

**HUMEDALES ARTIFICIALES: UNA ALTERNATIVA PARA TRATAMIENTO DE  
AGUAS DE PRODUCCIÓN**

**PAUL ANDREÉ ARCE CARDONA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.  
2018**

**HUMEDALES ARTIFICIALES: UNA ALTERNATIVA PARA TRATAMIENTO DE  
AGUAS DE PRODUCCIÓN**

**PAUL ANDREÉ ARCE CARDONA**

**Monografía para optar por el título de Especialista en  
Gestión Ambiental**

**ASESOR  
DORA MARIA CAÑON RODRIGUEZ  
Ingeniera Química**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTION AMBIENTAL  
BOGOTA D.C.  
2018**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

Firma director especialización

---

Firma Calificador

Bogotá, D.C. Marzo de 2018

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García Peña

Decano Facultad de Educación Permanente y Avanzada

Dr. Luis Fernando Romero Suárez

Director de la Especialización en Gestión Ambiental

Dr. Francisco Archer Narváez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documentos. Estos corresponden únicamente al autor.

## DEDICATORIA

A mis padres darles las gracias por apoyarme siempre,  
por ayudarme a cumplir mis sueños, y enseñarme  
a trabajar siempre por lo que quiero.

A mis hermanos, que me enseñan cada día  
a sonreír, y sacarle una risa a  
cada momento.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis papas, por ser un ejemplo de vida, y motivarme para seguir creciendo profesionalmente

Un agradecimiento, para la profesora Dora Cañon, por su tiempo y asesoría a lo largo de la elaboración de este trabajo.

A los profesores de la especialización, por su enseñanza y apoyo.

Un agradecimiento especial para el Doctor Francisco Archer, por su dedicación, por estar siempre pendiente de cada uno de los estudiantes

## TABLA DE CONTENIDOS

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	18
<b>OBJETIVOS</b>	20
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	21
1.1 COMPONENTES DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL TIPO	22
1.2 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN FUNCIÓN DEL SENTIDO DE CIRCULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA	23
1.3 ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	26
1.4 DIFERENCIA ENTRE UN HUMEDAL NATURAL Y UN HUMEDAL ARTIFICIAL	30
1.5 CONTAMINACIÓN GENERADA POR EL PETRÓLEO	31
1.6 EFECTOS AMBIENTALES DE LA ACTIVIDAD PETRÓLERA EN COLOMBIA	32
<b>2. CONSTRUCCION Y OPERACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES</b>	34
2.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN RECOMENDADAS	36
2.1.1 Estratificación del lecho	36
2.1.2 Proteccion del lecho lateral/sustrato	36
2.1.3 Capacidades de recirculacion	37
2.1.4 Mantenimiento del lecho	37
2.1.5 Control del liquido	37
2.1.6 Hidrología	37
2.1.7 Selección de la especie vegetal	37
<b>2.2 EVALUACION Y SELECCIÓN DE LA ZONA PARA DESARROLLAR EL PROYECTO</b>	42
2.2.1 Agua Residual	42
2.2.2 Parámetros importantes en el tratamiento de aguas residuales	42
2.2.3 Topografía	46
2.2.4 Riesgo de inundacion	47
2.2.5 Clima	47
2.2.6 Costos	47
<b>2.3 PASOS PARA EL DISEÑO</b>	50
<b>3. CASOS EN LOS QUE SE HAN UTILIZADO HUMEDALES ARTIFICIALES EN COLOMBIA</b>	55
3.1 CASO 1. IMPLEMENTACIÓN DE UN HUMEDAL PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTE DE LA GRANJA SAN CARLOS	55
3.2 CASO 2: DISEÑO DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DE UN CAMPO DE PETRÓLEO COLOMBIANO	60



<b>4. MANTENIMIENTO Y CONTROL DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL</b>	68
4.1 HIDROLOGÍA	68
4.2 VEGETACIÓN	68
4.3 ESTRUCTURAS	69
4.4 CONTROL DE FAUNA	69
4.5 CONTROL DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA	70
<b>5. CONCLUSIONES</b>	72
<b>6. RECOMENDACIONES</b>	73
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	74

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<b>Ecuación 1.</b> Área superficial	51
<b>Ecuación 2.</b> Tiempo de retención	51
<b>Ecuación 3.</b> Pendiente del lecho y la velocidad de flujo	51
<b>Ecuación 4.</b> Área de la sección transversal	52
<b>Ecuación 5.</b> Ancho Humedal	52
<b>Ecuación 6.</b> Largo Humedal	52
<b>Ecuación 7.</b> Numero geométrico	53
<b>Ecuación 8.</b> # de Carga	53

## LISTA DE GRAFICAS

	pág.
<b>Grafica 1.</b> Comportamiento de la producción de petróleo y agua hasta el año 2025	61
<b>Grafica 2.</b> Comparación de los costos totales del sistema de tratamiento del humedal con los que tenía el campo	64
<b>Grafica 3.</b> Costo de tratamiento por barril de agua producida	65

## LISTA DE IMÁGENES

	pág.
<b>Imagen 1.</b> Humedal Artificial	22
<b>Imagen 2.</b> Humedal Artificial de flujo libre	24
<b>Imagen 3:</b> Humedal Artificial de flujo subsuperficial	25
<b>Imagen 4.</b> Humedal Artificial flujo subsuperficial horizontal	25
<b>Imagen 5.</b> Layout de NWPT mostrando cada etapa del sistema	28
<b>Imagen 6.</b> Humedal Artificial con flujo subsuperficial	34
<b>Imagen 7.</b> Humedal Artificial	35
<b>Imagen 8.</b> Planta Scirpus Humedal	38
<b>Imagen 9.</b> Planta Scirpus detallada	38
<b>Imagen 10.</b> Planta Typha Humedal	39
<b>Imagen 11.</b> Planta Typha detallada	39
<b>Imagen 12.</b> Planta Phragmites Humedal	40
<b>Imagen 13.</b> Planta Phragmites detallada	40
<b>Imagen 14.</b> Humedal Artificial en la granja San Carlos	56
<b>Imagen 15.</b> Brotes y Medición de los tallos	58
<b>Imagen 16.</b> Plantas utilizadas de la región. Izquierda ( <i>Erochloa aristata</i> ) derecha ( <i>Eleocharis mutata</i> )	63

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Plantas más utilizadas en humedales artificiales	41
<b>Tabla 2.</b> Tasas Típicas de Carga Superficial	45
<b>Tabla 3.</b> Concentraciones naturales en los humedales artificiales	46
<b>Tabla 4.</b> Costos Inversión de O/M de un humedal artificial con capacidad de 100gl/día	48
<b>Tabla 5.</b> Comparación costos humedal artificial vs tratamiento convencional	49
<b>Tabla 6.</b> Clasificación de las plantas con su respectiva profundidad	50
<b>Tabla 7.</b> Dimensiones del humedal artificial proyecto granja San Carlos	55
<b>Tabla 8.</b> Porcentaje de Remoción	56
<b>Tabla 9.</b> Proporción de agua limpia y residual para la estabilización del humedal	58
<b>Tabla 10.</b> Concentración afluente Humedal	59
<b>Tabla 11.</b> Concentraciones de DBO y SST	62
<b>Tabla 12.</b> Costos del mantenimiento y operación del tren de tratamiento del campo	62
<b>Tabla 13.</b> Costos totales del humedal	64
<b>Tabla 14.</b> Ventajas y Desventajas de los tratamientos del estudio.	66

## RESUMEN

El propósito de esta monografía es dar a conocer los humedales artificiales como una de las opciones posibles de tratamiento eficientes y económicas para las aguas de producción de la industria petrolera. La fitorremediación, es una técnica en la cual se utilizan las plantas para eliminar contaminantes presentes en el agua, una alternativa económica y amigable con el medio ambiente, diferente a algunos métodos de tratamiento convencionales ya utilizados. El estudio presenta los tipos de humedales artificiales que existen, casos en los cuales se ha implementado esta tecnología fuera del país y una experiencia piloto en Colombia con aguas de producción con sus respectivos resultados, como también los parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de tratar el agua, la comparación de costos, ventajas y desventajas entre un humedal artificial y un proceso de tratamiento convencional y las variables a incluir en el diseño de un humedal artificial.

**Palabras claves:** Humedales Artificiales; Aguas de Producción; Fitorremediación; Fitodepuración

## GLOSARIO

**ABIOTICO:** factores químicos y físicos que afecta un ecosistema para que no tenga vida.

**ABSORCIÓN:** paso de agua y de sustancias presentes en ella disueltas al interior de una célula o de un organismo.

**ACUÍFERO:** agua subterránea

**ADSORCIÓN:** adherencia por unión química o física de un contaminante a una superficie sólida.

**AERÓBICO:** proceso que tiene lugar en presencia de oxígeno disuelto. En las zonas de las plantas depuradoras en las que tiene lugar este proceso se mantiene el agua con constante agitación para que abunde el oxígeno en el agua y las bacterias puedan realizar sus procesos metabólicos.

**AFLUENTE:** agua que entra en un sistema

**AGUAS RESIDUALES:** son las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial.

**CARGA:** concentración promedio por el caudal promedio determinado para un caudal de agua. Se expresa en (kg/d)

**CARRIZO:** planta más utilizada en humedales artificiales, pero se utiliza más en Estados Unidos. Tiene características de crecimiento en humedales poco profundos, aunque en algunos humedales es una especie invasora. Se identifica por eso una planta robusta, perenne, tallos rígidos, gruesos, los cuales pueden alcanzar una altura de 3 m.

**CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DARCIANA:** parámetro para evaluar la resistencia que ofrece el suelo al flujo del agua. Depende de la estructura del suelo, el tamaño de partículas, la gradación del suelo, la textura, rugosidad de las partículas, temperatura y viscosidad del fluido.

**CONTAMINACIÓN AGUA:** es un cambio en las características físicas, químicas, radiactivas y microbiológicas del agua, por procesos naturales o actividades humanas.

**CORROSIÓN:** es el proceso de oxidación química sobre un metal y depende de la actividad química de las sustancias presentes en el proceso.

**DEGRADACIÓN:** es la transformación de sustancias complejas en otras sustancias más sencillas. Para las plantas en este caso se trata de los restos que la planta deja caer al suelo, donde se descomponen por efecto de los microorganismos, los cuales ayudan a la liberación de los compuestos. Las sustancias que ahí se encuentran pueden estar inactivadas hasta que entren en contacto con la humedad o con los microorganismos o bien pueden estar activas y luego inactivadas por la actividad de los microorganismos o quedar retenidas en el suelo.

**DESNITRIFICACIÓN:** reducción microbiológica a partir de los nitratos con pérdida final de nitrógeno en el suelo. Esta se produce porque el microorganismo necesita de nitrógeno para sus células u oxígeno para la respiración.

**ECOSISTEMA:** sistema que integra la comunidad biótica y el ambiente abiótico.

**EFLUENTE:** agua que sale de un sistema.

**ESTABILIZACIÓN:** estos procesos de estabilización son referidos a los procesos de tratamiento de residuos en los cuales se puede usar una enorme variedad de desechos sólidos y líquidos, con el objetivo de reducir la movilidad o solubilidad del contaminante, para que no se propague este; mejor el manejo del contaminante mediante la formación de materiales sólidos sin líquidos libres para evitar su dispersión y disminuir la superficie expuesta a la transferencia o pérdida de los contaminantes, evitando la contaminación de otros materiales.

**EXTRACCIÓN:** procedimiento de separación de una sustancia que puede disolverse en dos disolventes no miscibles entre sí, con distinto grado de solubilidad y que están en contacto a través de una interfase.

**FILTRACIÓN:** pérdida de agua de un humedal artificial al suelo a través de la infiltración por debajo del sistema.

**FITORREMEDIACIÓN:** es una ecotecnología, basada en la capacidad de algunas plantas para tolerar, absorber, acumular y degradar compuestos contaminantes.

**GRADIENTE HIDRÁULICO:** se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua, esto quiere decir que representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua.

**HUMEDAL:** nombre para designar al hábitat de aguas abiertas y los terrenos inundados.

**HUMEDAL ARTIFICIAL:** sistema de tratamiento de aguas las cuales se realiza con procesos físicos, químicos y biológicos para tratar un caudal de agua contaminada.



**INFLITRACIÓN:** es el proceso por el agua el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la tierra, y queda retenida por ella o alcanza un nivel acuífero incrementando el volumen de este.

**JUNCO:** nombre de un número de plantas del género Scirpus encontrado en humedales. Varias de estas especies son utilizadas para los humedales artificiales, prosperan en la amplia gama de condiciones ambientales en los humedales artificiales, incluidos distintos niveles de profundidad del agua y de calidad.

**NICHO:** es la función que cumple cada organismo en el ecosistema, cada organismo tiene una función exacta. Este está relacionado con la adaptabilidad de las especies y designa su ubicación en el ambiente global y su sistema de vida. Este regula las adaptaciones orgánicas y los patrones de comportamiento que están íntimamente ligados a la función dentro del sistema.

**PERMEABILIDAD:** capacidad de un medio poroso para conducir el líquido.

**PLANTA PILOTO:** modelo que permite simular operaciones, procesos y condiciones.

**SUSTRATO:** medio natural sobre el que crece una planta.

**TIEMPO DE RETENCIÓN:** tiempo promedio que permanece el agua en movimiento en un sistema.

**VERTIMIENTO:** descarga líquida hecha a un cuerpo de agua o a un alcantarillado.

**VOLATILIZACIÓN:** las sustancias se liberan por las estomas

## INTRODUCCIÓN

Como bien sabemos la industria petrolera tiene un gran efecto en la actualidad, esto debido a la gran importancia que tiene por su necesidad energética. Cada vez la tecnología para la explotación y extracción de hidrocarburos avanza aumentando la producción diaria de petróleo. Al aumentar la producción diaria de petróleo, la producción diaria de gas y de agua también se aumenta, donde el agua es la que más se produce. En la actualidad por cada barril de petróleo que se extrae, se extraen 8 barriles de agua de producción, esto aumentando al pasar los años; hoy en día a veces la producción de agua es tan grande, que en algunos casos se abandona el pozo por no tener la viabilidad económica para poder tratar el agua.

Aunque la industria petrolera ha avanzado en su tecnología, muchos de los tratamientos para el agua son muy costosos, por eso se han tenido que buscar métodos y procesos para poder tratar agua, sin que afecte la viabilidad económica del proyecto. Entre estos métodos y procesos se encuentra la reutilización del agua y el vertimiento a aguas superficiales. Cabe resaltar que los vertimientos a agua siempre deben ser dentro de los límites estipulados por la norma para vertimientos a cuerpos de agua.

Para vertimientos se deben hacer tratamientos primarios, secundarios y terciarios, muchos de estos tratamientos siendo más costosos unos que otros, por lo que requieren una alta inversión para operación y mantenimiento.

Se han hecho considerables esfuerzos para la investigación sobre la técnica de fitorremediación, estudiando plantas adecuadas para esta técnica, por estos esfuerzos de investigación muchas plantas ya han sido identificadas y aplicadas al proceso.

Gracias a esto es que se ha pensado en utilizar la tecnología de los humedales artificiales, como una alternativa para tratamientos secundarios y terciarios, donde se ha demostrado que los humedales artificiales tienen una alta eficiencia de tratamiento, son viables económicamente, por no necesitar de una gran inversión de operación y mantenimiento, y además por ser una tecnología amigable con el medio ambiente.

En el caso de Colombia, muchos de los humedales utilizados, solo han sido para tratamientos de aguas residuales, como por ejemplo en los casos del eje cafetero, Valle del Cauca, Antioquia, todos estos tratando aguas residuales. Ahora bien, para tratamiento de aguas de producción, no se tienen casos en los cuales se ponga en práctica esta técnica, en Colombia el tratamiento de aguas de producción con humedales artificiales no se ha utilizado, y la información es casi nula, no existe información de experiencias o proyectos con esta tecnología.

Al aplicar los métodos y medidas necesarias para llevar a cabo la elaboración de proyectos de esta nueva tecnología alternativa en campos de petróleo colombianos, se le presenta al país una oportunidad nueva y ecológica para empezar a encontrar esas soluciones a las problemáticas existentes con respecto a la gran producción de agua. Por lo tanto el presente trabajo tiene como función, brindar la información de que son los humedales artificiales, los tipos de humedales artificiales que existen, casos en los cuales se ha implementado esta tecnología afuera del país, y un caso específico en Colombia con sus respectivos resultados; como también los parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de tratar el agua, la comparación de costos entre un humedal artificial y un proceso de tratamiento convencional y finalmente como podría ser un diseño de un humedal para posibles tratamientos de agua.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Definir las ventajas del uso de humedales artificiales como alternativa para el tratamiento de las aguas de producción en la industria petrolera.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Identificar el proceso para la construcción de los humedales artificiales.
- Establecer cómo opera el proceso
- Presentar 2 casos en los cuales se han implementado los humedales artificiales en Colombia.
- Determinar cuál es la disposición final de los humedales artificiales.

