

**REDISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y REÚSO:
MODELO DIDÁCTICO LABORATORIO DE RECURSOS HÍDRICOS UNIVERSIDAD CATÓLICA DE
COLOMBIA**

**MARIA ESTEFANY MORALES CAICEDO
LEIDY LETICIA CASTELLANOS RODRIGUEZ**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2018**

**REDISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y REÚSO:
MODELO DIDÁCTICO LABORATORIO DE RECURSOS HÍDRICOS UNIVERSIDAD CATÓLICA DE
COLOMBIA**

**MARIA ESTEFANY MORALES CAICEDO
LEIDY LETICIA CASTELLANOS RODRIGUEZ**

**Trabajo De Grado Para Optar Al Título De
Ingenieras Civiles**

**Directora
Ing. Paula Andrea Villegas González
Magister en Hidrosistemas
Candidata Doctora en Ingeniería**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2018**



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5 CO)

Esto es un resumen legible por humanos del [Texto Legal \(la licencia completa\)](#).

[Advertencia](#)

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación:

Ing. PAULA ANDREA VILLEGAS GONZÁLEZ
Directora de Proyecto

Ing.
Asesor de Proyecto

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del jurado

Fecha: 20 Noviembre 2018.

CONTENIDO

MARCO CONCEPTUAL	10
RESUMEN	19
1. INTRODUCCIÓN	20
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	21
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	22
1.2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	24
1.3 OBJETIVOS	25
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	25
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES	26
1.4.1 ALCANCES	26
1.4.2 LIMITACIONES	26
1.5 MARCO TEÓRICO	27
1.5.1 ESTADO ACTUAL Y EVOLUCIÓN DEL SANEAMIENTO Y LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN EL CONTEXTO NACIONAL E INTERNACIONAL	27
1.5.2 TRATAMIENTO AGUAS RESIDUALES POR UN SISTEMA PILOTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES: EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN ORGÁNICA.	29
1.5.3 BIOFILTRO CON CASCARILLA DE ARROZ Y PASTO VETIVER (CHRYSOPOGON ZIZANIOIDES) PARA EL TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DE LA PTAR DEL INPEC – YOPAL, CASANARE, COLOMBIA	30
1.5.4 REMOCIÓN DE CONTAMINANTES PRESENTES EN AGUAS SUPERFICIALES EMPLEANDO CARBÓN ACTIVADO GENERADO A PARTIR DE MATERIALES DE DESECHO AGROINDUSTRIAL.	32
1.5.5 MODELO DIDÁCTICO PARA SIMULAR EL FUNCIONAMIENTO EN UN HUMEDAL EN EL LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA	33
1.5.6 FILTRACIÓN CON ANTRACITA Y ARENA CASO PRÁCTICO EN EL REINO UNIDO	35
1.6 MARCO LEGAL	37
1.6.1 ESPECIFICACIONES TOMA DE PARÁMETROS.	37
1.6.2 NORMATIVIDAD PARA LA CALIDAD DE AGUA.	38
1.7 METODOLOGÍA	41
2. DIAGNÓSTICO PROCESO DE DISEÑO MODELO HUMEDAL ARTIFICIAL 2012	44
2.1 MÉTODO DE VACIADO Y LLENADO REED	44
2.2 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO	45
2.3 DESCRIPCIÓN MODELO DIDÁCTICO 2012	47

3. REDISEÑO PROTOTIPO HUMEDAL ARTIFICIAL.	49
3.1 USO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL GENERADO EN 2012	49
3.2 MATERIALES EMPLEADOS PARA MODELACIÓN DE HUMEDAL.	50
3.3 CONDICIONES MUESTRA A TRATAR	56
3.4 ENSAYOS DE LABORATORIO Y RESULTADOS	56
3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
3.5.1 PH	58
3.5.2 CONDUCTIVIDAD	59
3.5.3 RESISTIVIDAD	61
3.5.4 TURBIEDAD	63
3.5.6 SALINIDAD	66
3.5.7 OXÍGENO	68
3.5.8 PORCENTAJE DE OXÍGENO	71
3.5.9 SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (TDS)	72
3.5.10 ALCALINIDAD	73
3.5.11 TEMPERATURA	75
4. EFICIENCIA DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DADO POR EL HUMEDAL ARTIFICIAL REDISEÑADO.	78
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
ANEXOS	88
BIBLIOGRAFÍA	97

