

CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, Octubre 13 de 2018

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

OSCAR FABIAN ARTUNDUAGA CUELLAR, con C.C. No. 1.061.717.435, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado: "EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL MODIFICADO A ESCALA LABORATORIO EN LA REMOCIÓN DE CROMO HEXVALENTE UTILIZANDO COMO MATERIAL VEGETAL *CALATHEA LUTEA*", presentado y aprobado en el año 2018 como requisito para optar al título de MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

OSCAR FABIAN ARTUNDUAGA CUELLAR /ESTUDIANTE:

Firma:

Vigilada Mineducación



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: "EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL MODIFICADO A ESCALA LABORATORIO EN LA REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE UTILIZANDO COMO MATERIAL VEGETAL CALATHEA LUTEA"

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
ARTUNDUAGA CUELLAR	OSCAR FABIÁN

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
VALENCIA GRANADA	EDUARDO

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

FACULTAD: DE INGENIERÍAS

PROGRAMA O POSGRADO: MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

CIUDAD: AÑO DE PRESENTACIÓN: NÚMERO DE PÁGINAS:

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas  Fotografías  Grabaciones en discos  Ilustraciones en general  Grabados   
Láminas  Litografías  Mapas  Música impresa  Planos  Retratos  Sin ilustraciones   
Tablas o Cuadros

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: NINGUNO



MATERIAL ANEXO: NINGUNO

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Humedales Artificiales	Artificial wetlands
2. Fitorremediación	Phytoremediation
3. <i>Calathea lutea</i> ,	<i>Calathea lutea</i> ,
4. Cromo Hexavalente	Hexavalent Chromium

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Se evaluó la eficiencia en la remoción de Cromo Hexavalente y otros parámetros fisicoquímicos (DQO, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>); de un humedal artificial modificado (sistema acondicionado con trampas de contacto ubicadas en sentido longitudinal al flujo (T3)) y se comparó con dos unidades de tratamiento convencionales: un humedal artificial sub-superficial horizontal (T1) y un blanco (humedal sin vegetación (T2)). Dichas unidades se construyeron en vidrio de 0,6 mm de espesor, con dimensiones internas: Ancho (W=0,4m), Longitud (L=1 m), Altura (H=0,4m), Altura de la lámina de agua (y=0,2m); como soporte o medio granular se utilizó polipropileno de alta densidad (tapas de empaques PET) y como material vegetal *Calathea lutea*.

Luego de la estabilización del montaje de laboratorio (fijación de microorganismos en el material de soporte y adaptación del material vegetal) y por un periodo de cinco meses, se suministró a los sistemas (convencional (T1), blanco (T2) y modificado (T3)) agua residual sintética contaminada con Cromo VI a diferentes caudales (Q<sub>0</sub>= 0,005 m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup> y Q<sub>1</sub>= 0,01 m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup>); con el fin de valorar la remoción de los parámetros estudiados. Las remociones promedio para cada parámetro estudiado fueron de: Cr VI (73,23%; 68,33%; 83,78%); DQO (70,50%; 75,61%; 67,70%); NO<sub>3</sub> (69,99%; 70,29%; 70,29%); PO<sub>4</sub> (88,79%; 87,87%; 88,24%) respectivamente. Se concluyó que sí existen diferencias estadísticamente significativas entre las unidades objeto de estudio en la eliminación del Cromo Hexavalente. Los sistemas plantados registraron mayor remoción del metal pesado, respecto al sistema no plantado. La unidad que mayor porcentaje reportó fue la del humedal modificado; luego, las láminas instaladas dentro del mismo contribuyeron en la eliminación de este metal pesado.



**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

The efficiency in the removal of hexavalent chromium and other physicochemical parameters (COD, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>) was evaluated; of a modified artificial wetland (conditioned system with contact traps located longitudinally to the flow (T3)) and compared with two conventional treatment units: a horizontal sub-surface artificial wetland (T1) and a target (wetland without vegetation (T2)). These units were built in 0.6 mm thick glass, with internal dimensions: Width (W=0,4m), Length (L=1,0 m), Height (H=0,4m), Height of the water sheet (y=0,2 m); as a support or granular medium, high density polypropylene (PET packing lids) and Calathea lutea plant material were used.

After the stabilization of the laboratory assembly (fixation of microorganisms in the support material and adaptation of the plant material) and for a period of five months, the systems (conventional (T1), white (T2) and modified (T3)) were supplied with synthetic residual water contaminated with Chromium VI to different flow rates (Q<sub>0</sub>=0,005 m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup> and Q<sub>1</sub>=0,01 m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup>); in order to assess the removal of the parameters studied. The average removals for each parameter studied were: Cr VI (73,23%; 68,33%; 83,78%); COD (70,50%; 75,61%; 67,70%); NO<sub>3</sub> (69,99%; 70,29%; 70,29%); PO<sub>4</sub> (88,79%, 87,87%, 88,24%) respectively. It was concluded that there are statistically significant differences between the units under study in the elimination of hexavalent chromium. The planted systems registered greater removal of the heavy metal, compared to the unplanted system. The unit that reported the highest percentage was the modified wetland; then, the sheets installed inside it contributed to the elimination of this heavy metal.

**APROBACION DE LA TESIS**

Nombre Presidente Jurado: EDUARDO PASTRANA BONILLA

Firma:

Nombre Jurado: EDUARDO PASTRANA BONILLA

Firma:

Nombre Jurado: LUIS FERNEY TOVAR PEREZ

Firma:

Encabezado: REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE

Evaluación de un Humedal Artificial Modificado a Escala Laboratorio en la Remoción de Cromo Hexavalente Utilizando como Material Vegetal *Calathea Lutea*.

Oscar Fabián Artunduaga Cuellar

Universidad Surcolombiana

Notas del autor

Oscar Fabián Artunduaga Cuellar, Facultad de Ingenierías, Universidad Surcolombiana

Este proyecto de investigación fue financiado con recursos propios

La correspondencia relacionada con el proyecto deber ser dirigido a Oscar Fabián Artunduaga Cuellar, Carrera 5 No. 5-50 La Plata Huila Colombia, E-mail: ofac18@hotmail.com,

Director: Ingeniero Eduardo Valencia Granada M.Sc.

*Cuando pasas más tiempo pensando y escribiendo estos renglones que alguno de los capítulos de este mismo documento, te das cuenta de lo importante y significativa que fue, es y será esta persona en tu vida. Este logro en particular está dedicado a mi abuela patoja, mi ciberabuela, mi “Popayán” Villaquirán.*

## **Agradecimientos**

Me gustaría mostrar mis agradecimientos a todas aquellas personas e instituciones que, de una u otra forma apoyaron la ejecución y desarrollo del presente proyecto de investigación de Maestría.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director, Ingeniero Eduardo Valencia Granada M. Sc. Por su disposición, constante apoyo, asesoría y seguimiento durante todo el proceso de investigación. Asimismo, al ingeniero Nelson Gutiérrez Guzmán PhD. Por su colaboración, apoyo y asesoría.

Al Coordinador de la Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, Ingeniero Néstor Enrique Cerquera Peña M. Sc., al Comité de currículo de la Maestría y demás docentes de la Universidad Surcolombiana.

A mi familia Cuellar Valencia, que me apoyó y colaboró durante todo este proceso.

A la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena –CAM–

A Soluciones Ambientales y Forestales Integrales S.A.S.

## Resumen

Se evaluó la eficiencia en la remoción de Cromo Hexavalente y otros parámetros fisicoquímicos (DQO,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ ); de un humedal artificial modificado (sistema acondicionado con trampas de contacto ubicadas en sentido longitudinal al flujo (T3)) y se comparó con dos unidades de tratamiento convencionales: un humedal artificial sub-superficial horizontal (T1) y un blanco (humedal sin vegetación (T2)). Dichas unidades se construyeron en vidrio de 0,6 mm de espesor, con dimensiones internas: Ancho ( $W=0,4\text{m}$ ), Longitud ( $L=1\text{ m}$ ), Altura ( $H=0,4\text{m}$ ), Altura de la lámina de agua ( $y=0,2\text{m}$ ); como soporte o medio granular se utilizó polipropileno de alta densidad (tapas de empaques PET) y como material vegetal *Calathea lutea*.

Luego de la estabilización del montaje de laboratorio (fijación de microorganismos en el material de soporte y adaptación del material vegetal) y por un periodo de cinco meses, se suministró a los sistemas (convencional (T1), blanco (T2) y modificado (T3)) agua residual sintética contaminada con Cromo VI a diferentes caudales ( $Q_0= 0,005\text{ m}^3.\text{día}^{-1}$  y  $Q_1= 0,01\text{ m}^3.\text{día}^{-1}$ ); con el fin de valorar la remoción de los parámetros estudiados. Las remociones promedio para cada parámetro estudiado fueron de: Cr VI (73,23%; 68,33%; 83,78%); DQO (70,50%; 75,61%; 67,70%);  $\text{NO}_3$  (69,99%; 70,29%; 70,29%);  $\text{PO}_4$  (88,79%; 87,87%; 88,24%) respectivamente. Se concluyó que sí existen diferencias estadísticamente significativas entre las unidades objeto de estudio en la eliminación del Cromo Hexavalente. Los sistemas plantados registraron mayor remoción del metal pesado, respecto al sistema no plantado. La unidad que mayor porcentaje reportó fue la del humedal modificado; luego, las láminas instaladas dentro del mismo contribuyeron en la eliminación de este metal pesado.

*Keywords:* Humedales Artificiales, Fitorremediación, *Calathea lutea*, Cromo Hexavalente



## Abstract

The efficiency in the removal of hexavalent chromium and other physicochemical parameters (COD, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>) was evaluated; of a modified artificial wetland (conditioned system with contact traps located longitudinally to the flow (T3)) and compared with two conventional treatment units: a horizontal sub-surface artificial wetland (T1) and a target (wetland without vegetation (T2)). These units were built in 0.6 mm thick glass, with internal dimensions: Width (W=0,4m), Length (L=1,0 m), Height (H=0,4m), Height of the water sheet (y=0,2 m); as a support or granular medium, high density polypropylene (PET packing lids) and *Calathea lutea* plant material were used.

After the stabilization of the laboratory assembly (fixation of microorganisms in the support material and adaptation of the plant material) and for a period of five months, the systems (conventional (T1), white (T2) and modified (T3)) were supplied with synthetic residual water contaminated with Chromium VI to different flow rates ( $Q_0=0,005 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$  and  $Q_1=0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$ ); in order to assess the removal of the parameters studied. The average removals for each parameter studied were: Cr VI (73,23%; 68,33%; 83,78%); COD (70,50%; 75,61%; 67,70%); NO<sub>3</sub> (69,99%; 70,29%; 70,29%); PO<sub>4</sub> (88,79%, 87,87%, 88,24%) respectively. It was concluded that there are statistically significant differences between the units under study in the elimination of hexavalent chromium. The planted systems registered greater removal of the heavy metal, compared to the unplanted system. The unit that reported the highest percentage was the modified wetland; then, the sheets installed inside it contributed to the elimination of this heavy metal.

*Keywords:* Artificial Wetlands, Phytoremediation, *Calathea lutea*, Hexavalent Chromium

## Tabla De Contenido

1.	Introducción .....	7
2.	Marco Teórico .....	9
2.1.	Metales Pesados en Aguas Residuales .....	9
2.2.	Tratamientos para las Aguas Residuales .....	13
2.3.	Humedales Artificiales .....	17
2.3.1.	Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS) .....	19
2.3.2.	Humedal Artificial de Flujo Sub-Superficial (HAFSS) .....	20
2.4.	Fito-remediación .....	24
2.4.1.	Fito-acumulación .....	24
2.4.2.	Fito-degradación o fito-transformación. ....	25
2.4.3.	Fito-estimulación .....	25
2.4.4.	Fito-volatización. ....	25
2.4.5.	Fito-estabilización .....	26
2.4.6.	Rizo-filtración. ....	26
2.5.	Vegetación en los Humedales .....	27
2.5.1.	<i>Eichhornia crassipes</i> .....	29
2.5.2.	<i>Cyperus papyrus</i> . ....	30
2.5.3.	<i>Phragmites australis</i> . ....	31
2.5.4.	<i>Calathea lutea</i> . ....	32
2.6.	Material Granular o de Soporte en los Humedales .....	33
2.7.	Microorganismos .....	35
2.8.	Generalidades del Diseño de los Humedales .....	36

2.9. Humedales a Escala Regional .....	38
2.10. Remoción de Cromo con Humedales .....	39
3. Planteamiento del Problema de Investigación .....	42
3.1. Pregunta de Investigación.....	43
4. Justificación.....	44
5. Objetivos .....	45
5.1. General .....	45
5.2. Específicos.....	45
6. Metodología .....	46
6.1. Localización .....	46
6.2. Instalación del Centro de Experimentación.....	47
6.3. Componentes de los Humedales.....	48
6.3.1. Material Vegetal.....	48
6.3.2. Adaptación y Siembra del Material Vegetal. ....	49
6.3.3. Material de Soporte (Polipropileno Alta Densidad).....	50
6.3.4. Fijación de Microorganismos.....	51
6.4. El Agua Residual (AR).....	53
6.4.1. Composición. ....	53
6.4.2. Dosificación. ....	54
6.5. Variables Evaluadas .....	55
6.5.1. Parámetros in situ.....	55
6.5.2. Parámetros ex situ. ....	56
6.5.3. Análisis de Laboratorio.....	57

6.5.4. Análisis de Resultados .....	58
7. Resultados y Discusión .....	59
7.1. Diseño y Construcción del Sistema Experimental .....	59
7.1.1. Diseño del Sistema.....	59
7.1.2. Construcción del Sistema.....	64
7.2. Condiciones Iniciales del Agua Residual.....	68
7.3. Remoción de DQO, Nitratos y Fosfatos.....	69
7.3.1. Resultado de los Análisis de Laboratorio.....	69
7.3.2. Análisis Estadístico .....	73
7.3.3. Discusión.....	75
7.4. Remoción Cromo Hexavalente.....	77
7.4.1. Resultado de los Análisis de Laboratorio.....	77
7.4.2. Análisis Estadístico .....	80
7.4.3. Discusión.....	81
8. Conclusiones y Recomendaciones .....	83
9. Referencias Bibliográficas .....	86

## Listas De Tablas

Tabla 1. Plantas usadas en fito-remediación .....	28
Tabla 2. Valores estimados de porosidad para el material de sustrato en el humedal .....	35
Tabla 3. Principales procesos de depuración en humedales artificiales.....	37
Tabla 4. Adaptación del material vegetal.....	49
Tabla 5. Componentes del agua residual sintética .....	53
Tabla 6. Métodos de identificación de los parámetros objeto de estudio .....	57
Tabla 7. Conservación y control de calidad para las muestras .....	58
Tabla 8. Concentración de entrada del Agua Residual .....	68
Tabla 9. Remociones DQO, Nitratos y Fosfatos.....	70
Tabla 10. Medias de Tukey (HSD) para DQO, Nitratos y Fosfatos .....	73
Tabla 11. Remociones Cromo VI.....	77
Tabla 12. Medias de Tukey (HSD) para Cr VI.....	80

## Lista De Figuras

Figura 1. Humedal Artificial de Flujo Superficial –HAFS-.....	20
Figura 2. Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Horizontal –HAFSSH-.....	21
Figura 3. Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Vertical –HAFSSV-.....	22
Figura 4. Estrategias de fito-remediación. ....	26
Figura 5. <i>Eichhornia crassipes</i> .....	30
Figura 6. <i>Cyperus Papyrus</i> .....	31
Figura 7. <i>Phragmites Australis</i> .....	32
Figura 8. <i>Calathea lutea</i> .....	33
Figura 9. Procesos llevados a cabo en un humedal.....	38
Figura 10. La Plata Huila a nivel nacional.....	46
Figura 11. Construcción e Instalación del montaje de laboratorio.....	47
Figura 12. <i>Calathea lutea</i> .....	48
Figura 13. Adaptación Material Vegetal.....	49
Figura 14. Siembra de <i>Calathea Lutea</i> .....	50
Figura 15. Polipropileno de alta densidad.....	51
Figura 16. Inóculo microbial adicionado al material de sustrato .....	51
Figura 17. Fijación de microorganismo en material de sustrato .....	52
Figura 18. Alimentación del Humedal Convencional.....	54
Figura 19. Adaptación para toma de parámetros in situ.....	55
Figura 20. Toma de muestras de aguas residuales .....	56
Figura 21. Esquema de unidades de tratamiento.....	59
Figura 22. Vista en Planta y de Perfil de Humedal Convencional y Blanco .....	60

Figura 23. Características de medio de soporte .....	61
Figura 24. Determinación de porosidad del material granular.....	61
Figura 25. Bosquejo humedal modificado .....	63
Figura 26. Vista en Planta y de Perfil de Humedal Modificado .....	64
Figura 27. Dosificador de Caudal .....	65
Figura 28. Dimensiones de los Humedales .....	65
Figura 29. Conformación de los Humedales. Sistema Convencional y Blanco.....	66
Figura 30. Especificaciones de trampas de contacto.....	66
Figura 31. Trampas de contacto en humedal modificado .....	67
Figura 32. Montaje de laboratorio y unidades experimentales HAFSS.....	67
Figura 33. Remociones de contaminantes para Humedal convencional.....	71
Figura 34. Remociones de contaminantes para el Blanco.....	71
Figura 35. Remociones de contaminantes para el Humedal Modificado.....	72
Figura 36. Dispersión de datos para DQO, NO <sub>3</sub> y PO <sub>4</sub> .....	72
Figura 37. Cambios del % Remoción DQO en función del Caudal.....	74
Figura 38. Cambios del % Remoción PO <sub>4</sub> en función del Caudal.....	74
Figura 39. Remociones de contaminantes para Humedal convencional.....	78
Figura 40. Remociones de contaminantes para el Blanco.....	78
Figura 41. Remociones de contaminantes para el Humedal Modificado.....	79
Figura 42. Dispersión de datos para Cromo VI.....	79
Figura 43. Cambios del % Remoción Cromo VI en función del Caudal .....	81

## 1. Introducción

La contaminación de cuerpos hídricos por metales pesados (Plomo, Mercurio, Cadmio, Arsénico, Cromo, entre otros) presentes en aguas residuales, es un problema ambiental de gran importancia, pues esto se traduce en afectaciones a la flora y fauna, además, implicaciones en la salud pública y entorno social de las poblaciones cercanas a los puntos de vertimientos. De ahí, la necesidad de implementar tecnologías de producción más limpia y/o sistemas cada vez más especializados en la remoción de contaminantes xenobióticos que son generados principalmente por el sector industrial y minero.

Los tratamientos llamados convencionales (precipitación química, coagulación – floculación, adsorción, flotación, intercambio iónico, entre otros), frecuentemente son utilizados en la depuración de la mayoría de contaminantes criterios, pero implican elevados costos de construcción, operación y mantenimiento que los hacen poco atractivos en su relación costo-beneficio. Es aquí, donde las tecnologías alternativas y en especial la fito-remediación desempeñan un papel preponderante.

La fito-remediación es el uso de material vegetal para eliminar, destruir o transformar contaminantes presente en el suelo, agua y aire (Zhi-xin, Li-na, Tie-heng, Yu-shuang, Hong, 2007; Panich-Pat, Upathan, Pokethitiyook, Kruatrachue, Lanza, 2010). Puede llegar a ser una alternativa factible en el tratamiento de todo tipo de aguas residuales, pues en este proceso, las plantas contribuyen en gran porcentaje en la remoción de contaminantes criterios. Éstas (las plantas) son seleccionadas principalmente por el potencial fisiológico para tolerar y asimilar sustancias tóxicas y su habilidad para bio-acumular y/o degradar contaminantes (Peña-Salamanca, Palacios, Ospina-Álvarez, 2005; Pilon-Smits, 2005).



Dado que los humedales artificiales son considerados como sistemas de fito-remediación y gracias a sus ventajas respecto a los sistemas convencionales de tratamiento al ser alternativas económicas, de fácil construcción, operación, mantenimiento y por sobre todo, eficientes en la depuración de diferentes tipos de aguas residuales y su potencial en la remediación de los recursos naturales (agua, suelo y aire) contaminados, se consideró la experimentación con estas unidades.

Este proyecto de investigación se desarrolló en el Municipio de La Plata Huila y tenía como fin evaluar y comparar (a escala laboratorio) la remoción de Cromo Hexavalente y otros parámetros fisicoquímicos de interés (DQO,  $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$ ) en tres sistemas experimentales de tratamiento (Humedal Artificial Convencional (T1), Blanco (T2) y Humedal Artificial Modificado (T3)) plantados con *Calathea lutea*. El Agua residual suministrada a los sistemas se preparaba según metodología propuesta por Sánchez & Lozano (2012)

## 2. Marco Teórico

La presencia de contaminantes y de metales pesados en el ambiente (agua, suelo, aire), es el resultado tanto de procesos naturales como antropogénicos. Este último, es el principal responsable del incremento y/o aumento de las concentraciones de compuestos tóxicos perjudiciales para la salud. (Yabe & De Oliveira, 2003). Puesto que, afectan el balance natural de los ecosistemas y la incorporación de estos contaminantes a la fauna (incluido el ser humano) afectan el sistema inmune, reproductor y respiratorio (Porras, 2010).

### 2.1. Metales Pesados en Aguas Residuales

Las aguas residuales contienen un sinnúmero de componentes tóxicos y perjudiciales para la salud y el ambiente, entre ellos, se encuentran los metales pesados que son alrededor de 40 elementos de la tabla periódica (Nriagu & Pacyna, 1988). Y aunque en bajas concentraciones la mayoría de estos son fundamentales para el crecimiento y desarrollo de la vida: Sodio (Na), Potasio (K), Magnesio (Mg), Calcio (Ca), Manganeso (Mn), Cobalto (Co), Cinc (Zn), Hierro (Fe), Molibdeno (Mo). Otros en cambio, tienen efectos perjudiciales sobre las células, principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas: Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Arsénico (As), Cadmio (Cd), Níquel (Ni), Estaño (Sn). En la actualidad se consideran como los contaminantes inorgánicos más importantes. (Atkinson & Kasan, 1998). Pues elevadas concentraciones de algunos de estos compuestos pueden desencadenar una serie de problemas ambientales; que van desde la degradación y pérdida de fertilidad de suelos (Kizilkaya, Askin, Bayrakli & Saglam, 2004; Arias, Pérez-Novo, Osorio, López & Soto, 2005) hasta afectar procesos de tratamiento biológicos o fisicoquímicos de aguas residuales (Nurdan, Tulay & Oz 1997; Ong, Lim, Seng, Hirata & Hano, 2005).

La industria y la actividad minera son los mayores generadores de vertimientos y residuos con este tipo de contaminantes. En la Tabla 1, se muestra los diferentes metales pesados presentes en las aguas residuales de los principales sectores industriales y mineros.

*Tabla 1. Metales pesados presentes en efluentes industriales.*

<i>Actividad industrial</i>	<i>Metal pesado vertido</i>											
	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>Hg</i>	<i>Pb</i>	<i>Cd</i>	<i>Cr</i>	<i>As</i>	<i>Al</i>	<i>Sn</i>
Refinerías de petróleo	*		*	*	*		*		*	*		
Pulpa y papel			*	*	*	*	*		*			
Textiles	*	*	*	*	*		*	*	*			
Metalurgias	*		*		*		*	*	*	*		
Drenaje ácido de minas	*	*	*	*							*	
Galvanoplastia		*	*	*	*		*		*			
Químicos orgánicos	*		*			*	*	*	*	*	*	*
Químicos inorgánicos	*		*			*	*	*	*	*	*	
Plásticos	*											
Curtiembres									*			
Mineras		*		*		*	*	*		*		

Fuente: (Cavaco et al., 2007; Manzoor et al., 2006; Mohan & Pittman, 2006; Sial et al., 2006).

Este tipo de efluentes supone una preocupación importante en la salud pública, pues verter metales pesados como Plomo, Mercurio, Cadmio, Arsénico, Cromo y demás compuestos que son dañinos para la vida por su alta toxicidad, tal como lo indica Bermeo (2009). Y que si llegan al organismo pueden ocasionar: debilitamiento del sistema inmune, problemas respiratorios, erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, afectación en riñones, hígado, tiroides, bio-magnificación, alteración del material genético, cáncer de pulmón e incluso hasta la muerte. (Porrás, 2010; Garzón-Santamaria, González-López & Tejada-Tovar, 2012).

Colombia no es ajena a esta problemática, según la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUUDI), en su informe 2; determinó que en el proceso de extracción y amalgamación artesanal de oro se están vertiendo entre 50 y 100 toneladas de mercurio anuales. Convirtiéndose así, como el tercer país más contaminante de este metal pesado (Veiga, 2010). Asimismo, sucede con las curtiembres, Alzate (2008); Quiñones, Tejada & Ruiz, (2014) establecen que más del 90% son pequeñas empresas que hacen vertimientos de sus efluentes contaminados con cromo a cuerpos hídricos sin ningún tipo de tratamiento previo.

La remoción de metales pesados en aguas residuales plantea un problema de difícil solución, pues debido a su alta toxicidad y al ser compuestos no biodegradables representan un peligro para la flora y fauna de cuerpos receptores (Contreras, Ferro-Orozco, Urriza, Bertola & Zaritzky, 2009). El cromo es un contaminante ampliamente difundido en el ambiente, este metal pesado proveniente principalmente de industrias metalúrgicas, de cromados, curtiembres y resultados de procesos químicos (Contreras et al, 2009).