## 1. MARCO TEÓRICO

El concepto como tal de un humedal artificial con plantación de vegetales inicio un poco más de 50 años con el trabajo de la Doctora Seidel del Instituto Max-Planck en Alemania. La Doctora en uno de sus estudios se dio cuenta que al utilizar una planta llamada aena común (*Schoenoplectus lacustris*) está reducía considerablemente sustancias orgánicas e inorgánicas que estaban presentes en aguas contaminadas, así como esta planta reducía estas sustancias también reducía determinadas bacterias como coliformes, salmonella y enterococos, al pasar el agua a través de la plantación de aena. Finalmente se dio cuenta de que esta eliminaba metales pesados e hidrocarburos.

Aunque la Doctora Seidel descubriera esto hace más de 50 años fue el trabajo del Doctor Kickuth en las décadas del 70 y 80 que fue tomando nombre los humedales artificiales en Europa, los estudios hechos por el Doctor Kickuth trataban como era el proceso del tratamiento del agua que ocurría en las raíces de las plantas, y lo que sucedía en el suelo en las cuales las plantas crecían. Durante los años 70 y 80 se utilizaba más la tecnología de humedales artificiales para depurar aguas residuales urbanas. En la década de los 90 fue donde realmente se comenzó a utilizar los humedales artificiales para tratar distintas aguas, con especial éxito en el tratamiento de aguas residuales industriales.

Según Miguel<sup>1</sup> los humedales artificiales son zonas construidas por el hombre en las que, de forma controlada, se reproducen mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, que se dan en los humedales naturales mediante procesos físicos, biológicos y químicos. Los humedales artificiales son un tipo de alternativa para tratar el agua, mediante diferentes tipos de plantas, vegetales marinos, y microorganismos adaptados a las condiciones del agua a tratar. Esto es lo que genera que se pueda depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos en suspensión, nitrógeno, fosforo e incluso productos tóxicos.

Como indica la Epa<sup>2</sup> en su libro estos consisten en un lecho de estructura de piedra estratificada que tiene, en un extremo del lecho de piedra, un instrumento afluente que introduce las aguas a tratar en forma distribuida y un instrumento efluente para recolección, en el extremo opuesto del lecho, para recoger y descargar el efluente tratado del lecho. Las plantas o vegetaciones se colocan estratégicamente en la

---

<sup>1</sup>MIGUEL. Carolina. .IGUA. Los humedales artificiales. [<https://www.iagua.es/>]. [Bogotá. D.C. CO. Documento [consultado, 01, octubre, 2017]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/carolina-miguel/los-humedales-artificiales-componentes-y-tipos>.

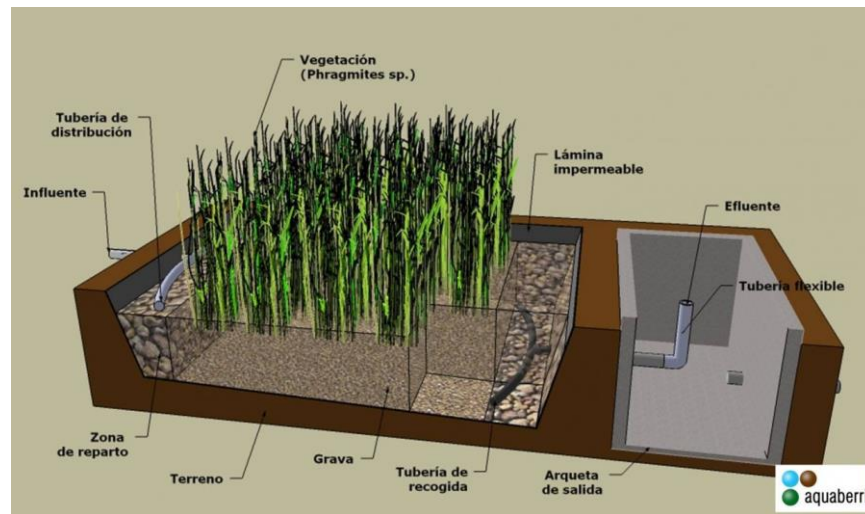
<sup>2</sup> EPA. Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales. División de Manejo de Aguas Rama de instalaciones municipales sección técnica. U.S: EPA – REGION 6. NATIONAL SERVICE CENTER FOR ENVIRONMENTAL PUBLICATIONS (NSCEP). p 5. [Consultado 01, octubre, 2017]. Disponible en <https://nepis.epa.gov/>

superficie del lecho de piedra. Los microbios se adhieren a la estructura de piedra y, si se utilizan plantas o vegetales, al sistema de raíces de las plantas. En este caso el nivel de agua se debe mantener entre 5 y 15 cm para asegurar el flujo, se debe usar un recubrimiento impermeable puede ser arcilla, para evitar infiltración.

De acuerdo con Poh-eng, I. y Polprasert, C<sup>3</sup> comúnmente se utiliza grava o arena para rellenar el lecho hasta una profundidad de 0.5 a 1m. Con el tiempo se taponará la grava con los sólidos y la capa bacterial, el material de filtro requiere de reemplazo entre los 8 y 15 años.

## 1.1 COMPONENTES DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL TIPO.

Imagen 1. Humedal Artificial



**Fuente:** Aquaberri. Tecnologías naturales de depuración y tratamiento de aguas. Humedales Artificiales. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 01, Octubre, 2017]. Disponible en <http://aquaberri.com/>

Estos humedales artificiales, están constituidos principalmente por una tubería de entrada por donde circula el agua a tratar (influyente), la cual pasa a través del sustrato, el sustrato sirve de soporte para la vegetación y logra la fijación de la biopelícula bacteriana, la cual tiene como función la eliminación de contaminantes presentes en las aguas a tratar. Luego de esto a través de la vegetación la cual está compuesta por macrófitas emergentes que ayudan a la oxigenación del sustrato.

---

<sup>3</sup> POH-ENG, L. Y POLPRASERT, C. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Resource Recovery. Environmental systems reviews. Bangkok, Thailand. Environmental Sanitation Information Center, ENSIC. 1998. p 63. [Consultado 01, Octubre, 2017]. Disponible en <https://www.ircwash.org/>

También debe tener una lámina impermeable para que no permita el paso del agua hacia zonas no deseadas, debe tener un material alrededor el sustrato para evitar infiltraciones. Finalmente, el agua entra a la tubería de recogida, la cual ya sale sin los contaminantes, es decir ya tratada el efluente.

Ahora los mecanismos por los cuales estos tipos de sistemas son capaces de depurar las aguas según Miguel<sup>4</sup> son:

1. La eliminación de sólidos suspendidos gracias a la filtración que sucede entre el sustrato y las raíces
2. Eliminación de nitrógeno, esto se consigue por acción directa de las plantas, por procesos nitrificación-desnitrificación, los microorganismos son los que desarrollan este proceso.
3. Eliminación de materia orgánica, gracias a las bacterias(microorganismos)
4. Eliminación de fósforo, debido a los procesos de adsorción sobre los componentes del sustrato.
5. Eliminación de patógenos mediante la adsorción sobre partículas del sustrato.

## **1.2 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN FUNCIÓN DEL SENTIDO DE CIRCULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA**

- **Humedales artificiales de flujo libre o superficial:**

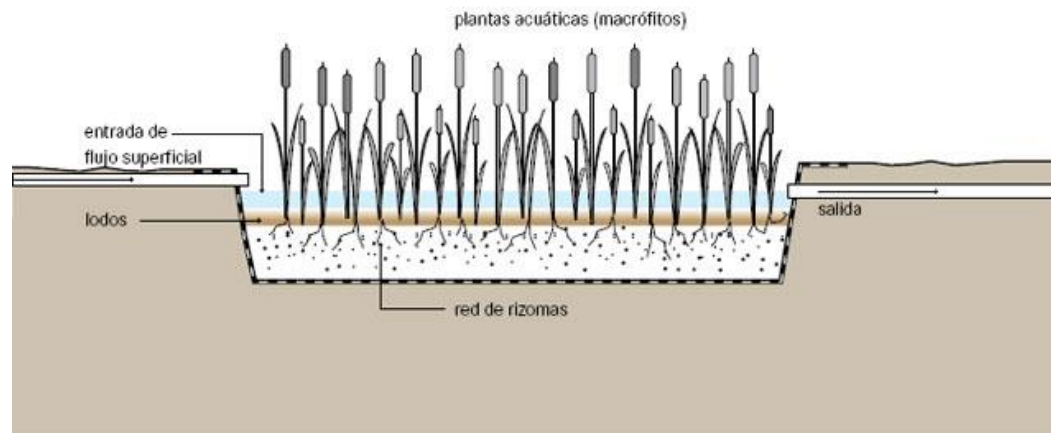
El objetivo de este humedal como lo afirma Miguel<sup>5</sup> es tratar de imitar los procesos naturales de un humedal natural, al ir fluyendo suavemente por el humedal, las partículas se asientan, se destruyen los patógenos, y finalmente los organismos y las plantas utilizan los nutrientes. En este caso las condiciones aerobias al estar el agua en contacto directo con la atmósfera. Estos tipos de humedales se utilizan para tratamientos secundarios y para crear o restaurar ecosistemas acuáticos.

---

<sup>4</sup> MIGUEL. Op. cit 1

<sup>5</sup> Ibíd., p 1

**Imagen 2.** Humedal Artificial de flujo libre.



**Fuente:** Alianzaporelagua. Humedal Artificial de Flujo Superficial Libre. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 01, Octubre, 2017]. Disponible en <http://alianzaporelagua.org/>

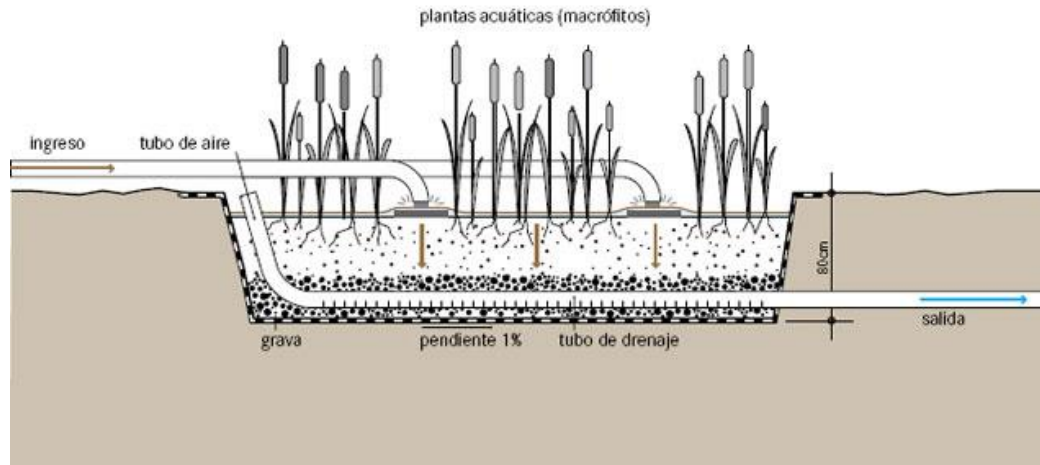
- **Humedales artificiales de flujo subsuperficial:** el agua circula a través del sustrato.
- **Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical:** De acuerdo con Moshiri <sup>6</sup> en este caso las aguas a tratar circulan de arriba abajo, a través de un material filtrante, en el cual se encuentra la vegetación. El agua es vertida desde la parte de arriba mediante un sistema mecánico de dosificación. En este caso el dosificar el agua el filtro por donde pasa el agua, toma periodos de saturación y falta de saturación, atravesando por diferentes condiciones aeróbicas y anaeróbicas. Estas dosis se deben de ajustar, para que la dosis anterior ya vertida tenga tiempo de pasar por el material filtrante, para que el oxígeno se difunda por el medio y llenar los espacios vacíos.

---

<sup>6</sup> MOSHIRI. Gerald A. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. [books google]. 2. ed. Boca Raton. Florida: Lewis Publishers. 1993. p.1-591. ISBN xxx [Consultado 01, octubre, 2017]. Disponible en [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=\\_PQJ7wGG\\_2cC&oi=fnd&pg=PA9&dq=design+and+construction+of+artificial+wetlands&ots=C6Cuj-zpOW&sig=4ZJ9zn8DEFtnQgS-g4LDTCCbH4E#v=onepage&q=design%20and%20construction%20of%20artificial%20wetlands&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=_PQJ7wGG_2cC&oi=fnd&pg=PA9&dq=design+and+construction+of+artificial+wetlands&ots=C6Cuj-zpOW&sig=4ZJ9zn8DEFtnQgS-g4LDTCCbH4E#v=onepage&q=design%20and%20construction%20of%20artificial%20wetlands&f=false)



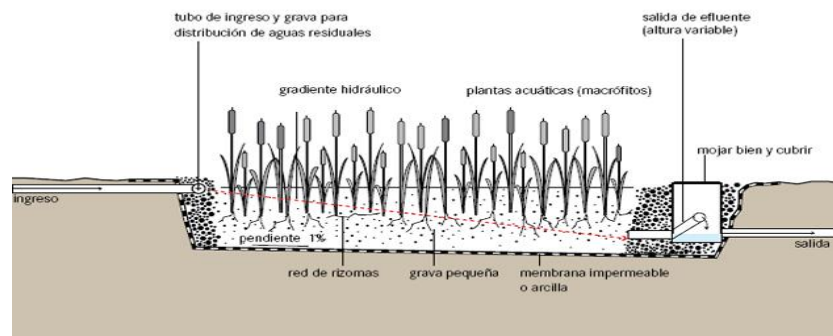
**Imagen 3:** Humedal Artificial de flujo subsuperficial.



**Fuente:** Alianzaporelagua. Humedal Artificial de Flujo Vertical. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 01, Octubre, 2017]. Disponible en <http://alianzaporelagua.org/>

- **Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal:** Según Cárdenas<sup>7</sup> en este caso las aguas a tratar circulan horizontalmente, esta agua atraviesa un material filtrante que en este caso puede ser grava, en la cual está la vegetación. Al fluir el agua a tratar horizontalmente el material filtra partículas y microorganismos y degrada el material orgánico.

**Imagen 4.** Humedal Artificial flujo subsuperficial horizontal



**Fuente:** Alianzaporelagua. Humedal Artificial de Flujo de Horizontal Subsuperficial . Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 01, Octubre, 2017]. Disponible en <http://alianzaporelagua.org/>

<sup>7</sup> CÁRDENAS SÁNCHEZ, Ana Carolina. Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviado de rellenos sanitarios. Monografía. Universidad de Sevilla. 2012. Cap 4. Pg 17-18. Disponible en <https://bibing.us.es/index/>

### 1.3 ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales, ciénagas y turberas se tomaron como los mejores receptores de aguas, su uso se remonta a comienzos de los años 50, como también fueron utilizados para la purificación del agua.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizando plantas, existen desde hace más de un siglo. El empleo de humedales de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales tiene su origen en los trabajos de K. Seidel, del Max Planck Institute en Alemania, a comienzos de los años 50. En años posteriores, K. Seidel trabajó con R. Kickuth en el desarrollo de un sistema de tratamiento conocido como "Root Zone Method", que operaba con flujo subsuperficial horizontal, recurriendo al empleo de arcilla como sustrato filtrante. Siguiendo las directrices del Max Planck Institute, se construyó en 1974, en una localidad alemana, el primer humedal artificial europeo a escala real.<sup>8</sup>

El uso de plantas y microbios, para la limpieza del medio ambiente se conoce como la fitorremediación, este proceso ha ganado su aceptación con el paso del tiempo se conoce como una alternativa hace 10 años, para los métodos de recuperación. Actuando las plantas como trampas o filtros eliminando contaminantes, y sus raíces absorbiendo metales pesados y materia orgánica, tratando así una gran variedad de contaminantes en el medio ambiente. Las plantas tienen varios usos, para la estabilización, extracción, degradación o volatilización del contaminante.

Se han realizado varios estudios en la implementación de humedales artificiales en la industria petrolera, como un método para evitar la contaminación de fuentes acuíferas cercanas a los pozos productores. Estos se han implementado especialmente en el medio oriente, donde las fuentes hídricas son de vital importancia, y que son limitadas.

A continuación, se describe un estudio realizado en Alberta, Canadá. Como indica Korsah<sup>9</sup>.

La Fitodepuración, la técnica que utiliza la habilidad inherente de las plantas para acumular metales está emergiendo rápidamente como una alternativa relativamente más económica y amigable con el medio ambiente que los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales

---

<sup>8</sup> *Ibíd.*, p 1

<sup>9</sup> KORSAH P.E.. The Use of Constructed Wetlands in Produce Water Treatment; An Option for the Oil and Gas Industry?. [OnePetro]. June 10-12 2014. p 7-9. ISSN SPE-169998-MS. [Consultado 01, Octubre, 2017]. Disponible en : <https://www.onepetro.org/>

En este caso se realizó la perspectiva evaluación de distintos tipos de plantas, usando tres humedales artificiales de flujo horizontal sub superficial conectados en serie, las plantas que se utilizaron en ese estudio fueron las siguientes.

