación de los lodos y la otra generar un leve movimiento en los lodos sedimentados lo que permite su recolección o barrido por medio de un sistema de aspas paralelas las cuales los envían a una tolva ubicada en el fondo de este tanque para de allí y mediante una bomba sumergible, enviarlos de regreso al birreactor.

#### **Efluente.**

El agua sale del sedimentador por un sistema de rebose y es conducida por una canaleta hasta los biofiltros de plantas acuáticas en donde se realiza la remoción final de contaminantes, para su posterior vertimiento en el cuerpo de agua.

Los resultados obtenidos durante el segundo periodo del 2005 se presentan a continuación.

	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
PARAMETROS						
DBO <sub>5</sub> AFLUENTE mg O <sub>2</sub> /L	192.8	146.3	477.23	105.6	129.44	210.31
DBO <sub>5</sub> EFLUENTE mg O <sub>2</sub> /L	1.99	1.48	4.77	4.37	3.03	2.85
<b>% REMOCION</b>	<b>98.96</b>	<b>98.98</b>	<b>99.0</b>	<b>95.86</b>	<b>96.75</b>	<b>98.64</b>
<b>Dec. 1594/84</b>	<b>&gt;30</b>	<b>&gt;30</b>	<b>&gt;30</b>	<b>&gt;30</b>	<b>&gt;30</b>	<b>&gt;30</b>
DQO AFLUENTE	1053	667.17	143.41	1094.99	744.61	1501.85
DQO EFLUENTE	30.66	32.68	33.52	44.38	2.57	43.86
<b>% REMOCION</b>	<b>97.08</b>	<b>95.10</b>	<b>76.62</b>	<b>95.94</b>	<b>99.65</b>	<b>97.07</b>
<b>Dec. 1594/84</b>	<b>&gt;30</b>	<b>&gt;30</b>	<b>&gt;30</b>	<b>&gt;30</b>	<b>&gt;30</b>	<b>&gt;30</b>
FENOL AFLUENTE	<0.01	0.99	0.28	0.08	0.244	0.243
FENOL EFLUENTE	<0.01	<0.01	0.06	0.03	0.230	<0.01
<b>%REMOCION</b>	<b>0</b>	<b>98.98</b>	<b>78.57</b>	<b>62.5</b>	<b>5.73</b>	<b>&gt;95.88</b>
<b>Dec. 1594/84</b>	<b>&gt;80</b>	<b>&gt;80</b>	<b>&gt;80</b>	<b>&gt;80</b>	<b>&gt;80</b>	<b>&gt;80</b>
SÓLIDOS SUSP. TOTALES AFLUENTE	4690.5	1036	2444	1428	1061	1160
SÓLIDOS SUSP. TOTALES EFLUENTE	458.6	408.3	638	380	260.6	529
<b>% REMOCION</b>	<b>90.22</b>	<b>60.58</b>	<b>73.89</b>	<b>73.38</b>	<b>75.43</b>	<b>54.39</b>
<b>Dec. 1594/84</b>	<b>&gt;50</b>	<b>&gt;50</b>	<b>&gt;50</b>	<b>&gt;50</b>	<b>&gt;50</b>	<b>&gt;50</b>
GRASAS Y ACEITES AFLUENTE	3.8	2.1	3.2	<1.4	246.8	<1.4
GRASAS Y ACEITES EFLUENTE	2.2	<1.4	3.2	<1.4	5.56	<1.4
<b>% REMOCIÓN</b>	<b>42.0</b>	<b>&gt;33.3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>97.74</b>	<b>0</b>
<b>Dec.1594/84</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>

**Tabla 6.** Resultados de afluentes y efluentes domésticos reportados durante el segundo periodo del 2005

#### **4.4 ANALISIS DE RESULTADOS PTARD**

Los resultados obtenidos en términos de materia orgánica, expresada como DBO y DQO, superaron enormemente las exigencias ambientales, reportándose remociones entre el 96% y 99% para la DBO y entre 76% y 99% para la DQO.

Con respecto al reporte de grasas y aceites, el sistema mantiene niveles óptimos de operación y los valores en el efluente sean adecuados. Se aprecia que durante noviembre, cuando puntualmente se incrementó el valor de grasas y aceites en el afluente en (246.8 ppm) se alcanzó un porcentaje de remoción del 97.74%, lográndose rangos en el efluente de 5.56 ppm.

La PTARD no cuenta con dispositivos especializados para retiros de grasas y aceites dado que la composición típica del agua en el afluente presenta bajos contenidos en los mismos. De igual forma se observar valores bastante bajos en el contenidos de fenoles del afluente que llega a la PTARD, sin embargo el contenido de fenol en el efluente cumple con las exigencias del decreto. En cuanto a los sólidos suspendidos totales, se reportaron porcentajes de remoción entre el 54 y 90%.