En el proceso de curtición son muchos los productos utilizados: dicromato de potasio, alumbre, tanino vegetal, sales metálicas y formaldehídos. Esta operación origina vertimientos y residuos contaminados principalmente con Cromo y otros compuestos químicos (Bidyut & Chris, 2010).

La toxicidad del Cromo deriva del estado de oxidación en que se encuentre en el ambiente: El cromo trivalente (Cr III) no es tóxico a diferencia del hexavalente (Cr VI) que si es tóxico y carcinógeno. (Martínez, 2013). Los valores máximos permisibles para aguas destinadas a consumo humano para este metal pesado en Colombia y según la Resolución 2115 de 2007; deben ser inferiores a  $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$ , pero se han encontrado concentraciones hasta de  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  (Garzón-Santamaria et al, 2012). El cromo trivalente generalmente no se encuentra en agua

potable, contrario al cromo hexavalente; que es la especie que predomina en el agua clorada y/o aireada (Velasquí, 2016). La absorción de Cr VI se produce más fácilmente a través de tracto gastrointestinal al atravesar membranas celulares. (Jiménez, 2005)

“La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), clasificó al cromo hexavalente y sus compuestos en el Grupo I de sustancias cancerígenas, es decir que son consideradas como sustancias comprobadamente cancerígenas para el humano” (Téllez, Carvajal & Gaitán, 2004).

El ingreso al organismo de estos contaminantes es principalmente mediante la ingesta de alimentos, agua contaminada y la exposición laboral. La toxicidad de este metal pesado está relacionada con su acción irritante y sensibilizante, es un contaminante capaz de producir daño oxidativo en el ADN, malformaciones y alteraciones en el desarrollo fetal, tales como: paladar hendido, hidrocefalia y defectos del tubo neural. (Sanz & Trallero, 2010).

Las grandes industrias del curtido de pieles, galvanizado y demás que trabajan con este metal pesado, cuentan con diferentes sistemas de tratamiento que llegan a obtener remociones considerables de Cromo y otros contaminantes, cumpliendo así con la normatividad ambiental vigente. El problema se centra en las medianas y pequeñas empresas que no realizan o realizan un tratamiento incompleto a sus vertimientos y en ocasiones los depositan directamente a cuerpos hídricos.

En Colombia, la legislación que establece los parámetros y/o valores máximos permisibles a vertimientos puntuales es la Resolución 631 del 17 de marzo de 2015; Su objetivo es la de reducir en cantidad los diferentes contaminantes que son depositados en cuerpos hídricos; ocasionando la degradación del recurso, afectación de flora y fauna. El cumplimiento con esta

normatividad mejora la calidad del líquido y de la población asentada a orillas de las diferentes arterias fluviales del país.

Para dar cumplimiento a esta normativa es necesario implementar sistemas adecuados para el tratamiento de los vertimientos industriales y domésticos antes de ser depositados al alcantarillado o cuerpos hídricos o en su defecto, optimizar los sistemas ya existentes; por ello, se hace indispensable la adecuación y/o construcción de sistemas para tratar estos contaminantes presentes en el agua.

## **2.2.Tratamientos para las Aguas Residuales**

Las aguas residuales generadas en los sectores: industrial, minero y comercial; que están contaminadas con metales pesados y demás compuestos tóxicos, se han convertido en uno de los problemas ambientales más serios de hoy en día. Su tratamiento es de especial interés debido a su re-calcitancia y persistencia en el ambiente. (Fu & Wang, 2010). Dentro de los métodos terciarios y/o especializados en la remoción de contaminantes criterio se encuentran: La precipitación química, coagulación – floculación, adsorción, flotación, intercambio iónico, métodos electroquímicos y filtración por membrana. Para Kurniawan, Chan, Lo & Babel (2006) las tecnologías más empleadas en la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales industriales son: el intercambio iónico, la filtración por membrana y la flotación.

La precipitación química es una de las técnicas más sencillas en operación y muy efectiva en la remoción de contaminantes criterios; debido su selectividad y eficiencia. Su objetivo es, mediante la adición de reactivos específicos la formación de un precipitado concentrado con el contaminante de interés, que luego, son removidos mediante la filtración, flotación o decantación. Para el caso específico en la remoción metales pesados como: Cd, Cr, Cu, Pb, Zn,

As y Hg. Mandel et al (2013) mencionan la importancia en la acidificación del agua residual a tratar ( $\text{pH} \leq 4$  Unidades), para así, conseguir remociones superiores al 95%.

La floculación-coagulación, es el proceso por el cual las partículas coloidales son desestabilizadas cuando se adiciona un coagulante, que es el encargado de neutralizar las fuerzas que separan a los coloides. Al incrementar el tamaño de las partículas, estas se unen formando flóculos voluminosos que posteriormente son retirados mediante sedimentación u otras técnicas (Kurniawan et al, 2006; Fu & Wang, 2010).

Otra técnica utilizada es la flotación; encargada de separar sólidos y/o dispersar líquidos que están en la misma fase, usando finas burbujas de gas suministradas desde la base o fondo del sistema. Las burbujas se adhieren a los contaminantes y estos ascienden hasta la superficie del líquido, donde son eliminados principalmente como lodos de baja densidad o espumas. (Mandel et al, 2013).

La adsorción se ha convertido en una de las técnicas más estudiadas para la eliminación de metales pesados, por ser un método económico y efectivo, ya que, es un proceso en el cual el contaminante que se encuentra diluido en el agua residual, se adhiere o se transfiere a una superficie sólida (adsorbente), donde es confinado por interacciones físicas y/o químicas. Debido a su alta capacidad de adsorción y reactividad de la superficie, el carbón activado es el compuesto más utilizado, (Kurniawan et al, 2006). La adsorción química, la filtración por membrana y el intercambio iónico, son los tratamientos que frecuentemente se emplean en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados. (Peña-Salamanca et al, 2013).

En el intercambio iónico, ocurre un intercambio reversible de iones entre las fases sólida y líquida, donde una sustancia insoluble (resina) remueve iones o en este caso contaminantes de

una solución electrolítica y libera otros iones de igual carga en una cantidad químicamente equivalente sin ningún cambio estructural en la resina (Mandel et al, 2013). Esta técnica se utiliza en la recuperación de metales pesados y demás compuestos inorgánicos considerados como valiosos en el sector industrial y minero (Fu & Wang, 2010).

La filtración por membrana ha recibido interés particular en el tratamiento de efluentes inorgánicos, ya que es capaz de eliminar no solo sólidos suspendidos y compuestos orgánicos, sino también contaminantes inorgánicos (Kurniawan et al, 2006). La técnica empleada depende más del tamaño de partícula a remover; de ahí que se hable de tipos de filtración: ultrafiltración, nanofiltración, y/u osmosis inversa. Esta última, como la más utilizada para la remoción de metales.

Con una adecuada operación y mantenimiento, estos métodos convencionales logran alcanzar eficiencias cercanas al 90% en la remoción de DBO<sub>5</sub>, SST, DQO. (Min Ambiente, 2002); sin embargo, implican un alto costo en cuanto a su construcción y operación, puesto que en cada proceso se debe contar con personal encargado y de amplia experiencia en el seguimiento y control de cada fase, con el fin de garantizar la eficiencia del sistema. Para el caso del Cromo Hexavalente, la concentración máxima permitida para ser vertida a cuerpos hídrico es de 1,5 mg.L<sup>-1</sup> (Resolución 631, 2015).

En datos obtenidos por Laboratorios Químia y Cian y Laboratorios de Química de la Universidad Santo Tomás en 2012, para curtiembres cercanas a la ciudad de Bogotá, los valores promedios de Cromo en aguas residuales industriales fueron de 2475 mg.L<sup>-1</sup> (Ortiz & Carmona, 2013). Lo que implica buscar tratamiento o alternativas más específicas o complementarias que contribuyan con el 99.94% de remoción para este metal pesado y den cumplimiento con lo establecido en la normatividad colombiana.



Las limitaciones de los tratamientos fisicoquímicos utilizados actualmente en la remoción de contaminantes criterio presente en las aguas residuales, conducen en la implementación de tecnologías alternativas y/o experimentales; principalmente basadas en procesos biológicos, debido a que tanto los microorganismos como las plantas, poseen la capacidad de adaptarse a sinnúmeros agentes contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos y aunque en ocasiones, estos no pueden destruir los metales pesados, si pueden influir en su movilidad en el medio ambiente, modificando sus características físicas y/o químicas. (Peña-Salamanca et al, 2013). Según Vargas (2005) se han realizado diferentes estudios en los que se llevan a cabo la descontaminación de fluidos contaminados con metales pesados, se ha demostrado la afinidad de estos contaminantes a flóculos microbianos y su facilidad para adherirse a estos en cortos periodos de tiempo.

Es aquí donde las llamadas tecnologías alternativas para el tratamiento de aguas residuales, entran a jugar un papel preponderante en el tratamiento de tipo terciario, pues además de ser métodos sencillos y eficientes, también suelen ser menos costosos en cuanto a operación y mantenimiento que los sistemas convencionales; suelen ser igualmente eficaces en la eliminación en la remoción de patógenos, metales pesados y nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo (Burton et al, 1995). Otra ventaja con la que cuenta estos sistemas de tratamiento, es el consumo energético, pues suele ser mínimo y sus costos de mantenimiento son muy bajos, requiriendo también personal menos especializado. (Delgadillo, 2010).

En investigaciones a escala de laboratorio (Gao et al, 2008; Jain et al, 2009; Memon et al 2009; Pinzón, 2009; Galindo, Sotto & Artunduaga, 2015); plantean sistemas no convencionales para el tratamiento de las aguas residuales con la utilización de bio-absorbentes (cascarilla de arroz, residuos de girasol, cáscara de plátano, cáscara de naranja) llegando a remociones en

promedio del 70% de Cromo, pero establecen la necesidad de experimentar con sistemas alternativos para este tipo de efluentes. Puesto que, la literatura reporta que se pueden llegar a concentraciones cercanas a 100 ppm de Cromo hexavalente en aguas residuales industriales que son vertidas a cuerpos hídricos (Coronel & Romero, 2004).

De los llamados sistemas alternativos para el tratamiento de todo tipo de aguas residuales, se desglosan la corriente que emplean la bio-remediación; mediante el uso de organismos o sistemas vivos para la recuperación de un recurso natural alterado y/o contaminado. De estos, los humedales artificiales son cada vez más utilizados.

### **2.3.Humedales Artificiales**

La definición de humedal, fue establecido en el Convenio Internacional de Ramsar (1971), en donde se definió como:

Las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros. (Ramsar, 1971)

Debido a la capacidad que los humedales poseen para modificar todos los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua que transita en forma lenta por estas unidades.

Bernal-López (2014), define a los humedales artificiales como sistemas acuáticos que son diseñados con el fin de suplir las necesidades de tratamiento en los que se buscan aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos que suceden en el agua, medio filtrante, macrófitas y la atmósfera. Dentro de las funciones que se producen dentro de estos sistemas se pueden encontrar: La fijación de contaminantes a través del proceso de adsorción gracias a la presencia del material de sustrato, la degradación y/o metabolización de elementos orgánicos e

inorgánicos, por medio de los microorganismos y el material vegetal presente dentro de las unidades (Bernal-López, 2014).

Asimismo, García & Corzo (2008) definen a los humedales artificiales como: “lagunas o canales poco profundos (de menos de 1 m) plantados con vegetales propios de las zonas húmedas y en los que los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna”

En estos sistemas, se desarrollan una serie de procesos (físicos, químicos y biológicos) que contribuyen en la depuración de contaminantes, los cuales se basan en reacciones que ocurren naturalmente, entre ellas se tienen: Remoción de sólidos suspendidos (SS) por sedimentación y filtración. (Lara, 1999), biodegradación de la materia orgánica gracias a la presencia de microorganismos aerobios y anaerobios. (Delgadillo, 2010), remoción de metales pesados atribuida al fenómeno de precipitación y absorción. (Bernal-López, 2014), ajuste de pH. (Lara, 1999), entre otros.

Estos mecanismos hacen que los sistemas con humedales artificiales sean atractivos, pues además, de ser económicamente viables y versátiles en el tratamiento de varios tipos de aguas; tienen algunas ventajas entre las que se pueden destacar: El costo de construcción, mantenimiento y operación es menor al de otras opciones de tratamiento convencionales, se adapta a las variaciones de caudal, facilita el reciclaje y la reutilización del agua, no requiere de productos químicos para el funcionamiento de los humedales, la producción de olores, vectores es casi nulo; cuando son de flujo sub-superficial, además, de proporcionar hábitat a microorganismos, plantas y demás que contribuyen en el mejoramiento de la calidad hídrica y condiciones estéticas de los espacios abiertos.

Los humedales artificiales (García & Corzo, 2008; Villegas et al, 2006) se han clasificado en dos grandes grupos: de flujo superficial y el de sub-superficial (horizontal y vertical).

Humedal de Flujo Superficial- HAFS (Lámina de agua visible): Las macrófitas se encuentran enraizadas en la base o fondo del humedal y el agua residual atraviesa por medio de los tallos, raíces y hojas de las plantas (Gallego, 2010).

Humedal de Flujo Sub-superficial- HAFSS (Lámina de agua no visible): El flujo atraviesa un lecho de relleno o material granular (arena, grava, suelo o piedra picada), donde crecen las macrófitas que sólo tienen las raíces y rizomas en contacto con el agua residual (US EPA A. E., 1993). El sentido del flujo define si es de tipo horizontal o vertical.

En los humedales, los procesos aerobios ocurren principalmente en la capa superficial del mismo. En humedales artificiales anaerobios, primordialmente a través del sustrato. Se ha sugerido que los sistemas con flujo sub-superficial; son más exitosos, particularmente para el tratamiento de aguas residuales ácidas y remoción de Metales pesados como el Zn y el Cu. Factores como el diseño, el tipo de macrófitas juegan un papel importante a tener en cuenta para su óptimo funcionamiento (Stottmeister Wießner, Kuschik, Kappelmeyer, Kästner, Bederski, Muller, & Moormann, 2003; O'Sullivan, Murria, & Otte, 2000).

**2.3.1. Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS).** Superficie de suelo en el que las macrófitas se encuentran inundadas de agua residual (AR). En estos humedales denominados de tipo superficial, el agua fluye sobre la superficie, cuentan con una profundidad no mayor a 0,45 m; presencia de vegetación emergente, flotante, sumergida o su combinación de ellas que se utilizan dentro de los humedales, con el fin de optimizar y/o mejorar la remoción de los contaminantes o parámetros fisicoquímicos (Romero, 2008). En algunos casos, teniendo en cuenta la radiación solar y otros factores climáticos, porcentaje considerable de agua contenida

dentro de los sistemas se pierde a través de la evapotranspiración, evaporación o percolación (Commission, 2000). En la figura 1 se puede apreciar el funcionamiento y los diferentes componentes de los Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS).

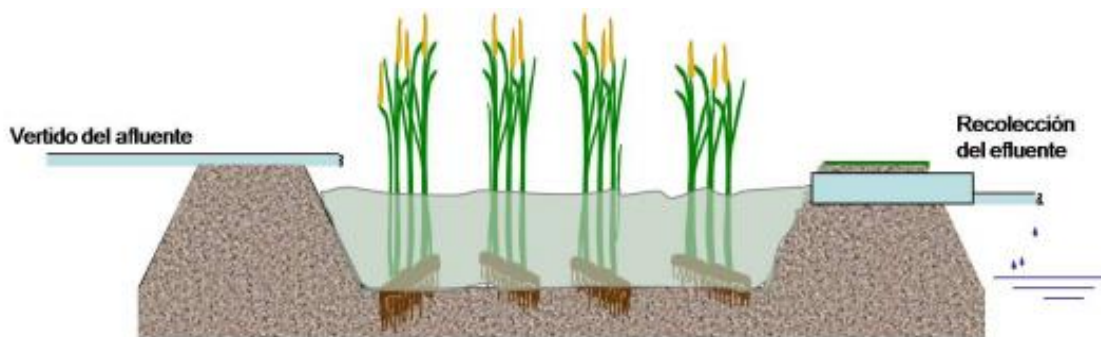


Figura 1. Humedal Artificial de Flujo Superficial –HAFS-  
Fuente: García & Corzo (2008).

Estas unidades cuentan con poca profundidad y se recomienda el recubrimiento del fondo, con el fin de prevenir y evitar la percolación del agua residual y contaminación de napas de aguas. Cada sistema debe contar con estructuras adecuadas de entrada y de salida del agua tratada, para asegurar una distribución uniforme del AR aplicada y su recolección (US EPA U. S., 2000). Los sistemas de flujo superficial son utilizados en el tratamiento de aguas residuales del sector minero e industrial, agrícola, urbano, ganadero, avícola y lixiviados de rellenos sanitarios (US EPA U. S., 2000).

**2.3.2. Humedal Artificial de Flujo Sub-Superficial (HAFSS).** Estos sistemas son principalmente excavaciones poco profundas rellenos de material granular (grava, suelo, piedra, etc.), donde el agua circula por debajo de la superficie del medio de soporte, sembrado de plantas emergentes. La profundidad del medio en estos humedales de flujo sub-superficial tiene un rango de 0,30 a 0,90 m. (Lara, 1999). La grava o material de sustrato debe ser lo suficientemente grande para evitar obstrucciones a largo plazo. Las raíces y rizomas de las macrófitas seleccionadas y que se establecen dentro del humedal crecen en los espacios

proporcionados por la separación de la grava. Estos sistemas son considerados como reactores biológicos tipo “proceso bio-películas sumergida” (García, Morató & Bayona, 2004). Estos sistemas (HAFSS) son utilizados en el tratamiento de efluentes provenientes de fosas sépticas y de sedimentación primaria y secundarios, los efluentes de lagunas (Gil, 1999). La clasificación de estos humedales; dependen del sentido del flujo (horizontal o vertical); Además, existen combinaciones entre ellos -sistemas híbridos- (García & Corzo, 2008).

**HAFSS Flujo Horizontal.** El agua atraviesa el sistema (material de soporte, raíces y rizomas) de forma horizontal. La profundidad de la lámina de agua varía entre 0,30 y 0,90 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (García & Corzo, 2008). Trabajan con una alimentación continua (suministro continuo de AR). La recolección del agua ya tratada, se realiza en el extremo opuesto al de la alimentación. La altura de la lámina de agua, como el tiempo de retención hidráulico (TRH) en el sistema, es regulado mediante tuberías diseñadas para garantizar que el material de soporte siempre se encuentre inundado (saturado), aunque se han realizado experimentación a condiciones intermitentes (Vymazal, 2006).

En la Figura 2 se presenta el funcionamiento y componentes del Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Horizontal (HAFSSH).

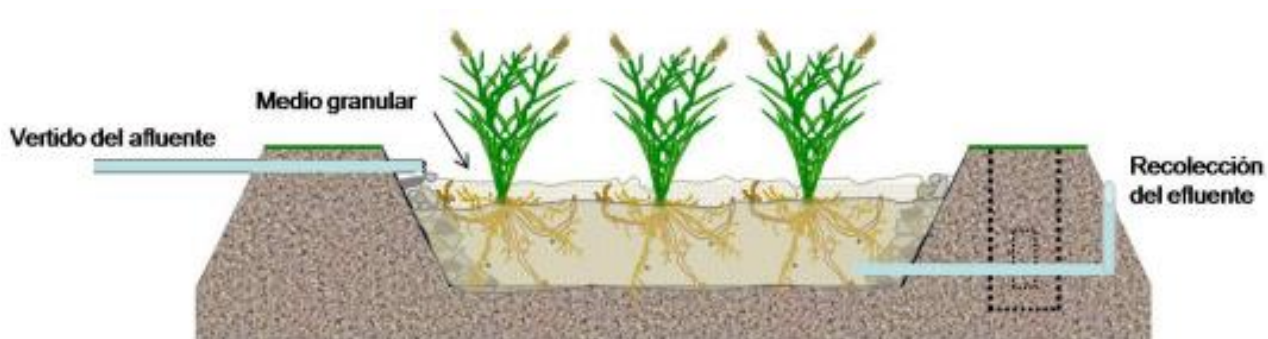


Figura 2. Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Horizontal –HAFSSH-  
Fuente: García & Corzo (2008).

Los sistemas con flujo sub-superficial no generan malos olores durante el proceso de depuración, y si se llegasen a producir, esto indicaría que algunos procesos bioquímicos se limitaron por la falta de oxígeno ( $O_2$ ) en el sistema y ello, implica hacer modificaciones al respecto (Cooper, 2005). Los humedales construidos de flujo horizontal sub-superficial (HAFSS), han resultado ser una solución atractiva para tratar aguas residuales de comunidades rurales, municipales e industriales. (Romero, 2008), (García & Corzo, 2008), (Lara, 1999).

**HAFSS Vertical.** La circulación del agua dentro del sistema es de tipo vertical y el suministro del líquido se realiza por periodos de tiempo o discontinuo, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado. En la Figura 3 se presenta al funcionamiento y componentes del Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Vertical (HAFSSV).

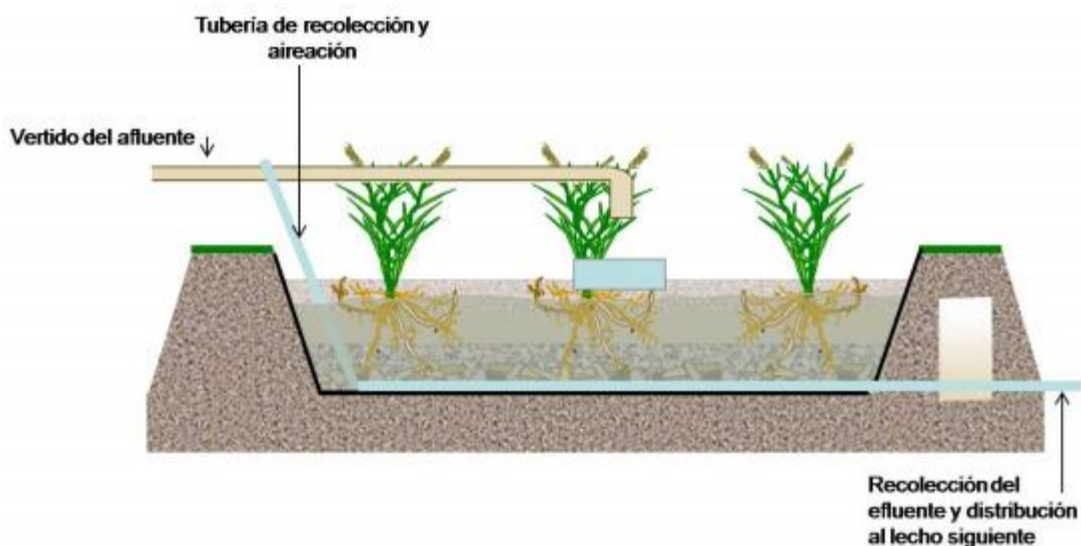


Figura 3. Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Vertical –HAFSSV-  
Fuente: García & Corzo (2008).

La profundidad del medio granular varía entre 0,50 y 0,80 m. Estos sistemas producen efluentes con mayor oxigenación debido a su flujo discontinuo y están libres de malos olores (García & Corzo, 2008). Estos sistemas tienen una mayor capacidad de tratamiento que los humedales horizontales (García & Corzo, 2008). La alimentación o suministro del agua residual

se debe realizar de forma uniforme en la superficie del humedal y la recolección se debe realizar al fondo del sistema. Aunque ocupan un área superficial menor que los horizontales, presentan inconvenientes, puesto que, su operación es más compleja, más costosa y no se han estudiados como los horizontales (Mena, Rodríguez, Núñez, & Villaseñor, 2000; Gallego, 2010). Por otra parte, son más susceptibles a la colmatación (García & Corzo, 2008).

La remoción de materia orgánica, inorgánica, nutrientes, patógenos y demás compuestos nocivos para el ambiente y la salud pública, TRH y Área superficial del humedal, están directamente relacionadas, ya que, a mayor TRH implicaría mayor área superficial, pero también mayor eficiencia en la remoción de la carga orgánica del agua residual que se esté tratando; factor importante y decisivo en la aplicabilidad del sistema. En la actualidad, se reportan humedales construidos con áreas superiores a los 6000 m<sup>2</sup> (García, Morató & Bayona, 2004).

Aunque la depuración de carga orgánica en aguas residuales mediante el uso de humedales artificiales es una alternativa viable respecto a costos de operación, mantenimiento y eficiencia; la literatura reporta remociones por encima del 90% en DBO<sub>5</sub> y SST, 80% en DQO, 30% P<sub>T</sub> y 40% N<sub>KT</sub> con un tiempo de retención hidráulico mayores a siete días (TRH > 7 días); (Vymazal, 2011). Lo que traduce a diseñar estos sistemas con un gran área superficial y ahí la mayor desventaja que presenta este método natural. De ahí, que se busquen modificaciones u optimizaciones a los humedales artificiales convencionales; con el fin de aumentar la eficiencia en la remoción, reduciendo o conservando las mismas dimensiones. Actualmente conocidos como humedales de alta tasa.



## **2.4. Fito-remediación**

En los últimos años, han surgido tecnologías alternativas basadas en el uso de plantas, que reciben el nombre de fito-remediación (phyto=planta y remediación=mal por corregir). Su definición es el uso de plantas para eliminar, reducir o degradar los contaminantes del entorno y/o su peligrosidad (Carpena & Bernal, 2007).