- *Limnocharis flava*
- *Thalia geniculata*
- *Typha latifolia*

En este caso, cada humedal tenía un tipo de planta diferente, se evaluó cada planta pero con la misma recepción de agua contaminada, es decir con el mismo de volumen de agua a tratar.

L. Flava fue la más eficiente ( $p < 0,001$ ) en remover hierro (Fe), La mayor parte del cobre fue removida por T. Latifolia ( $p < 0,001$ ) mientras que T. Genuiculate pareció ser la mejor para remover plomo ( $p < 0,021$ ). Ambas T. Genuiculate y T. Latifolia parecieron remover el zinc mejor que L. Flava ( $p < 0,021$ ), pero no hubo diferencia estadística en las tasas de remoción del mercurio por las plantas. Tendencias similares fueron observadas para la bioacumulación, la cual incremento sustancialmente con el tiempo. Las plantas acumularon la mayoría de metales en sus raíces. Los resultados demostraron las capacidades de las tres Fito depuraciones para el mejoramiento de la calidad del agua contaminada por metales pesados.<sup>10</sup>

El siguiente caso fue realizado en Oman, en donde se implementó humedales artificiales a mayor escala, este proyecto fue uno de los más grandes.

Se presenta un resumen de dicho estudio realizado por Al-rawahi<sup>11</sup>.

Como se venía diciendo anteriormente esta alternativa para el tratamiento de agua producida se remonta a principios de siglo, en este caso se probó en Oman desde el año 2000 con un proyecto planteado a gran escala desde el 2010. La tecnología de los humedales es un proceso llamado Fitodepuración, en el cual las plantas nativas facilitan la degradación microbiana de los hidrocarburos. La reducción de volumen también se consigue a través de la alta tasa de evapotranspiración de las plantas. Las ventajas que brinda este proyecto fueron las siguientes.

- No requiere o requiere de un bajo consumo de energía
- Bajo costo de operación
- Sin insumos químicos
- Larga expectativa de vida

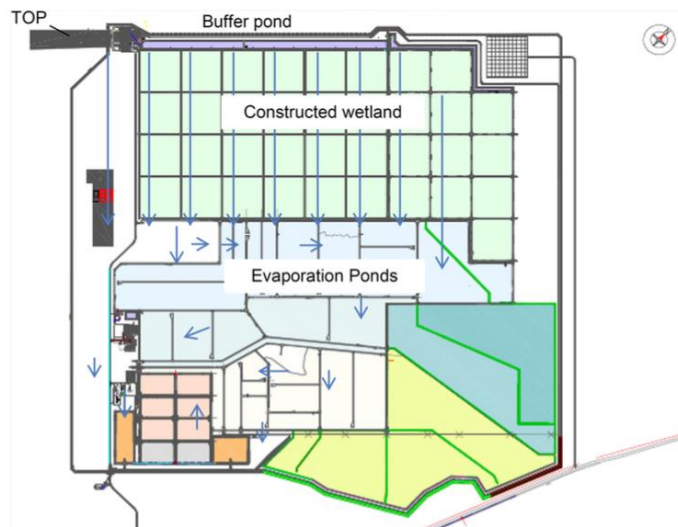
---

<sup>10</sup> *Ibíd.*, p 7-9

<sup>11</sup> AL-RAWAHI. Mohammed, PRIGENT. Stephane, HEADLEY. Tom, BREUER. Roman, y PAETZEIT. Rainer. Constructing Wetlands in the Desert: An Example of Sustainable Produced Water Management in Oman. [OnePetro]. November 10-13 2014. p 1-8. ISSN SPE-172158-MS. [Consultado 20, Octubre, 2017]. Disponible en <https://www.onepetro.org/>

- **Alto desempeño de tratamiento y confiabilidad.**  
 En base a estas ventajas, Petroleum Development Oman (DOP) decidió proceder con una aplicación a gran escala de la tecnología de humedales para la gestión del agua producida en su campo de petróleo Nimr en el sur de Omán. En 2008, BAUER obtuvo el contrato de diseño, construcción, explotación y transferencia (DBOOT) para el desarrollo de la Planta de Tratamiento de Agua de Nimr (NWTP), que se puso en marcha en 2010. La capacidad de la NWTP se ha ampliado con el tiempo y ahora tiene capacidad para tratar 115.000 m<sup>3</sup> / día de agua producida dentro de 350 ha de humedales construidos de flujo superficial (SFCWs), seguido de 500 Ha de estanques de evaporación (EP) para reducción de volumen y producción de sal. Todo el proceso funciona a través de la gravedad sin bombas. El agua producida por la entrada es salobre (TDS 7.000 mg / L) y el aceite en agua es 400 mg / L en promedio. Más del 90% del aceite (260 bbl / día) se recupera en la parte delantera del sistema usando hidrociclones y skimmers. Los hidrocarburos restantes se degradan biológicamente dentro de los humedales, produciendo un efluente con aceite en agua por debajo de la detección (< 0,1 mg de aceite / L) y salinidad salina (aproximadamente 10000 mg / l de TDS). Actualmente se están llevando a cabo investigaciones y ensayos sobre el terreno para desarrollar opciones para la reutilización del agua tratada con humedales para el riego de plantas tolerantes a la sal (agricultura biosalina) con el fin de producir biomasa, biocombustibles, fibra y otros productos. El proyecto ha creado efectivamente un "oasis" en el desierto, proporcionando hábitat valioso para la vida de las aves (> 117 especies identificadas en el sitio)<sup>12</sup>

**Imagen 5.** Layout de NWPT mostrando cada etapa del sistema.



**Fuente:** AL-RAWAHI. Mohammed, PRIGENT. Stephane, HEADLEY. Tom, BREUER. Roman, y PAETZEIT. Rainer. Constructing Wetlands in the Desert: An Example of Sustainable Produced Water Management in Oman.[OnePetro]. November 10-13 2014. p 1-8. ISSN SPE-172158-MS. [Consultado 20, Octubre, 2017].

<sup>12</sup> Ibíd., p 3

Objetivos del estudio según Al-rawahi:<sup>13</sup>

1. Proveer un sistema confiable y fuerte para la gestión del agua producida, capaz de operar sin necesidad de un shut-down.
2. Asegurar el flujo por gravedad del agua permitiendo al sistema operar con un requerimiento mínimo de poder externo usando la topografía local.
3. Tratar el agua producida a través de la remoción de hidrocarburos y el agua disponible a través de la evaporación
4. Crear oportunidades de reuso como la agricultura bio-salina, acuicultura, tratamiento de osmosis inversa para usos de alto valor, operaciones de perforación, recargo de acuífero superficial.
5. Crear un hábitat de vida silvestre dentro de un sitio industrial

Se realizó otro estudio realizado en Abu Dhabi, campo en donde se explotaba petróleo y gas, a continuación, el objetivo de este proyecto.

El objetivo del estudio era realizar un estudio de factibilidad para determinar la tratabilidad de las aguas residuales producidas de las actividades de extracción de gas utilizando sistemas de humedales construidos. GASCO está buscando una solución sostenible de tratamiento y reutilización para el agua producida en sus cinco sitios en la región occidental de Abu Dhabi.

El estudio se divide en cinco fases principales como menciona Kabadeh<sup>14</sup>

1. Recopilación de datos - caracterización de las aguas residuales existentes (agua producida) en los sitios de GASCO
2. Definición del Proyecto - desarrollo de dos alternativas de humedales diseñadas para el tratamiento del agua producida basados en la mejor tecnología disponible, y examen de opciones de reutilización para el tratamiento del efluente
3. Medio ambiente: preparación de memorandos técnicos que aborden un registro de riesgos y la identificación de los desafíos especiales en materia de medio ambiente, seguridad o preocupaciones
4. Prueba de Concepto - construcción, operación y monitoreo de una

---

<sup>13</sup> *Ibíd.*, p 6

<sup>14</sup> KABADEH. Abdi. Wetland Engineering to Treat Process Water. [OnePetro]. November 10-13. 2014. p 3. ISSN SPE-171853-MS. [Consultado 27, Octubre, 2017]. Disponible en <https://www.onepetro.org/>

pequeña planta piloto de humedales para demostrar el tratamiento de los hidrocarburos disueltos y permitir la optimización del tamaño

5. Diseño Conceptual - diseño conceptual para un humedal piloto a gran escala, usando el coeficiente de velocidad de reacción

De este estudio se concluyó que conforme al estudio hecho por Kabadeh.<sup>15</sup>

- Existe un alto grado de confianza en la eficacia técnica de un humedal de tratamiento para tratar el agua producida por GASCO con el fin de cumplir con los criterios de reutilización del riego ADNOC.
- Los humedales construidos son un proceso de tratamiento natural que depende principalmente de plantas y bacterias para crear procesos de tratamiento muy estables. Como resultado, la automatización de las operaciones de los humedales reducirá los costos operativos anuales permitiendo una operación diaria desatendida y relegando la mano de obra de las operaciones a la inspección de rutina y al mantenimiento planificado.

#### **1.4 DIFERENCIA ENTRE UN HUMEDAL NATURAL Y UN HUMEDAL ARTIFICIAL**

Un humedal natural, es un ecosistema, el cual cuenta con una gran variedad de flora y fauna, que incluye diversos tipos de plantas acuáticas, terrestres e intermedias, así como también tiene gran variedad de insectos, algunos mamíferos, anfibios, reptiles y aves como lo afirma Definición ABC<sup>16</sup>. Se caracteriza por tener territorios fangosos o no del todo firmes, debido a la alta cantidad de agua. Algunas funciones que tienen los humedales naturales son de acuerdo con Ciceana<sup>17</sup>.

- Cumplen ciclos primordiales para la vida, ciclos hidrológicos y de carbono.
- Son ecosistemas donde alberga grandes cantidades de fauna y flora, por lo cual les brinda un hábitat.
- Este actúa como un filtro natural de agua, por sus plantas, almacenan y liberan agua. Tratamiento de aguas residuales naturales, destoxificación de sustancias

---

<sup>15</sup> *Ibíd.*, p 9

<sup>16</sup> DefiniciónABC, tu diccionario fácil. Definición ABC. Definición de Humedal. [<https://www.definicionabc.com/geografia/humedal.php>]. Bogotá. D.C. CO. Documento [Consultado 27, Octubre, 2017].

<sup>17</sup> CICEANA. Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, A.C. Historial de artículos ambientales. Funciones y Valores de los humedales. [<http://www.ciceana.org.mx/seccion.php?sec=36>]. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 27, Octubre, 2017].

- Tiene una gran función la cual es el soporte de la cadena de alimentación y de ciclo de los nutrimentos.

Los humedales naturales según Definición ABC<sup>18</sup> son un ecosistema que separa a los terrestres de los acuáticos, estos pueden variar de tamaño, de vegetación o de fauna, pero lo que lo caracteriza es que siempre son ecosistemas con una alta humedad debido a la presencia de agua, tienen climas calurosos y húmedos.

A diferencia de los humedales artificiales, estos son creados por los humanos, con la función de tratar agua, mediante el uso de plantas o vegetales marinos, los humedales naturales tienen una gran variedad de flora y fauna, mientras que en los artificiales solo se utilizan las plantas necesarias.

Además de esto los humedales artificiales están constituidos principalmente por las plantas, el sustrato (grava o arena), tuberías que ayudan a guiar el agua para que circule a través del sustrato y la vegetación, como también cuenta con un material impermeable alrededor para que el agua no se filtre en zonas indeseadas.

El único humedal artificial que es un poco parecido a un humedal natural, es el humedal artificial de flujo libre o superficial, es en el cual el agua fluye lentamente por el humedal, asentando las partículas, y las plantas o los vegetales presentes utilizan los nutrientes del agua a tratar. De resto todos los otros modelos de humedales artificiales no se asimilan en nada a los humedales naturales.

## **1.5 CONTAMINACIÓN GENERADA POR EL PETRÓLEO.**

Primero debemos saber que es la contaminación, la contaminación como menciona Definición ABC<sup>19</sup>. Es la introducción de algún tipo de sustancia o energía que atentará contra el normal funcionamiento y equilibrio que ostentaba el medio inicialmente, provocando además un daño casi irreversible

Los agentes contaminantes pueden ser químicos, físicos o biológicos, estos son los que generan esa alteración al ecosistema en grandes cantidades, generando un cambio negativo al estado natural, por lo general este se genera por una actividad humana. Hay muchas formas de combatir y solucionar la contaminación, legislaciones internacionales que regulan las emisiones, pero generalmente esta está ligada a la economía, algunas de estas soluciones son demasiado costosas para tratar, o a veces simplemente se pasan por alto las reglas.

---

<sup>18</sup> Definición ABC. Op. cit. 1

<sup>19</sup> DefiniciónABC, tu diccionario fácil. Definición ABC. Definición de Contaminación. [<https://www.definicionabc.com/medio-ambiente/contaminacion.php>]. Bogotá. D.C. CO. Documento [Consultado 27, Octubre, 2017].

De acuerdo con Avellaneda<sup>20</sup> la contaminación por petróleo se produce ya sea por una liberación accidental o intencionada en el ambiente, provocando efectos adversos sobre el hombre o sobre el medio. Esta contaminación se ve reflejada por todas las operaciones relacionadas con la explotación y transporte de este. Las cuales afectan directamente al suelo, agua, aire a la fauna y flora.

Como indica Mendoza<sup>21</sup>. Los efectos en el suelo son, degradación del suelo, alteración al sustrato dejando suelos inutilizables, efectos en el agua debido a vertimientos, reduce contenido de oxígeno, aporta sólidos y sustancias orgánicas e inorgánicas. Ahora para el caso del aire, cuando se extrae este recurso natural por lo general se extrae petróleo y gas, el gas que se extrae puede contener dióxido de carbono, monóxido de carbono o ácido sulfhídrico, si este los contiene estos gases se deben quemar, si el gas producido es dióxido de carbono se ventea Como se conoce se tienen reglamentaciones para estos casos, pero en este caso estos procesos pueden llegar a contaminar extensas zonas.

Y por último efectos realizados sobre la fauna y flora, en este caso las áreas en donde se deben adecuar las plataformas para la explotación del recurso se debe talar los árboles de la zona, deforestación, muchas de estas áreas proveen refugio y alimento a la fauna adaptada al ambiente, lo que genera un cambio hacia el ambiente y hacia los animales presentes, generando un impacto ambiental es decir generando un efecto que se produce por una determinada acción humana sobre el medio ambiente, en este caso la explotación del recurso, la cual genera una alteración al medio ambiente.

## **1.6 EFECTOS AMBIENTALES DE LA ACTIVIDAD PETRÓLERA EN COLOMBIA**

La actividad petrolera en sus diversas actividades genera contaminación y cambios al uso del suelo, contaminación de aguas superficiales y subterráneas y modificaciones biológicas sobre hábitats naturales.

Algunos de los efectos ambientales que la actividad petrolera ha dejado en Colombia sobre los ecosistemas y el hombre según Avellaneda<sup>22</sup> son:

---

<sup>20</sup> AVELLANEDA, Alfonso. Petróleo acto ambiental en Colombia. Revistas Universidad Nacional. 1990. Volumen 6. p 21-28. Consultado [06, Noviembre, 2017]. Disponible en : <https://revistas.unal.edu.co/index.php/revistaun/article/viewFile/12208/12845>

<sup>21</sup> CONICET MENDOZA. Centro Científico Tecnológico. Contaminación por la industria petrolera. [<https://www.mendoza-conicet.gob.ar/portal>]. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 06, Noviembre, 2017].

<sup>22</sup> AVELLANEDA, Alfonso. Petróleo acto ambiental en Colombia. Revistas Universidad Nacional. 1990. Volumen 6. p 21-28. Consultado [06, Noviembre, 2017]. Disponible en : <https://revistas.unal.edu.co/index.php/revistaun/article/viewFile/12208/12845>



1. Remoción de cobertura vegetal y construcción de trochas de penetración a zonas de la amazonia y la Orinoquia, entre las que se puede contar varios Parques Nacionales Naturales y zonas de Reserva Forestal. Casos específicos como el caso del Oleoducto Caño Limón-Coveñas, el Oleoducto el Porvenir-Velásquez y el Gaseoducto Villavicencio-Bogotá, donde se vieron afectadas zonas de Reserva Forestal en la Cordillera Oriental dañando zonas y contaminando aguas superficiales. Se tienen estudios donde la recuperación de estas zonas fue casi nula, y fueron varios cientos de hectáreas.
2. Cambios en la conducta de los drenajes naturales que en algunos casos ha llevado al secamiento total de grandes áreas de humedales. Este problema se puede ver en donde más fuerte se ha hecho explotación de los hidrocarburos como en las zonas de valles medios del Magdalena y depresión Momposina, estas zonas son reconocidas por la gran pesca que se puede efectuar en estas zonas, con todas las actividades hechas por la industria petrolera se ha alterado los flujos naturales de innumerables ciénagas, generando problemas para la pesca.
3. La contaminación de aguas superficiales y acuíferos cerca a actividades de explotación de petróleo por no contar con la adecuada tecnología de tratamiento de las aguas asociadas a estas actividades o simplemente no hacer caso a lo establecido por la norma para los vertimientos de estas aguas.