TABLA DE ILUSTRACIONES

<i>Figura 1. Esquema agua residual.</i>	10
<i>Figura 2. Clasificación de los humedales</i>	11
<i>Figura 3. Sistema de agua superficial libre (Llagas Chafloque and Guadalupe Gómez, 2006).</i>	12
<i>Figura 4. Sistemas de flujo bajo la superficie (Llagas Chafloque and Guadalupe Gómez, 2006).</i>	13
<i>Figura 5. Ventajas y desventajas de un sistema de humedal de flujo subsuperficial (Ortiz, 2014).</i>	14
<i>Figura 6. Esquema simplificado de un humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal (a) (Vidal, 2018).</i>	15
<i>Figura 7. Esquema simplificado de un humedal artificial de flujo sub-superficial vertical (b) (Vidal, 2018).</i>	15
<i>Figura 8. Esquema humedal flujo superficial (Vidal, 2018).</i>	16
<i>Figura 9. Humedal córdoba.</i>	17
<i>Figura 10. esquema típico de una planta emergente (Ortiz, 2014).</i>	18
<i>Figura 11. Esquema desarrollo de las fases.</i>	42
<i>Figura 12. Diseño hidráulico modelo humedal sub-superficial 2012 (Charry and Achipiz, 2012).</i>	45
<i>Figura 13. Diseño humedal artificial (Charry and Achipiz, 2012).</i>	46
<i>Figura 14. Proceso de recirculación de agua tratada en humedal artificial</i>	47
<i>Figura 15. Limpieza y desinfección recipiente humedal artificial.</i>	50
<i>Figura 16. Grava para prototipo.</i>	50
<i>Figura 17. Sembrado de junco</i>	52
<i>Figura 18. Recolección agua rio arzobispo. I</i>	52
<i>Figura 19. Recolección agua rio arzobispo. II</i>	53
<i>Figura 20. Antracita en el sistema de humedal</i>	53
<i>Figura 21. Rediseño humedal artificial</i>	54
<i>Figura 22. Detalle de rediseño humedal artificial.</i>	55
<i>Figura 24. Envase de muestra para toma de resultados.</i>	69

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Enfermedades transmitidas por el agua.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2. Valores de las concentraciones de DQO de las muestras obtenidas durante la temporada de estiaje y porcentaje de remoción de la carga orgánica de aguas residuales (Romero-Aguilar et al., 2009).</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 3. Valores obtenidos del análisis de laboratorio en el cuarto muestreo (Higuera, 2016).....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4. Resultados de remoción (Aguilar et al., 2016)</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 5. Resultados de pruebas y análisis de laboratorio (Charry & Achipiz, 2012)</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 6. Resultados de pruebas (Miller, 2006).....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 7. Especificaciones de toma de parámetros (fuente propia).</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 8. Guías que establecen límites para algunos parámetros de calidad del agua empleada para riego (Vera et al., 2016).</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 9. Parámetros de calidad de agua para uso agrícola según la normatividad colombiana (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 10. Límites de clases norma secundaria de calidad ambiental de agua para riego (Sancha et al., 2005).....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 11. Plan de monitoreo para desarrollo laboratorios</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 12. Plan de monitoreo para nitritos.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 13. Resultados de pruebas y análisis de laboratorio (prototipo 2012).</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 14. Resultados laboratorio humedal artificial prototipo 1</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 15. Resultados laboratorio humedal artificial prototipo 2.....</i>	<i>57</i>