La fito-remediación es el conjunto de tecnologías utilizadas en la eliminación de diferentes contaminantes o compuestos presentes en el ambiente y a partir de procesos bioquímicos llevados por plantas y diferentes microorganismos asociados a su raíz. Esta tecnología utiliza material vegetal (plantas) para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes de suelos, sedimentos, agua y aire. (Delgadillo, 2010)

La desintoxicación de contaminantes por medio de la fito-remediación se da a través de diversos mecanismos de las plantas, actualmente, se han definido seis procesos básicos en los que las plantas pueden contribuir a la recuperación de suelos, sedimentos y aguas contaminadas. (Ortega, Benavides, Arteaga, & Zermeño, 2007).

Los humedales artificiales son unidades de fito-remediación que dependen tanto de la actividad microbiana, como de procesos biológicos, físicos y químicos que contribuyen en la depuración de las aguas contaminadas, estos procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el material granular, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna (García & Corzo, 2008).

**2.4.1. Fito-acumulación.** Hace referencia a la toma o captura de los contaminantes criterios por parte de la planta, específicamente por las raíces que está en contacto directo con el agua residual, incorporando los contaminantes en sus tejidos. En este proceso la planta absorbe y/o

concentra el compuesto contaminante en sus partes cosechables: hojas, tallos y flores (Carpena & Bernal, 2007).

**2.4.2. Fito-degradación o fito-transformación.** En este proceso la planta es la encargada de degradar o transformar (parcial o completamente) los contaminantes orgánicos presentes en el agua residual en compuestos menos tóxicos o inocuos, mediante reacciones enzimáticas que se llevan a cabo entre plantas y microorganismos. Algunos contaminantes son asimilados por la planta, los que no, son almacenados en la vacuolas o fijados a estructuras celulares como la lignina de las plantas. (Delgadillo, 2010).

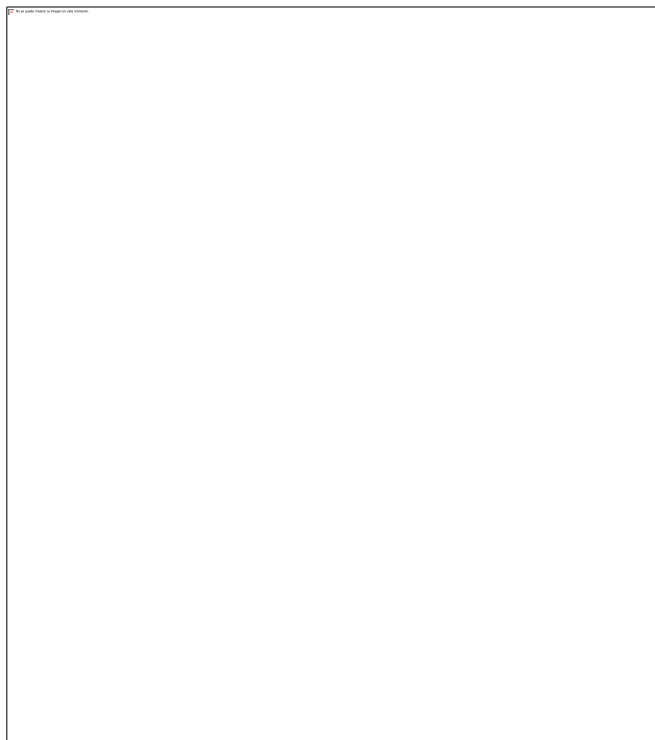
**2.4.3. Fito-estimulación.** Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos) encargados de remover y/o eliminar contaminantes criterio (Mentaberry, 2011). Este proceso se ve favorecido gracias a las diferentes proteínas y enzimas que producen los exudados de carbono, energía, nutrientes, azúcares, amino ácidos y otros compuestos que garantizan las condiciones necesarias para el establecimiento microbiano (Van Deeps, 2006). Comúnmente, es utilizado en la remediación de contaminantes orgánicos hidrofóbicos (PCBs, PAHs e hidrocarburos derivados del petróleo), que no pueden ser incorporados por la planta, pero que pueden ser degradados por los microorganismos asociados en las raíces de la misma (Mentaberry, 2011).

**2.4.4. Fito-volatización.** Este mecanismo se produce a partir de la absorción de los contaminantes por parte de la planta; los contaminantes se metabolizan y son transportados desde su raíz a sus partes superiores y posteriormente son liberados en formas volátiles menos tóxicas, esta liberación se produce mediante la transpiración (Carpena & Bernal, 2007). Puede utilizarse para compuestos orgánicos (TCE: Tricloroetileno y MTBE: éter metil tert-butílico) y para algunos compuestos inorgánicos (Se y Hg). (Mentaberry, 2011).

**2.4.5. Fito-estabilización.** Se refiere al uso de plantas identificadas como tolerantes a los compuestos, para la reducción de diferentes contaminantes en el medio, inmovilizándolos en el suelo y agua a través de las raíces y evitar el contacto con napas de aguas subterráneas; este mecanismo se aplica a metales pesados, puesto que, se hace necesario inmovilizar el compuesto, debido a su difícil biodegradación (Van Deeps, 2006; Mentaberry, 2011).

**2.4.6. Rizo-filtración.** Se realiza a través del uso de las raíces de las plantas para adsorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados. Estas plantas deben tener alta tasa de crecimiento y área superficial. (Núñez, Meas, Ortega, & Olgún, 2004). Se utiliza esta técnica para un sinnúmero de contaminantes inorgánicos (metales, percloratos, cianuro, nitratos y fosfatos) y contaminantes orgánicos (explosivos y herbicidas) (Mentaberry, 2011).

En la figura 4, se muestran los procesos de fito-remediación mencionados anteriormente.



*Figura 4.* Estrategias de fito-remediación.

Fuente: Tomado de Favas, Pratas, Varun, D'Souza & Paul (2014)

## 2.5. Vegetación en los Humedales

El material vegetal juega un papel importante dentro de los humedales artificiales; puesto que contribuyen en la remoción, adsorción y precipitación de nutrientes y contaminantes presentes en el agua residual a través del tallo, raíces y rizomas. Estas plantas, deben ser tolerables a altas cargas orgánicas, poseer un gran sistema de raíces para proporcionar sustrato a bacterias adheridas y contribuir a la oxigenación de las zonas adyacentes a los rizomas y tener alta biomasa con el fin de aislar el sistema en época de invierno en regiones frías y templadas y para eliminación de nutrientes a través de la cosecha. (García, Morató & Bayona, 2004).

Las plantas contribuyen de muchas maneras en el tratamiento del agua residual; de las que se destacan: estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo, promueven velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen o sedimenten, toman el carbono y demás nutrientes y los incorporan a los tejidos de la planta, transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos, proporciona espacios para la fijación de microorganismos, entre otros. (Bondía, 2014), favorece la conductividad hidráulica, las raíces sirven como soporte para la biopelícula junto al material granular, aireación de la rizósfera que permite el transporte de oxígeno en el sistema, liberación de diferentes sustancias entre ellas antibióticos; para el control del plagas. (Bondía, 2014; Romero, 2008; García & Corzo, 2008; Lara, 1999).

Diferentes especies se han estudiado, para tratar varios tipos de aguas residuales y así, minimizar la contaminación de cuerpos hídricos, suelo, fauna y flora. Torres & Vásquez en 2010 y Prasad en 2004, realizan una compilación de las principales plantas utilizadas en fito-remediación y su potencial en la eliminación de contaminantes criterios de aguas residuales industriales.

En la Tabla 1, se compilan especies vegetales tropicales utilizadas en la remoción de diferentes contaminantes criterios.

*Tabla 1. Plantas usadas en fito-remediación*

<i>Especie vegetal</i>	<i>Papel en fito-remediación</i>
<i>Alyssum sp</i>	Acumula Níquel
<i>Amaranthus retroflexus</i>	Acumula Cesio
<i>Armoracia rustica</i>	Retirar metales pesados
<i>Armeria marítima</i>	Acumula Plomo
<i>Asthenatherum forsskalii</i>	Remediación de hidrocarburos de petróleo
<i>Altriplex prostrata</i>	Retira sal del suelo
<i>Azolla pinnata</i>	Acumula plomo, cobre, cadmio y hierro
<i>Brassica canola</i>	Remedia suelos contaminados con Cesio
<i>Brassica juncea,</i>	Hiperacumuladora de metales
<i>Cannabis sativa</i>	Hiperacumuladora de metales
<i>Cardamonopsis hallerii</i>	Hiperacumuladora de metales
<i>Ceratophyllum demersum</i>	Acumula metales, Retira TNT
<i>Cyperus conglomeratus</i>	Remediación e hidrocarburos de petróleo
<i>Datura innoxia</i>	Acumula Bario
<i>Eucalyptus spp.</i>	Retira sodio y arsénico
<i>Eichornia crassipes</i>	Acumula plomo, cobre, cadmio e hierro
<i>Hydrocotyle umbellata</i>	Acumula plomo, cobre, cadmio e hierro
<i>Thypha spp.</i>	Volatilización del Selenio
<i>Cyperus conglomerats</i>	Remediación de hidrocarburos de petróleo
<i>Heliconia Psittacorum</i>	Eliminación de materia orgánica, Nitrógeno y Fósforo
<i>Lemna minor</i>	Acumula Plomo, Cobre, Cadmio Y hierro
<i>Phragmites australis</i>	Tratamiento de contaminantes orgánicos

**Nota.** Modificada de Prassad, 2004 y Torres & Vásquez, 2010

Aunque existen estudios que comparan sistemas plantados y no plantados en humedales para el tratamiento de aguas residuales; el uso de la vegetación en las unidades no es unánime, pero la mayoría de estudios han demostrado que los sistemas que utilizan macrófitas logran una mayor eficiencia en la remoción de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Fósforo (P), Nitrógeno (N). y demás componentes xenobióticos. Dicha eficiencia se ve reflejada a medida que el humedal se estabiliza. A continuación, se describen brevemente las principales especies vegetales usadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas mediante la utilización de humedales artificiales.

**2.5.1. *Eichhornia crassipes*.** Pertenece a la familia Pontederiaceae, del grupo de las monocotiledóneas, ampliamente distribuido en el geotrópico; es considerada como una macrófita en la que sus raíces cuelgan por sobre el agua. Sus hojas forman roseta, sin hojas sumergidas y con pedúnculo largo (Valera, 2001). Esta planta crece en una gran variedad de humedales, pantanos y prefiere las aguas enriquecidas en nutrientes, sin embargo, puede tolerar un rango amplio de temperatura (1 a 40 °C) y pH con tendencia neutra (6 a 8 unidades) (Malik, 2007). Se extiende con gran rapidez en cuerpos hídricos lenticos y en ocasiones es considerada como plaga. Sin embargo, esta planta es utilizada como materia prima en la fabricación de artesanías, pulpa para la producción de papel, alimento para animales, en procesos de compostaje y en el tratamiento de las aguas residuales mediante sistemas de biorremediación o como especie bioindicadora de contaminación hídrica (Valderrama & Hernández, 2005; Gunnarsson & Petersen, 2007).

Por ser una planta acuática con raíces que oscilan entre 0,50 – 1,00 metros de longitud se utilizan en humedales artificiales superficiales, lagunas aerobias, facultativas y anaerobias. En figura 5, se muestra *Eichhornia crassipes*. (Buchón de agua o Jacinto de agua)

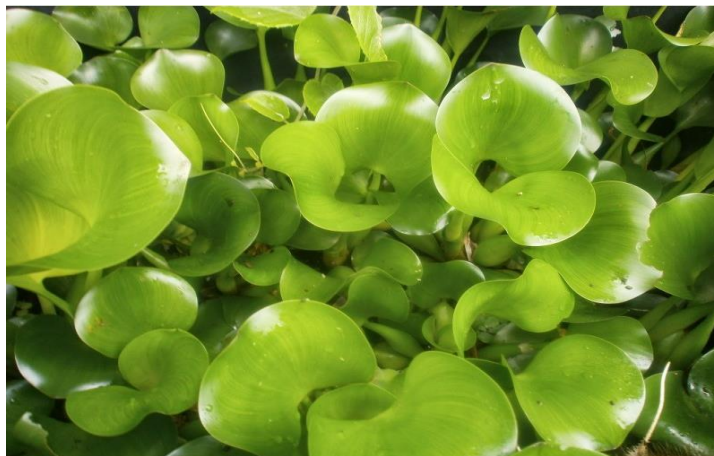


Figura 5. *Eichhornia crassipes*

Fuente: <https://plantcol.com.co/plantas-flotantes/172-buchon-de-agua-planta-flotante.html>

**2.5.2. *Cyperus papyrus*.** Conocidos popularmente como “papiro”, pertenecen a la familia Cyperaceae. Son especies con altura considerable (de 0,5 a 1,5 metros), son plantas que prosperan adecuadamente entre 6 y 8,5 unidades de pH, toleran temperaturas de 20 a 33 °C. Debido a la facilidad en su reproducción (ya sean por medio de sus rizomas y/o por producción de semillas), profundidad radical hasta de 0,4 metros, además, de soportar altos niveles de insolación y su adaptabilidad a suelos arenosos son muy utilizados en procesos de fitorremediación. (Hammel, Grayum, Herrera & Zamora, 2003; Pérez, Alfaro, Sasa & Agüero, 2013)

Este material vegetal se utiliza tanto para sistemas parcialmente inundados (humedales sub-superficiales de flujo horizontal o vertical) o completamente inundados (humedales artificiales superficiales, lagunas de oxidación, facultativas y anaerobias). Actualmente, junto con el *Phragmites Australis* el *Cyperus Papyrus* es la especie vegetal más utilizada en

biorremediación debido al potencial en la remoción de contaminantes criterios (metales pesados) y su gran adaptabilidad a diferentes suelos y aguas contaminadas. En figura 6 se muestra *Cyperus Papyrus*.



Figura 6. *Cyperus Papyrus*

Fuente: <https://www.elnougarden.com/tienda/plantas/plantas-acuaticas/papiro-cyperus-papyrus>

**2.5.3. *Phragmites australis*.** Llamado comúnmente como “carrizo”, “carrillo”, “caña de río”, o “cañavera”, pertenecen a la familia de las Gramíneas o Poaceae, es una planta perenne. Esta especie vegetal llega a alcanzar alturas de 1,5 a 4 m, 2 cm de diámetro y profundidad radical cercana al metro de longitud, presenta una gran inflorescencia al final del tallo, suelen habitar en terrenos húmedos, prosperan en climas templados y cálidos 20-24°C, se adapta y se puede desarrollar sin problema en aguas residuales con pH ácidas o neutras entre (Celis, Junod & Sandoval, 2005; García, 2013).

El *phragmites australis* es una de las especies vegetales más utilizadas en procesos de biorremediación y en el tratamiento de aguas residuales industriales, agrícolas y domésticas; gracias a su fácil consecución, su efectividad y adaptabilidad a diferentes tipos de contaminantes.



Son utilizadas principalmente en humedales artificiales superficiales y subsuperficiales. En figura 7 se muestra *Phragmites Australis*.



Figura 7. *Phragmites Australis*

Fuente: <http://science.halleyhosting.com/nature/basin/poaceae/phragmites/australis.html>

**2.5.4. *Calathea lutea*.** Conocida popularmente como bijao, bijau, bijahua o cachibú, es una especie perteneciente a la familia de las marantáceas. Originaria de toda la zona tropical americana, donde crece en los bosques húmedos en zonas pantanosas a lo largo de los ríos a baja y media altitud. (Betancur, Zuluaga, Clavijo, Cordero & Salinas. 2007).

La planta alcanza hasta de 3 m de altura, es similar al platanillo, posee múltiples tallos que nacen desde su base (cepa). Las hojas miden entre los 50 cm y los 100 cm de largo y entre 25 cm y los 60 cm de ancho, su envés de color blanco, su ápice tiene forma redonda y termina en una pequeña punta. Las flores son de colores amarillos o rojas, se encuentran agrupadas en inflorescencias y tienen forma de espiga; estas se localizan en el pedúnculo. Los frutos son capsulas alargadas con forma ovoide, son de color marrón rojizo y cada uno contiene 3 semillas, las raíces alcanzan hasta 0,6 metros (Mahecha *et al.* 2004).

En Colombia; se encuentran en sectores cálidos y cafeteros de las cordilleras, se cultiva en zonas húmedas del valle de río Magdalena junto a solares, quebradas y espacios pantanosos del país. Crecen entre los 0 y los 1600 msnm (Mahecha *et al.* 2004). En figura 8 se muestra

*Calathea lutea*



Figura 8. *Calathea lutea*.

Fuente: Tomado de: <http://swbiodiversity.org/seinet/taxa/index.php?taxon=75524>

## 2.6. Material Granular o de Soporte en los Humedales

El material granular o de soporte juega un papel importante dentro de los humedales artificiales, puesto que, aquí ocurren múltiples procesos importantes en la descontaminación de las aguas contaminadas como la retención y sedimentación de los sólidos suspendidos, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de nutrientes y la inactivación de los microorganismos patógenos (García & Corzo, 2008). Además, de servir como hábitat a diferentes microorganismos responsables en los procesos de nitrificación y desnitrificación y fundamentales en la dinámica del fósforo.

El sustrato o material granular sirve de soporte a la vegetación y permite la fijación de la población microbiana encargada de participar en la mayoría de los procesos de eliminación de los contaminantes presentes. (Salas, Pidre & Sánchez, 2007)

El tamaño del medio de soporte influye en la dinámica y comportamiento del agua dentro de sistema, pues si están constituidos principalmente por limos o arcillas, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración del agua a tratar, pero este medio conlleva a una elevada hidráulica y por ello, se requiere de velocidades de flujo muy bajas, limitando así, el caudal (Arias, 2004). Caso contrario sucede si el lecho está formado por gravas y arenas, pues disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del humedal, pero aumenta considerablemente la conductividad hidráulica y los espacios dejados por el material de soporte es aprovechado por colonias de microorganismos que contribuyen en la eliminación de contaminantes (Delgadillo, 2010).

La grava de diferentes tamaños es el medio de soporte más utilizado en Estados Unidos y Europa, aunque también se utiliza roca triturada, arena y suelo. (US – EPA, 2000). Para Lara (1999), los sustratos en los humedales artificiales pueden ser: suelo, arena, grava, roca o combinaciones de los mismos y juegan un papel fundamental, puesto que, contribuyen enormemente a crear condiciones necesarias para el tratamiento y eliminación de carga orgánica contaminante y demás que albergan a muchos de los organismos vivientes en el humedal. El sustrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes a través de procesos físicos (adsorción, filtración, decantación).

La vegetación como lo restos de la misma contribuyen en el aumento de la cantidad de materia orgánica dentro del sistema, lo que da a lugar al intercambio de materia, fijación de

microorganismos, y es un reservorio de carbono; que es la fuente de energía para las más importantes reacciones biológicas dentro del humedal (Delgadillo, 2010).

Las características físicas y químicas del suelo y otros sustratos se alteran cuando se inundan. En un sustrato saturado, el agua reemplaza los gases atmosféricos del material granular y los microorganismos fijados dentro del sistema consumen el oxígeno disponible y aunque se presenta dilución de oxígeno de la atmósfera puede darse lugar a la formación de un sustrato anóxico, lo cual es indispensable en la remoción de contaminantes como el nitrógeno. (Cevallos, 2009).

Lara (1999), establece valores estimados de porosidad ( $\eta$ ) para los diferentes sustratos utilizados comúnmente como soporte en humedales artificiales. En tabla 2 se muestran los valores de porosidad según el tamaño del sustrato.

*Tabla 2. Valores estimados de porosidad para el material de sustrato en el humedal*

<i>Tipo Material</i>	<i>Tamaño efectivo (mm)</i>	<i>Porosidad, <math>\eta</math> (%)</i>
<i>Arena gruesa</i>	2	28 – 32
<i>Arena gravosa</i>	8	30 – 35
<i>Grava fina</i>	16	35 – 38
<i>Grava media</i>	32	36 – 40
<i>Roca gruesa</i>	128	38 – 45

**Nota.** Modificada de Lara, 1999

## **2.7. Microorganismos.**

Los procesos de transformación que ocurren en los humedales artificiales y demás sistemas de bio-remediación (lagunas, filtros, entre otros), están ampliamente regulados por los microorganismos y su metabolismo (Faulwetter et al., 2009). Las bacterias, levaduras, hongos y protozoarios que se establecen en el material de sustrato y las raíces de las plantas son los

encargados de la eliminación de nutrientes y contaminantes presentes en las aguas residuales. Rodríguez (2008), resume las siguientes actividades microbianas ocurridas dentro de los humedales: Transformación de un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles, Alteración las condiciones de potencial REDOX del sustrato y El reciclaje de nutrientes; algunas de estas transformaciones microbianas son aerobias (en presencia de oxígeno libre), otras en cambio, son anaeróbicas (en ausencia de oxígeno libre). Sin embargo, muchas especies bacterianas son facultativas, es decir, son capaces de metabolizar contaminantes en condiciones aeróbicas y anaeróbicas en respuesta a los cambios en las condiciones ambientales del sistema (Delgadillo, 2010).

Las poblaciones microbianas fijadas dentro del sistema tienen la facilidad de adaptarse a diferentes tipos de agua residual, los microorganismos prosperan cuando existen condiciones favorables y cuando las condiciones ambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y pueden permanecer inactivos durante años. (Rodríguez, 2008).

## **2.8. Generalidades del Diseño de los Humedales.**

Para el diseño y escogencia del tipo de humedal artificial, es necesario tener en cuenta una serie de factores que influyen en la eficiencia de remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales a tratar; en las que se destacan: tipo o especie de material vegetal y granular a utilizar, características climatológicas de la zona, características del agua residual a tratar y parámetros fisicoquímicos a eliminar, volumen o caudal a tratar, Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), área superficial destinada para la construcción de las unidades de tratamiento, componente estético, entre otras.

En tabla 3 se muestran los principales procesos físicos, químicos y biológicos que suceden dentro de los humedales artificiales y que contribuyen en la depuración de contaminantes presentes en las aguas residuales.

*Tabla 3. Principales procesos de depuración en humedales artificiales*

<i>Contaminante</i>	<i>HAFS</i>	<i>HAFSSH</i>	<i>HAFSSV</i>
<i>Materia orgánica</i>	Conversión biológica, Adsorción y Sedimentación.	Conversión biológica, Adsorción, Filtración y Sedimentación.	Conversión biológica, Adsorción, Filtración y Sedimentación.
<i>M. suspensión</i>	Filtración, Sedimentación.	Filtración, Sedimentación.	Filtración, Sedimentación.
<i>Nitrógeno</i>	Nitrificación – Desnitrificación, Asimilación y Volatilización	Nitrificación – Desnitrificación, Asimilación y Volatilización	Nitrificación - Desnitrificación Asimilación y Volatilización
<i>Fósforo</i>	Sedimentación, Asimilación plantas y microorganismos.	Filtración, Sedimentación, Adsorción. Asimilación por plantas y microorganismos	Filtración, Sedimentación, Adsorción. Asimilación plantas y microorganismos
<i>Metales Pesados</i>	Adsorción de las plantas Acumulación, Degradación, Sedimentación.	Acumulación y Degradación por la planta y biopelícula del sustrato, Sedimentación.	Acumulación y Degradación por la planta y biopelícula del sustrato, Sedimentación.
<i>Patógenos</i>	Muerte natural, Depredación, Radiación UV, Sedimentación, Secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.	Muerte natural, Depredación, Sedimentación, Secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.	Muerte natural, Depredación, Sedimentación, Secreción de antibióticos de las raíces de las plantas

**Nota.** Modificada de Crites & Tchobanoglous, 1998, Tomado de Arias & Brix, 2003.

En la figura 9, Lara (1999) muestra gráficamente los diferentes procesos llevados a cabo en un humedal y que permiten la depuración y/o tratamiento del agua residual, gracias a la acción de las plantas y microorganismos.

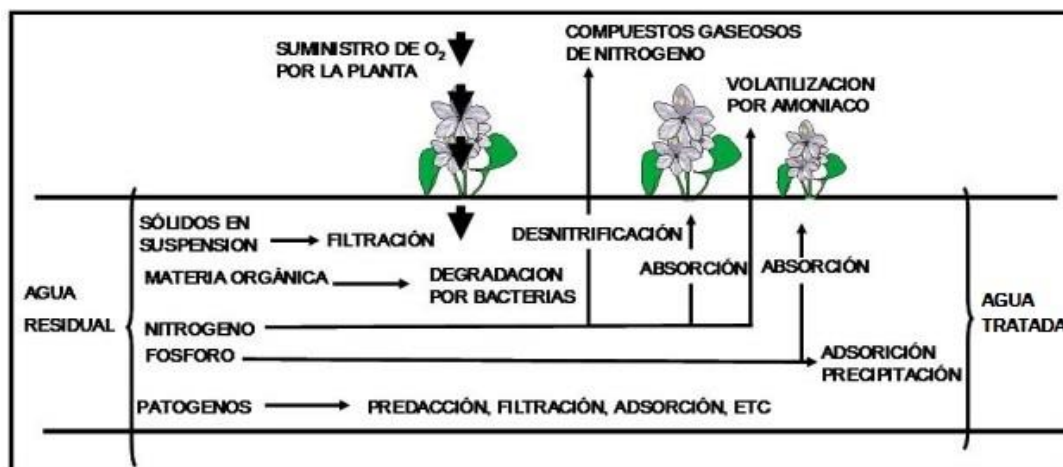


Figura 9. Procesos llevados a cabo en un humedal  
Fuente: Modificada de Lara, (1999); Tomado de López (2009)

## 2.9. Humedales a Escala Regional

El Estudio y comportamiento de los Humedales Artificiales para la remoción de contaminantes en diferentes tipos de aguas residuales se han documentado a nivel mundial, sin embargo, para América Latina y en especial para países de América del Sur esta tecnología está captando adeptos, pues son sistemas eficientes y capaces de tratar cualquier tipo de residuo líquido.