Las cuencas más afectadas son.

- Cuenca del Río Magdalena.
  - Cuenca del Río Catatumbo
  - Cuenca del Río Arauca
  - Cuenca del Río Putumayo
  - Cuenca del Río Meta
4. Desaparición de especies vegetales y animales, cambiando ecosistemas. Se tienen estudios de que la diversidad de las especies vegetales se ha reducido considerablemente en zonas donde se explota petróleo.
  5. Salinización de suelos por aguas asociadas al petróleo en lugares abiertos.

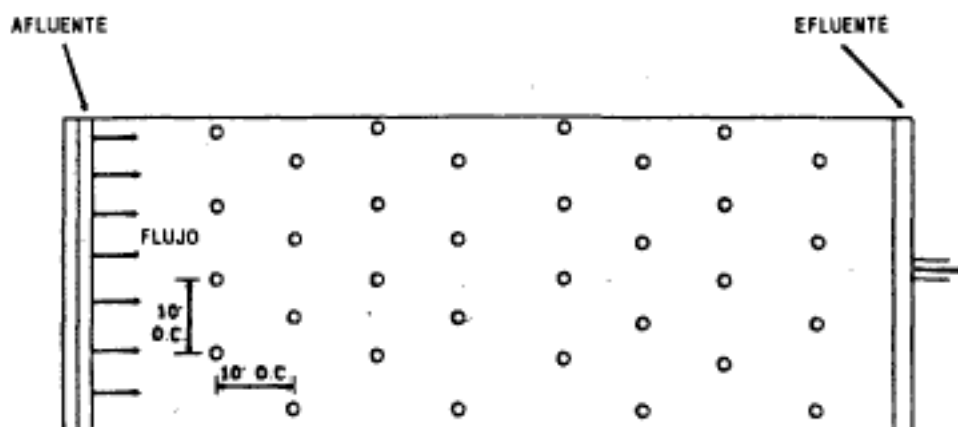
## 2. CONSTRUCCION Y OPERACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.

Un humedal construido con flujos subsuperficiales se basa en un lecho, que es una estructura de piedra estratificada, puede ser grava o arena, dependiendo. En Estados Unidos se han practicado más con grava y arena ya que tienen una mejor eficiencia por lo que eliminan más sólidos suspendidos gracias a la filtración de estos junto con las raíces. Este lecho en un extremo tiene un instrumento afluente que introduce el agua a tratar, de forma distribuida y otro instrumento efluente para la recolección del agua tratada al extremo opuesto. Y finalmente se colocan de manera estratégica las plantas o vegetales marinos en la superficie del lecho.

La información que se verá en este capítulo va enfocada a los procedimientos que se sugieren para el diseño y la construcción de un humedal artificial.

A continuación, en la **Imagen 6** podemos observar un humedal construido con flujo subsuperficial. Vista desde plano.

**Imagen 6.** Humedal Artificial con flujo subsuperficial



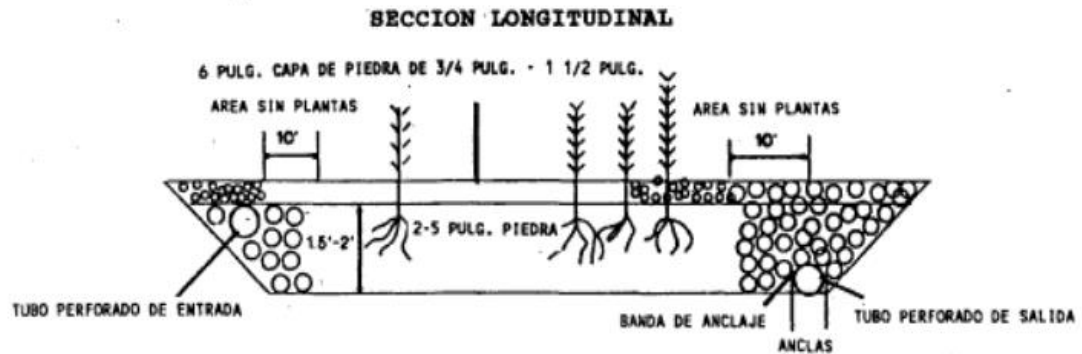
**Fuente:** EPA. Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales. División de Manejo de Aguas Rama de instalaciones municipales sección técnica. U.S: EPA – REGION 6. NATIONAL SERVICE CENTER FOR ENVIRONMENTAL PUBLICATIONS (NSCEP). [Consultado 01, octubre, 2017].

En este caso los puntos son las plantas o los vegetales, como lo afirma la Epa<sup>23</sup> se recomienda que se debe mantener la densidad de las plantas, y se deben de eliminar posibles plantas adicionales que puedan desarrollar y reducir la separación entre las plantas.

<sup>23</sup> EPA. Op. cit. p.5

En la **Imagen 7** se observará ya más detalladamente como es un humedal artificial. (Sección Longitudinal)

**Imagen 7.** Humedal Artificial



**Fuente:** EPA. Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales. División de Manejo de Aguas Rama de instalaciones municipales sección técnica. U.S: EPA – REGION 6. NATIONAL SERVICE CENTER FOR ENVIRONMENTAL PUBLICATIONS (NSCEP). [Consultado 01, octubre, 2017].

Notas importantes a la hora de realizar un humedal artificial como lo indica la Epa<sup>24</sup>:

1. El volumen, un mínimo de 24 horas de retención
2. El espacio vacío entre las rocas debe de ser entre 2 a 5 pulgadas.
3. Se sugiere que las plantas se coloquen a 10 pies entre los centros.

Al principio, cuando se estaba reconociendo este nuevo proyecto, se creía necesario una mayor proporción largo-ancho, una relación de 10 a 1, o hasta más, para prevenir que en el proceso no se quede estancada el agua a tratar a través del filtro. A lo largo del tiempo y con una mayor experiencia se demostró que una mayor proporción largo-ancho puede afectar el proceso, perdiendo eficiencia. Actualmente se prefieren las menores proporciones, así sean sistemas grandes.

Con respecto a la profundidad del lecho, de acuerdo con Hammer<sup>25</sup> usualmente este es de 61 a 76.2 cm (24 a 30 pulgadas), como lo dicho anteriormente se recomienda nunca ser mayor a 1 metro. Existen estudios o evidencias que el lecho puede llegar a tener una profundidad de 47.5 cm (18 pulgadas), para evitar condiciones anaeróbicas en el fondo.

---

<sup>24</sup> *Ibíd.*, p.6.

<sup>25</sup> HAMMER. Donald A. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Municipal, Industrial, and Agricultural.* [CRC PRESS]. Chattanooga, Tennessee. Lewis Publishers. 1989. [Consultado 07, Noviembre, 2017]. Disponible en <https://www.crcpress.com/>

El instrumento utilizado para el afluente según la Epa<sup>26</sup> es un tubo plástico perforado, el cual se prolonga a través de lo ancho del lecho, para poder repartir el flujo a través de lo ancho del sistema. Una recomendación que se hace es ubicar el tubo sobre la parte superior o que este ubicado bien cerca de la parte superior. Este instrumento es de suma importancia ya que se necesita que repartir el flujo uniformemente en todo lo ancho del lecho para una mejor eficiencia.

Finalmente, el instrumento, de recolección para el efluente de acuerdo con la Epa.<sup>27</sup>, es generalmente también un tubo plástico perforado como el del afluente, su función es recoger el efluente en forma uniforme. Otra recomendación para este instrumento es que debe de estar en el fondo o cerca del fondo

## **2.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN RECOMENDADAS**

Al momento de construir un humedal artificial se deben tomar en consideración algunas características para aumentar la eficiencia, y para que funcione de una manera adecuada, es decir que ejecute su proceso de una mejor manera.

**2.1.1 Estratificación del lecho.** El humedal debe de tener dos capas, la primera capa subsuperficial a la cual se debe confinar el flujo de las aguas, y la segunda capa superficial es la que tiene como función ser base para las plantas o vegetales.

Como lo afirma Moshiri<sup>28</sup> la capa subsuperficial debe tener un máximo de 2 pies de profundidad y la capa superficial un máximo de 6 pulgadas.

**2.1.2 Protección del lecho lateral/sustrato.** Para la Epa<sup>29</sup> es primordial evitar la erosión, y la transferencia del subsuelo para poder proteger el humedal artificial es por esto que se recomienda o se sugiere la instalación de un forro sintético, esto con el fin de evitar la infiltración.

---

<sup>26</sup> EPA. Op.cit. p7

<sup>27</sup> Ibíd., p.7.

<sup>28</sup> MOSHIRI. Op. cit.

<sup>29</sup> EPA Op. cit., p8

**2.1.3 Capacidades de recirculación.** Como lo indica el libro de la Epa<sup>30</sup>, el humedal artificial debe tener la capacidad de recircular el efluente de vuelta a través del tratamiento, esto se requiere cuando el agua a tratar no cumple con los estándares de calidad o con los requisitos, esto no solo sirve para poder volver a retratar el agua, sino que también sirve para poder aumentar el flujo en caso tal de que este esté bajo y que no se estanque el agua.

**2.1.4 Mantenimiento del lecho.** El mantenimiento del lecho es sumamente importante para que cumpla con su funcionamiento y tenga una alta eficiencia el humedal artificial, por eso como lo mencionado anteriormente es de vital importancia plantar las plantas o vegetales a una misma distancia y evitar obstrucciones, para que el agua no se estanque.

Otra recomendación es utilizar una manguera a una alta presión insertada en la línea de recolección del efluente para poder eliminar algunos depósitos sólidos de los espacios vacíos dentro de la estructura para su mejor funcionamiento.

**2.1.5 Control del líquido.** Se debe estar en un constante chequeo del nivel del agua en los humedales artificiales, si se construye con una línea efluente que se pueda ajustar, a veces será obligatorio realizar ajustes periódicos para mantener el nivel apropiado de líquido en el lecho, puede que en otras veces sea necesario vaciar el humedal para su posible mantenimiento.

**2.1.6 Hidrología.** Como lo indica Silva<sup>31</sup> este es uno de los más importantes factores para el mantenimiento y funcionamiento del humedal, por lo que este influye directamente y controla los factores abióticos, los nutrientes, condiciones aerobias y anaerobia, la profundidad, velocidad del agua y el suelo.

Ahora bien, los componentes bióticos, tienen importancia directamente en la hidrología del humedal a través de sus procesos, como lo es la precipitación, la transpiración, y los cambios de temperatura al interior del humedal.

**2.1.7 Selección de la especie vegetal.** La importancia de las plantas en los humedales artificiales es la transferencia física en el sistema (las raíces, los tallos, y rizomas).

---

<sup>30</sup> Ibíd., p.23.

<sup>31</sup> SILVA, Ángela Sofía y ZAMORA, Hernán Darío. Humedales Artificiales. [Repositorio Digital]. Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Química. 2005. p 11-19. [Consultado 07, Noviembre. 2017]. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/>.

Las plantas que frecuentemente se utilizan en la mayoría de los humedales para tratar aguas son las siguientes según Silva<sup>32</sup>

- **Scirpus:** Estas plantas son de la familia de las ciperáceas, son perennes y crecen en grupos. Crecen desde 5 cm a 3 m de profundidad, puede crecer en la grava, las temperaturas deseables son 16-27 °C y pH de 4-9.

**Imagen 8.** Planta Scirpus Humedal



**Fuente:** LARA, BORRERO. Jaime Andrés. Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. [Repositorio Digital]. Trabajo Final. Universidad Politécnica de Cataluña. Instituto Catalán de Tecnología. Barcelona. Mayo de 1999. [Consultado 07, Noviembre, 2017]. Disponible en <https://www.ecohabitar.org/>

**Imagen 9.** Planta Scirpus detallada.



**Fuente:** LARA, BORRERO. Jaime Andrés. Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. [Repositorio Digital]. Trabajo Final. Universidad Politécnica de Cataluña. Instituto Catalán de Tecnología. Barcelona. Mayo de 1999. [Consultado 07, Noviembre, 2017]. Disponible en <https://www.ecohabitar.org/>

---

<sup>32</sup> Ibid., p15

- Typhas: Es capaz de crecer bajo diversas condiciones, esta es recomendable para humedales subsuperficiales y se propaga fácilmente. Esta tiene una remoción potencial pequeña de nitrógeno y fosforo.

**Imagen 10.** Planta Typha Humedal.



**Fuente:** VitalSigns. Typha Angustifolia. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 07, Noviembre, 2017] Disponible en <http://vitalsignsme.org/>

**Imagen 11.** Planta Typha detallada.



**Fuente:** Plantas y Hongos. Contenidos Glosario Herbarium taxones Listas Autor. espadaña, enea, anea, lesser bulrush (engl.), narrow-leaf cat-tail (engl.) Typha angustifolia L. ([Typhaceae](#)). Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 07, Noviembre, 2017]. Disponible en <http://www.plantasyhong>



- Phragmites: Esta especie posee poco valor alimenticio por lo cual no son atacadas por los animales u otro tipo de plantas, por esta razón tienen una mayor vida para ser utilizados en humedales artificiales.

**Imagen 12.** Planta Phragmites Humedal



**Fuente:** LARA, BORRERO. Jaime Andrés. Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. [Repositorio Digital]. Trabajo Final. Universidad Politécnica de Cataluña. Instituto Catalán de Tecnología. Barcelona. Mayo de 1999. [Consultado 07, Noviembre, 2017]. Disponible en <https://www.ecohabitar.org/>

**Imagen 13.** Planta Phragmites detallada.



**Fuente:** Biopix. Common Reed (Phragmites Australis). Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 07, Noviembre, 2017]. Disponible en <http://www.biopix.com/>

Una sugerencia es darle la densidad necesaria al humedal artificial, y si están disponibles plantas de las zonas aledañas que sean locas mejor, ya que estas ya están adaptadas a las condiciones del sitio, eso sí toca estudiar si esas plantas pueden generar el mismo tratamiento que las ya utilizadas frecuentemente.



Las plantas utilizadas en Estados Unidos son juncos de laguna y las espadañas, en Europa es dominante los carrizos. En Colombia los más utilizados son las espadañas, carrizos, juncos y juncos de laguna.

En la **Tabla 1** se puede observar información sobre algunas plantas utilizadas para humedales artificiales

**Tabla 1.** Plantas más utilizadas en humedales artificiales.

Especie	Nombre Latino	Nombre común más usual	Temperatura, °C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
			Deseable	Germinación de las semillas		
Ciperáceas	<i>Carex</i> sp.	NA	14 - 32	NA	NA	5 - 7,5
	<i>Eleocharis</i> sp.	NA	NA	NA	NA	NA
	<i>Scirpus</i> lacustris L. (*)	Junco de laguna	18 - 27	NA	20	4 - 9
Gramíneas	<i>Glycer</i> fluitans (L.) R. Br.	Hierba del maná	NA	NA	NA	NA
	<i>Phragmites</i> australis (Caw) Trin. Ex Steudel (*)	Carrizo	12 - 23	10 – 30	45	2 - 8
Iridáceas	<i>Iris pseudacorus</i> L.	Lirio amarillo, espadaña fina	NA	NA	NA	NA
Juncáceas	<i>Juncus</i> sp.	Juncos	16 - 26	NA	20	5 - 7,5
Tifáceas	<i>Thypha</i> sp (*)	Eneas, aneas, espadañas	10 - 30	12 – 24	30	4 - 10

(\*) Especie más utilizada

**Fuente:** ESPINOZA, ORTIZ. Camilo Eduardo. Factibilidad del Diseño de un Humedal de Flujo Subsuperficial para el tratamiento de Aguas Residuales Municipales de 30.000 Habitantes.[Repositorio Digital]. Escuela Colombiana de Ingeniería – Julio Garavito. Escuela Maestría en Ingeniería Civil. Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Bogotá D.C. 2014. [Consultado: 08, Noviembre, 2017]..

## 2.2 EVALUACION Y SELECCIÓN DE LA ZONA PARA DESARROLLAR EL PROYECTO

Los humedales se deben construir en áreas que estén disponibles y que sean áreas extensas, el área depende de su flujo de volumen, de los contaminantes que tenga el agua a tratar, y cuáles son los objetivos a los que se quiere llegar, la finalidad del tratamiento.