LISTA DE GRÁFICOS

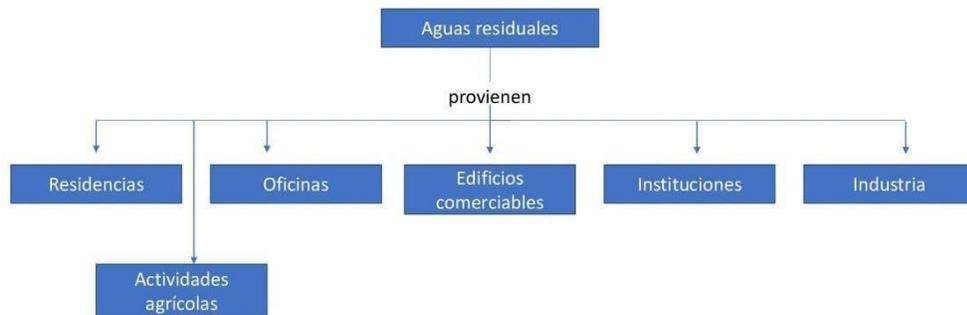
Gráfico 1. Resultados de pH para prototipo No 1.....	58
Gráfico 2. Resultados de pH para prototipo No 2.....	59
Gráfico 3. Resultados de conductividad para prototipo No 1	60
Gráfico 4. Resultados de conductividad para prototipo No 2	61
Gráfico 5. Resultados de resistividad para prototipo No 1.....	62
Gráfico 6. Resultados de resistividad para prototipo No 2.....	63
Gráfico 7. Resultados de turbiedad para prototipo No 1	63
Gráfico 8. Resultados de turbiedad para prototipo No 2	64
Gráfico 9. Resultados de color aparente para prototipo No 1.....	65
Gráfico 10. Resultados de color aparente para prototipo No 2.....	66
Gráfico 11. Resultados de salinidad para prototipo No 1.....	67
Gráfico 12. Resultados de salinidad para prototipo No 2.....	68
Gráfico 13. Resultados de oxígeno disuelto para prototipo No 1.....	68
Gráfico 14. Resultados de oxígeno disuelto para prototipo No 2.....	70
Gráfico 15. Resultados de porcentaje de oxígeno para prototipo No 1.....	71
Gráfico 16. Resultados de porcentaje de oxígeno para prototipo No 2.....	71
Gráfico 17. Resultados de sólidos disueltos suspendidos para prototipo No 1.....	72
Gráfico 18. Resultados de sólidos disueltos suspendidos para prototipo No 2.....	73
Gráfico 19. Resultados de alcalinidad para prototipo No 1.....	74
Gráfico 20. Resultados de alcalinidad para prototipo No 2.....	75
Gráfico 21. Resultados de temperatura para prototipo No 1.....	76
Gráfico 22. Resultados de temperatura para prototipo No 2.....	77
Gráfico 23. Resultados de nitritos para prototipo No 2.....	77
Gráfico 24. Comparación pH.....	78
Gráfico 25. Comparación conductividad.....	79
Gráfico 26. Comparación resistividad.....	80
Gráfico 27. Comparación turbiedad.....	80
Gráfico 28. Comparación color aparente.....	81
Gráfico 29. Comparación salinidad.....	82
Gráfico 30. Comparación oxígeno disuelto.....	82
Gráfico 31. Comparación porcentaje de oxígeno.....	83
Gráfico 32. Comparación (SDS).....	84
Gráfico 33. Comparación temperatura.....	84
Gráfico 34. Comparación alcalinidad.....	85

MARCO CONCEPTUAL

Para el desarrollo del proyecto se presentan los términos fundamentales de la investigación.

A. Aguas residuales: agua que procede de viviendas, poblaciones o zonas industriales y arrastra suciedad y detritos (Diccionario de la lengua español, 2017).