En el ámbito nacional, la implementación de estos sistemas naturales va en crecimiento, se reportan publicaciones sobre el tema, entre los que se incluyen las investigaciones realizadas en la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) que implementa humedales artificiales como tratamiento secundario dentro de su campus universitario con Guadua (*Angustifolia kunth*), en la Universidad del Valle con *Phragmites australis*, *Heliconia psittacorum*, la Universidad del Cauca experimentando con humedales en el tratamiento de lixiviados y aguas producto de centro

de sacrificio animal, entre otras. Obteniendo remociones eficientes de materia orgánica y nutrientes asociados a aguas residuales domésticas y agrícolas.

En la ciudad de Bogotá, la Universidad Nacional estudió y patentó un prototipo de humedal artificial de configuración simple y eficiente denominado “HUMEDAR – I ®” cuya configuración involucra un reactor anaerobio de compartimientos paralelos de flujo a pistón seguido de un humedal artificial de alta tasa con macrófitas nativas. Dicho prototipo, contempla la utilización de plástico esfero elipsoidal de múltiples planos como material de soporte y cuenta con una porosidad del 94%, (Sanabria, 2009).

El “HUMEDAR – I ®” ya se encuentra funcionando en diferentes poblaciones e instituciones colombianas y se ha evaluado su eficiencia en la remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas en diferentes condiciones topográficas y climáticas. Dicha tecnología fue instalada en la locación petrolera de Caño Gandul en Casanare y se lograron eficiencias de remoción de la  $DBO_5$  para el humedal en promedio un 45%, de SST obtuvo una eficiencia de remoción en promedio del 92.5 % con un tiempo de retención hidráulico de 2.77 días (Otálora, 2011).

#### **2.10. Remoción de Cromo con Humedales**

Malaver (2017) evaluó la eficiencia en remoción de Cromo III y DQO del agua residual de una curtiembre en la ciudad de Bogotá, utilizando como material vegetal lenteja de agua (*lemna minor*) y con un tiempo de retención hidráulico de 18 horas, obtuvo resultados de eliminación del 97, 11% para DQO y del 99,91% para Cr III.

Cabezas & Cedeño (2015) construyeron a escala laboratorio dos humedales en paralelo utilizando como material vegetal espadañas (*Typha sp*) y junco (*Juncus Effusus Scirpus*) para evaluar a remoción de Cromo total de un agua residual producto de las actividades de



curtiembre, reportando remociones promedio de 87% y 91% respectivamente, pero establecen la necesidad de evaluar la eficiencia en la remoción de las diferentes especies del Cromo, haciendo énfasis en el Cromo VI.

Álvarez et al, (2004) estudiaron la remoción de Cromo hexavalente con lirio acuático (*Eichornea crassipes*) como sistema secundario de tratamiento, aunque reportaron remociones cercanas al 75% del metal pesado, no se logró llegar a las concentraciones admitidas por la normatividad mexicana y se concluyó que se debía reducir primero los compuestos salinos, para asegurar mayor eficiencia con los procesos de biorremediación.

Cortes-Sandoval et al (2014) evaluó el desempeño de humedales artificiales sub-superficiales sembrados con especies nativas tropicales (*Gynerium sagittatum*, *Colocasia esculenta* y *Heliconia psittacorum*) en la eliminación de Cr (VI) de lixiviado de relleno sanitario San Pedro (Valle del Cauca) y para un tiempo de retención del agua residual de 7 días, obteniendo remociones del 72,4%.

Peña-Salamanca et al, (2013) reportaron que la Heliconia (*Heliconia Psittacorum*) ha mostrado resultados muy alentadores, mencionando a esta especie como una planta acumuladora, con gran desempeño en la eliminación de metales pesados (Cd, Pb, Hg y Cr (VI)). Luego que una solución contaminada con múltiples a travesaran los humedales con este material vegetal. Se registraron porcentajes de remoción cercanas al 90% de Cr VI y no se presentaron procesos de antagonismo o inhibición de la planta. Tampoco, no se evidenciaron signos de daño tales como: hojas amarillas o clorosis.

Sayago, (2016) realizó un estudio a escala piloto y evaluó la remoción de Cr VI y otros parámetros fisicoquímicos de un agua residual producto de actividades de curtiembre. A través de humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal – HAFSS- sembrados con jacinto de

agua (*Eichornea crassipes*) y con un tiempo de retención hidráulico de 72 horas. Arrojó porcentajes promedios de remoción cercanos al 60%.

### 3. Planteamiento del Problema de Investigación

El uso de Humedales Artificiales como unidades de fitorremediación y su implementación en sectores como el industrial y el doméstico, están condicionadas principalmente a los siguientes factores limitantes: requieren de Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) altos y de extensas áreas superficiales, que contrapesan con sus beneficios y por ende, vuelven poco atractivos a estos sistemas.

Asimismo, se deben tener en consideración las principales fallas que se cometen en la construcción de los humedales y que pueden inducir en la disminución de la remoción de contaminantes criterios: Un gradiente hidráulico (pendiente) del humedal mayor al 1% (Lahora Cano, 2003) y que el sistema reciba volúmenes mayores al Caudal de diseño (Lahora Cano, 2003; García & Corzo, 2008): pues en ambos casos induce en la disminución del TRH.

Adicionalmente en Humedales artificiales con gran área superficial se crean espacios pasivos, sitios por los que el agua residual no circula y que son no provechosos para el tratamiento del líquido. Por ello, no es recomendable la realización de un solo gran humedal artificial para tratar grandes volúmenes de agua, sino, varios humedales en serie o en paralelo.

Estas limitaciones fueron analizadas y tomadas en cuenta para el diseño del Sistema de Fito-remediación modificado, y para ello, se establecieron las siguientes anotaciones:

- Por la ubicación alternada de las laminillas; el agua residual es obligada a recorrer todo el humedal y por ende estará en mayor contacto y por más tiempo con las raíces de las plántulas, bio-película y filtro de grava que son los encargados de la remoción de materia orgánica y compuestos xenobióticos.
- En áreas superficiales pequeñas es más sencillo controlar el gradiente hidráulico.

- No se crean espacios pasivos; luego el 100% del área superficial destinada para el Humedal es aprovechado en el tratamiento del agua residual.

Por ende, sí es posible mejorar la eficiencia en la remoción de carga orgánica, de nutrientes, compuestos químicos y nocivos del ambiente presentes en el agua residual mediante la utilización de láminas alternadas dentro de un Humedal Artificial De Flujo Sub-Superficial y así, reducir el área superficial utilizada en la construcción de este tipo de sistemas.

### **3.1. Pregunta de Investigación**

- ¿Las trampas de contacto ubicadas dentro del humedal artificial modificado contribuyen a una mayor eficiencia en la remoción de Cromo (VI)? Para ello, se establecieron las siguientes hipótesis:

**Ho:** Las trampas de contacto dispuestas en el sistema contribuyen a aumentar la eficiencia de remoción del Cromo hexavalente presente en el agua residual.

**Ha:** Las trampas de contacto dispuestas en el sistema no contribuyen a aumentar la eficiencia de remoción del Cromo hexavalente presentes en el agua residual.

#### **4. Justificación**

Con las trampas de contacto instaladas dentro del sistema experimental, se podría cuestionar una de las principales desventajas en la utilización de los Humedales Artificiales de Flujo Sub-Superficial (HAFSS) en Industrias, Municipios y/o Ciudades en donde la construcción de tipo horizontal refleja un reto para arquitectos e ingenieros. Además, se quiere demostrar que estas unidades son eficientes en la remoción de contaminantes, a condiciones ambientales propias del departamento del Huila.

Con la implementación a escala local, regional y nacional de estos tipos de sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales, su facilidad en construcción y mantenimiento, se impactaría positivamente la calidad de las aguas que recorren el país, se aumentaría la cobertura respecto al tratamiento de aguas residuales tratadas, se facilitaría la potabilización aguas abajo de las descargas de AR, se disminuiría drásticamente las enfermedades causadas por el consumo de agua contaminadas y se eliminaría miles de kilogramos (kg) de metales pesados y químicos que en la actualidad son vertidos a las fuentes hídricas.

## 5. Objetivos

### 5.1. General

- Evaluar a escala laboratorio, la remoción de Cromo Hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ) de un humedal artificial modificado con las de un humedal artificial convencional y un blanco, utilizando como material vegetal *Calathea Lutea*.

### 5.2. Específicos

- Diseñar y construir a escala laboratorio las tres unidades experimentales propuestas
- Comparar la eficiencia en remoción de Cromo Hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ) de las tres unidades propuestas, utilizando agua residual preparada en laboratorio y *Calathea lutea* como material vegetal.
- Determinar la eficiencia en remoción de DQO, Nitratos y Fosfatos en las unidades propuestas como una forma de evaluar el normal funcionamiento de los sistemas.

## 6. Metodología

### 6.1. Localización

El proyecto se desarrolló en la Villa de San Sebastián de la Plata; municipio de Colombia ubicado en el departamento del Huila, con una población de 62.722 habitantes (censo DANE proyección 2015). Se encuentra a una distancia 122 km de la ciudad de Neiva, 147 km de la ciudad de Popayán, 210 km de la población de San Agustín y 436 km de Bogotá D.C.

El municipio se encuentra localizado en la parte suroccidental del departamento del Huila; en las estribaciones de la Cordillera Central, geográficamente se encuentra situado en las coordenadas 2°23'00'' de Latitud Norte y 75° 53'00'' de Longitud Oeste. Con altura de 1050 m.s.n.m., temperatura media de 23 °C. Y precipitación promedio anual de 2092 mm. . En la figura 10, se muestra al Municipio de La Plata Huila a escala departamental y nacional.

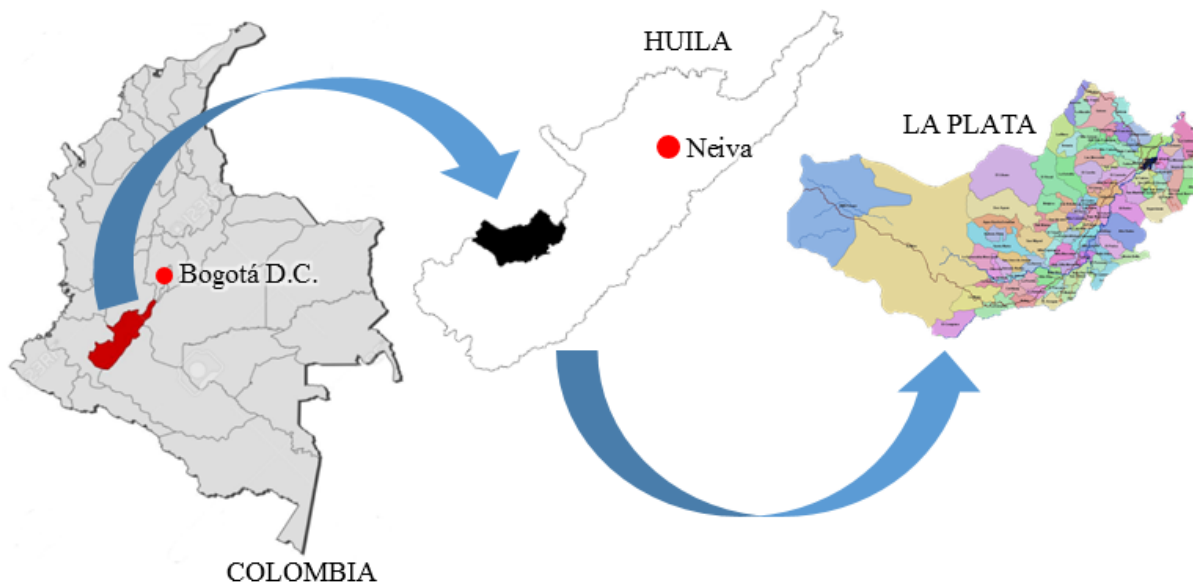


Figura 10. La Plata Huila a nivel nacional

Fuente: [http://www.laplata-huila.gov.co/mapas\\_municipio.shtml?apc=bcxx-1-&x=1365839](http://www.laplata-huila.gov.co/mapas_municipio.shtml?apc=bcxx-1-&x=1365839)

## 6.2. Instalación del Centro de Experimentación

Las unidades de tratamiento experimentales (HAFSS) se ubicaron en la carrera 6 No. 6-42 del Barrio Páez; con coordenadas planas X: 756231, Y: 798215 y una altitud de 944 m.s.n.m. Para dicha instalación; se realizó una construcción tipo invernadero de dimensiones: 2,10 metros de ancho por 3,00 metros de largo (6, 3 m<sup>2</sup> área superficial) y 3,4 metros de altura.

Los costados del invernadero se cubrieron con tela verde de cerramiento, para aislar los sistemas estudiados de agentes externos que pudiesen interferir dentro del normal funcionamiento (precipitación, plagas, animales, entre otros); la parte superior o techo de la construcción, se ubicaron láminas de zinc transparentes junto con poli-sombra de color negro al 80%, con el fin de permitir la entrada de luz solar a los montajes; pero también poder limitar o controlar que dicha radiación no afectara el material vegetal utilizado. En la figura 11, se muestra tanto la parte externa como la interna de invernadero destinado para la ejecución del proyecto.



*Figura 11.* Construcción e Instalación del montaje de laboratorio



### 6.3. Componentes de los Humedales

**6.3.1. Material Vegetal.** Se consideró la utilización de *Calathea lutea* como material vegetal para el proyecto de investigación; debido a que es una planta promisoría en procesos de fito-remediación; requiere suelos ricos en materia orgánica, pantanosos, aireados y bien drenados; que son condiciones que predominan en humedales artificiales de flujo sub-superficial de tipo horizontal. Además, en la actualidad no se tiene conocimiento de investigaciones realizadas con este material vegetal en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. La implementación de este material vegetal en sistemas alternativos establece gran potencial en la experimentación con especies nuevas a las ya estudiadas y conocidas. La consecución de dicho material vegetal se realizó en zona rural del Municipio de La Plata Huila, (Vereda Segovianas a  $\approx 10$  km del casco urbano). En Figura 12, se muestra el material vegetal utilizado dentro del montaje de laboratorio.



Figura 12. *Calathea lutea*

**6.3.2. Adaptación y Siembra del Material Vegetal.** Luego de la recolección del material vegetal y por un periodo de treinta (30) días se sometió la *Calathea lutea* a un proceso de adaptación, tanto a las condiciones climáticas de la zona objeto de estudio, como al medio donde se iban a instalar (sistemas experimentales HAFSS). Para ello, se realizó la siembra de las plantas a diferentes medios y sustratos por periodos determinados y así, paulatinamente ir adaptando al material vegetal a condiciones netamente acuosas. Los sustratos, concentraciones y tiempos utilizados, se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Adaptación del material vegetal

<i>Tierra</i>	<i>Porcentaje de sustrato (%)</i>			<i>Tiempo (días)</i>	<i>Observación</i>
	<i>Agua</i>	<i>Material granular</i>			
100	-	-		5	Condición inicial
75	25	-		5	
50	50	-		5	
25	50	25		5	
0	50	50		5	
0	25	75		5	Condición final

Y en la figura 13, se muestra el proceso de adaptación de la *Calathea lutea* a las condiciones objeto de estudio (medio acuoso y al material granular).



Figura 13. Adaptación Material Vegetal.

Posterior al proceso de adaptación del material vegetal, se realizó la siembra de la *Calathea Lutea* a dos de los tres sistemas evaluados. Se tuvo en cuenta la altura de la lámina de agua ( $y=0,20$  m) en la siembra de la planta; pues el objetivo era ubicar la raíz por debajo de dicha altura y así, tuviese contacto directo con el agua residual. En la figura 14 se muestran los sistemas ya plantados.



Figura 14. Siembra de *Calathea Lutea*

**6.3.3. Material de Soporte (Polipropileno Alta Densidad).** El polipropileno de alta densidad (PP) o tapas de empaques de gaseosas PET como material granular y/o de soporte posee las siguientes ventajas respecto a otros materiales utilizados convencionalmente para este tipo de sistemas (grava, arena o roca triturada) y estas son: Resistente a la corrosión y al paso del tiempo; mayor valor de la porosidad que en teoría, conlleva a un mayor tiempo de retención hidráulico; fácil consecución; superficie corrugada que facilita la adhesión de microorganismos encargados de remover gran porcentaje de compuestos orgánicos e inorgánicos presente en las aguas residuales, son livianos y facilitan el transporte de las unidades experimentales, evitando posibles daños a las estructuras elaboradas en vidrio, su color claro (blanco); facilita la observación de las diferentes colonias microbianas que pueden establecerse dentro de la

superficie del material granular. En figura 15, se muestra el material de soporte utilizado dentro de la experimentación.



Figura 15. Polipropileno de alta densidad

**6.3.4. Fijación de Microorganismos.** Para la fijación de los microorganismos y conformación de la biopelícula dentro del material de sustrato, se preparó una mezcla de 27 Litros de agua residual sintética tal como propone Sánchez & Lozano (2012); a ello, se adicionó 3 Litros de inóculo microbial de solución concentrada fabricado por la Fundación de Asesorías para el Sector Rural Ciudad de Dios –FUNDASES–, que previamente fue activado con melaza. Dicha mezcla, se dejó reposar por 72 horas a temperatura ambiente y se dosificó a razón de 10 Litros para cada unidad experimental. En la figura 16, se muestra el inóculo microbial utilizado.



Figura 16. Inóculo microbial adicionado al material de sustrato

En la figura 17, se muestra la fijación de los microorganismos a los días tres (3), catorce (14) y veintiún (21) de la adición del caldo microbiano dentro del material de sustrato.

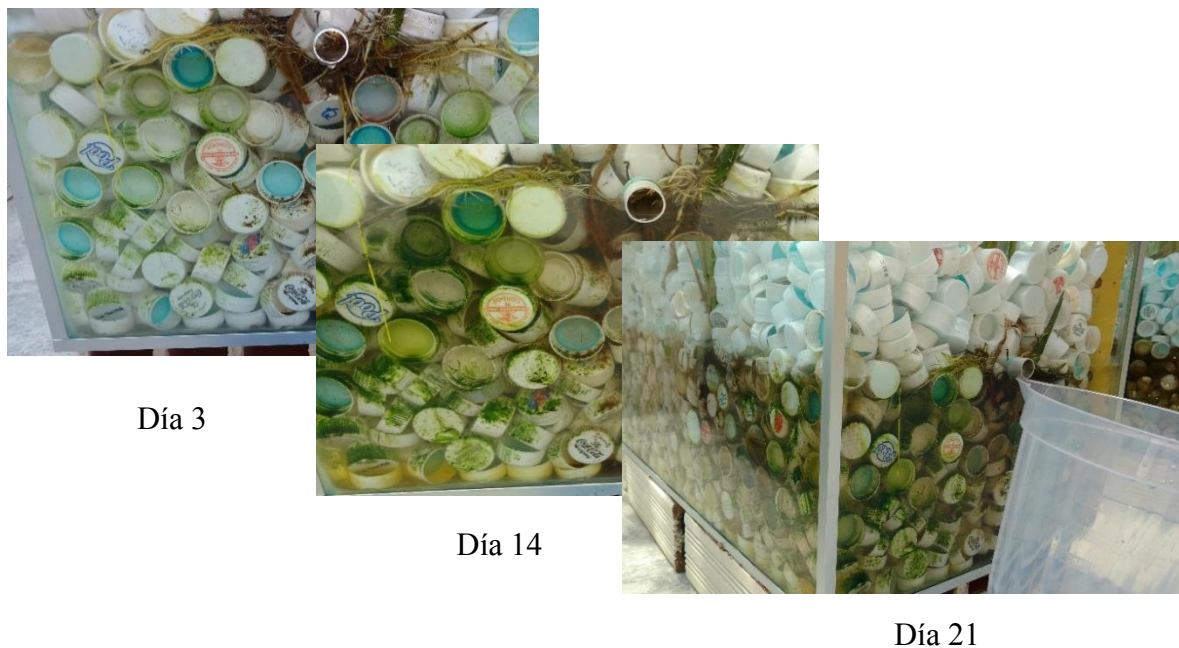


Figura 17. Fijación de microorganismo en material de sustrato

Luego del proceso de adaptación del material vegetal, fijación de microorganismos y siembra del material vegetal en los humedales; se estableció un (1) mes para la estabilización y maduración de los sistemas experimentales. Cabe mencionar que diariamente se hacía la dosificación de 5 Litros de agua residual sintética a cada unidad; con el fin, de suministrar alimento y nutrientes tanto para los microorganismos fijados en el material de sustrato como para el material vegetal. Luego del lapso determinado; se comenzó a suministrar el agua residual contaminada con Cromo hexavalente.

## 6.4. El Agua Residual (AR)

**6.4.1. Composición.** La preparación del agua residual sintética contaminada con Cromo Hexavalente (Cr VI) que se suministró a los tres sistemas de tratamientos estudiados; fue adaptada de la propuesta de Sánchez & Lozano, (2012) y la masa de cada elemento, se obtuvo mediante la utilización de Balanza Analítica Modelo: LS 220A Marca: Precisa; con precisión de 0,1 mg. En Tabla 5 se muestran los componentes utilizados en la elaboración del agua residual sintética.

*Tabla 5. Componentes del agua residual sintética*

<i>Compuesto</i>	<i>Concentración</i>
Leche en polvo	100 mg/L
Gelatina sin sabor	35 mg/L
Almidón	170 mg/L
Sal (NaCl)	7 mg/L
Azúcar (C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub> )	28 mg/L
Úrea (CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O)	3 mg/L
Fosfato Bicálcico (CaHPO <sub>4</sub> )	40 mg/L
Sulfato de magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	2,5 mg/L
Inóculo de microorganismos	70 ml/L
Jabón de tocador	3 gotas/L
Aceite de soya	15 gotas/L
K <sub>2</sub> CrO <sub>7</sub> (99%)	230 mg/L

**Nota.** Adaptado de Sánchez & Lozano, 2012.

Para evitar las formación de grumos en el agua residual preparada en laboratorio, se mezclaban los ingredientes de difícil dilución (Almidón, Leche en polvo y Fosfato Bicálcico) a 300 Revoluciones por minuto (RPM) con 0,001 m<sup>3</sup> de agua durante 3 minutos, posterior a ello, se adicionaba el resto de ingredientes y se dejaba reposar la mezcla por 24 horas a temperatura ambiente con el fin, de permitir la formación de ácidos grasos volátiles (AGV), Sánchez & Lozano (2012). Luego de la maduración del agua residual, se adicionaba el Dicromato de Potasio

( $K_2Cr_2O_7$ ) de grado analítico (pureza del 99%) para aportar la concentración de metal pesado (Cromo Hexavalente).

**6.4.2. Dosificación.** El proyecto de investigación se manejó en dos (2) etapas; su diferenciación dependía del volumen de agua residual suministrada a cada sistema. A continuación se muestran los periodos y caudales utilizadas en cada fase.

- Fase 1: Periodo comprendido entre el 26 de mayo de 2017 al 1 de septiembre de 2017 (98 días) y se alimentaba a cada sistema con un caudal  $Q_0 = 0,005 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$
- Fase 2: Periodo comprendido entre el 2 de septiembre de 2017 al 21 de octubre de 2017 (50 días) y se alimentaba a cada sistema con un caudal  $Q_1 = 0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$

Para garantizar la misma concentración de entrada a cada unidad objeto de estudio; se realizaba la preparación del volumen total del agua residual sintética para cada fase ( $15 \text{ L} \cdot \text{día}^{-1}$  y  $30 \text{ L} \cdot \text{día}^{-1}$ ) respectivamente, se contaminaba con el metal pesado y luego se suministraba a cada dosificador. En figura 18, se muestra el humedal convencional, siendo alimentado con el agua residual sintética ya contaminada con Cromo Hexavalente.



Figura 18. Alimentación del Humedal Convencional

## 6.5. Variables Evaluadas

Luego de la estabilización de los sistemas y por un periodo de 5 meses (junio a octubre de 2017); se realizó el monitoreo de las tres unidades experimentales, correspondiente al seguimiento en la remoción de los contaminantes objeto de estudio. Dicha caracterización del agua residual sintética contaminada con Cromo hexavalente, se realizó a la entrada y salida de cada unidad.

**6.5.1. Parámetros *in situ*.** (Temperatura, pH y Conductividad Eléctrica) se tomaron directamente en los tres humedales; gracias, a la instalación de un tubo de PVC de 3 pulgadas de diámetro con perforaciones laterales, que facilitaba la toma de estos parámetros. Los equipos utilizados para el registro de los parámetros *in situ* fueron:

- Medidor de grado para investigación con Calibración Check™ y USP pH/ORP/ISE y EC/TDS/Resistividad/Salinidad y temperatura Referencia HI 4522 de HANNA instruments
- Termómetro Infrarrojo Referencia HI 99550 de HANNA instruments.