Principales características para la localización y diseño de un humedal artificial son:

**2.2.1 Agua residual.** Estas aguas vienen de una red de alcantarillado que son conducidas hacia el humedal, las aguas residuales abastecen a una cierta población y son modificadas por diferentes actividades domésticas o industriales.

Esta agua según su función, traen combinación de líquidos y residuos sólidos, las cuales son de residencias, industrias, oficinas e instituciones, también entre estas se encuentran las aguas subterráneas y superficiales.

Contaminantes importantes para el tratamiento de las aguas residuales de acuerdo con Espinoza: <sup>33</sup>

- Sólidos suspendidos
- Materia Orgánica
- Microorganismos patógenos
- Nutrientes
- Compuestos tóxicos
- Materia orgánica refractaria
- Metales Pesados
- Sólidos inorgánicos disueltos

### 2.2.2 Parámetros importantes en el tratamiento de aguas residuales

- **Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO)**

Oxígeno para degradar la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. Esta demanda se cuantifica a 20 °C, con valores numéricos expresados en mg/L.

---

<sup>33</sup> ESPINOZA, ORTIZ. Camilo Eduardo. Factibilidad del Diseño de un Humedal de Flujo Subsuperficial para el tratamiento de Aguas Residuales Municipales de 30.000 Habitantes.[Repositorio Digital]. Escuela Colombiana de Ingeniería – Julio Garavito. Escuela Maestría en Ingeniería Civil. Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Bogotá D.C. 2014. [Consultado: 08, Noviembre, 2017]. Disponible en <https://repositorio.escolaing.edu.co/>

De acuerdo con Correa<sup>34</sup> este parámetro es el más usado para medir la calidad del agua residual y superficial, esto con el fin de diseñar el tratamiento biológico adecuado, para evaluar la eficiencia del tratamiento utilizado y para mirar efectos de contaminación. Mayor parte de las aguas usadas en acueductos tiene una DBO menor de 7 mg/L.

- **Demanda química de Oxígeno (DQO)**

Oxígeno que se requiere para degradar químicamente la materia orgánica, esto se hace con dicromato de potasio por lo general un agente oxidante, en un medio ácido y a alta temperatura.

- **Nitrógeno:**

Este es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas. Se puede presentar como nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitritos y nitratos. El dato de nitrógeno es necesario según Estrada<sup>35</sup> para el tratamiento de aguas residuales por un método biológico, si el agua no tiene el nitrógeno necesario puede necesitar de una adición de este nutriente para su adecuada descomposición. La concentración en aguas residuales domésticas la concentración de nitrógeno total puede ser de 30 a 100 mg/L, la de nitrógeno amoniacal, de 5 a 20 mg/L, la de nitritos y nitratos menor de 1 mg/L.

- **Oxígeno Disuelto**

Según Correa<sup>36</sup> el oxígeno disuelto es requerido para la vida acuática, este gas tiene una baja solubilidad. La solubilidad de este gas en el agua dulce oscila entre 7 mg/L a 35°C y 14,6 mg/L a 0°C. Cuando el agua tiene una baja concentración de oxígeno disuelto, reduce la capacidad autopurificadora del agua y esto hace que el tratamiento de las aguas residuales sea necesario para su disposición final. Todo proceso aerobio requiere de una concentración mayor

---

<sup>34</sup> CORREA, RAMÍREZ; Juan Carlos y MARÍN MONTOYA, Jhoan Pablo. Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la *Guadua angustolia* Kunth. [Repositorio Digital]. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Escuela de Tecnología Química. Pereira. 2010. p 9-15. [Consultado: 08, Noviembre, 2017]. Disponible en <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/>

<sup>35</sup> ESTRADA, GALLEGO. Islena Yineth. Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial(HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. [Repositorio Digital]. Monografía. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Escuela de Química. Pereira. 2010. [Consultado: 08, Noviembre, 2017]. Disponible en <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/>

<sup>36</sup> CORREA y MONTOYA. Op. cit. p12.

de 0,5 mg/L de oxígeno disuelto, y en aguas naturales las concentraciones para mantener la vida acuática son mayores de 4 mg/L.

- **pH**

Para aguas con pH menor de 6, cuando se está realizando el tratamiento biológico, se favorece al crecimiento de hongos sobre las bacterias. Entonces el valor de pH que se recomienda para procesos de tratamiento y para que permanezca la vida acuática debe ser generalmente de 6,5 a 8,5.

Para los efluentes de tratamiento secundario se considera un pH de 6,0 a 9,0, para procesos biológicos de nitrificación se considera valor de pH de 7,2 a 9,0 y para desnitrificación de 6,5 a 7,5, como lo afirma Delgadillo.<sup>37</sup>

- **Grasas y Aceites**

De acuerdo con la Universidad De Salamanca<sup>38</sup> este parámetro interfiere en la actividad biológica, impide la transferencia de oxígeno, esto es debido a la baja solubilidad del oxígeno en los aceites y en las grasas. Estas ocupan grandes superficies debido a su tensión superficial.

- **Sólidos Suspendidos Totales**

Como lo menciona también la Universidad De Salamanca<sup>39</sup> estos son los sólidos que flotan en el agua, son de gran tamaño, como los sólidos fecales, papeles, maderas, comida, basura y algunos otros materiales parecidos. Estos pueden ser eliminados dejando que se depositen o que se filtren y en su mayoría estos sólidos son orgánicos. Pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias.

---

<sup>37</sup> Blogdelagua. DELGADILLO, Oscar; CAMACHO, Alan; PÉREZ, Luis F y ANDRADE, Mauricio. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.[ [http://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2013/02/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf](http://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2013/02/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf)]. Bogotá D.C. CO. Documento [08, Noviembre, 2017].

<sup>38</sup> Universidad de Salamanca. Campus de excelencia Institucional. Parámetros para el agua. [<http://cidta.usal.es/>]. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 08, Noviembre, 2017].

<sup>39</sup> Ibid. Unidad 3. Cap1.

- **Metales Pesados**

Este parámetro tiene mucha importancia de acuerdo con Lariojaorg<sup>40</sup>, ya que estos pueden persistir en el ambiente, esto lo que hace es aumentar la acumulación y toxicidad, los metales pesados en su mayoría son adicionados por el ser humano en sus actividades diarias.

- **Coliformes Fecales**

Según Lara<sup>41</sup>: Se encuentran en los intestinos y excremento de los animales y humanos, la presencia de estos indica que el agua está contaminada y esta agua puede generar enfermedades.

En las siguientes tablas. **Tabla 2** y **Tabla 3** podemos ver la carga típica en el afluente, en efluente y las concentraciones naturales en los humedales artificiales.

**Tabla 2.** Tasas Típicas de Carga Superficial

Constitu-yente	Concentra-ción típica del afluente (mg/L)	Meta de tratami-ento del efluente (mg/L)
Carga hidráulica (pulgadas por día)	0.4 a 4**	
DBO	5 a 100	5 a 30
SST	5 a 100	5 a 30
Nitrógeno como NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub>	2 a 20	1 a 10
Nitrógeno como NO <sub>3</sub>	2 a 10	1 a 10
Nitrógeno total	2 a 20	1 a 10
Fósforo total	1 a 10	0.5 a 3

**Fuente:** EPA. United States Environmental Protection Agency. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 08, Noviembre, 2017]. Disponible en <https://www.epa.gov/>

---

<sup>40</sup> Lariojaorg. El Gobierno de La Rioja en Internet. Salud y metales pesados. [<http://www.larioja.org/larioja-client/cm>]. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 08, Noviembre, 2017].

<sup>41</sup> LARA, BORRERO. Jaime Andrés. Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. [Repositorio Digital]. Trabajo Final. Universidad Politécnica de Cataluña. Instituto Catalán de Tecnología. Barcelona. Mayo de 1999. [Consultado 08, Noviembre, 2017]. Disponible en <https://www.ecohabitar.org/>

**Tabla 3.** Concentraciones naturales en los humedales artificiales.

<b>Constituyente</b>	<b>Rango de concentración</b>
DBO (mg/L)	1 a 10
SST (mg/L)	1 a 6
Nitrógeno total (mg/L)	1 a 3
Nitrógeno como NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> (mg/L)	menos de 0.1
Nitrógeno como NO <sub>3</sub> (mg/L)	menos de 0.1
Fósforo total (mg/L)	menos de 0.2
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	50 a 500

**Fuente:** EPA. United States Environmental Protection Agency. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 08, Noviembre, 2017]. Disponible en <https://www.epa.gov/>

Después de depurar el agua, se debe regir la norma para vertimientos de agua el decreto 0631 del 2015, aquí es donde se presentan los límites permitidos para vertimientos en cuerpos de agua superficiales.

**2.2.3 Topografía.** El terreno óptimo para la construcción de un humedal artificial según silva<sup>42</sup> es una topografía uniforme horizontal ya que los humedales de flujo libre suelen tener depósitos y canales horizontales o con una pendiente de 1% o superior que son los humedales subsuperficiales.

Es primordial construirlos con estas topografías ya que pueden tener un costo económico mayor porque el movimiento de tierras podrá afectar la construcción de estos.

---

<sup>42</sup>SILVA y ZAMORA. Op. cit. 56

**2.2.4 Riesgo de Inundación.** Los humedales se deben construir lejos de las comunidades, se debe conocer el caudal de agua que se va a tratar, para evitar posibles inundaciones y que no sobrepase la capacidad que tiene el humedal artificial.

**2.2.5 Clima.** En este caso el rendimiento del proceso de tratamiento depende mucho del clima, ya que, si se instala el humedal artificial en una zona que esté pasando invierno, su funcionamiento va a depender mucho de la temperatura del agua en el interior y del tratamiento.

Esto es muy importante en la eficiencia de este sistema por lo que es muy sensible a la temperatura, porque los principales mecanismos de tratamiento son biológicos.

En los casos en los que la zona este pasando por invierno y no se cumpla los objetivos de tratamiento es necesario almacenar el agua, por el otro lado en climas cálidos se es necesario fuentes de agua suplentes para evitar que se seque el humedal.

**2.2.6 Costos.** Los costos a tener en cuenta para la inversión de un humedal artificial son los siguientes

- Costo del Terreno
- Evaluación del sitio
- Limpieza
- Movilización de suelos
- Recubrimiento
- Sembrado
- Plantas
- Estructuras encargas del efluente y afluente
- Cercas
- Tuberías
- Ingeniería

En la **Tabla 4** podemos observar los costos de inversión de operación y mantenimiento para un humedal artificial con una capacidad de 100 galones/día.

**Tabla 4.** Costos Inversión de O/M de un humedal artificial con capacidad de 100 gl/día.

<b>Elemento</b>	<b>Costo, \$*</b>	
	<b>Recubrimiento de suelo natural</b>	<b>Recubrimiento de membrana plástica</b>
Costo del terreno	\$16,000	\$16,000
Evaluación del sitio	3,600	3,600
Limpieza del sitio	6,600	6,600
Movimiento de tierra	33,000	33,000
Recubrimiento	0	66,000
Suelo para siembra	10,600	10,600
Plantas	5,000	5,000
Sembrado	6,600	6,600
Estructuras de entrada y descarga	16,600	16,600
<i>Subtotal</i>	<b>\$98,000</b>	<b>\$164,000</b>
Costos de ingeniería, legales, etc.	<b>\$53,800</b>	<b>\$95,100</b>
<i>Costo total de inversión</i>	<b>\$154,800</b>	<b>\$259,100</b>
Costos de O/M, \$/año	\$6,000	\$6,000

**Fuente:** EPA. United States Environmental Protection Agency. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 08, Noviembre, 2017]. Disponible en <https://www.epa.gov/>



Ahora bien, en la **Tabla 5** se hace la comparación entre los costos de un humedal artificial y un tratamiento convencional de tratamiento de aguas.

**Tabla 5.** Comparación costos humedal artificial vs tratamiento convencional

<b>Elemento de costo</b>	<b>Proceso</b>	
	<b>Humedal</b>	<b>SBR</b>
Costo de inversión (\$)	259,000	1,104,500
Costo de O/M (\$)	6,000/año	106,600/año
Costo total a valor presente* (\$)	322,700	2,233,400
Costo por 1000 galones de agua tratada** (\$)	0.44	3,06

**Fuente:** EPA. United States Environmental Protection Agency. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 08, Noviembre, 2017]. Disponible en <https://www.epa.gov/>

Esta tabla presenta una comparación de costos del ciclo de vida útil de un humedal con el de un sistema convencional de tratamiento de reactor secuencial por tandas (sequencing batch reactor, SBR), como lo indica Epa en su estudio de Humedales de flujo libre superficial.<sup>43</sup>

<sup>43</sup> EPA. United States Environmental Protection Agency. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial. [[https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs\\_00\\_024.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs_00_024.pdf)]. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 08, Noviembre, 2017].

## 2.3 PASOS PARA EL DISEÑO.

Los siguientes pasos de diseño fueron sacados de libro Metodología para el diseño de humedales<sup>44</sup>.

1. Determinar la profundidad del humedal. \*

Para determinar la profundidad del humedal que se va a construir se debe ver cuál es la profundidad máxima que van a alcanzar las raíces de las plantas o vegetales marinos que se van a utilizar para tratar el agua. Según estudios la profundidad de las raíces puede oscilar entre 0.3 – 0.9 m.

A continuación, en la **Tabla 6** se pueden ver algunas plantas con sus respectivas profundidades de enraizamiento.

**Tabla 6.** Clasificación de las plantas con su respectiva profundidad.

Plantas	Profundidad de la raíz dentro del agua.
Elcocharis ovata	5 cm
Juncus effusus y Scirpus microcarpus	5-15 cm
Iris pseudocorus	10-20 cm
Typha latifolia	15-60 cm
Sparganium spp	60-120 cm
Scirpus acutus	60-200 cm

INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL, VOL. XXXII, No. 1, Ene-Abr 2011

**Fuente:** Revistas Científicas. Universidad Tecnológica de La Habana. Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. VOL. XXXII, NO. 1, ENE-ABRIL 2011. Bogotá D.C. CO. P 61-70. Los pasos del diseño fueron sacados de este libro. Febrero 2011. [Consultado: 10, Diciembre, 2017]. Disponible en: [http://revistascientificas.cujae.edu.cu/.%5CRevistas%5CHidraulica%5CVol-XXXII%5C1-2011%5C61-70\\_Metodologia\\_para\\_el.pdf](http://revistascientificas.cujae.edu.cu/.%5CRevistas%5CHidraulica%5CVol-XXXII%5C1-2011%5C61-70_Metodologia_para_el.pdf).

---

<sup>44</sup> Revistas Científicas. Universidad Tecnológica de La Habana. Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal. [ [http://revistascientificas.cujae.edu.cu/.%5CRevistas%5CHidraulica%5CVol-XXXII%5C1-2011%5C61-70\\_Metodologia\\_para\\_el.pdf](http://revistascientificas.cujae.edu.cu/.%5CRevistas%5CHidraulica%5CVol-XXXII%5C1-2011%5C61-70_Metodologia_para_el.pdf)]. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. VOL. XXXII, NO. 1, ENE-ABRIL 2011. Bogotá D.C. CO. P 61-70. \* Los pasos del diseño fueron sacados de este libro. Febrero 2011. [Consultado: 10, Diciembre, 2017].

2. Determinar el área superficial.

Se calcula con la siguiente ecuación.

**Ecuación 1.**

$$A_s = \frac{[Q(\ln C_o - \ln C_e)]}{K_T h n}$$

Donde:

$C_e$ : Concentración de DBO del efluente (mg/l)

DBO= Oxígeno para degradar la materia orgánica.

$C_o$ : Concentración de DBO del afluente (mg/l)

$K_T$ : Constante de velocidad de reacción del sistema

T: Temperatura del agua (°C)

h: Profundidad del lecho (m)

n: Porosidad del medio

Q= Caudal medio que circula a través del sistema (m<sup>3</sup>/s)

$A_s$ = Área superficial del sistema (m<sup>2</sup>)

3. Determinar el tiempo de retención

Se puede determinar con la siguiente expresión

**Ecuación 2.**

$$t_r = \frac{\ln C_o - \ln C_e}{K_T}$$

4. Determinar la pendiente del lecho y la velocidad de flujo.

La velocidad de flujo, mediante estudios se llegó a la conclusión que se debe limitar a 6.8m/d para minimizar el arrastre localizado de películas biológicas, por esto la pendiente se puede calcular de la siguiente forma.

**Ecuación 3.**

$$S = \frac{6}{86400K_D} \quad \text{ó} \quad S = \frac{1}{14400K_D}$$

Donde:

S= Pendiente longitudinal del fondo del lecho.

$K_D$ = Conductividad hidráulica Darciana (m/s)

5. Determinar el área de la sección transversal.

Esta se puede calcular de la siguiente manera.