## CONCLUSIONES

El tratamiento de aguas residuales utilizando especies macrófitas con ayuda de microorganismos como parte del tratamiento secundario o terciario, es una excelente alternativa frente a los métodos tradicionalmente utilizados ya que desde el punto de vista ambiental y económico presenta muchas ventajas atractivas, entre las que se destacan que son sistemas relativamente sencillos de construir y de operar y no requieren para su funcionamiento de grandes insumos de energía o maquinaria ni de personal especializados.

Una de las ventajas más atractivas de esta alternativa es la amplia disponibilidad de estas especies de plantas acuáticas macrófitas, especialmente en las zonas del trópico y además de considerar que estas plantas muestran una gran resistencia a medios altamente contaminados y tienen la capacidad de absorber estos contaminantes y crecer manteniendo un crecimiento relativamente acelerado.

Durante el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico, la cosecha de biomasa que se obtiene, puede ser utilizada como fertilizante sobre la tierra, como compostaje, como alimento para animales, en la manufactura de cartón, en la producción de combustible, mediante gasificación de la biomasa para la producción de biogás o como material absorbente de colorantes y metales pesados. Sin embargo debido a que se han observado reducciones en la concentración de bacterias de los efluentes, por acumularse alrededor de las raíces, la biomasa puede convertirse en una fuente de contaminación, en cuyo caso se requiere un manejo cuidadoso en su cosecha.

En el caso del tratamiento de aguas residuales de tipo industrial con plantas acuáticas, se exige un manejo especial y control constante del vegetal y disposición final de la biomasa obtenida, ya que las plantas acuáticas acumulan gran cantidad de metales pesados en sus tejidos como mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As), cromo (Cr), los cuales, sin el manejo adecuado de los lodos, pueden llegar a ser liberados posteriormente al medio pudiendo causar problemas en el suelo y en la cadena alimenticia. Esto implica la remoción de estas plantas después de un cierto tiempo a fin de no provocar problemas de contaminación en los ecosistemas. Algunos autores indican que una forma de disposición final segura de esta biomasa removida es el enterrado o quemado, por considerarse más seguro para el medio ambiente.

La biomasa obtenida del tratamiento de agua residual con altos contenidos de mercurio, debe ser tratada con especial cuidado, de lo contrario puede liberar el mercurio contenido en las células a formas más móviles, tales como metilmercurio

(MeHg) y de ahí pasar a los peces y luego a los humanos, causando un problema ambiental mucho mayor.

Una aplicación bastante interesante para el tratamiento de lodos obtenidos durante el proceso de aguas residuales con arsénico, es el exprimido en prensas, de la savia de las plantas, recuperándose tres cuartas partes de arsénico, que ha sido extraído para aplicaciones industriales.

Los resultados presentados en esta monografía son bastante gratificantes, sin embargo, no solo se deben quedar en un gran volumen de trabajos recopilados, sino que se debe dar continuidad en los mismos. Se debe llegar a que las publicaciones que en muchos casos son trabajos empíricos o de investigación sean divulgadas para dar solución a problemas locales.

En muchos casos el deterioro de las fuentes por vertimientos de residuos líquidos obedece a falta de recursos económicos, técnicos, o humanos para poner en marcha sistemas de tratamiento convencionales. La operación de sistemas como los tratamientos con macrófitas que pueden tratar vertimientos puntuales, pueden ser menos costosos y más fácil de manejar que un gran proyecto para la resuperación de un cuerpo de agua deteriorado, por métodos tradicionales.

## **RECOMENDACIONES**

El tratamiento de aguas residuales utilizando plantas macrófitas ha sido presentado como una alternativa bastante eficiente en la remoción de contaminantes como hidrocarburos o metales pesados, sin embargo antes de implementar esta tecnología es indispensable conocer a fondo la caracterización del afluente para determinar el tipo de macrófito mas adecuado y que permita una fácil y adecuada disposición de los lodos que se obtengan para evitar así incurrir en problemas medioambientales mas complicados.

Dentro de la posible disposición de lodos obtenidos luego del tratamiento de aguas residuales con altos contenidos de contaminantes metálicos, se encuentran la de enterrarlos o incinerarlos, sin embargo se recomienda indagar más sobre otras posibles acciones que puedan permitir aprovechar mas este material, sin que incida en mas contaminación.