La toma de dichos parámetros se realizaba de forma semanal. En figura 19; se evidencia la adaptación de los sistemas para la toma de parámetros *in situ*.



Figura 19. Adaptación para toma de parámetros *in situ*



**6.5.2. Parámetros *ex situ*.** (Cromo Hexavalente, Demanda Química de Oxígeno, Nitratos y Fosfatos); una vez se tomaba la muestra de agua (una vez por semana), se enviaba a un laboratorio independiente y acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM- en la ciudad de Neiva; CONSTRUCSUELOS Y SUMINISTRAS LTDA. Respetando todos los parámetros referidos para la conservación, preservación y transporte de las muestras, ello, con el fin de garantizar independencia e imparcialidad en los resultados obtenidos durante el proyecto de investigación. El equipo utilizado por este laboratorio, para el análisis de los parámetros fisicoquímicos *ex situ* estudiados fue el Espectrofotómetro HACH UV-VIS DR 6000. En la figura 20, se muestra la toma de muestra de las aguas residuales luego de atravesar los sistemas estudiados.



Figura 20. Toma de muestras de aguas residuales

**6.5.3. Análisis de Laboratorio.** A continuación, en la Tabla 6. Se realiza una identificación de los métodos utilizados, unidades de medida y procesamiento de los diferentes parámetros (*in situ* y *ex situ*) estudiados durante el proyecto de investigación.

*Tabla 6. Métodos de identificación de los parámetros objeto de estudio*

<i>Parámetro</i>	<i>Método</i>	<i>Unidades</i>	<i>Laboratorio</i>
pH	SM 4500 – H <sup>+</sup> B	Unidades de pH	In situ
Conductividad Eléctrica	SM 2510 B	μS/cm	In situ
Temperatura	SM 2550 B	°C	In situ
Demanda Química de Oxígeno –DQO-	SM 5220 D	mg O <sub>2</sub> /L	CONSTRUCSUELOS
Cromo Hexavalente – Cr VI-	SM 3500 Cr –B	mg Cr <sup>+6</sup> /L	CONSTRUCSUELOS
Nitratos	Salicilato de Sodio – Rodier	mg N-NO <sub>3</sub> /L	CONSTRUCSUELOS
Fosfatos	SM 4500 - P D	mg P-PO <sub>4</sub> /L	CONSTRUCSUELOS

Adicionalmente, se garantizó el cumplimiento de las consideraciones y recomendaciones solicitadas tanto por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM- en los apartes de “Metodologías de Análisis” como por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater versión 21 y que se plasman en las guías de laboratorio de calidad ambiental del IDEAM.

En tabla 7, se muestran las consideraciones tenidas en cuenta en el procesamiento y análisis de los diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos estudiados.

*Tabla 7. Conservación y control de calidad para las muestras*

<i>Parámetro</i>	<i>Tipo de Recipiente</i>	<i>Volumen (mL)</i>	<i>Conservación</i>	<i>Tiempo máximo almacenamiento</i>
pH	In situ	-	-	Analizar inmediatamente
C. Eléctrica	In situ	50	-	Analizar inmediatamente
Temperatura	In situ	-	-	Analizar inmediatamente
DQO	Envase vidrio (color ámbar)	120	Refrigeración a 4°C. + Adición de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Hasta veintiocho (28) días
Cr VI	Envase vidrio	1000	Refrigeración a 4°C.	48 horas
Nitratos	Envase plástico	1000	Refrigeración a 4°C.	24 horas; para almacenamientos más prolongados preservar con 2 mL de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> concentrado por Litro.
Fosfatos	Envase vidrio	1000	Refrigeración a 4°C.	48 horas

Fuente: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/metodos-analiticos>

**6.5.4. Análisis de Resultados.** La determinación del porcentaje de remoción de los diferentes parámetros fisicoquímicos objeto de estudio, se realizó con base a la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Remoción} = \left( 1 - \frac{\text{Concentración salida}}{\text{Concentración entrada}} \right) * 100 \%$$

Luego de calcular los diferentes porcentajes, dicha información se procesó y analizó con el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XVI, mediante ANOVA Multifactorial.

## 7. Resultados y Discusión

### 7.1. Diseño y Construcción del Sistema Experimental

**7.1.1. Diseño del Sistema.** Cada Sistema de Tratamiento (T), se conformó de dos (2) unidades. Una unidad complementaria denominada Dosificador y una Unidad de Tratamiento Secundario un Humedal Artificial de Flujo Sub superficial (HAFSS).

El T1 (humedal convencional), un humedal de flujo completamente mezclado y como material vegetal bijao (*Calathea Lutea*), El T2 (blanco), un humedal de flujo completamente mezclado y sin material vegetal. El T3 (humedal modificado), un humedal de flujo a pistón y como material vegetal bijao (*Calathea Lutea*); para lograr el flujo a pistón se colocó unas pantallas transversales al flujo. La figura 21 muestra un Esquema del Sistema Experimental de Tratamiento.

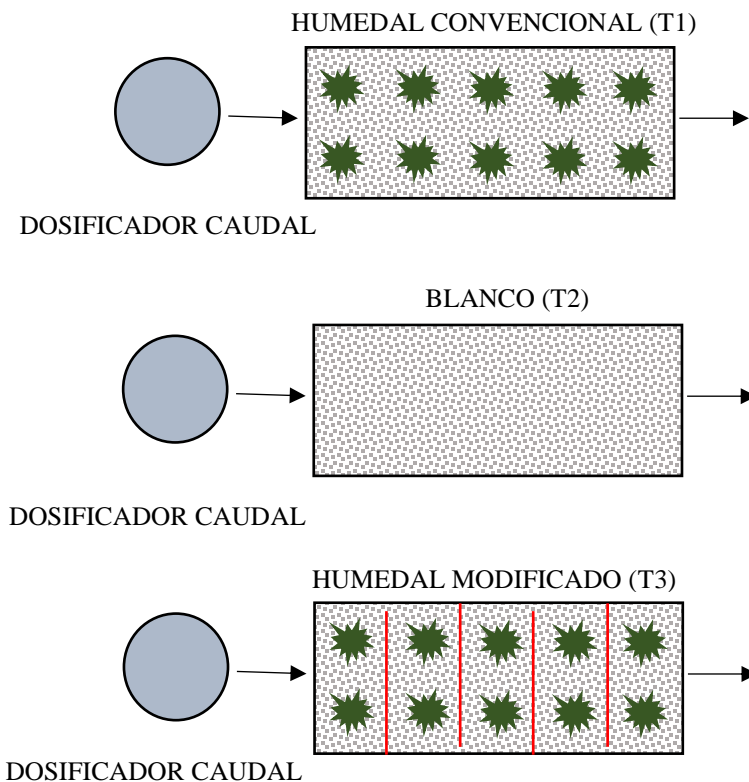


Figura 21. Esquema de unidades de tratamiento.

**Humedales.** Definidas las dimensiones internas de las tres unidades objeto de estudio; (blanco, humedal artificial convencional y humedal artificial modificado) desde el inicio de la investigación: Ancho ( $W=0,4\text{m}$ ), Longitud ( $L=1,0\text{m}$ ) y Altura ( $H=0,4\text{m}$ ), altura de la lámina de agua ( $y=0,2\text{m}$ ), espesor del material de soporte ( $s=0,30\text{ m}$ ) y los caudales a trabajar dentro de las dos fases de proyecto ( $Q_0= 0,005\text{ m}^3/\text{día}$  y  $Q_1= 0,010\text{ m}^3/\text{día}$ ). Solo restaba definir el material granular a ubicar en las unidades, determinar y/o calcular el valor de la porosidad ( $\eta$ ) del lecho filtrante, el Volumen total y útil de cada unidad y el Tiempo de retención hidráulico.

En figura 22, se muestran las dimensiones del humedal convencional (T1) y blanco (T2) (vista en planta y vista en perfil).

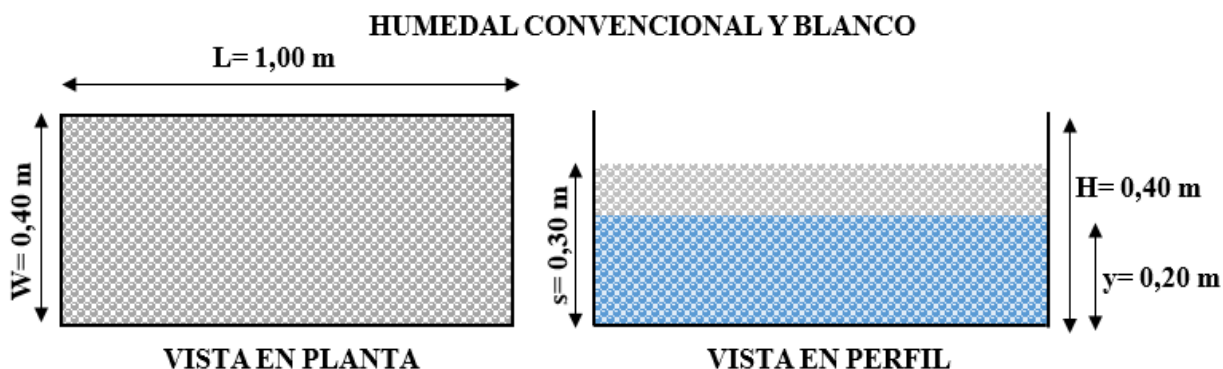


Figura 22. Vista en Planta y de Perfil de Humedal Convencional y Blanco

**Material de Soporte (lecho filtrante).** Se utilizó polipropileno de alta densidad (PP) o tapas de empaques de gaseosas PET como medio de soporte, de color blanco; colocadas al azar dentro de los sistemas. El espesor del lecho filtrante de  $s=0,30\text{ m}$  medidos desde la base de los sistemas; con el fin de no exponer directamente el agua residual a la atmosfera y así, evitar la proliferación de vectores y olores. Adicionalmente conseguir funcionamiento de los humedales con flujo sub-superficial horizontal.

La figura 23, muestra el material de soporte utilizado dentro de la experimentación y sus características (dimensiones y espesor).

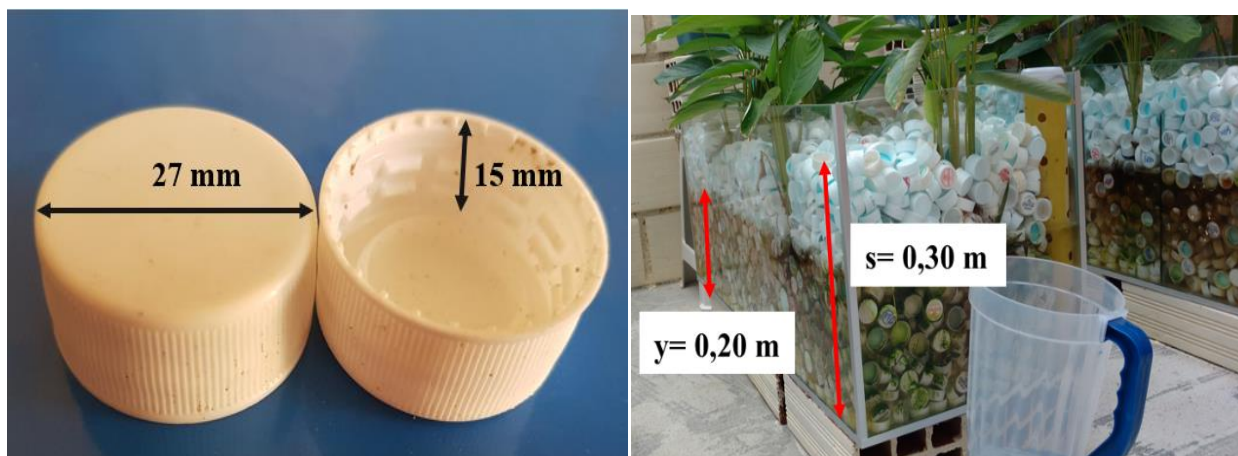


Figura 23. Características de medio de soporte

*Porosidad ( $\eta$ ) del lecho filtrante.* Es la relación del volumen de espacio vacíos ( $V_e$ ) sobre el volumen total de la muestra ( $V_t$ ). Este parámetro es fundamental para el tiempo de retención hidráulico; puesto que, a mayor porosidad, mayor tiempo de retención. Dicho valor se halló en el Laboratorio de Química de la Universidad Surcolombiana ubicada en la Avenida Pastrana Borrero - Carrera 1 en la ciudad de Neiva (H). En figura 25, se muestra la determinación de la porosidad del material granular



Figura 24. Determinación de porosidad del material granular

El cálculo de la porosidad del polipropileno de alta densidad (tapas de gaseosas PET) utilizado como material de sustrato, se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Ve}{Vt} \rightarrow \eta = \frac{0,652 L}{0,800 L} \rightarrow \eta = \mathbf{0,815}$$

*Volumen total y útil de los sistemas.* Con las dimensiones internas de los humedales; Ancho (W=0,4m), Longitud (L=1,0m) y altura de la lámina de agua de (y=0,2m); se calculó el volumen total de cada humedal ( $V = 0,080 \text{ m}^3$ ). Asimismo, y con el valor de la porosidad se determinó el volumen útil que ocuparía el agua residual sintética contaminada con Cromo hexavalente en cada unidad experimental.

$$Vol_{(útil sistemas)} = (L) \times (W) \times (y) \times (\eta)$$

$$Vol_{(útil sistemas)} = (1,0m) \times (0,4m) \times (0,2m) \times (0,815)$$

$$Vol_{(útil sistemas)} = \mathbf{0,0652 \text{ m}^3}$$

*Tiempo de Retención Hidráulico Teórico (TRH<sub>T</sub>).* Se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$TRH_T = \frac{Volumen\ util}{Caudal}$$

- Con caudal inicial (Q<sub>0</sub>= 0,005 m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup>), se obtuvo:

$$TRH_0 = \frac{Volumen}{Caudal} \rightarrow TRH = \frac{0,0652 \text{ m}^3}{0,005 \text{ m}^3/\text{día}} \rightarrow TRH_0 = \mathbf{13,04 \text{ días}}$$

- Dos veces al caudal inicial (Q<sub>1</sub>= 0,010 m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup>), se obtuvo:

$$TRH_1 = \frac{Volumen}{Caudal} \rightarrow TRH = \frac{0,0652 \text{ m}^3}{0,010 \text{ m}^3/\text{día}} \rightarrow TRH_1 = \mathbf{6,52 \text{ días}}$$

***Pantallas o trampas de contacto del T3.*** Con el fin de contribuir con la mejora en la eficiencia de remoción de contaminantes criterios, nutrientes y demás, se instalaron dentro de un humedal artificial sub-superficial horizontal trampas de contacto buscando flujo a pistón dentro del sistema, mayor tránsito del agua residual por la unidad y por ende mayor eliminación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Asimismo, garantizar el uso del 100% del área destinada en el tratamiento del agua residual; puesto que, la ubicación alternada de las laminillas, obliga al agua residual a recorrer todo el humedal, estará en mayor contacto y por más tiempo con las raíces de las plantas, bio-película y filtro que son los encargados de la remoción de materia orgánica, nutrientes, compuestos xenobióticos y demás elementos nocivos. Dicha tecnología ya es utilizada en Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP); como alternativa de optimización en los procesos de floculación-coagulación en espacios reducidos, buscando movimientos lentos del agua y contribuyendo en la sedimentación de los sólidos suspendidos, grasas, aceites y espumas. En figura 25, se observa el bosquejo del humedal modificado utilizado en el montaje de laboratorio.

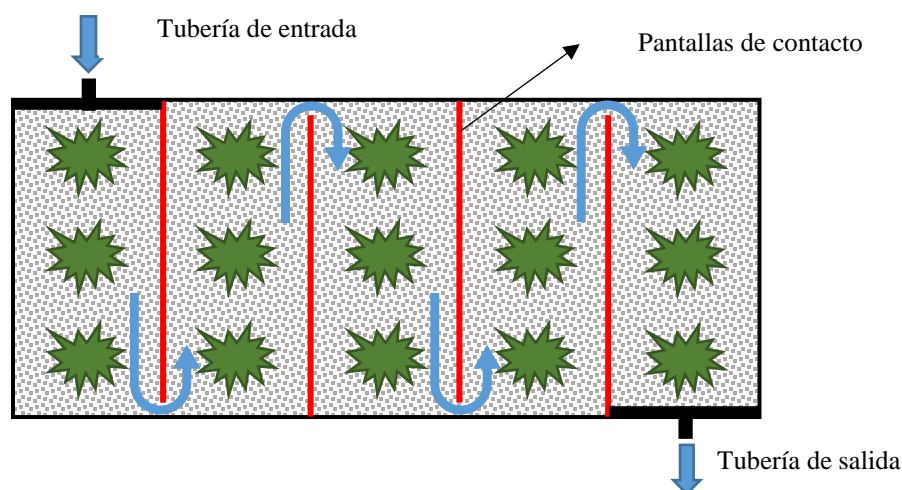


Figura 25. Bosquejo humedal modificado



En figura 26, se muestra las dimensiones tanto del humedal modificado (T3) así como la ubicación de las trampas de contactos, instaladas dentro del sistema

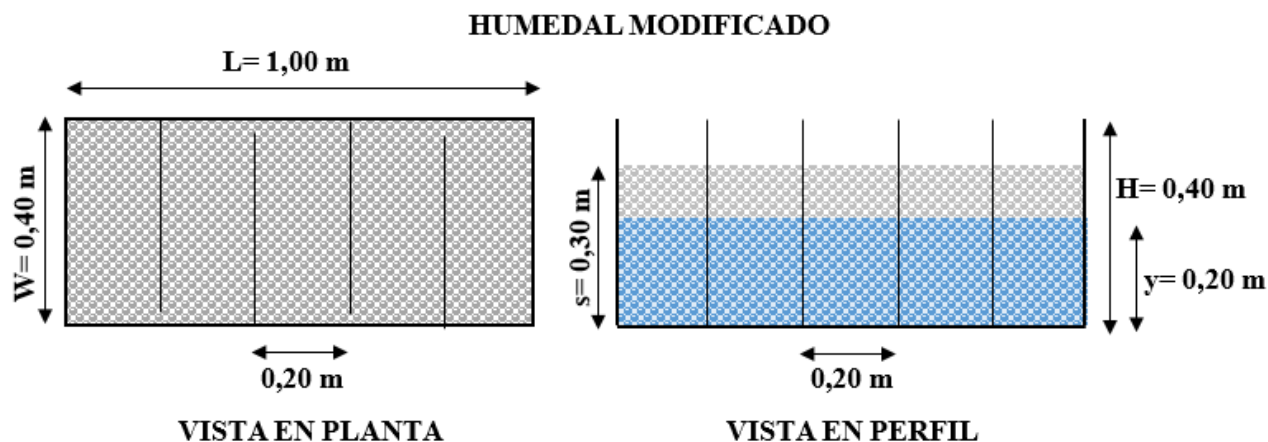


Figura 26. Vista en Planta y de Perfil de Humedal Modificado

**7.1.2. Construcción del Sistema.** Luego del cálculo de parámetros fundamentales para el buen funcionamiento de las unidades experimentales ( $\eta = 0,815$ ; Volumen.<sub>(útil sistema)</sub> =  $0,0652 \text{ m}^3$ ;  $\text{TRH}_0 = 13,04$  días;  $\text{TRH}_1 = 6,52$  días, establecer las dimensiones internas de los humedales : Ancho ( $W=0,4\text{m}$ ), Longitud ( $L=1,0\text{m}$ ) y Altura ( $H=0,4\text{m}$ ), la altura de la lámina de agua de ( $y=0,2\text{m}$ ), espesor del material de soporte ( $s=0,30 \text{ m}$ ), los caudales a trabajar dentro de las dos fases de proyecto ( $Q_0 = 0,005 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$  y  $Q_1 = 0,010 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$ ) y las adaptaciones a implementar dentro del humedal modificado; se realizó la construcción del montaje de laboratorio (Dosificador y Unidades de tratamiento).

**Dosificador.** Dichas unidades, se construyeron; con el fin de incorporar a los sistemas estudiados el mismo volumen de agua residual, para ello; se utilizó bidones con capacidad de 30 litros de almacenamiento y en su base, se adaptó un equipo de infusión de micro-goteo sin aguja para soluciones intravenosas; con ella, se lograba dosificar el ingreso del líquido a los humedales a razón de  $Q = 10 \text{ mL} \cdot \text{mín}^{-1}$ . ( $Q = 0,6 \text{ L} \cdot \text{hora}^{-1}$ ). Cada unidad de tratamiento, contaba con su

respectivo dosificador. En figura 27 se muestra el recipiente adaptado y utilizado como dosificador.



Figura 27. Dosificador de Caudal

**Humedales.** Los sistemas de tratamiento se construyeron con vidrio de 6 mm de espesor y de dimensiones internas: Ancho ( $W=0,4\text{m}$ ), Longitud ( $L=1,0\text{m}$ ) y Altura ( $H=0,4\text{m}$ ), la altura de la lámina de agua de ( $y=0,2\text{m}$ ), espesor del material de soporte o lecho filtrante ( $s=0,30\text{ m}$ ). En Figura 28, se muestran las dimensiones de las unidades de tratamiento.

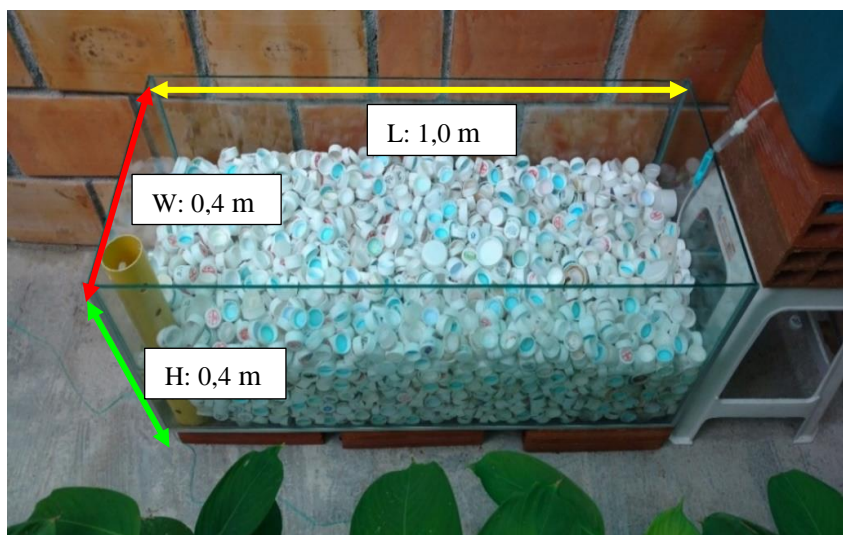


Figura 28. Dimensiones de los Humedales

Asimismo, en figura 29, se muestra la conformación de los sistemas convencionales (T1 y T2) en funcionamiento.

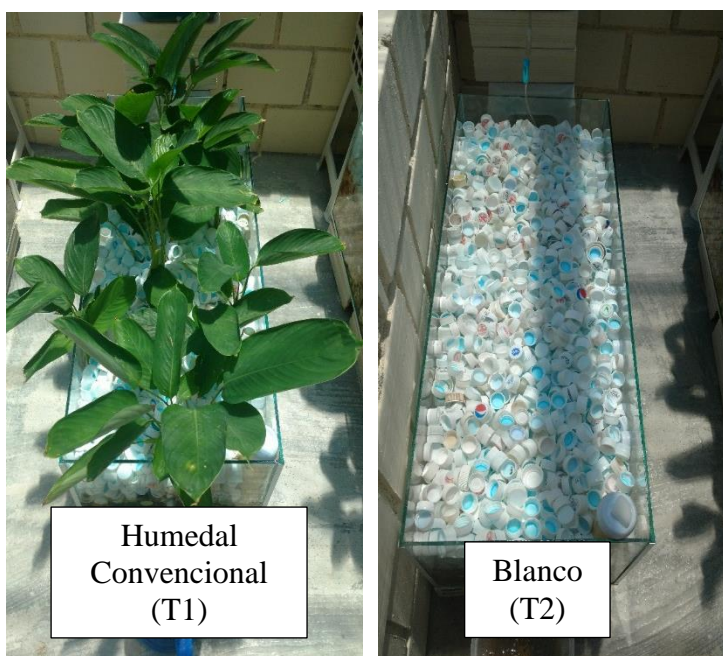


Figura 29. Conformación de los Humedales. Sistema Convencional y Blanco

***El humedal modificado (T3).*** Se construyó con las mismas especificaciones de diseño que las otras dos unidades (humedal artificial convencional y el blanco), con la diferencia que dentro del sistema; se instalaron de forma alternada en total cuatro (4) trampas de contacto de vidrio de 6mm de espesor, ubicadas cada 0,2 m colocadas en sentido transversal al flujo. En figura 30, se muestra las dimensiones de las trampas de contacto instaladas dentro del humedal artificial.

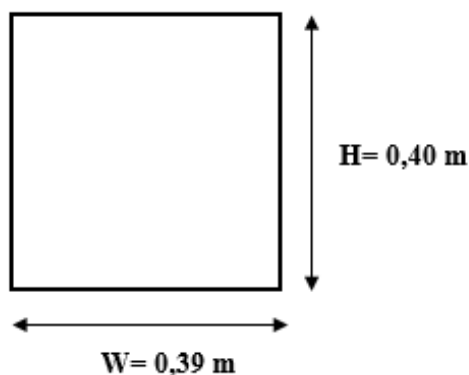


Figura 30. Especificaciones de trampas de contacto.