**Ecuación 4.**

$$A_c = \frac{Q}{K_D S}$$

Donde:

$A_c$  = Área transversal del lecho ( $m^2$ )

$K_D$ = Conductividad hidráulica Darciana (m/s)

Q= Caudal medio que circula a través del sistema ( $m^3/s$ )

S= Pendiente longitudinal del fondo del lecho.

6. Determinar el ancho y la longitud del humedal.

Ya con los datos calculados del área de la sección transversal y de la profundidad del lecho se puede calcular el ancho y la longitud de la siguiente manera:

**Ecuación 5.**

$$b = \frac{A_c}{d}$$

Donde:

b= Ancho del humedal (m)

d= profundidad del agua (m)

Ahora con el valor del ancho y del área superficial se puede calcular la longitud L:

**Ecuación 6.**

$$L = \frac{A_s}{b}$$

Donde:

$A_s$ = Área superficial del sistema ( $m^2$ )

b= ancho del humedal (m)

7. Chequeo de la pendiente del lecho. Numero geométrico ( $G_1$ )

Este es un chequeo que se hace para verificar que no se esté generando disminuciones en el caudal, para que no bajen el gradiente hidráulico de forma brusca, afectando a las plantas o los vegetales marinos. Para esto se debe cumplir lo siguiente.

**Ecuación 7.**

$$0.1 > \frac{S}{(h_o/L)} = G_1$$

Donde:

$H_o$  : Profundidad del agua.

En este caso de que la desigualdad de la expresión anterior no se cumpla, se debe reducir la pendiente del lecho, luego de esto volver a recalcular todo desde el paso 4.

8. Chequeo de la carga superficial. # de Carga. ( $G_3$ )

En este caso las cargas excesivas o la disminución de la conductividad hidráulica, que ocasionen gradientes muy latos pueden generar disminución de la eficiencia del proceso, por inundaciones. Para poder que esto no pase se debe cumplir lo siguiente.

**Ecuación 8.**

$$0.1 > \frac{q/K_D}{(h_o/L)^2} = G_3$$

Donde:

$$q = \frac{Q}{bL}$$

es la carga superficial que recibe el humedal ( $m^3/m^2s$ ).

En este caso es igual, donde la desigualdad no llegue a ser cierta, se debe disminuir la pendiente del lecho, y volver al paso 4 para volver a calcular.

## 9. Altura del dispositivo de salida

Este instrumento debe de estar situado en una posición que facilite el paralelismo entre el lecho y la superficie del agua. Este instrumento debe de tener la función de tener una buena distribución del flujo a la salida, para evitar que se creen zonas muertas, es decir zonas en donde se estanque el agua.

### 3. CASOS EN LOS QUE SE HAN UTILIZADO HUMEDALES ARTIFICIALES EN COLOMBIA.

#### 3.1 CASO 1. IMPLEMENTACIÓN DE UN HUMEDAL PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTE DE LA GRANJA SAN CARLOS

Este proyecto implemento el uso de un tratamiento no convencional como lo son los humedales artificiales para aguas residuales industriales generadas por la granja. Esta está ubicada en Yacuanquer (Nariño). Este estudio fue realizado por Erazo.<sup>45</sup>

El humedal artificial se implementó en esta granja con la función de reducir la carga orgánica y los nutrientes presentes en el agua, para poder ponerle un fin a los problemas que se estaban generando con la población por no tratarlas. Por esto se hizo el plan de construir un humedal artificial empleando carrizo (*Phragmites australis*), para el tratamiento secundario del efluente de los corrales de esta industria porcícola.

Para este proyecto se planteó si la construcción de este humedal artificial si era eficiente, por eso se estudió cual fue la remoción de DBO, nitrógeno, fosforo y solidos suspendidos del agua residual de esta industria.

Los resultados de este proyecto fueron estos: se hizo estudio de la calidad del agua del afluente al humedal, las concentraciones fueron las siguientes “DBO (5994 mg O<sub>2</sub>/l), Nitrógeno (867 mg/l), fósforo (120 mg/l) y solidos suspendidos (1983 mg/l). Con un caudal máximo diario de (0,169 m<sup>3</sup>/día) todo esto para estimar las dimensiones del humedal. En la **Tabla 7** se muestran las dimensiones”<sup>46</sup>.

**Tabla 7.** Dimensiones del humedal artificial proyecto granja San Carlos.

Medida	Valor
Largo	1 m
Ancho	1 m
Área	1 m <sup>2</sup>
Profundidad del humedal	0,9 m
Profundidad del agua	0,6 m
Pendiente	0,5 %
Borde libre agua	0,3 m
Diámetro canto rodado (inferior)	40 mm
Diámetro grava (medio)	20 mm
Diámetro arena (superior)	10 mm
Estrato inferior	0,10 m
Estrato medio	0,20 m
Estrato superior	0,60 m

**Fuente:** ERAZO Tania y REVELO Tatiana. Implementación de un humedal para tratamiento del efluente de la granja San Carlos. [Repositorio Digital]. Universidad Mariana. Pasto, Nariño. Colombia. [Consultado: 7, Enero, 2018]. Disponible en <http://www.umariana.edu.co/>

---

<sup>45</sup> Estudio realizado por: ERAZO Tania y REVELO Tatiana. Implementación de un humedal para tratamiento del efluente de la granja San Carlos. [Repositorio Digital]. Universidad Mariana. Pasto, Nariño. Colombia. [Consultado: 7, Enero, 2018]. Disponible en <http://www.umariana.edu.co/>

La estabilización de la planta se realizó con proporciones como 80:20, 40:60, 20:80 y 100 % litros de agua limpia y agua residual esto con el fin de que la planta se acoplara a las condiciones climáticas. Se escogió el lecho de los diferentes sustratos (canto rodado 10 cm, gravilla 20 cm y granzón 55 cm) y al final se sembró el carrizo.

**Imagen 14.** Humedal Artificial en la granja San Carlos



**Fuente:** ERAZO Tania y REVELO Tatiana. Implementación de un humedal para tratamiento del efluente de la granja San Carlos. [Repositorio Digital]. Universidad Mariana. Pasto, Nariño. Colombia. [Consultado: 7, Enero, 2018]. Disponible en <http://www.umariana.edu.co/>

Y en la siguiente tabla, **Tabla 8** se puede observar los porcentajes de remoción que género este humedal artificial al tratar el agua residual.

**Tabla 8.** Porcentaje de Remoción

Parámetro	Porcentaje de remoción (%)			
	Día 1 (Alta producción )	Día 2 (Media producción )	Día 3 (Baja producción )	Promedio % remoción
DBO <sub>5</sub>	93,7	91,8	89,2	93
Nitrógeno total	65,7	63,8	47,4	59
Fósforo total	71,4	77,5	77,9	76
Sólidos suspendidos	89,1	90,1	89,1	89

**Fuente:** ERAZO Tania y REVELO Tatiana. Implementación de un humedal para tratamiento del efluente de la granja San Carlos. [Repositorio Digital]. Universidad Mariana. Pasto, Nariño. Colombia. [Consultado: 7, Enero, 2018]. Disponible en <http://www.umariana.edu.co/>



Para la DBO teniendo en cuenta la Resolución 0631 de 2015, la cual habla acerca de los parámetros fisicoquímicos para conocer los valores máximos permisibles para los vertimientos de aguas residuales no domésticas a aguas superficiales, dice que el valor permisible de DBO es de 450 mg O<sub>2</sub>/l lo que indica que el biodigestor que tiene la granja no alcanza a remover totalmente la cantidad adecuada de materia orgánica, por eso es que se planteó este proyecto de construir un humedal artificial como tratamiento secundario.

Ahora bien, también se analizó el nitrógeno, nutriente que puede generar efectos negativos, bajos niveles de oxígeno disuelto, la alteración de las plantas y diversos microorganismos. “Los valores que se obtuvieron fueron de 1057 mg/l, 933 mg/l y 610.4 mg/l. El valor promedio de este fue de 866.8 mg/l esto indica que se tiene en exceso este nutriente. Se toma en este caso el Decreto 3930 de 2010, donde se mira el valor límite máximo para los vertimientos en cuerpos de aguas superficiales, el cual es de nitrógeno total 19 mg/l. Como podemos ver está muy por encima del valor establecido.” Este nutriente en exceso puede generar pérdida de oxígeno disuelto, ocasionando “proliferación de los microorganismos, estos ayudan a la biodegradación de los componentes orgánicos presentes en el agua residual.

Los datos de nitrógeno son esenciales para calificar la tratabilidad de las aguas residuales por tratamientos biológicos, un agua residual con contenido bajo de nitrógeno puede necesitar de adición para su adecuada bio-descomposición.

Siguiendo con los datos, los valores que se obtuvo de fósforo fueron de “126 mg/l, 118 mg/l y 117 mg/l los 3 días analizados. Estos también pasan los límites establecidos por la norma. En este caso también se toma el Decreto 3930 de 2010, donde el valor permisible es de 1,0 mg/l y en promedio el valor de fósforo total fue de 120,3 mg/l, como vemos este también sobrepasa el límite. “

Y por último los sólidos suspendidos totales (SST) fueron de 2.350 mg/L, 1.950 mg/L y 1.650 mg/L. Tomando la Resolución 0631 de 2015 como referencia, el valor límite permitido para SST es de 400 mg/L, es decir el biodigestor de la granja no alcanza a remover la cantidad adecuada de sólidos.

La estabilización como se mencionó anteriormente comenzó con la adquisición de carrizo la planta, se tuvo en cuenta que fueran plantas jóvenes y que fueran de la zona para que estuvieran en buenas condiciones, con el propósito de que no se tuviera pérdidas. Se llevó al cabo el riego con agua limpia y residual con el fin de estabilizar la vegetación antes de que fuera implementada en el humedal. Esto se hizo directamente al sustrato. Se usó un balde aforado de 1 L para las proporciones ya mencionadas anteriormente fueran exactas. En la **Tabla 9** podemos observar la proporción usada para cada semana y el volumen de agua usado y su tipo de agua.

**Tabla 9.** Proporción de agua limpia y residual para la estabilización del humedal

Semana	Proporción de agua limpia (%)	Volumen de agua en (ml)	Proporción de agua residual (%)	Volumen de agua en (ml)
1	80	800	20	200
2	40	400	60	600
3	20	200	80	800
4	0	0	100	100

**Fuente:** ERAZO Tania y REVELO Tatiana. Implementación de un humedal para tratamiento del efluente de la granja San Carlos. [Repositorio Digital]. Universidad Mariana. Pasto, Nariño. Colombia. [Consultado: 7, Enero, 2018]. Disponible en <http://www.umariana.edu.co/>

La primera semana al hacer el riego, no hubo cambio alguno de las plantas, pero ya con el tiempo se observó un cambio en las plantas tanto generación de brotes como en la altura del tallo, en las semanas 3 y 4 se evidencio esto, los tallos tenían alturas de 80 cm y pasaron a tener 1,20m, esto nos indica que las plantas se acoplaron al clima para el tratamiento. A continuación, una imagen donde se puede observar los brotes y la medición.

**Imagen 15.** Brotes y Medición de los tallos.



**Fuente:** ERAZO Tania y REVELO Tatiana. Implementación de un humedal para tratamiento del efluente de la granja San Carlos. [Repositorio Digital]. Universidad Mariana. Pasto, Nariño. Colombia. [Consultado: 7, Enero, 2018]. Disponible en <http://www.umariana.edu.co/>

Finalmente, para evaluar la eficiencia de remoción del humedal artificial, se empleó como parámetros de caracterización del agua, el contenido en carga orgánica (DBO), nutrientes (N y P) y sólidos suspendidos (SST). A continuación, podemos ver en la **Tabla 10** después de poner el humedal artificial los resultados de la concentración del afluente del humedal.

**Tabla 10.** Concentración afluente Humedal

Parámetro	Concentraciones salida (mg/L)		
	Día 1 (Alta producción )	Día 2 (Media producción )	Día 3 (Baja producción )
DBO <sub>5</sub>	527,33	516,33	356
Nitrógeno total	361,76	337,12	320,88
Fósforo total	36	26,5	25,8
Sólidos suspendidos	256,67	193,33	180

**Fuente:** ERAZO Tania y REVELO Tatiana. Implementación de un humedal para tratamiento del efluente de la granja San Carlos. [Repositorio Digital]. Universidad Mariana. Pasto, Nariño. Colombia. [Consultado: 7, Enero, 2018]. Disponible en <http://www.umariana.edu.co/>

Ahora con respecto a los resultados se tiene una concentración promedio de 466.55 O<sub>2</sub>/L de DBO según la **Tabla 10**. Como podemos observar tenemos un cambio notable, del afluente y efluente, lo que nos dice que el sistema si alcanza a remover cantidades notorias, contando con más tiempo se puede llegar a lo establecido por la norma o variando los lechos utilizados para mirar mejores eficiencias; sin embargo, el no haber llegado al límite para el vertimiento, no quiere decir que los resultados no sean buenos, los resultados mostraron una disminución en grandes proporciones con referencia al afluente. Cabe resaltar que la evaluación se realizó en una etapa muy temprana, se necesita que se establezca mejor el humedal para poder llegar a los requerimientos de la norma.

Seguimos con otro parámetro con el nitrógeno total, en los cuales los valores fueron 361.76 mg/L, 337.12 mg/L, 320.88 mg/L respectivamente, y de fosforo total fueron 36 mg/L, 26.5 mg/L y 25.8 mg/L. Para estos nutrientes también como para el DBO podemos ver que disminuyen notoriamente, la remoción de estos nutrientes depende de la edad de la vegetación. Si se compara con lo establecido por la norma que en el caso para nitrógeno es 10 mg/L y fosforo es de 1mg/L, los valores no están en el rango; pero si vemos la diferencia entre el afluente y el efluente es bastante.

Y finalmente los SST, los datos fueron 256.67 mg/L, 193.33 mg/L y por último 180 mg/L. Mirando la normal el límite permitido para el vertimiento es de 400 mg/L, esto nos muestra que, si cumple con lo establecido por la norma, se pudo cumplir esto porque se implementó en la granja una trampa de grasas y además de esto el humedal artificial, lo que ayuda a una mejor retención de los sólidos

Se vuelve a aclarar que estos resultados se tomaron en una etapa muy temprana del humedal artificial, como lo dicho anteriormente falta que se establezca mejor el sistema natural, y después de un cierto periodo de tiempo retomar los datos, en este caso puede que tenga una mejor eficiencia el humedal. Como sugerencia también mirar que planta se adecua mejor al entorno y estudiar diferentes plantas de la zona para ver si están tienen una mejor eficiencia a las ya utilizadas para un mejor tratamiento del agua residual.

### **3.2 CASO 2: DISEÑO DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DE UN CAMPO DE PETRÓLEO COLOMBIANO.**

En este caso se plantea un humedal artificial como alternativa para poder tratar las aguas de producción, debido a problemas que se presentan en las diferentes actividades petroleras con el manejo y disposición final del agua. También se plantea como una alternativa ya que las empresas petroleras gastan grandes cantidades de dinero para el tratamiento, manejo y disposición de esta agua de producción. Estudio realizado por Díaz.<sup>47</sup>

Para la construcción del humedal se tuvieron en cuenta las características fisicoquímicas del agua afluyente del campo petrolero colombiano, en este caso se tuvieron en cuenta (DBO) concentración de materia orgánica, y sólidos suspendidos (SST), obviamente tomando en cuenta los criterios para la construcción de un humedal, el tipo de humedal y concentración de los contaminantes presentes en el agua, caudal de entrada y área total requerida.

El humedal construido fue un humedal de Flujo Sub-Superficial Horizontal (HCFSSH) de 120.000 m<sup>2</sup> de superficie y una profundidad de 2 ft para tratar un caudal de 678.697 Bbl/d. El Humedal Artificial consistió en 60 celdas de 109,35 ft por 196,85 ft, en las cuales se plantaron macrófitas acuáticas nativas para los procesos de depuración.

La selección del campo de petróleo se hizo con el objetivo primario de atender la problemática mundial en materia de producción de agua. Este campo es operado por ECOPETROL S.A y está ubicado en los Llanos Orientales de Colombia.