## BIBLIOGRAFIA

1. Ryan, J.R., Loehr, R.C., y Rucker, E., Biorremediation of Organic Contaminated Soils, *Journal of Hazardous Material*, Vol 28:159-169. 1991.
2. Eweis, J.B., Ergas, S.J., Chang, D.P. *Principios de Biorrecuperación*. Ed. McGraw Hill, 1999.
3. <http://www.porquebiotecnologia.com.ar>
4. EPA/600/R-99/107., *Constructed wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater treatment*. Environmental Protection Agency. 2000
5. <http://www.macrofitas.com>
6. Valderrama, L., *Las plantas acuáticas: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales en Colombia*. *Innovación y Ciencia*, Vol VI-N°2,1997.
7. <http://www.cricyt.edu.ar>
8. Novotny, V., y Olem, H., *Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution*. Van Nostrand Reinhold, New York. 1994.
9. Hidalgo, J; Montano, J., y Estrada, M., *Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas*. *Theoria*, Vol 14, 2005.
10. Sálek, J Marcián, F.y Elazizy, I. *Use of artificial wetlands for the treatment of surface and wastewater*, *Water science Tech*. Vol 33 N°4-5, 1996.
11. Metcalf, E., *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. McGraw-Hill, interamericana de España S.A. 1996.
12. Restrepo, R. *Vegetales en el tratamiento de aguas generadas en los procesos de la industria del petróleo en Barrancabermeja*, *Congreso Colombiano del petróleo*, Bogota, 1988.
13. Amador, A y Lara, R. *La lenteja de agua como sistema blando de depuración de aguas residuales de bajo coste*. *Tecnología del agua*. Vol 174. Marzo, 1998.
14. Caicedo, J. *Plantas acuáticas de la familia de las Lemnáceas para el postratamiento de efluentes anaeróbicos-efecto del NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N en la producción*

de biomasa. Memorias IV Seminario-Taller Latinoamericano sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales. 1998.

15. Moore, T.R., et al. Methyl and total mercury in boreal wetland plants, Experimental Lakes Area, Northwestern Ontario. Environmental Quality, Vol 24, 1995
16. Burke, D.J., et al. Release of metals by leave of the SALT marsh grasses *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis*. Coastal and Science, Vol 51, 2000.
17. Reddy, K. Tucker, J., Productivity and nutrient uptake of water hyacinth, *Eichhornia assipes*. Effect of nitrogen source. Economic Botany, Vol 37, N°2, 1983.
18. Balls, H., et al. The loss of submerged plants with eutrophication I. Experimental design, water chemistry, aquatic plant and phytoplakton biomasa in experiments carried out in pouds in the Norfolk Broadland. Fresh water biology, Vol 22, 1989.
19. Qiu, D., et al. The restoration of aquatic macrophytes for improving water quality in a hypertrophic shallow lake in Hubei Province, China. Ecol Eng. Vol18, 2001.
20. Portielje, R., y Roijackers, R., Primary sucesión of aquatic macrophytes in experimental ditches in relation to nutriet input. Aqua Bot, Vol 50, 1995.
21. Ericsson, P., y Weisner, S., Nitrogen removal in a wastewater reservoir: The important of denitrification by epiphytic biofilms on submerged vegetation. Environmental quality, Vol 26, 1997.
22. Otto, S., et al. Invasive plant species and microbial processes in a nidal freshwater marsh. Environmental quality, Vol 28, 1999.
23. Roston, D., et al. Uso de leitos cultivados como alternativa de post tratamiento de un reactor anaeróbico. 2001.
24. Qian, J., et a. Phytoacumulation of trace elements by wetland plants: III. Uptake and accumulation of ten trace elements by twelve plants species. Environmental quality, Vol 28, 1999.
25. Boniardi, N., et al. Effect of disolved metals on the organic load removal efficiency of *Lemna gibba*. Water Res, Vol 33, 1999.

26. Ye, Z., et al. Zinc, lead and cadmium tolerant, uptake and accumulation by the common reed *Phragmites australis*. *Ann Bot*, 1997.
27. Maine, M., et al. Cadmium uptake by floating macrophytes. *Water Res*, 2001.
28. Windham, L., et al. Lead uptake, distribution, and effects in two dominant SALT marsh macrophytes, *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis*. *Mar Pollut Bull*, 2001.
29. Ribeyre, F., y Boudou, A., Experimental study of inorganic and methylmercury bioaccumulation by four species of freshwater rooted macrophytes from water and sediment contamination source. *Ecotoxicol Environmental safety*, 1994.
30. Huang, J., et al. Phytofiltration of arsenic from drinking water using arsenic hyperaccumulating ferns. *Environmental Science and Technology*, 2004.
31. Machate, T., et al. Purification of fuel and nitrate contaminated ground water using a free water surface constructed wetland plant, *Environmental quality*, Vol 28, 1999.
32. Huddleston, G., et al. Using constructed wetland to treat biochemical oxygen demand and ammonia associated with a refinery effluent. *Ecotoxicol Environmental safety*, 2000.
33. Kietlinska, A., et al. Nitrogen removal from landfill leachate using compact constructed wetland and the effect of chemical pretreatment. *Environmental science health*, 2005.
34. Demchik, M y Garbutt, K., Growth of woolgrass in acid mine drainage. *Environmental quality*, Vol 28, 1999.
35. Mays, P., y Edwards, G., Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetland receiving acid drainage. *Ecol Eng*, 2001.
36. Pezzolesi, T., et al. Nutrients in a playa wetland receiving wastewater. *Environmental quality*, Vol 27, 1998.
37. Overall, R., y Parry, D., The uptake of uranium by *Eleocharis dulces* in the ranger uranium mine constructed wetland filter. *Environmental pollution*. 2004.
38. Mazer, G., et al. Limitations to vegetation establishment and growth in biofiltration swales. *Ecol Eng*, 2001.