En figura 31, se muestra las adaptaciones propuestas en el humedal modificado y el sentido del flujo en el sistema



Figura 31. Trampas de contacto en humedal modificado

En figura 32 se muestra el Sistema Experimental conformado por: Humedal convencional, Blanco, Humedal Modificado y los dosificadores del agua residual, después de la estabilización del material vegetal y fijación de la bio-película en el material de soporte.

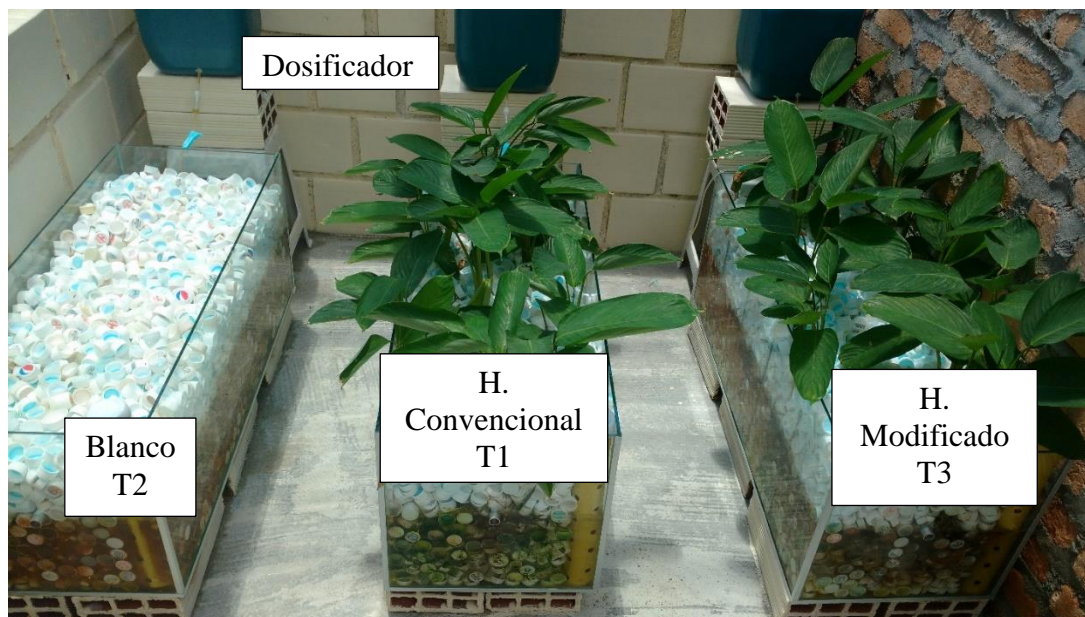


Figura 32. Montaje de laboratorio y unidades experimentales HAFSS

## 7.2. Condiciones Iniciales del Agua Residual.

Siguiendo la propuesta metodológica de Sánchez & Lozano en (2012), la preparación del agua residual se realizaba diariamente y se dejaba reposar la solución por 24 horas. Luego era suministrado a los sistemas evaluados. Para conocer la concentración de entrada o inicial del agua residual que alimentaba a los humedales, se analizaron en total 16 muestras, tomadas durante todo el proceso de experimentación. En Tabla 8; se muestran las concentraciones iniciales del agua preparada en laboratorio contaminada con Cromo hexavalente y que era suministrada a los tres (3) sistemas evaluados. Los promedios se calcularon mediante estadística descriptiva.

Tabla 8. Concentración de entrada del Agua Residual

Fecha	Parámetros					
	Cr VI [mg.L <sup>-1</sup> ]	DQO [mg.L <sup>-1</sup> ]	Nitratos [mg.L <sup>-1</sup> ]	Fosfatos [mg.L <sup>-1</sup> ]	pH [Unidad]	Temperatura °C
26-may	102,17	601	1,7	1,0	6,0	26,0
09-jun	97,10	589	1,8	1,0	6,3	25,4
23-jun	98,72	588	1,7	0,9	6,2	25,9
07-jul	101,26	593	1,8	1,0	6,0	25,7
21-jul	100,46	569	1,6	1,1	6,1	26,1
04-ago	103,21	592	1,5	1,0	6,2	26,1
18-ago	95,58	556	1,7	1,2	6,1	26,0
01-sep	100,49	589	1,7	1,0	6,0	26,0
09-sep	100,18	610	1,7	1,0	6,0	26,0
16-sep	98,21	597	1,6	0,9	6,2	25,5
23-sep	97,21	587	1,7	1,0	6,1	26,0
30-sep	96,22	567	1,7	1,0	6,1	26,3
07-oct	102,15	559	1,7	1,0	6,1	25,7
14-oct	97,56	603	1,7	0,9	6,2	26,0
18-oct	99,19	587	1,7	1,0	6,0	25,0
21-oct	98,01	602	1,6	0,9	6,1	25,2
	<b>99,23±2,28*</b>	<b>586,8±16,01*</b>	<b>1,68±0,08*</b>	<b>0,98±0,08*</b>	<b>6,11±0,09*</b>	<b>25,8±0,36*</b>

\* Medias ± Desviación estándar

Aunque los valores promedios resultantes del análisis de laboratorio de las muestras del agua residual de entrada, arrojando concentraciones mayores respecto a valores como la DQO, Nitratos y Fosfatos que los presentados por Sánchez & Lozano en 2012, (DQO= 371 mg.L<sup>-1</sup>; NO<sub>3</sub>= 0,0 mg.L<sup>-1</sup>; PO<sub>4</sub>= 16,9 mg.L<sup>-1</sup> y pH= 7, 11 Unidades). Estos cambios podrían tener las siguientes justificaciones:

- La calidad de los diferentes compuestos utilizados para la preparación del agua residual pudieron alterar o modificar las concentraciones dadas por Sánchez & Lozano en 2012 y las obtenidas dentro de la experimentación.

- La adición de un componente adicional (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>); con el fin de suministrar la concentración del metal pesado, pudo afectar y/o aumentar la concentración tanto de la DQO; como la disminución del pH.

- Sánchez & Lozano en 2012 utilizó como inóculo microbiano, los lodos activados generados en un reactor de aguas residuales. En esta experimentación, se utilizó como inóculo microbial el estiércol fresco de ganado. Esto, pudo incidir en las diferencias de concentraciones tan evidentes en Nitratos y Fosfatos.

### **7.3. Remoción de DQO, Nitratos y Fosfatos**

**7.3.1. Resultado de los Análisis de Laboratorio.** A continuación, en tabla 9 se muestran el resultado de las remociones obtenidas de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (DQO, NO<sub>3</sub> y PO<sub>4</sub>) de la unidades estudiadas. Evaluación que se realizó por un periodo de 5 meses (desde el 26 de mayo de 2017 al 21 de octubre de 2017); Distribuidas en dos fases o etapas, según los caudales manejados dentro del proyecto de investigación (Q<sub>0</sub>= 0,005 m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup> y Q<sub>1</sub>= 0,010 m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup>). Adicionalmente, se registró los valores de pH y Temperatura del agua

residual luego de atravesar los sistemas; para evidenciar el comportamiento y/o cambio de estos factores en sistemas de fito-remediación.

*Tabla 9. Remociones DQO, Nitratos y Fosfatos*

<i>Tratamiento</i>	<i>Caudal</i>	<i>Remoción</i>	<i>Remoción</i>	<i>Remoción</i>	<i>pH</i>	<i>Temperatura</i>
<i>(T)</i>	<i>(m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup>)</i>	<i>DQO (%)</i>	<i>NO<sub>3</sub> (%)</i>	<i>PO<sub>4</sub> (%)</i>	<i>(Unidades)</i>	<i>•C</i>
<b>T1</b>	0,005	45,47	67,32	89,83	7,3	26,4
<b>T1</b>	0,005	53,99	70,29	89,83	7,2	26,4
<b>T1</b>	0,005	67,11	70,29	89,83	7,1	25,8
<b>T1</b>	0,005	66,60	70,29	79,45	7,2	26,1
<b>T1</b>	0,005	73,42	70,29	89,83	7,1	26,3
<b>T1</b>	0,010	77,85	70,29	89,83	7,0	25,8
<b>T1</b>	0,010	84,15	70,29	89,83	7,4	25,9
<b>T1</b>	0,010	70,52	70,29	89,83	7,2	25,8
<b>T1</b>	0,010	77,85	70,29	89,83	7,0	25,6
<b>T1</b>	0,010	88,07	70,29	89,83	7,4	25,0
<b>T2</b>	0,005	73,42	70,29	89,83	7,5	26,0
<b>T2</b>	0,005	69,67	70,29	89,83	7,2	26,4
<b>T2</b>	0,005	70,01	70,29	79,86	6,9	26,4
<b>T2</b>	0,005	79,55	70,29	80,16	7,4	25,8
<b>T2</b>	0,005	69,50	70,29	89,83	7,0	26,1
<b>T2</b>	0,010	71,71	70,29	89,83	7,3	25,8
<b>T2</b>	0,010	89,78	70,29	89,83	7,3	25,6
<b>T2</b>	0,010	74,44	70,29	89,83	7,4	25,0
<b>T2</b>	0,010	83,64	70,29	89,83	7,3	25,3
<b>T2</b>	0,010	74,44	70,29	89,83	7,5	25,2
<b>T3</b>	0,005	60,30	70,29	89,83	7,5	26,4
<b>T3</b>	0,005	58,08	70,29	89,83	7,6	25,8
<b>T3</b>	0,005	62,51	70,29	82,60	7,4	26,1
<b>T3</b>	0,005	63,19	70,29	81,18	7,5	26,3
<b>T3</b>	0,005	65,92	70,29	89,83	7,7	26
<b>T3</b>	0,010	63,70	70,29	89,83	7,4	25,3
<b>T3</b>	0,010	78,53	70,29	89,83	7,5	25,8
<b>T3</b>	0,010	70,01	70,29	89,83	7,4	25,9
<b>T3</b>	0,010	73,93	70,29	89,83	7,4	25,8
<b>T3</b>	0,010	80,74	70,29	89,83	7,5	25,6

En la figura 33, se muestran las remociones globales obtenidas del Humedal Convencional (T1) para los parámetros fisicoquímicos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y Fosfatos ( $\text{PO}_4$ ).

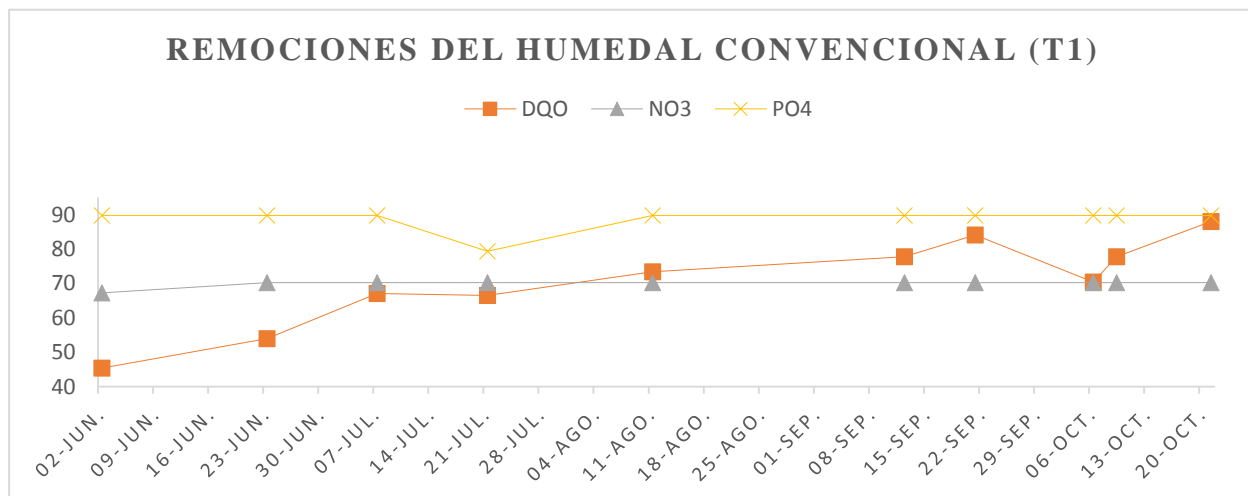


Figura 33. Remociones de contaminantes para Humedal convencional.

En la figura 34, se muestran las remociones globales obtenidas del Blanco (T2) para los parámetros fisicoquímicos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y Fosfatos ( $\text{PO}_4$ ).

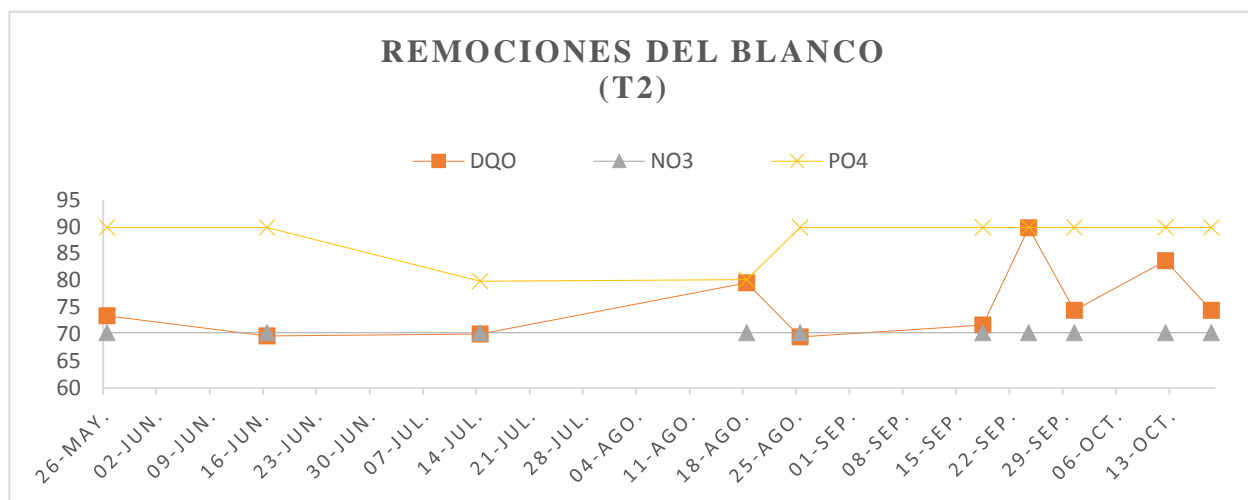


Figura 34. Remociones de contaminantes para el Blanco.



En la figura 35, se muestran las remociones globales obtenidas se muestran las remociones globales obtenidas del Humedal Modificado (T3) para Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y Fosfatos ( $\text{PO}_4$ ).

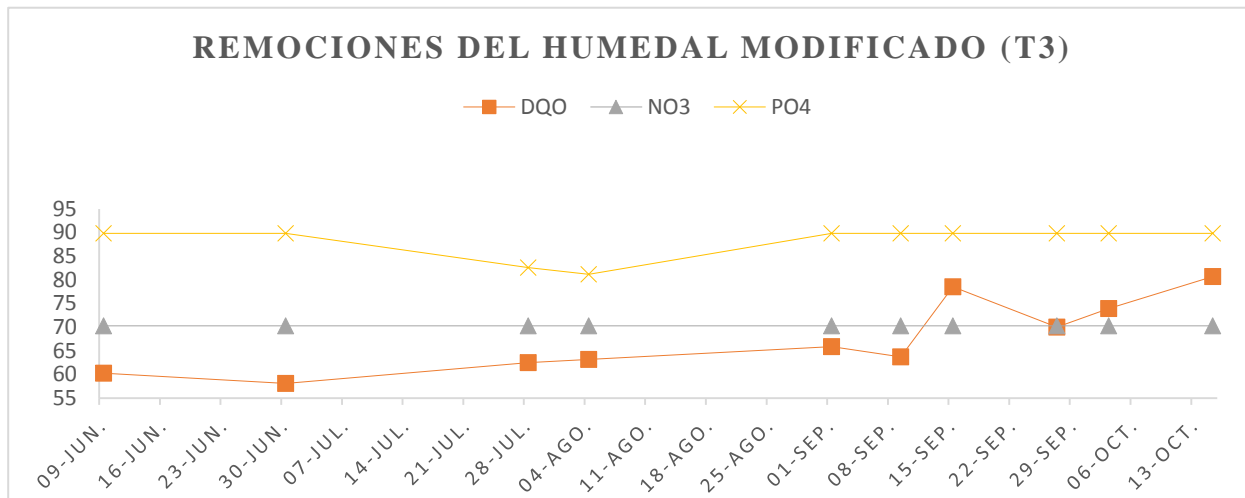


Figura 35. Remociones de contaminantes para el Humedal Modificado.

Asimismo, se elaboró grafica de dispersión de datos; donde se realizó la comparación de remociones por contaminante y tratamiento, para cada parámetro fisicoquímico evaluado. Ver figura 36.

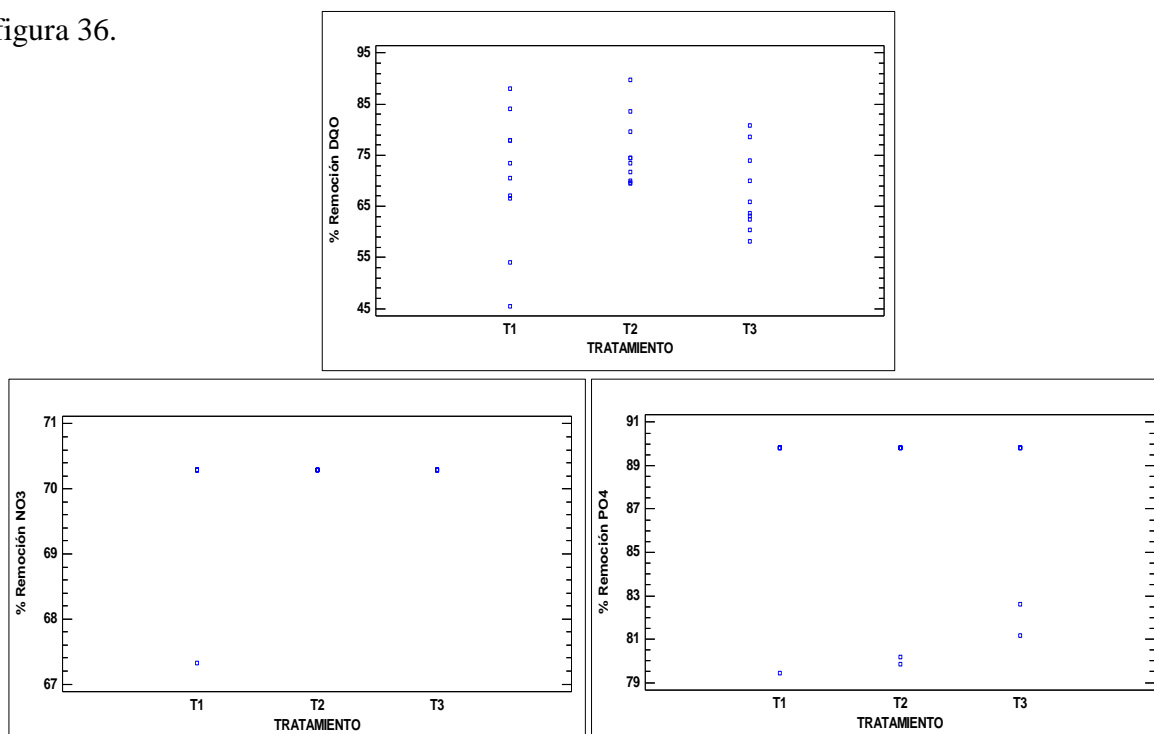


Figura 36. Dispersión de datos para DQO,  $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$

**7.3.2. Análisis Estadístico.** Los resultados del análisis estadístico aplicado a los valores obtenidos en la remoción de los parámetros fisicoquímicos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y Fosfatos ( $\text{PO}_4$ ), para los factores de Caudal ( $Q_1= 0,005 \text{ m}^3.\text{día}^{-1}$  y  $Q_2= 0,010 \text{ m}^3.\text{día}^{-1}$ ) y Tratamiento (Humedal Convencional (T1), Blanco (T2) y Humedal Modificado (T3)), fueron procesados con el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XVI.

Para la ANOVA Multifactorial; se determinó qué factores son los que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre cada una de las variables estudiadas, en este caso, se evidencia que la variable “% Remoción  $\text{NO}_3$ ” no presenta diferencias significativas ( $p<0,05$ ); sobre los factores Caudal y Tratamiento, mientras que en las variables “% Remoción DQO” y “% Remoción  $\text{PO}_4$ ” evidencia diferencias estadísticamente significativas ( $p<0,05$ ) sobre el factor Caudal (Q); registrando que para estos parámetros el porcentaje de remoción fue mayor con  $Q_2= 0,010 \text{ m}^3.\text{día}^{-1}$ . En tabla 10 se muestran los datos arrojados de la aplicación de ANOVA Multifactorial + test de Tukey.

Tabla 10. Medias de Tukey (HSD) para DQO, Nitratos y Fosfatos

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>% Remoción DQO</b>	<b>% Remoción <math>\text{NO}_3</math></b>	<b>% Remoción <math>\text{PO}_4</math></b>
T1	70,50 <sup>a</sup> ± 13,07	69,99 <sup>a</sup> ± 0,94	88,79 <sup>a</sup> ± 3,28
T2	75,61 <sup>a</sup> ± 6,73	70,29 <sup>a</sup> ± 0,00	87,87 <sup>a</sup> ± 4,14
T3	67,70 <sup>a</sup> ± 8,49	70,29 <sup>a</sup> ± 0,00	88,24 <sup>a</sup> ± 3,36
<b>CAUDAL (<math>\text{m}^3/\text{día}</math>)</b>	<b>% Remoción DQO</b>	<b>% Remoción <math>\text{NO}_3</math></b>	<b>% Remoción <math>\text{PO}_4</math></b>
0,005	65,25 <sup>a</sup> ± 10,91	70,09 <sup>a</sup> ± 0,77	86,77 <sup>a</sup> ± 4,53
0,010	77,29 <sup>b</sup> ± 7,15	70,29 <sup>a</sup> ± 0,00	89,83 <sup>b</sup> ± 0,00

Medias ± Desviación estándar.

Columnas con letras distintas son significativamente diferentes, prueba de (HSD) de Tukey ( $P < 0,05$ )

Asimismo, se muestran que los efectos de las interacciones tratamiento (T) y caudal (Q) no representan significancia estadística para todos los casos evaluados, con un nivel de confianza del 95%.

En la figura 37 se observa los cambios del “% Remoción DQO” para los tratamientos T1, T2 y T3 en función del Caudal. Se observa un incremento en el porcentaje de remoción para los tres tratamientos a un caudal de  $0,010 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$ .

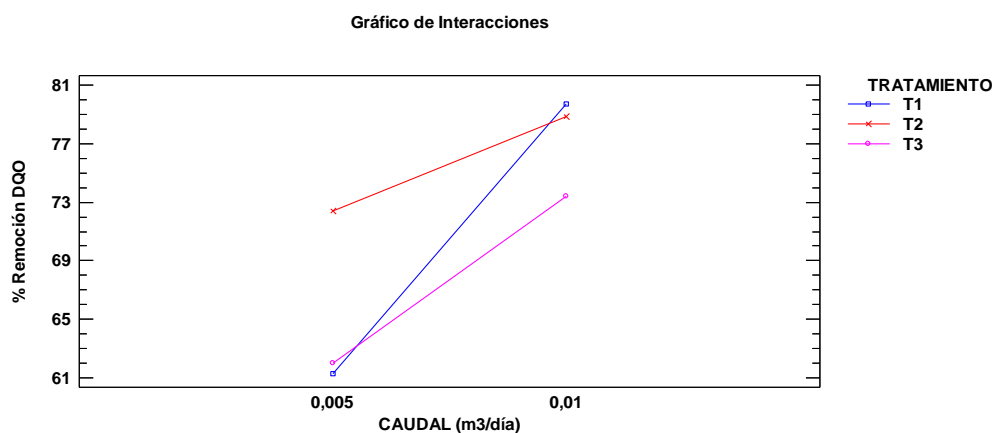


Figura 37. Cambios del % Remoción DQO en función del Caudal

Mediante la evaluación de los cambios del “% Remoción  $\text{PO}_4$ ” para los tratamientos T1, T2 y T3 en función del Caudal (Figura 38), se observó que existe un incremento del porcentaje Remoción  $\text{PO}_4$  al incrementar a un caudal de  $0,010 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$ , sin embargo los valores son similares para todos los tratamientos a implementar este caudal.

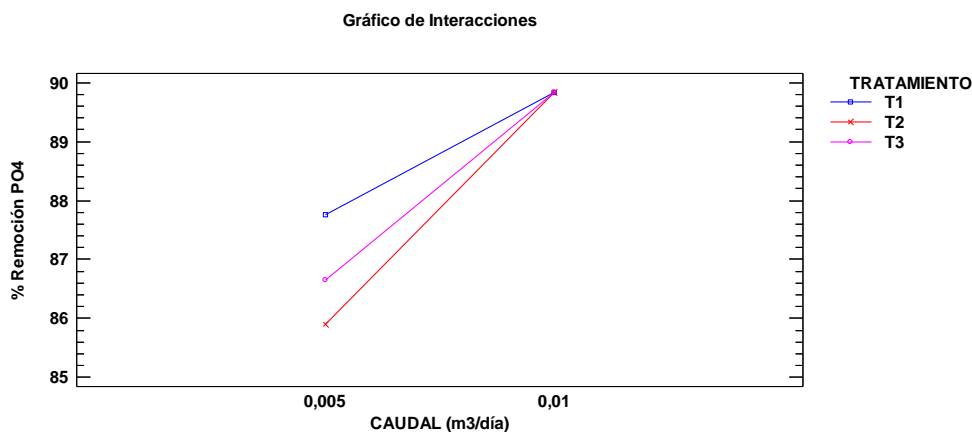


Figura 38. Cambios del % Remoción  $\text{PO}_4$  en función del Caudal

Para el caso de la variable “% Remoción  $\text{NO}_3$ ”, como no se presentó variabilidad en los datos obtenidos (diferencias estadísticamente significativas); no se pudo elaborar el gráfico de interacciones pertinente.