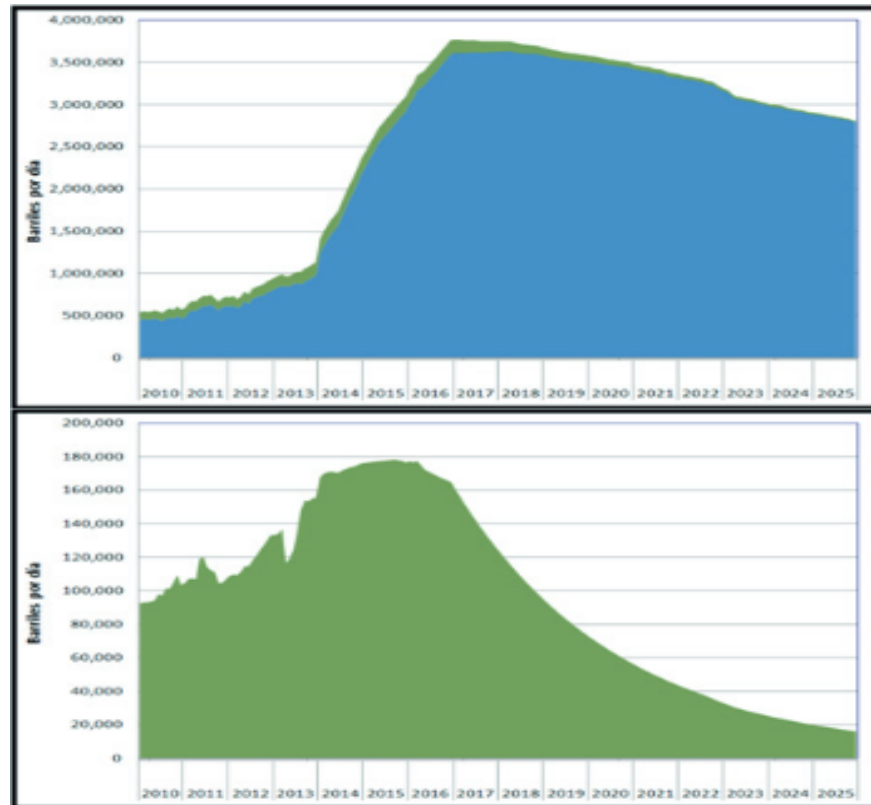
En este campo la producción diaria de agua es de 678.607 bbl/día, y tiene un pico de producción de petrolero de cerca de unos 180.000 bbl/día, teniendo una relación de agua-petróleo de 8:1, con pronósticos de 35:1 para el 2018. En la **Grafica 1** se

---

<sup>47</sup> Estudio realizado por: EDUARDO DÍAZ, Sergio; ZAMORA, Edwin; OSORIO, Aracelly; y LEÓN, John. Diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un campo de petróleo Colombiano. [Repositorio Digital]. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol.11Nº2 de 2013. p 55-63 [Consultado: 15, Enero, 2018]. Disponible [<http://revistas.uis.edu.co/>].

muestra el comportamiento de la producción de petróleo y de agua hasta 2025 en ambos casos.

**Grafica 1.** Comportamiento de la producción de petróleo y agua hasta el año 2025



**Fuente:** EDUARDO DÍAZ, Sergio; ZAMORA, Edwin; OSORIO, Aracelly; y LEÓN, John. Diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un capo de petróleo Colombiano. [Repositorio Digital]. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol.11Nº2 de 2013. p 55-63 [Consultado: 15, Enero, 2018]. Disponible [<http://revistas.uis.edu.co/>].

En este proyecto las concentraciones de DBO y SST del agua afluente y efluente del tratamiento del agua de producción fueron tenidas en cuenta para la construcción del humedal y las podemos observar en la **Tabla 11**.

**Tabla 11.** Concentraciones de DBO y SST.

Contaminante	concentración a la entrada	concentración a la salida
DBO <sub>5</sub>	31 ppm	2,42 ppm
SST	44 ppm	<5 ppm

**Fuente:** EDUARDO DÍAZ, Sergio; ZAMORA, Edwin; OSORIO, Aracelly; y LEÓN, John. Diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un capo de petróleo Colombiano. [Repositorio Digital]. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol.11Nº2 de 2013. p 55-63 [Consultado: 15, Enero, 2018]. Disponible [<http://revistas.uis.edu.co/>].

El campo cuenta con un sistema de tratamiento primario, secundario y terciario, y también tiene las facilidades necesarias para el envío del agua a su destino final, un cuerpo de agua receptor.

Los costos totales del campo para los diferentes tratamientos de aguas de producción en el campo se pueden observar en la **Tabla 12**.

**Tabla 12.** Costos del mantenimiento y operación del tren de tratamiento del campo.

ACTIVIDAD	CAPEX (USDS)	OPEX (USDS)	TOTAL (USDS)
Tratamiento primario	108.268.719	22.006.528	130.275.247
Tratamiento secundario	11.779.780	7.342.614	19.122.394
Tratamiento terciario	7.965.331	2.965.292	10.930.623
Disposición	25.002.427	11.488.947	36.491374
<b>COSTO TOTAL STAP</b>			<b>196.819.638</b>

**Fuente:** EDUARDO DÍAZ, Sergio; ZAMORA, Edwin; OSORIO, Aracelly; y LEÓN, John. Diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un capo de petróleo Colombiano. [Repositorio Digital]. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol.11Nº2 de 2013. p 55-63 [Consultado: 15, Enero, 2018]. Disponible [<http://revistas.uis.edu.co/>].

Y en la **Imagen 16** se muestra las macrófitas acuáticas nativas utilizadas y encontradas, con muy buenas referencias de depuración de contaminantes en plantas piloto de Hidrocarburos que fueron estudios hechos en la región Caribe Colombiana.

**Imagen 16.** Plantas utilizadas de la región. Izquierda (*Erochloa aristata*) derecha (*Eleocharis mutata*)

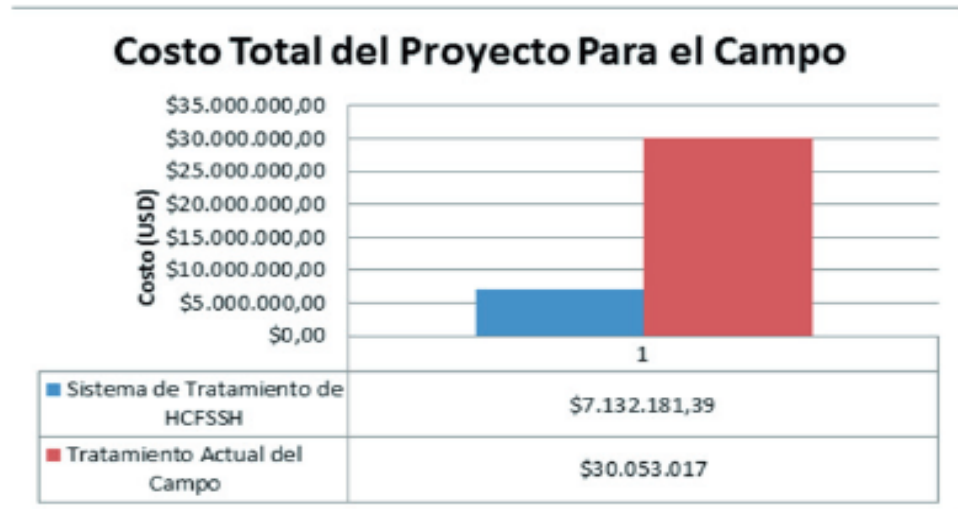


**Fuente:** EDUARDO DÍAZ, Sergio; ZAMORA, Edwin; OSORIO, Aracelly; y LEÓN, John. Diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un capo de petróleo Colombiano. [Repositorio Digital]. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol.11Nº2 de 2013. p 55-63 [Consultado: 15, Enero, 2018]. Disponible [<http://revistas.uis.edu.co/>].

Ahora bien, viendo costos, como podemos observar en la **Grafica 2** los anteriores costos de operación e implementación que tenía el campo anteriormente son mayores; superando los valores obtenidos de la construcción del Humedal Artificial de Flujo Sub-Superficial Horizontal. Los costos fueron sacados de actividades de excavación, de la instalación de la vegetación, y el personal que tiene experiencia en el tema. Costos de operación también, la energía requerida de las bombas, del mantenimiento como tal del humedal.



**Grafica 2.** Comparación de los costos totales del sistema de tratamiento del humedal con los que tenía el campo.



**Fuente:** EDUARDO DÍAZ, Sergio; ZAMORA, Edwin; OSORIO, Aracelly; y LEÓN, John. Diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un capo de petróleo Colombiano. [Repositorio Digital]. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol.11Nº2 de 2013. p 55-63 [Consultado: 15, Enero, 2018]. Disponible [<http://revistas.uis.edu.co/>].

Y por último los costos totales de tratamiento secundario y terciario, los costos de operación del humedal, y el gasto para el desarrollo del humedal artificial se muestran en la **Tabla 13**.

**Tabla 13.** Costos totales del humedal

	CAPEX (USD)	*OPEX (USD)
<b>Costos efectivos</b>	<b>\$ 6.895.363,6</b>	<b>\$ 236.817,79</b>
<b>TOTAL (USD)</b>	<b>\$7.132.181,39</b>	

**Fuente:** EDUARDO DÍAZ, Sergio; ZAMORA, Edwin; OSORIO, Aracelly; y LEÓN, John. Diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un capo de petróleo Colombiano. [Repositorio Digital]. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol.11Nº2 de 2013. p 55-63 [Consultado: 15, Enero, 2018]. Disponible [<http://revistas.uis.edu.co/>].



Como se puede observar de los datos de costos, un humedal artificial es una alternativa muy económica para tratar el agua de producción de un campo de petróleo, como se muestra en este caso los costos totales de tratamiento que tenía anteriormente el campo para tratar el agua son muy superiores, a los costos de tratamiento realizados por un humedal artificial, y esto se debe a los bajos costos de operación y mantenimiento que requiere un humedal artificial.

Viendo la tabla los costos de inversión, operación y mantenimiento de los equipos de tratamiento que tenían el campo, tratamiento secundario y terciario alcanzaban los precios de US\$30.000.000, mientras que los del humedal artificial fueron de US\$7.000.000, lo cual quiere decir que utilizando esta tecnología alternativa se ahorraría mucho en costos teniendo los mismos resultados.

Por otra parte, el estudio demostró que el sistema de humedales artificiales requiere de un área superficial superior a 10 hectáreas, mientras que el sistema convencional que tenía el campo necesita de 0,2 hectáreas de área total. Lo que nos indica que el tratamiento de humedales artificiales ocupa unas 60 veces más lo que ocuparía el tratamiento convencional, esta es una desventaja que tiene esta tecnología como lo podemos evidenciar, el tener el espacio requerido para poder construir el humedal.

Finalmente, en este proyecto hecho para un campo de los Llanos Orientales, se calcularon los costos por barril de agua, comparando los tratamientos que se utilizaban actualmente en ese campo, con los del tratamiento hecho con un humedal artificial. En este estudio se encontró una diferencia de 1,3 centavos de dólar, que mirando la cantidad de volumen diario que se produce de agua, es un ahorro significativo de dinero. A continuación, podemos observar en la **Grafica 3** el costo total de tratamiento por barril de agua producida.

**Grafica 3.** Costo de tratamiento por barril de agua producida



**Fuente:** EDUARDO DÍAZ, Sergio; ZAMORA, Edwin; OSORIO, Aracelly; y LEÓN, John. Diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un campo de petróleo Colombiano. [Repositorio Digital]. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol.11Nº2 de 2013. p 55-63 [Consultado: 15, Enero, 2018]. Disponible [<http://revistas.uis.edu.co/>].

**Tabla 14.** Ventajas y Desventajas de los tratamientos del estudio.

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Humedales Artificiales	No requieren de grandes costos para su operación y mantenimiento.	Requiere de largas extensiones de tierra, necesita por lo menos unas 60 veces más de extensión que el tratamiento convencional. Necesita de 10 hectáreas para poderlo construir.
	Alcanza las eficiencias de depuración, de acuerdo a los límites de vertimiento en cuerpos de agua. Cumple los estándares ambientales y legales.	Los mosquitos y otros insectos pueden ser un problema, por cuestiones de salud
	Proporciona un espacio verde, incorpora un hábitat de vida silvestre.	
	Se requiere de \$0.099 para tratar un barril de agua producida	
Tratamiento convencional del campo	No requiere de grandes extensiones de tierra, en este caso solo necesita 0,2 hectáreas, mientras que el del humedal requiere de 10 hectáreas	Los costos de este tratamiento son superiores que los de un sistema de tratamiento con Humedales Artificiales. En este caso el de los Humedales Artificiales se necesitaron unos \$7.150.000 y para el tratamiento convencional se alcanzaron los \$30.000.000
	Cumple con los estándares ambientales y legales.	Requiere altos costos para mantenimiento y operación.
		Se requieren \$0.112 para tratar un barril de agua producida, una diferencia de \$ 1,3 centavos, de lo que le cuesta tratarlo con un humedal artificial.

**Fuente:** Elaboración propia basado en : DUARDO DÍAZ, Sergio; ZAMORA, Edwin; OSORIO, Aracelly; y LEÓN, John. diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un capo de petróleo colombiano. [repositorio digital]. revista fuentes: el reventón energético. vol.11nº2 de 2013. p 55-63 [consultado: 15, enero, 2018]. Disponible [<http://revistas.uis.edu.co/>].

En la tabla anterior podemos evidenciar las ventajas y desventajas como tal del estudio realizado, entre el humedal artificial construido y puesto a estudio, y el tratamiento convencional con el que ya contaba el campo.

Por último, se llegó a la conclusión de que para el campo colombiano de acuerdo con Díaz<sup>48</sup>, se debe utilizar un humedal de flujo sub-superficial horizontal, por lo que este trata la materia orgánica y sólido suspendida con una alta eficiencia. Y por también tener un grado de exposición bajo hacia el personal, porque el agua es subterránea. No se implementó un humedal artificial de flujo vertical ya que estos requieren de periodos de llenado y vaciado para su implementación.

---

<sup>48</sup> *Ibíd.*, p 5-7

## 4. MANTENIMIENTO Y CONTROL DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL

A la hora de realizar la construcción de un humedal artificial, es sumamente importante la operación y el mantenimiento del humedal, para esto se debe considerar un plan de gestión. Tanto la operación como el mantenimiento deben tener unos objetivos importantes para la eficiencia del tratamiento.

Los objetivos son los siguientes de acuerdo con Lara.<sup>49</sup>

- El agua debe tener contacto total con las plantas, y con el lecho para una mejor eficiencia.
- Proporcionarle un ambiente saludable al humedal.
- Llevar un monitoreo constante del crecimiento de la vegetación
- Monitorear que el caudal de agua alcance a todas las partes del humedal.

### 4.1 HIDROLOGÍA

Como lo dicho anteriormente se debe tener un monitoreo permanente de que el agua se esté moviendo a través de todo el humedal, que los residuos generados no bloqueen el flujo de agua a través de este, y no se esté estancando el agua, ya que esto trae consigo algunos problemas como los mosquitos. Siempre monitorear los flujos y niveles del agua, el caudal del agua.

Otro papel importante para el mantenimiento y control es la profundidad del agua, puesto que esta puede necesitar de ajustes dependiendo del clima, o ya sea por obstrucciones generados por los residuos, como lo plantea Otálora<sup>50</sup> la clave es tener un control sobre el agua por lo que el agua es el éxito para las plantas sobrevivan y algunas veces las plantas pueden acoplarse a la profundidad, pero algunas veces no se pueden sobrepasar los límites que pueden tolerar las plantas.

### 4.2 VEGETACIÓN

Como se venía comentando el nivel del agua tiene un papel clave para la conservación de la vegetación del humedal, para esto la vegetación debe ser monitoreada regularmente, se debe de eliminar posibles especies que puedan afectar la vegetación y residuos que puedan obstruir el espacio entre plantas o el

---

<sup>49</sup> LARA, BORRERO. Op. cit.

<sup>50</sup> OTÁLORA RODRÍGUEZ. Alejandra Patricia. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl. [Repositorio Digital]. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería química. Bogotá. 2011. p [Consultado: 10, Febrero, 2018]. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/>

agua de acuerdo con Lara.<sup>51</sup> A veces es necesario la recolección de estas plantas, la poda o incluso la replantación para la eficiencia del tratamiento o a veces en algunas ocasiones es mejor que la densidad de la vegetación sea mayor y que tenga más residuos vegetales ya que puede realizar un mejor proceso para tratar el agua, mejorando la eficiencia del tratamiento; esto también ayuda a que a veces se tiene clima frío y ayuda al aislamiento térmico, para prevenir temperaturas muy bajas en el humedal.

Casos en los cuales los humedales no reciban altas cargas contaminantes, el monitoreo de la vegetación no debe ser necesariamente cuantitativa, se podrán hacer monitoreos cualitativos. Como lo afirma Estrada<sup>52</sup> cuando el humedal artificial presente alta carga contaminante la supervisión si debe ser más periódica, se sugiere que sea durante los primeros 5 años después de a ver construido el humedal.

La vegetación presente del humedal puede tener cambios a través de los años, tal cual los humedales naturales. Puede que algunas especies mueran, siendo reemplazados por otras. Por eso se debe de tener monitoreo constante para ver que va pasando mientras pasa el tiempo.

### **4.3 ESTRUCTURAS**

Al presentarse un cambio en el caudal o en los niveles del agua, se debe realizar un control estricto de las estructuras del humedal, por lo que puede afectar el lecho o la vegetación. En este caso según Estrada<sup>53</sup> los daños realizados a las estructuras ya sea por corrosión, u obstrucción se deben de corregir rápidamente, para evitar fallos y reparaciones que puedan ser costosas a largo plazo.