39. Fernández, J. Nuevos filtros verdes con macrófitas en Flotación (sistema FMF) para el litoral mediterráneo. Universidad Politécnica de Madrid, 2002.
40. Garza, G. Tratamiento de Aguas residuales con Plantas Acuáticas, Agua potable, octubre, 1989.
41. Rodríguez, C. et al, Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales. 1996.
42. Marrero, M; Rodríguez, C y Marrero, F. Remoción de Cromo (III) por el Jacinto de agua. Acodal, revista N°163. 1995
43. Wildshut, L., Introductory study on the performance of Lemnaceae on fresh municipal wastewater emphasis on the growth of the Lemnaceae, the ammonium removal from the wastewater. Wageningen University, 1984.
44. Arjona, B., Evaluación de un cultivo hidropónico de *Pennisetum clandestinum* Hochsi como tratamiento biológico de aguas residuales domésticas. Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1987.
45. Baena, S., Evaluación del poder depurador de la Técnica de la película nutriente (TPN), en la estación de bombeo de aguas residuales El Salitre, Santafé de Bogotá, Tesis de grado, Universidad Javeriana, Departamento de Biología, 1986.
46. Lopez, M., et al., Ensayos hidropónicos exploratorios para depurar aguas del beneficio del café. Universidad Nacional de Colombia. Federación Nacional de Cafeteros. LICQ, 1988.
47. Domínguez, A. Evaluación de la depuración de las aguas residuales provenientes de un sistema de tratamiento combinado de lagunas de estabilización y laguna con jacinto de agua. Actual Biol 23, 2001.
48. Restrepo, R y Cardeñosa, M. Eficiencia del Jacinto de Agua en la remoción de Cloruros. Instituto Colombiano del petróleo Asuntos Ambientales. 1990
49. Aoyama, Isao y Nishizaki, H. Uptake of nitrogen and phosphate and water purification by water hyacinth *Eichhornia crassipes*. Water science and technology, Vol 28, N°7. 1993.
50. Boyajian, G y Devedjian, D. Phytoremediation: It grows on you. Soll and Groundwater Cleanup. 1997.

51. Crites, R. et al. Removal of metals and ammonia in constructed wetlands. *Water environmental research*, Vol69 N°2. 1997
52. Farahbakhshazad, N y Morrison, G. Ammonia removal processes for Urine in an Upflow macrophyte system. *Environmental science and technology*, Vol 31, N°11. 1997.
53. Peterson, H. et al. Development of aquatic plant bioassays for rapid screening and interpretive risk assessments of metal mining liquid waste waters. *Water science and technology*, Vol 33, N°6. 1996
54. Rogers, K. et al Nitrogen removal in experimental wetland treatment system: evidence for the role of aquatic plants. *Water environmental research*, Vol64 N°7. 1998
55. Sawidis, T et al. Distribution of heavy metals in sediments and aquatic plants of the river pinios (central Greece). *The science of total environment*, 1991.
56. Schnoor, J. et al. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environmental Science and Technology*, Vol29 N°7, 1995.
57. Van der Merwe, C. Shoonbee, H y Pretorius, J. Observations on concentrations of the heavy metals zinc, manganese, nickel and iron in the water, in the sediments and in two aquatic macrophytes, *thypa capensis* and *Arundo donax* of a stream affected by goldmine and industrial effluents. *Water SA*, Vol 16, N°2, 1990.

<http://aupec.univalle.edu.co>

<http://tabloide.eurofull.com>

<http://www.ssc.nasa.gov>

<http://www.csic.es>

<http://www.uc.cl>

<http://www.porquebiotecnologia.ar>

<http://tabloide.eurofull.com>

<http://www.ingenieroambiental.com>

<http://www.chapingo.mx>

<http://www.calidadambiental.info>

<http://limno.fcien.edu.uy>