**7.3.3. Discusión.** Para la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la unidad que reportó mayor porcentaje de remoción fue el sistema no plantado ( $T_2=75,61\%$ ), en comparación a los sistemas plantados con *Calathea Lutea* ( $T_1=70,50\%$  y  $T_3=67,70\%$ ). Aunque el sistema modificado ( $T_3$ ) fue quien reportó menor remoción para este parámetro; el análisis de los resultados demuestra que no existen diferencias estadísticamente significativas para este factor entre las tres unidades. La posible necrosis de raíces que quedaron afectadas en el proceso de adaptación del material vegetal y restos de tierra presente en la raíces de las mismas pudo contribuir en la disminución de remoción de este factor. Aun así, las remociones coinciden con investigaciones realizadas por Conte et al. (2001); Kao et al. (2001); Duran-de-Bazua & Guido-Zarate (2008), quienes establecen porcentajes de remoción para este parámetro fisicoquímico entre el 50 y el 70 %.

Si bien, la literatura reporta que a mayor tiempo de retención hidráulico (TRH), mayor remoción; para el caso de la DQO no aplicó dicho axioma, pues las remociones fueron mayores con el TRH menor ( $\text{TRH}_{6,52 \text{ días}}=77,29\%$ ) respecto al TRH mayor ( $\text{TRH}_{13,04 \text{ días}}=65,25\%$ ). Dicha disminución, probablemente se debe a que al ser unidades mayormente aerobias y el caudal suministrado inicialmente ( $Q_0=0,005 \text{ m}^3/\text{día}$ ) y que derivó al  $\text{TRH}=13,04 \text{ días}$ , pudo incidir en condiciones con poca concentración de oxígeno disuelto y ello, facilitaría la inactivación de diferentes microorganismos aerobios encargados de la remoción tanto de carga orgánica, como de nutrientes y contaminantes.

Además, el uso de un TRH tan alto (TRH=13,04 días) implicaría el uso o utilización de grandes extensiones de terreno, pues a mayor TRH mayor área superficial; lo que lo hace una propuesta inviable en la práctica y los resultados de laboratorio soportan dicha afirmación.

Caso similar sucedió en las remociones de Nitratos  $-\text{NO}_3^-$  (T1= 69,99%; T2=70,29% y T3=70,29%) y aunque no se presentaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos estudiados, las mayores remociones se vieron reflejadas con el menor TRH (6,52 días). Para este caso, la variación puede sugerir en el incremento del proceso de nitrificación, probablemente debido a una mayor oxigenación del sistema o por incremento de esta especie nitrogenada, tal como lo refiere Romero-Aguilar et al. (2009).

Las mayores remociones se reportaron para los Fosfatos  $-\text{PO}_4^-$  (T1= 88,79%; T2=87,87% y T3=88,24%) y así como para la DQO y Nitratos la remoción aumentó, cuando se aumentó el caudal de agua residual suministrado a los sistemas. Para este caso, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas respecto a las tres unidades estudiadas, lo que demuestra, que para la remoción tanto de los Nitratos, como Fosfatos; los microorganismos fijados en el material de sustrato y suspendidos en los sistemas, son los encargados de la remoción de estos parámetros fisicoquímicos. Aunque se reportaron remociones altas para los fosfatos; (Karpiscak et al, 2001) menciona que dicha eficiencia disminuye a largo plazo; pues se reduce la asimilación del fósforo y sus diferentes formas iónicas por parte de las plantas y biomasa.

Adicionalmente; se comprobó el ajuste o corrección del pH por parte de las unidades de bio-remediación; tal como lo menciona Lara (1999). Debido a que el pH del agua residual sintética contaminada con Cromo hexavalente que ingresaba a los sistemas tenía tendencia ácida (6,1 Unidades), pero luego de atravesar por los humedales; se tornaban neutras (T1= 7,1; T2=7,3 y T3= 7,4).

## 7.4. Remoción Cromo Hexavalente

**7.4.1. Resultado de los Análisis de Laboratorio.** En tabla 11 se muestran el resultado de las remociones obtenidas (en porcentaje) del Cromo Hexavalente, en las tres unidades experimentales evaluadas; (T1= Humedal Convencional; T2= Blanco y T3= Humedal Modificado).

*Tabla 11. Remociones Cromo VI*

<i>Tratamiento (T)</i>	<i>Caudal (m<sup>3</sup>/día)</i>	<i>Remoción Cr VI (%)</i>
T1	0,005	75,19
T1	0,005	72,79
T1	0,005	76,72
T1	0,005	80,63
T1	0,005	71,39
T1	0,010	77,37
T1	0,010	68,03
T1	0,010	66,78
T1	0,010	69,29
T1	0,010	67,06
T2	0,005	65,86
T2	0,005	68,59
T2	0,005	70,90
T2	0,005	69,49
T2	0,005	70,27
T2	0,010	67,89
T2	0,010	64,81
T2	0,010	71,26
T2	0,010	67,19
T2	0,010	89,69
T3	0,005	81,22
T3	0,005	83,16
T3	0,005	85,43
T3	0,005	88,90
T3	0,005	85,41
T3	0,010	84,15
T3	0,010	82,75
T3	0,010	80,78
T3	0,010	76,26
T3	0,010	75,19

En la figura 39 se muestran las remociones en porcentaje globales obtenidas del Humedal Convencional (T1), para el Cromo Hexavalente.

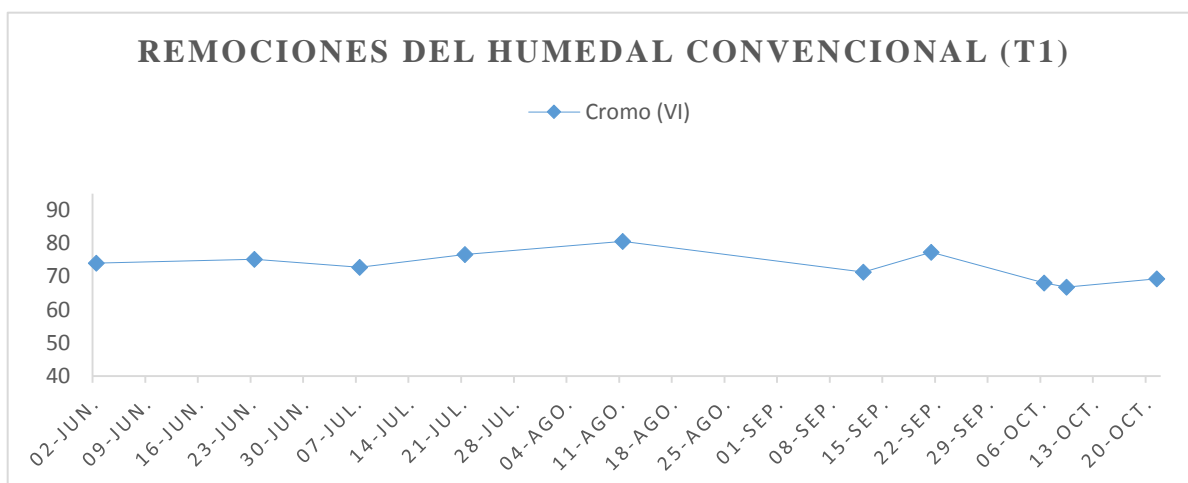


Figura 39. Remociones de contaminantes para Humedal convencional.

En la figura 40, se muestran las remociones en porcentaje globales obtenidas del Blanco (T2), para el Cromo Hexavalente.

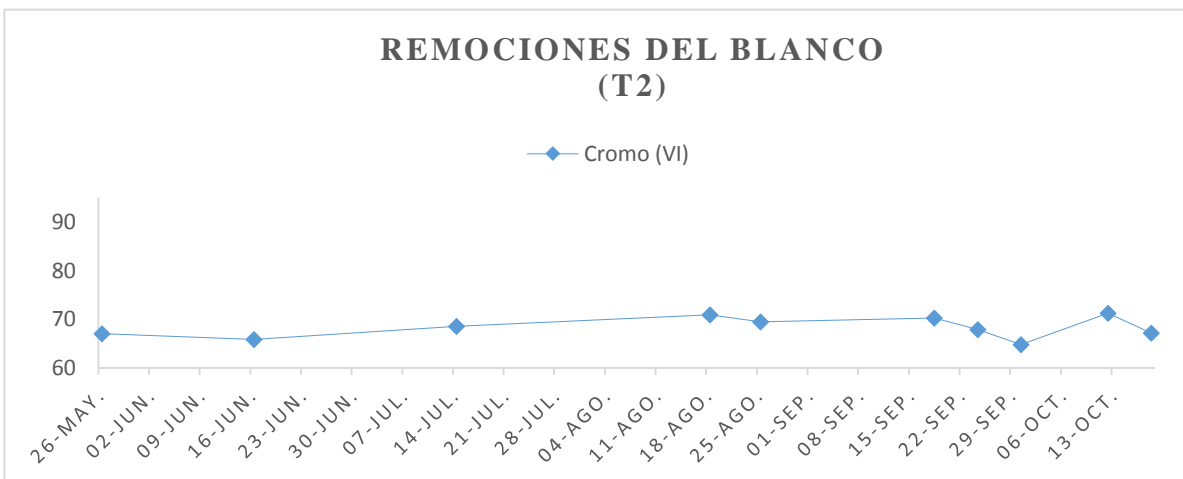


Figura 40. Remociones de contaminantes para el Blanco.

En la figura 41, se muestran las remociones en porcentaje obtenidas en el Humedal Modificado (T3), para el Cromo Hexavalente.

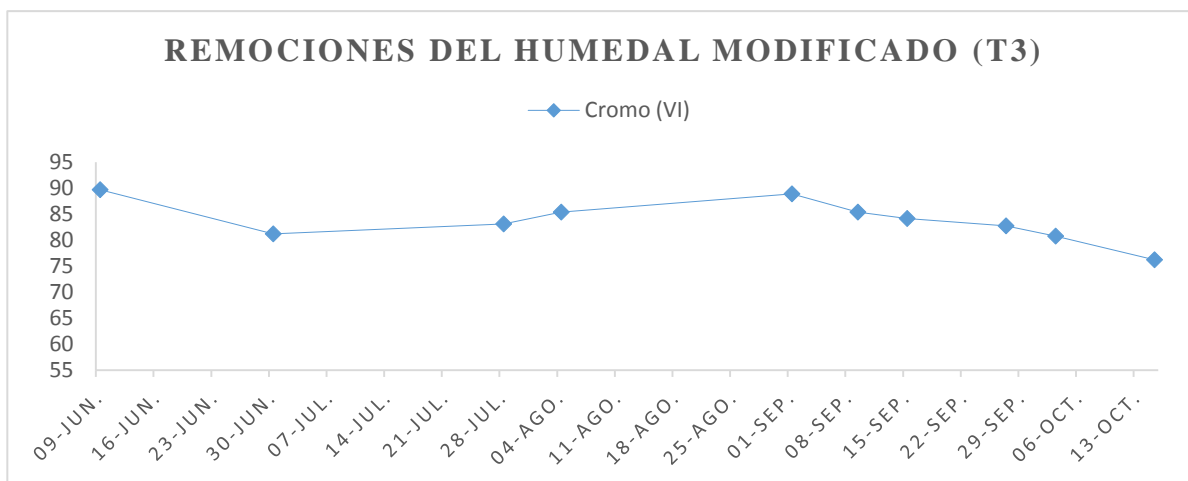


Figura 41. Remociones de contaminantes para el Humedal Modificado.

Asimismo, en figura 42 se muestra la gráfica de dispersión de datos; para el Cromo Hexavalente por tratamiento (T1= Humedal Convencional; T2= Blanco y T3= Humedal Modificado).

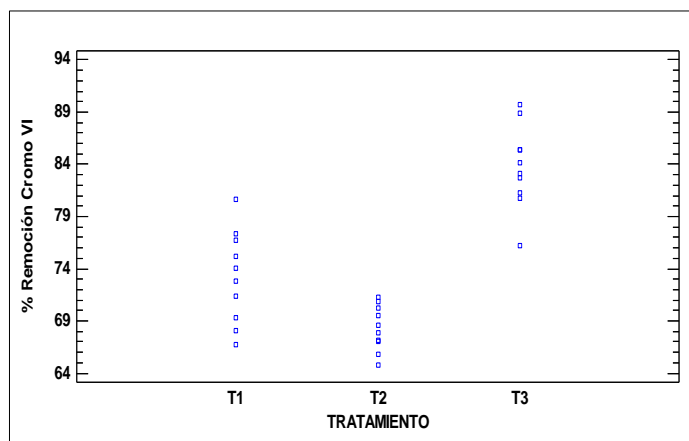


Figura 42. Dispersión de datos para Cromo VI



**7.4.2. Análisis Estadístico.** Los datos fueron procesados con el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XVI.

Para la ANOVA Multifactorial; se determinó qué factores son los que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre cada una de las variables estudiadas. En la tabla 11 se observa que para los factores caudal ( $Q_1= 0,005 \text{ m}^3.\text{día}^{-1}$  y  $Q_2= 0,010 \text{ m}^3.\text{día}^{-1}$ ) y tratamiento (Humedal convencional (T1), Blanco (T2) y Humedal modificado (T3)) tienen efecto significativo ( $p<0,05$ ) y por ende, presenta diferencias estadísticamente significativas en la Remoción Cromo VI (ver Tabla 12), con un nivel de confianza del 95%.

*Tabla 12. Medias de Tukey (HSD) para Cr VI*

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>% Remoción Cromo VI</b>
T1	73,23 <sup>a</sup> ± 4,43
T2	68,33 <sup>b</sup> ± 2,16
T3	83,78 <sup>c</sup> ± 3,94
<b>CAUDAL (m<sup>3</sup>/día)</b>	<b>% Remoción Cromo VI</b>
0,005	76,65 <sup>a</sup> ± 7,83
0,010	73,58 <sup>b</sup> ± 6,95

Medias ± Desviación estándar.

Columnas con letras distintas son significativamente diferentes, prueba de (HSD) de Tukey ( $P < 0,05$ )

En la figura 43, se observa que existe un efecto entre el caudal y el tipo de tratamiento sobre las medias sobre la variable “% Remoción Cromo VI”, donde los mayores valores de remoción están relacionados en el tratamiento T1 y T3, a un caudal de 0,005 m<sup>3</sup>/día, mientras en el T2 las medias son similares para los dos tipos de caudal (0,005 m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup> y 0,010 m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup>). De igual forma se puede establecer, para los dos caudales aplicados, que los valores medios más altos se muestran en el T3, los más bajos en el T2 y los intermedios en el T1.

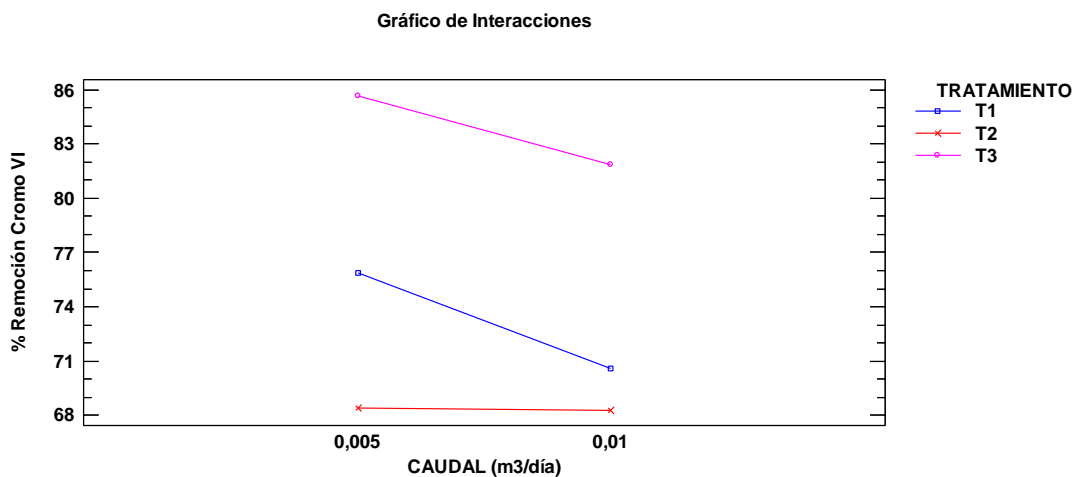


Figura 43. Cambios del % Remoción Cromo VI en función del Caudal

**7.4.3. Discusión.** Los tres sistemas evaluados presentaron porcentajes de remoción de Cromo hexavalente (T1= 73,23%; T2= 68,33%; T3= 83,78%); luego, los sistemas plantados con *Calathea Lutea* (T1 y T3) eliminan un mayor porcentaje de este metal pesado, en comparación con el sistema no plantado (T2). Asimismo, se demostró que el humedal modificado obtuvo mayor porcentaje de remoción del contaminante en cuestión; lo que traduce a que las trampas de contacto ubicadas en sentido longitudinal al flujo contribuyen en un aumento de la remoción y/o eliminación de Cromo VI. Estas remociones se asemejan con las obtenidas por Cortes-Sandoval et al (2014) que utilizando especies nativas tropicales (*Gynerium sagittatum*, *Colocasia esculenta* y *Heliconia psittacorum*) y evaluando la remoción de Cr VI de un lixiviado, reportaron

porcentajes de remoción del 72,4% de este metal pesado. Pero también, dichos resultados se alejan de Peña-Salamanca *et al*, (2013) que mediante humedales artificiales sembrados con *Heliconia psittacorum* registraron remociones cercanas al con 90% de Cr VI. Aunque los valores difieren entre los autores consultados; cabe mencionar que la concentración inicial del Cromo Hexavalente y el TRH inciden en la remoción del metal pesado.

Para el caso del Cr VI, las mayores remociones se registraron con el mayor TRH<sub>13,04 días</sub>= 76,65%; en comparación con el menor TRH<sub>6,52 días</sub>= 73,58 %, dicha mejora en la eficiencia de remoción del metal pesado, aunque reporta diferencias estadísticamente significativas, en la práctica, no compensaría el área superficial la unidad respecto a su remoción.

A esta concentración de Cr VI (C = 99,23 mg/L), no se evidenció procesos de antagonismo, inhibición del crecimiento o muerte de la especie vegetal (*Calathea Lutea*) puesto que no mostró signo alguno de daño como hojas amarillas o clorosis y en cambio, reportó remociones considerables del metal pesado; pudiéndose catalogar como una planta hiperacumuladora; así como lo refiere Peña-Salamanca, et al (2013).

## 8. Conclusiones y Recomendaciones

Los tres sistemas evaluados presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), en la remoción de Cromo hexavalente ( $T1 = 73,23\%$ ;  $T2 = 68,33\%$ ;  $T3 = 83,78\%$ ); comprobando así, que los sistemas plantados con *Calathea Lutea* ( $T1$  y  $T3$ ) eliminan un mayor porcentaje de este metal pesado en comparación con el sistema no plantado ( $T2$ ); lo que indica el papel benéfico de esta planta en los humedales artificiales, aumentando las remociones en un 7% y 12% respectivamente. Asimismo, se acepta la hipótesis nula; puesto que, se demostró que el humedal modificado ( $T3$ ), obtuvo mayor porcentaje de remoción del contaminante en cuestión; lo que traduce a que las trampas de contacto ubicadas en sentido longitudinal al flujo contribuyen en un aumento de la remoción y/o eliminación de Cromo VI.

Caso particular sucedió para la Demanda Química de Oxígeno (DQO), pues la unidad que reportó mayor porcentaje de remoción fue el sistema no plantado ( $T2 = 75,61\%$ ) respecto a los plantados con *Calathea Lutea* ( $T1 = 70,50\%$  y  $T3 = 67,70\%$ ). Aunque el sistema modificado ( $T3$ ) fue quien reportó menor remoción para este parámetro; no se reportaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), lo que indica que ni la colocación de la planta ni el mejoramiento del flujo (instalación de las trampas de contacto), aumentaron la remoción de materia orgánica en el sistema experimental.

Asimismo, para  $\text{NO}_3$  ( $T1 = 69,99\%$ ;  $T2 = 70,29$  y  $T3 = 70,29$ ) y  $\text{PO}_4$  ( $T1 = 88,79$ ;  $T2 = 87,87\%$  y  $T3 = 88,24\%$ ), tampoco se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), lo que podría indicar, que son los microorganismos fijados dentro del material granular (polipropileno de alta densidad) son los encargados de metabolizar, degradar y eliminar en gran porcentaje estos contaminantes y nutrientes.

Los valores de DQO (T1=70,50%; T2= 75,61 y T3=67,70%), NO<sub>3</sub> (T1=69,99%; T2=70.29 y T3=70.29) y PO<sub>4</sub> (T1= 88,79; T2= 87,87% y T3= 88,24%), demuestran que los Sistemas de Tratamiento “Humedales” utilizados en el estudio, operaron normalmente, alcanzando remociones similares a las de otros Sistemas de Tratamiento; concluyendo, que los humedales artificiales pueden ser utilizados para el tratamiento de otras aguas residuales.

Las remociones de los parámetros fisicoquímicos evaluados desde el punto de vista del caudal suministrado. El Cromo VI, DQO y PO<sub>4</sub> fueron los factores que presentaron diferencias estadísticamente significativas; lo que induce que el tiempo de retención hidráulico (TRH) influye en la degradación de los contaminantes objetos de estudio. Como es de esperar, a mayor caudal, menor TRH y por ende menor eliminación de contaminantes, pero para la Demanda Química de Oxígeno y los Fosfatos, las mayores remociones se presentaron con el mayor volumen de agua ( $Q_2= 0,010 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$ ). Lo que permite recomendar hacer estudios más detallados de remociones respecto a variaciones del TRH.

Dentro del proyecto de investigación; se comprobó el ajuste o corrección del pH por parte de las unidades de bio-remediación; tal como lo menciona Lara en 1999. Debido a que el pH del agua residual sintética contaminada con Cromo hexavalente que ingresaba a los sistemas tenía tendencia ácida (6,11 Unidades), pero luego de atravesar por los humedales; se tornaban neutras (T1= 7,1; T2=7,3 y T3= 7,4).

A esta concentración de Cr VI ( $\approx 99,23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), no se evidenció procesos de antagonismo, inhibición del crecimiento o muerte de la especie vegetal (*Calathea Lutea*). Asimismo, la planta no mostró signo alguno de daño como hojas amarillas o clorosis y en cambio, reportó remociones considerables del metal pesado; pudiéndose catalogar como una material hiperacumulador; tal como lo establece Peña-Salamanca, et al (2013).

El sustrato utilizado como material de soporte (polipropileno de alta densidad) presenta una porosidad de  $\eta_{\text{pad}}=0,815$ , mayor que los sustratos utilizados comúnmente en la construcción de humedales artificiales como la grava o roca triturada del mismo diámetro que oscila entre  $\eta_{\text{grava}}=0,36 - 0,45$ ; lo que hace recomendable su uso, además de los beneficios ambientales al darle uso a este subproducto o residuo sólido.

Se observó también, el papel preponderante de tiene el material vegetal (*Calathea Lutea*) dentro de los sistemas de bio-remediación evaluados, pues sensorialmente se evidenció la capacidad de camuflar los olores producidos por la descomposición de la materia orgánica presente en el agua residual. Asimismo, se recalca la ventaja que poseen los humedales de mimetizarse con el entorno a diferencia de los tratamientos convencionales.

Se recomienda, seguir realizando estudios de investigación, asociados a Bioprospección con especies vegetales nativas para el tratamiento de aguas residuales domésticas (ARD) y Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) y otros recursos naturales contaminados o afectados por actividades antropogénicas.

Aunque las remociones reportadas en este estudio para Nitratos y Fosfatos fueron altas (70% y 89% respectivamente); estos resultados no son concluyentes; puesto que, la concentración de salida para estos parámetros se expresaban mediante las siguientes unidades de medida  $<0,5 \text{ mg N-NO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$  y  $<0,1 \text{ mg P-PO}_4 \cdot \text{L}^{-1}$ ; valor límite cuantificable del equipo utilizado (Espectrofotómetro HACH UV-VIS DR 6000). Como no se pudo establecer el papel del material vegetal y de los microorganismos fijados dentro del sustrato en la remoción de estos contaminantes, se recomienda en investigaciones similares, realizar la evaluación de los sistemas con Nitrógeno total y Fosforo total.