### **4.4 CONTROL DE FAUNA**

El control de la fauna es vital para el proceso de tratamiento del humedal de acuerdo al estudio hecho por Estrada<sup>54</sup>, el control de la vida silvestre debe ser muy riguroso, existen especies como los castores, nutrias y la rata almizclera, los cuales pueden atravesar los lechos, y consumen la vegetación del humedal artificial; los mosquitos los cuales causan problemas de salud y molestias y ciertos peces, un ejemplo de estos la carpa, la cual se alimenta en el fondo y remueve las raíces de los vegetales,

---

<sup>51</sup> LARA, BORRERO. Op. cit. p65

<sup>52</sup> ESTRADA, GALLEGO. Op. cit 76

<sup>53</sup> Ibíd. p 96

<sup>54</sup> ESTRADA. Op. Cit p 104

ayudando a que los sólidos suspendidos totales de los efluentes se incrementen. Las aves acuáticas también pueden causar daños parecidos.

Los mosquitos son uno de los problemas más comunes, la mejor estrategia para evitar este inconveniente es crear condiciones en el humedal que no favorezcan a los mosquitos, o al desarrollo de larvas. Al momento de estancamientos de agua, por residuos que obstruyan el paso del agua, esto genera una excelente condición para el hábitat de mosquitos, por eso se debe de hacer el monitoreo del nivel de agua junto con la de la vegetación. En este caso como lo dijo Borrero<sup>55</sup> el uso de insecticidas o aceites no es de gran ayuda, ya que el uso de estas en humedales artificiales con alta carga de materia orgánica, es ineficiente su uso por que el humedal absorbe y se diluye rápidamente en el agua. Se debe tener un cuidado enorme con esto por posible contaminación al humedal.

Un método efectivo que se ha realizado para los humedales artificiales para tener un control de los mosquitos es el pez mosquito, el cual ha sido efectivo para eliminar las poblaciones de mosquitos cuando se dan todas las condiciones para el hábitat de estos.

#### **4.5 CONTROL DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA**

Lo que hace el constante control del humedal, es mirar si se están logrando los objetivos y para mirar la eficiencia del proceso. Además de esto logra detectar problemas de manera más rápida, para tener así una respuesta al problema con igual rapidez. Las fotografías pueden ser de gran ayuda, todo esto dependerá de que tan grande sea el proyecto. También la toma de muestras en el afluente y en el efluente para mirar en qué condiciones se encuentran y si se cumple con los permisos y los de la norma.

Todo esto con el propósito de mirar la efectividad de remoción de los contaminantes presentes en el agua. Los parámetros de interés como:

- DBO
- DQO
- Nitrógeno
- Sólidos Suspendidos Totales
- Otros

En caso tal de que el agua tenga contaminantes tóxicos, se debe analizar los sedimentos presentes en el humedal una o dos veces al año para mirar si se tienen un aumento de estos contaminantes.

---

<sup>55</sup> BORRERO. Op. Cit pag 97

Finalmente, la disposición final de un humedal artificial, se la da el mantenimiento, control de la operación y el proceso del humedal, se tienen estudios de que con su respectivo cuidado los humedales artificiales pueden tratar el agua durante largos años. Si se tiene un cuidado a esta alternativa para tratar el agua, no solo trae ventajas económicas sino ventajas ambientales, por eso es que esta tecnología se considera como un método innovador para el tratamiento de aguas tanto residuales como aguas de producción.

## 5. CONCLUSIONES

- Para la construcción de los humedales artificiales los parámetros de diseño más importantes son, la selección de las plantas a utilizar, que estas sean de la zona para que se acoplen más fácil al clima, y el mantenimiento del lecho, esto es lo que le da la vida útil a este sistema y permite que sea eficiente la depuración del agua.
- Los humedales artificiales son una tecnología alternativa factible, tanto para el tratamiento de aguas residuales como para el tratamiento de aguas de producción
- La implementación de un humedal artificial, para tratar el agua, se considera viable siempre y cuando se tengan los terrenos disponibles para su operación.
- Viendo el caso de tratamiento de aguas de producción se puede observar que utilizando un humedal artificial para el tratamiento de esta agua puede llegar a reducir 1,3 centavos por barril de agua tratada, en comparación con el método convencional con el que ya contaba el campo; además de esto podemos observar que los costos de operación y de mantenimiento de un humedal artificial para el proyecto fueron de \$7.132.181,39 dólares, mientras que con el tratamiento utilizado los costos eran 30,053,017 dólares, comparándolos es una reducción de costos bastante grande.
- Viendo el caso de la Granja San Carlos, algunos de los datos del efluente no llegaban a los límites permitidos por la norma para vertimientos, pero esto fue porque se tomaron los parámetros de caracterización del agua muy rápido, se tenía que dar un poco más de tiempo para que el sistema hiciera su proceso debidamente y esperar los resultados.
- Los humedales artificiales son una tecnología económicamente viable para el tratamiento de aguas de producción, por ser menos costosos que otros tratamientos.
- En Colombia se han utilizado humedales artificiales, pero solo para tratar aguas residuales, no se ha tomado como una alternativa para tratar aguas de producción.
- La vida útil de un humedal artificial, se la da el mantenimiento y control de un humedal, dependiendo de esto, el humedal puede trabajar durante años.



## 6. RECOMENDACIONES

- Se debe valorar la idea de usar humedales artificiales como tratamiento secundario y terciario para aguas de producción en Colombia, ya que esta puede reducir en gran cantidad los costos de operación.
- Realizar pruebas, para observar el comportamiento de un sistema de humedales artificiales a mayor escala, para obtener información precisa, y demostrar a las industrias petroleras que este es una verdadera alternativa, para reducir costos de operación y mantenimiento; y para ayudar al medio ambiente.
- Evaluar qué tipo de humedal artificial, es mejor para el tratamiento de aguas de producción en las industrias petroleras. Investigando experiencias exitosas a nivel internacional.
- Investigar el tiempo que toma un humedal artificial para poder tratar el agua contaminada, con relación al área utilizada.
- Recomendable mirar los tipos de plantas que se pueden utilizar en Colombia, para mirar las eficiencias de remoción de estas.

## BIBLIOGRAFÍA

ABC Rural. Especie vegetal de valor ecológico, productivo y estratégico. El carrizo. ABC color. Mayo 10. 2012.

A. Macías, D. Marín, A. Oliveros-Bastidas, R.M. Varela, A.M. Simonet, C. Carrera & J.M.G. Molinillo. 2003. Allelopathy as a new strategy for sustainable ecosystems development. *Biological Sciences in Space* 17 (1).

ACOSTA. Adriel. Comunicación entre plantas: Relaciones Alelopáticas. *All You Need Is Biology*. Mayo 05. 2015.

AGUILAR ROMERO, Mariana. CRUZ COLÍN, Arturo. SALINAS SÁNCHEZ, Enrique. HERNÁNDEZ ORTIZ, Laura. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Ambient* vol.25 no 3. México. Agosto 2009

Alianza por el Agua. Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento. 2006

Al-Rawahi, M., Prigent, S., Headley, T., Breuer, R., & Paetzelt, R. (2014, November 10). Constructing Wetlands in the Desert: An Example of Sustainable Produced Water Management in Oman. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/172158-MS

Anne L. Simi, Cynthia A. Mitchell Design and Hydraulic Performance of a Constructed Wetland Treating Oil Refinery Wastewater, *Water Science and Technology* Aug 1999, 40 (3) 301-307;

AVELLANEDA. Alfonso. Petróleo e Impacto Ambiental en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. *Revistas UNAL*. p 21-28

Bensenane, F. K., Dhina, O., & Abdallahelhadj, M. A. (2012, January 1). Aquifers Vulnerability: A New Mapping Method Based on Hydrogeological and SeismicData-Case Study: Mio-Pliocene Aquifer in Hassi Messaoud-Algeria. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/153190-MS

Brix H. How 'green' are constructed wetland treatment systems? In: *TaukTornisielo M, editor. Proceedings of Sixth International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. Brazil: Brazil Ecological Society, 1998.

Cárdenas Sánchez, Ana Carolina. Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviado de rellenos sanitarios. Universidad de Sevilla 2012. Cap 4

CICEANA. Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, A.C. Historial de artículos ambientales. Funciones y Valores de los Humedales. México, D.F.

CIDTA. Aula Virtual del Agua. Universidad de Salamanca. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua.

Cristian FRERS Técnico Superior en Gestión Ambiental. Consultor Ambiental. El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales, 2008

Crites, R. y Tchobanoglous, G. (1998). Small and Decentralized Wastewater Management Systems. WCB and McGraw-Hill, Nueva York, EE.UU pp. 582/599. (Capítulo de resumen detallado incluyendo problemas resueltos.)

Crites, R.W. and G. Tchobanoglous, 1998, Small and Decentralized Wastewater Management Systems, McGraw Hill Co., New York, NY.

DELGADILLO, Oscar. CAMACHO, Alan. PÉREZ, Luis F. ANDRADE, Mauricio. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Serie técnica. Proyecto GOV-AGUA. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba. Bolivia. 2010.

DÍAZ, ACERO. Carlos Ariel. Magíster en Ingeniería Civil. Tratamiento de agua residual a través de humedales. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja. Julio 4 de 2014. p 8.

DÍAZ C. Sergio Eduardo. ZAMORA C. Edwin Ricardo. OSORIO. Aracelly Caselles. LEÓN. John Alexander. Diseño de un humedal construido para el tratamiento de agua de producción de un campo de petróleo Colombiano. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Colombia. Diciembre 19 de 2013.

Ecologistas en acción. Publicaciones. Revistas. N°49 al 58. Fitorremediación."<[url:https://www.ecologistasenaccion.org/article17857.html](https://www.ecologistasenaccion.org/article17857.html)>."

EPA. United States Environmental Protection Agency. Economic Benefits of Wetlands. Office of Water. p 1-4. May 2006.

EPA. United States Environmental Protection Agency. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial. Office of Water Washington, D.C. Septiembre de 2000. Pg 10.

EPA. United States Environmental Protection Agency. Guía para el Diseño y Construcción de un Humedal Construido con Flujos Subsuperficiales. U.S. EPA – REGION 6. División de manejo de Aguas. Rama de Instalaciones Municipales. Sección Técnica. 1993

ERAZO GESAMA. Tania Elizabeth. REVELO CALVACHE. Lady Tatiana. Implementación de un humedal para tratamiento del efluente de la granja San Carlos. p 1-18. Editorial UNIMAR

ESPINOSA ORTIZ, Camilo Eduardo. Factibilidad del Diseño de un humedal de flujo Subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes. Escuela Colombiana de Ingeniería – Julio Garavito. Maestría en Ingeniería Civil. Énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente. p 1- 81. Bogotá D.C. 2014.

ESTRADA GALLEGU. Islena Yineth. Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Escuela de Química. p 1-178. Pereira. 2010

Fleckenstein, W. W., Eustes, A. W., Stone, C. H., & Howell, P. K. (2015, October 11). An Assessment of Risk of Migration of Hydrocarbons or Fracturing Fluids to Fresh Water Aquifers: Wattenberg Field, CO. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/175401-MS

Generalitat Valenciana. Criterios de diseño y construcción de humedales artificiales aplicados en la EPSAR. I Jornadas de Diseño, Construcción y Explotación de Humedales Artificiales en Pequeños Municipios. Benicàssim. Junio 13. 2017.

GARCIA LLUQUE, Kevin. DELGADO SAAVEDRA, Rubén. VIDAL SEMINARIO, King. JIMENEZ VERA, William. Operaciones unitarias de transferencia de materia; Absorción y Adsorción. p 1-20. Sullana. Julio 9. 2017

Haberl, R., Grego, S., Langergraber, G. et al. J Soils & Sediments (2003) 3: 109. doi:10.1007/BF02991077

HAMMER. Donald A. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Municipal, Industrial, and Agricultural. Lewis Publishers. CRC Press Company. 1989

Hussain, A., Minier-Matar, J., Gharfeh, S., Janson, A., & Adham, S. (2014, March 25). Advanced Technologies for Produced Water Treatment. Offshore Technology Conference. doi:10.4043/24749-MS

Instituto Argentino del Petróleo. Guía de recomendaciones para proteger el medio ambiente durante el desarrollo de la exploración y explotación de hidrocarburos. Buenos Aires.1991.

IZAGUIRRE. Martín. Contaminación del Agua. ¿Qué es? Conoce causas y efectos en la salud. La contaminación del agua.

Kabadeh, A. (2014, November 10) Wetland Engineering to Treat Process Waterer. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/171853-MS

Korsah, P. E., Ambrose, I. S., & Korsah, W. (2014, June 10). The Use of Constructed Wetlands in Produce Water Treatment; An Option for the Oil and Gas Industry? Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/169998-MS 2014. Alberta, Canada. June 10-12.

LAMENCA. Mario Blasco. Microbiología de Suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Centro de Enseñanza e Investigación. Turrialba. Costa Rica. 1970.

LARA, BORRERO. Jaime Andrés. Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental. p 1 – 122. Barcelona. Mayo 1999.

LEVY, SHARON. The Ecology of Artificial Wetlands. En: BIOSCIENCE. 04.vol. 65, no. 4, p. 346-352 April 2015.

Mara, DD. (2003). Domestic wastewater treatment in developing countries. Earthscan, Londres, Reino Unido. pp. 85-187

MARÍN MONTOYA, Jhoan Pablo. CORREA RAMÍREZ, Juan Carlos. Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la Guadua angustifolia Kunth. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Escuela de Tecnología Química. p 1-100. Pereira. 2010.

MOSHIRI. Gerald A. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Lewis Publishers. CRC Press, INC. 1993

OTÁLORA RODRIGUEZ, Alejandra Patricia. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandul. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. p 1-163. Bogotá. 2011

Performance of a constructed wetland in treating brackish wastewater from commercial recirculating and super-intensive shrimp growout Systems. Yonghai Shi, Genyu Zhang, Jianzhong Liu, Yazhu Zhu, Jiabo Xu

PULIDO, Antonio. Nociones De Hidrogeología Para Ambientólogos. Almería, ES: Editorial Universidad de Almería, 2014.

R.B.E. Shutes. Artificial wetlands and wáter quality improvement. Urban Pollution Research Centre. Middlesex University. Bounds Green Road. London N11 2NQ. UK. 2001'

REBOLLO, Luis F. Movimiento del agua en el Subsuelo. Hidrogeología. Universidad de Alcala. Departamento de Geología

Remtavares. Humedales Artificiales como sistemas naturales de depuración de aguas residuales. Conceptos e historia. Mayo 16. 2013.

RODRÍGUEZ CHAPARRO, T. y OSPINA, Ivonne Maritza. Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del río Bogotá. 20090101.

SALMON, C., et al. Artificial wetland performances in the purification efficiency of hydrocarbon wastewater. En: WATER, AIR, AND SOIL POLLUTION. vol. 104, no. 3-4, p. 313-329

Shutes RBE, Ellis JB, Revitt DM, Shang T. The use of *Typha latifolia* for heavy metal pollution control in urban wetlands. In: Moshiri GA, editor. Constructed wetlands for water quality management. USA: Lewis, 1993. pp. 407.

SILVA R, Ángela Sofía. ZAMORA Z, Hernán Darío. Humedales Artificiales. Trabajo de Grado: Monografía. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Química. 2005 p 1-100.

Stone, C. H., Fleckenstein, W. W., & Eustes, A. W. (2016, September 26). An Assessment of the Probability of Subsurface Contamination of Aquifers from Oil and Gas Wells in the Wattenberg Field, Modified for Water Well Location. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/181696-MS

SUAREZ, A., et al. Evaluation of the Treatment for Petroleum Production Wastewater Industry using Artificial Wetland Planted with *Eichhomia Crassipes*. 2013.

Título: Contaminación. Sitio: Definición ABC. Fecha: 27/11/2008. Autor: Florencia Ucha. URL: <https://www.definicionabc.com/medio-ambiente/contaminacion.php>

Título: Humedal. Sitio: Definición ABC. Fecha: 31/08/2010. Autor: Cecilia Bembibre. URL: <https://www.definicionabc.com/geografia/humedal.php>

TORRES, Ernesto. SANABRIA, Alexander Marín. Optimización del humedal artificial subsuperficial para tratamiento de aguas residuales. Universidad Libre. Septiembre 9. 2012.

VYMAZAL, Jan. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Department of Landscape Ecology, Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences, Prague. August 27. 2010.

VYMAZAL. Jan. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. Ecological Engineering. Duke University Wetland Center. Nicholas School of the Environment and Earth Science. Durham NC27708. USA. July 11. 2005.

Water, Air, and Soil Pollution, 1998, Volume 104, Number 3-4, Page 313  
C. Salmon, J. L. Crabos, J. P. Sambuco