## 9. Referencias Bibliográficas

- Álvarez, S. G., Maldonado, M., Gerth, A., & Kusch, P. (2004). Caracterización de agua residual de curtiduría y estudio del lirio acuático en la recuperación de Cromo. *Información tecnológica*, 15(3), 75-80. Recuperado de: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642004000300012&script=sci\\_arttext](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642004000300012&script=sci_arttext)
- Alzate A.M. (2008). Proyecto gestión ambiental en la industria de curtiembre en Colombia. Diagnóstico y estrategias [versión pdf]. Recuperado de: <http://www.tecnologiaslimpias.org/%20Curtiembres/EstrategiasDiagnostico.pdf>
- Arias, C. A., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 13(1), 17-24.
- Arias M, Pérez-Novo C, Osorio F, López E y Soto B. (2005). "Adsorption and desorption of copper and zinc in the surface layer of acid soils". *Journal of Colloid and Interface Science* 288: 21-29. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Arias Triguero, Ó. (2004). Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. (Tesis de maestría). Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3339>
- Atkinson, B. W., Bux, F., & Kusan, H. C. (1998). Considerations for application of biosorption technology to remediate metal-contaminated industrial effluents. *Water S. A.*, 24(2), 129-135.
- Bermeo A. (2009). Contaminación por metales pesados [Mensaje en un blog]. Recuperado de: <http://medioambienteperiodismo.blogspot.com.co/2009/11/contaminacion-por-metales-pesados-y-sus.html>

- Bernal López, O. J. (2017). Diseño de unidad piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial para tratamiento de aguas residuales domesticas en el Campus UMNG-Cajicá con fines de reusó (Tesis de Maestría, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano). Recuperado de:  
<http://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/1749/T060.pdf?sequence=1>
- Betancur J. A., Zuluaga L., Clavijo Z., Cordero P., Salinas N. R. (2007) Santa María pintada de flores. Serie de guías de campo del Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia Bogotá, Colombia.
- Bidyut, S., & Chris, O. (2010). Biosorbents for hexavalent chromium elimination from industrial and municipal effluents. *Coordination Chemistry Reviews*, 254(23), 2959-2972.  
Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010854510001591>
- Bondia, J. R. (2014). Eliminación de contaminantes emergentes mediante Humedales Artificiales como sistema alternativo o complementario a un tratamiento de aguas convencional. (Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia)
- Burton, F. L., CAJIGAS, A., Tchobanoglous, G., TRILLO FOX, I. A. N., MONTSORIU, T., & DE DIOS, J. U. A. N. (1995). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. Metcalf & Eddy.
- Cabezas, L. M. V., & Cedeño, F. G. (2015). Eliminación de cromo utilizando humedales de flujo sub-superficial horizontal. *Afinidad*, 72(571). Recuperado de:  
<https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/viewFile/300888/390332>
- Cardona, A., Pinzón-Bedoya, M., (2008). Caracterización de la cáscara de naranja para su uso como material bioadsorbente. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 6(1).  
Recuperado de: <http://www.redalyc.org/html/903/90312176003/>



- Carpena, R. O., & Bernal, M. P. (2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Revista Ecosistemas*, 16(2). Recuperado de:  
<http://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/download/123/120>
- Cavaco S. A, Fernandes S, Quina MM y Ferreira LM. (2007). "Removal of chromium from electroplating industry effluents by ion exchange resins". *Journal of Hazardous Materials* 144: pp. 634-638. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Celis Hidalgo, J., Junod Montano, J., & Sandoval Estrada, M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, 14(1). Recuperado de:  
<http://www.redalyc.org/html/299/29900103/>
- Cevallos Torres, E. D. (2009). Evaluación de la adaptación y fitoremediación de 3 especies de ciperáceas con 2 densidades distintas sobre lechos filtrantes para aguas servidas en la estación páramo del OCP Ecuador SA (Bachelor's thesis, SANGOLQUÍ/ESPE/2009). Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/754>
- Commission, W. R. (2000). *Constructed wetlands: The answer to small scale wastewater treatment in South Africa*. South Africa.
- Conte, G., Matinuzzi, N., Giovannelli, L., Pucci, B., & Masi, F. (2001). Constructed wetlands for wastewater treatment in central Italy. *Water science and technology*, 44(11-12), 339-343. Recuperado de: [http://www.iridra.it/pubblicazioni/Conte\\_WaterPollution\\_POSTER.pdf](http://www.iridra.it/pubblicazioni/Conte_WaterPollution_POSTER.pdf)
- Contreras, E. M., Ferro Orozco, A. M., Urriza, M., Bertola, N. C., & Zaritzky, N. E. (2009). Cinética de remoción de Cr (VI) con carbón activado. In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 30 (pp. 1-13). AIDIS. Recuperado de:  
[http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/AR04011\\_Zaritzky.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/AR04011_Zaritzky.pdf)

- Cooper, P. (2005). The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates. *Water Science and Technology*, 51(9), 81-90. Recuperado de: <http://wst.iwaponline.com/content/51/9/81>
- Cortés-Sandoval, A. E. (2014). Evaluación del desempeño de humedales construidos subsuperficial de flujo horizontal sembrados con especies nativas tropicales para la eliminación de Cr (VI) y Cd (II) de lixiviado de relleno sanitario (Tesis de Doctorado). Recuperado de: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/7724>
- Coronel, E., & Romero, C. (2004). Método para determinar la concentración de cromo en soluciones de curtido y recurtido.
- Cuellar, O. F. A. (2015). Tratamientos para la remoción de Cromo (VI) presente en aguas residuales. *Revista Nova*, 1(1), 66-73. Recuperado de: <http://revistas.sena.edu.co/index.php/rnova/article/view/187>
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (1998). *Small and decentralized wastewater management systems*. McGraw-Hill. Citado por: Arias, C. A., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 13(1), 17-24.
- Delgadillo, O. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Nelson Antequera. Recuperado de: <http://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2013/02/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales.pdf>
- Durán-de-Bazúa, C., Guido-Zárate, A., Huanosta, T., Padrón-López, R. M., & Rodríguez-Monroy, J. (2008). Artificial wetlands performance: Nitrogen removal. *Water Science and Technology*, 58(7), 1357-1360. Recuperado de: <https://europepmc.org/abstract/med/18957747>

- EPA, U. S. (2000). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. Office of Research p. 12- 97. Cincinnati: US EPA.
- Faulwetter, J. L., Gagnon, V., Sundberg, C., Chazarenc, F., Burr, M. D., Brisson, J., & Stein, O. R. (2009). Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: a review. *Ecological engineering*, 35(6), 987-1004. Recuperado de:  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.030>
- Favas, P. J., Pratas, J., Varun, M., D'Souza, R., & Paul, M. S. (2014). Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: potential of native flora. In *Environmental risk assessment of soil contamination*. InTech. pp. 486. Recuperado de:  
<https://cdn.intechopen.com/pdfs/46355.pdf>
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of environmental management*, 92(3), 407-41
- Galindo, L. A. L., Sotto, M. A., & Artunduaga, O. F. (2015). Remoción de Cromo Hexavalente utilizando cáscara de *Moringa Oleifera* como bio-adsorbente. *Revista Nova*, 1(1), 74-87. Recuperado de: <http://revistas.sena.edu.co/index.php/rnova/article/view/189/222>
- Gallego, E.I. (2010). Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales (Tesis de Pregrado, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira). Recuperado de:  
<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1833>
- García Alberca, J. E. (2013). *Toponimias de la Provincia de Loja. Significado o etimología de los nombres de: cantones, ciudades, parroquias, barrios, ríos, montañas, valles, etc.* Catacocha: GRAFIPLUS. Recuperado de:  
[https://books.google.com.co/books?id=WFS4CgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=WFS4CgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

García, J., & Corzo Hernández, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial.

Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/33422601/download>

García J., Morató J., Bayona J., (2004). “Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos”. Ed. Ediciones CPET. p. 100.

Garzon-Santamaria, J. A., González-López, L. A., & Tejada-Tovar, C. D. (2012). Adsorción de Cr (VI) utilizando carbón activado a partir de cáscara de naranja (Doctoral dissertation, Universidad de Cartagena). Recuperado de:

<http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/68>

Gao, H., Liu, Y., Zeng, G., Xu, W., Li, T., & Xia, W. (2008). Characterization of Cr (VI) removal from aqueous solutions by a surplus agricultural waste—rice straw. *Journal of Hazardous Materials*, 150(2), 446-452. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389407006437>

Gil, E. (1999). Remoción y recuperación de metales pesados de aguas residuales industriales. *Revista Facultad de Ingeniería*, (18), 38-47. Recuperado de:

<http://revistaestudiospoliticos.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/download/325814/20783150>

Gunnarsson, C. C., & Petersen, C. M. (2007). Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: A literature review. *Waste Management*, 27(1), 117-129. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X06000109>

Hammel, B. E., Grayum, M. H., Herrera, C., & Zamora, N. (2003). *Manual of Plants of Costa Rica, Volume III: Monocotyledons (Orchidaceae-Zingiberaceae)*. Missouri Botanical Garden Press. Recuperado de: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20073069969>

- Jain, M., Garg, V. K., & Kadirvelu, K. (2009). Equilibrium and kinetic studies for sequestration of Cr (VI) from simulated wastewater using sunflower waste biomass. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 328-334. Recuperado de:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409009170>
- Jeon, C., & Höll, W. H. (2003). Chemical modification of chitosan and equilibrium study for mercury ion removal. *Water Research*, 37(19), 4770-4780.
- Jiménez, E. (2005). La contaminación ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada. México: Editorial Limusa. [Versión pdf]. Recuperado de:  
<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=FCIA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mf&n=0042311>
- Kao, C. M., Wang, J. Y., Lee, H. Y., & Wen, C. K. (2001). Application of a constructed wetland for non-point source pollution control. *Water Science and technology*, 44(11-12), 585-590. Recuperado de:  
<https://search.proquest.com/openview/382a8a9c8947afce1032c5c942b21dca/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2044520>
- Karpiscak, M. M., Whiteaker, L. R., Artiola, J. F., & Foster, K. E. (2001). Nutrient and heavy metal uptake and storage in constructed wetland systems in Arizona. *Water Science and Technology*, 44(11-12), 455-462. Recuperado de:  
<https://search.proquest.com/openview/fdbec99e80e30b7592cf6f8dc8be4573/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2044520>
- Kizilkaya R, Askin T, Bayrakli B. & Saglam M. (2004). "Microbiological characteristics of soils contaminated with heavy metals". *European Journal of Soil Biology* 40: pp. 95-102. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.

- Kurniawan, T. A., Chan, G. Y., Lo, W. H., & Babel, S. (2006). Physico–chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical engineering journal*, 118(1-2), 83-98. Recuperado de:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894706000362>
- Lara, J., (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales (Tesis Doctoral, Instituto Catalán de Tecnología Universidad Politécnica de Cataluña).  
Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/fulltext/humedales/humedales.pdf>
- Lahora Cano, A. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). [Versión pdf]. Recuperado de:  
[http://www.almediam.org/PDF/humedales\\_17.pdf](http://www.almediam.org/PDF/humedales_17.pdf)
- Llagas, W.A., Guadalupe, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 9(17), 85-96. Recuperado de:  
<http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/699>
- Leclerc, G., Rochete, F. J., Málaga, H., Rolim Mendoca, S., Pardo Sánchez, A., & Fernández Acevedo, L. (1999). Estudios técnicos de sustitución aplicables al saneamiento de aguas servidas de pequeñas comunidades: Sistemas de tratamiento de aguas servidas por medio de humedades artificiales. Canadá. Societé Québécoise d'Assainissement des Eaux; Organización Panamericana de la Salud; Centro Nacional del Agua (CENAGUA).
- Leyva, R., Flores, J. V., Díaz, P. E., & Berber, M. S. (2008). Adsorción de cromo (VI) en solución acuosa sobre fibra de carbón activado. *Información tecnológica*, 19(5), 27-36. Recuperado de: [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642008000500005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642008000500005&script=sci_arttext)

Lopez, M. E. P. (2009). Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango”. (Tesis Doctoral, Centro de Investigación de Materiales Avanzados, -CIMAV-S.C.). Recuperado de:

<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/598/1/Tesis%20Ma.%20Ele-na%20P%C3%A9rez%20L%C3%B3pez.pdf>

Madera-Parra, C. A., Peña-Salamanca, E. J., Peña, M. R., Rousseau, D. P. L., & Lens, P. N. L. (2015). Phytoremediation of landfill leachate with *Colocasia esculenta*, *Gynerum sagittatum* and *Heliconia psittacorum* in constructed wetlands. *International journal of phytoremediation*, 17(1), 16-24. DOI: 10.1080/15226514.2013.828014

Mahecha, G. E., Barrero Barrero, D., Camelo Salamanca, D., Ovalle Escobar, A., & Rozo Fernández, A. (2004). Vegetación del Territorio CAR: 450 Especies de sus Llanuras y Montañas. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR, 32-33.

Malaver Moreno, A. F. (2017). Evaluación de un humedal artificial de flujo superficial empleando lenteja de agua (*Lemna minor*) para el tratamiento de aguas residuales generadas por la industria de curtiembres. Recuperado de:

<http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/9999>

Malik, A. (2007). Environmental challenge vis a vis opportunity: the case of water hyacinth. *Environment international*, 33(1), 122-138. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412006001309>

Mandel, K., Hutter, F., Gellermann, C., & Sextl, G. (2013). Reusable superparamagnetic nanocomposite particles for magnetic separation of iron hydroxide precipitates to remove and recover heavy metal ions from aqueous solutions. *Separation and Purification Technology*, 109, 144-147. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586613001366>

Manzoor, S., Shah, M. H., Shaheen, N., Khaliq, A., & Jaffar, M. (2006). Multivariate analysis of trace metals in textile effluents in relation to soil and groundwater. *Journal of Hazardous Materials*, 137(1), 31-37. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406001981>

Martínez Cartajena, A. S. (2013). Validación de métodos analíticos por espectrofotometría para determinar sulfatos, cianuros y cromo hexavalente en aguas, suelos y lixiviados.

Recuperado de: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/890>

Mena, J., Rodríguez, L., Núñez, J., & Villaseñor, J. (2009). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Castilla, España: CONAMA.

Recuperado de:

[http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643\\_JMena.pdf](http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643_JMena.pdf)

Mentaberry, A. (2011). Fitorremediación. Curso de Agrobiotecnología. Departamento de Fisiología, Biología Molecular y Celular Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires. Recuperado de:

[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IQM\\_fitorremediacion\\_argentina\\_25620.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IQM_fitorremediacion_argentina_25620.pdf)

Memon, J. R., Memon, S. Q., Bhangar, M. I., El-Turki, A., Hallam, K. R., & Allen, G. C. (2009). Banana peel: a green and economical sorbent for the selective removal of Cr (VI) from industrial wastewater. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 70(2), 232-237. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092777650800502X>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (26, Mayo de 2015) Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. [Decreto 1076 de 2015].

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (22, Junio de 2007). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. [Resolución 2115 de 2007].



Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17, Marzo de 2015) Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. [Resolución 631 de 2015].

Mohan, D., & Pittman Jr, C. U. (2006). Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri-and hexavalent chromium from water. *Journal of hazardous materials*, 137(2), 762-811. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406006996>

Mora Ortiz, L. (2009). Crecimiento sobre buchón y elodea de pleurotus ostreatus y efecto de esta especie fúngica sobre la digestibilidad del sustrato lignocelulósico como potencial alimento para rumiantes (Tesis para optar el título ecóloga. Pontificia Universidad Javeriana).

Recuperado de:

<https://repository.javeriana.edu.co:8443/bitstream/handle/10554/8443/tesis412.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Nriagu, J. O., & Pacyna, J. M. (1988). Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *nature*, 333(6169), 134-139. Recuperado de:

<https://doc.uments.com/download/s-quantitative-assessment-of-worldwide-contamination-of-air-water.pdf>

Núñez, R., Meas, Y., Ortega, R., & Olguín, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *CIENCIA*, 55(3), pp. 69-82. Recuperado de:

[http://revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55\\_3/Fitorremediacion.pdf](http://revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf)

Nurdan Y.B., Tulay A.O. & Oz H.O. (1997). "Combined effects of Cu<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> on activated sludge process". *Water Research* 31: pp. 699-704. Citado por: Agouborde, L. (2008).

Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.

Ong, S. A., Lim, P. E., Seng, C. E., Hirata, M., & Hano, T. (2005). Effects of Cu (II) and Cd (II) on the performance of sequencing batch reactor treatment system. *Process biochemistry*, 40(1), 453-460. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.

Ortiz, E., Carmona, J., (2013). Recuperación y reutilización de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido de curtiembres de San Benito (Bogotá), mediante un proceso sostenible y viable tecnológicamente, Universidad de Manizales, pp. 88-94. Recuperado de: <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/1076>

O'Sullivan, A. D., Murray, D. A., & Otte, M. L. (2000). Constructed wetlands for treatment of mine tailings at Tara Mines, Ireland. Recuperado de: <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/406>

Otálora, A., (2011). Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl. Trabajo final de maestría. Universidad Nacional De Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/5044/>

Panich-Pat, T., Upathan, S., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., Lanza, G.R. (2010). Phytoextraction of metal contaminants by *Thypha angustifolia*: interaction of lead and cadmium in soil-water microcosms. *Journal of environmental protection*, 1:431-437. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/profile/Guy\\_Lanza2/publication/266479511](https://www.researchgate.net/profile/Guy_Lanza2/publication/266479511)

Peña-Salamanca, E., Palacios, M. L., Ospina-Álvarez, N., 2005. Algas como indicadores de contaminación. Universidad del Valle, Cali. pp. 75-146. Recuperado de: [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=l4QBTq77BsIC&oi=fnd&pg=PA3&ots=\\_JYysIiopf5&sig=WqweuE0hK3MPX4ytF6WJzcpqR\\_o#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=l4QBTq77BsIC&oi=fnd&pg=PA3&ots=_JYysIiopf5&sig=WqweuE0hK3MPX4ytF6WJzcpqR_o#v=onepage&q&f=false)

- Peña-Salamanca, E. J., Madera-Parra, C. A., Sánchez, J. M., & Medina-Vásquez, J. (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *heliconia psittacorum* (heliconiaceae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(145), 469-481. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n145/v37n145a04.pdf>
- Pérez Salazar, R., Alfaro Chinchilla, C., Sasa Marín, J., & Agüero Pérez, J. (2013). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Uniciencia*, 27(1). Recuperado de: <http://www.redalyc.org/html/4759/475947762019/>
- Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual review of plant biology*, Colorado State University, Fort Colling, 56:15-39. Recuperado de: [http://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214#\\_i1](http://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214#_i1)
- Pinzón-Bedoya M.; Vera, L. (2009): Modelamiento de la cinética de bioadsorción de Cromo (III) usando cascara de naranja. *Rev. DYNA*. Universidad de Pamplona. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n160/a09v76n160.pdf>
- Porras, Á. C. (2010). Descripción De La Nocividad Del Cromo Proveniente De La Industria Curtiembre Y De Las Posibles Formas De Removerlo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 41–49. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/750/75017164003.pdf>
- Prasad, M. N. V. (2004). Fitorremediación. Aplicaciones, ventajas e inconvenientes. *La Ecofisiología Vegetal*. Thomson Editores. España. 1197p. Recuperado de: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-662-07743-6\\_14](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-662-07743-6_14)
- Quiñones, E., Tejada, C., & Ruíz, V. (2014). Remediación de aguas contaminadas con cromo utilizando diferentes biomateriales residuales. *Revista Ciencias e Ingeniería al Día*, 9(1), 25-42. Recuperado de: <http://revistas.unicartagena.edu.co/index.php/ciad/article/view/39>

- Rodríguez, J. (2008). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades (Doctoral dissertation, Tesis). Recuperado de:  
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19117/Capitulo3.pdf>
- Romero, J. (2000). Tratamiento de aguas residuales. *Teoría y principios de diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería.*
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., & Ortiz-Hernández, M. A. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 157-167. Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992009000300004&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992009000300004&script=sci_arttext&tlng=en)
- Ronderos, M. T. (2011). La fiebre minera se apoderó de Colombia. *Revista semana*, 6. Recuperado de: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/39091172>
- Salas, J. J., Pidre, J. R., & Sánchez, L. (2007). Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Capítulo V: Filtros de Turba.
- Sanabria, O. (2009). *Humedales Artificiales de Alta Tasa - HAAT- Reactores de flujo horizontal subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales: Teoría y Práctica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia Biblioteca Digital - Sede Bogotá.
- Sánchez, I., & Lozano-Rivas, W. A. (2012). Preparación, composición y uso de agua residual sintética para alimentación de reactores prototipo y de laboratorio. *Revista de Didáctica Ambiental*, 8(11), 10-16. Recuperado de:  
<http://www.didacticaambiental.com/revista/numero11/completa.pdf>
- Sanz, P., & Trallero, J. (2010). Intoxicaciones por otros metales. En *Toxicología clínica* (pp. 550-569). Medellín, Colombia: CIB Corporación para investigaciones Biológicas.

Sayago, U. F. C. (2016). Diseño y evaluación de un biosistema de tratamiento a escala piloto de aguas de curtiembres a través de la *Eichhornia crassipes*. Revista Colombiana de Biotecnología, 18(2), 74-81. Recuperado de:

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/52271/html>

Sial, R. A., Chaudhary, M. F., Abbas, S. T., Latif, M. I., & Khan, A. G. (2006). Quality of effluents from Hattar industrial estate. Journal of Zhejiang University SCIENCE B, 7(12), 974-980. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.

Stottmeister, U., Wießner, A., Kuschik, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Muller, R. & Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. Biotechnology advances, 22(1), 93-117. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975003001319?via%3Dihub>

Team, P. W. (2001). Technical and Regulatory Guidance Document. Phytotechnology: Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group Phytotechnologies Work Team, 1-124. Recuperado de: <https://itrcweb.org/GuidanceDocuments/PHYTO-3.pdf>

Téllez, J., Carvajal, R., & Gaitán, A. M. (2004). Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso productivo de curtiembres. Facultad de Medicina Universidad Nacional Colombia, 52(1), pp.50-61. Recuperado de:

<https://search.proquest.com/openview/c8f6c1dc58b086be05612e8958ff592a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2035757>

Torres, Z. S. I., & Vásquez, V. R. A. (2010). Estudio de la potencialidad de crecimiento de once especies vegetales nativas tropicales regadas con lixiviados de rellenos sanitarios (Tesis de grado (ingeniería sanitaria), facultad de ingeniería, universidad del Valle. Cali, Colombia).

- US EPA, A. E. (1993). Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment A Technology Assessment. Washington: US EPA Office of Water. Recuperado de: <http://www.ceadu.org.uy/documentos/Manual%20EPA%20de%20Sistemas%20Naturales.pdf>
- US – EPA (2000). United States, Environmental Protection Agency. Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales. Humedales de flujo sub-superficial. Office of Water Washington, D.C.
- Valderrama, M., & Hernández, S. (2005). Propuesta para un Plan de Ordenación Pesquera en la Laguna de Fúquene. Serie de divulgación Técnica (1).
- Valera, M. (2001). Tasas de descomposición de las macrófitas *Schoenoplectus californicus*, *Egeria densa* y *Eichhornia crassipes* en la laguna de Fúquene. Tesis para optar el título ecóloga. Pontificia Universidad Javeriana. Citado por: Mora Ortiz, L. (2009). Crecimiento sobre buchón y elodea de *pleurotus ostreatus* y efecto de esta especie fúngica sobre la digestibilidad del sustrato lignocelulósico como potencial alimento para rumiantes (Tesis para optar el título ecóloga. Pontificia Universidad Javeriana).
- Van Deeps A., (2006). Phytoremediation of petroleum hydrocarbons. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste and Emergency Response and Office of Superfund Remediation and Technology Innovation. Washington, DC.
- Vargas, R., (2005). Eliminación de metales pesados de aguas subterráneas mediante sistemas de lechos sumergidos: estudio microbiológico de las biopelículas. Tesis doctoral, Universidad de Granada, instituto del agua. Editorial de la Universidad de Granada. ISBN: 84-338-3363-4.
- Veiga, M. (2010). Antioquia, Colombia: the world's most polluted place by mercury: impressions from two field trips. United Nations Industrial Development Organization, Vienna, 1-24.

- Velasteguí, A., & Elizabeth, L. (2016). Análisis comparativo de la velocidad de degradación de cromo VI aplicando fitorremediación en medio físicos distintos: suelo y agua (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4892>
- Villegas J, Guerrero J, Castaño J, Paredes D. (2006). Septic Tank (ST)-Up flow anaerobic filter (UFAF)-Subsurface flow constructed wetland (SSF-CW) systems aimed at wastewater treatment in small localities in Colombia. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 29(3). pp. 269-281. Recuperado de: [http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:XeAxM3wvkWcJ:scholar.google.com/++Villegas+J,+Guerrero+J,+Casta%C3%B1o+J,+Paredes+D.+\(2006\).+&hl=es&as\\_sdt=0,5](http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:XeAxM3wvkWcJ:scholar.google.com/++Villegas+J,+Guerrero+J,+Casta%C3%B1o+J,+Paredes+D.+(2006).+&hl=es&as_sdt=0,5)
- Vymazal, J. (2011). Long-term performance of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: Ten case studies from the Czech Republic. *Ecological Engineering*, 37(1), 54-63. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857409003310>
- Yabe, M. J. S., & de Oliveira, E. (2003). Heavy metals removal in industrial effluents by sequential adsorbent treatment. *Advances in environmental research*, 7(2), 263-272. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Zhi-xin, N, Li-na, S., Tie-heng, S., Yu-shuang, L., Hong, W., (2007). Evaluation of phytoextracting cadmium and lead by sunflower, ricinus, alfalfa and mustard in hydroponic culture. *Journal of environmental sciences*, 19(8), 961-967. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074207601582>