Figura 1. Esquema agua residual.



FUENTE: Propia

Resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con residuos de industrias, de actividades agrícolas, así como las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación (Ortiz, 2014).

En la Figura 1 se muestran los diferentes medios de donde provienen las aguas residuales.

B. Coliformes: bacterias Gram Negativas en forma bacilar que fermentan la lactosa a temperatura de 35 a 37°C, produciendo ácido y gas (CO₂) en un plazo de 24 a 48 horas. Se clasifican como aerobias o anaerobias facultativas. Es un indicador de contaminación microbiológica del agua para consumo humano (Ministerio de la Protección Social and Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial I, 2017).

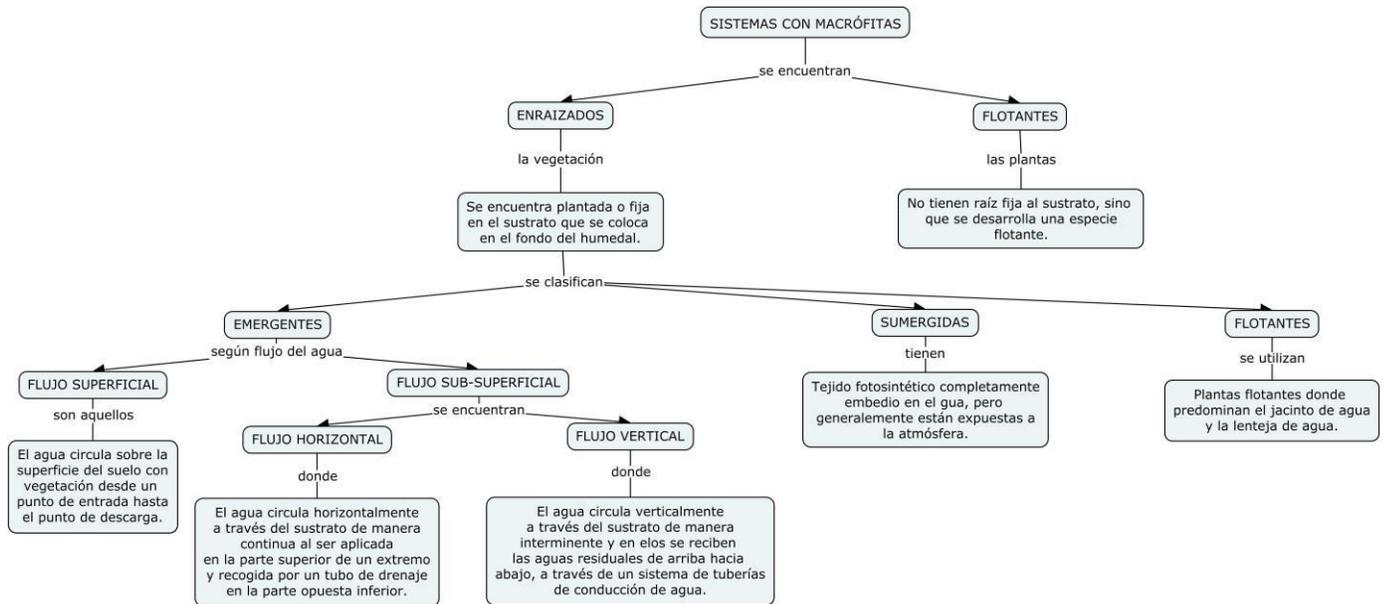
Tradicionalmente se les ha considerado como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua destinada al consumo humano en razón de que, en los medios acuáticos, los coliformes son más resistentes que las bacterias patógenas intestinales y porque su origen es principalmente fecal. Por tanto su ausencia indica que el agua es bacteriológicamente segura (Calidad microbiológica, 2018).

C. Humedal artificial: es un sistema de tratamiento de agua residual (estanque o cauce) poco profundo construido por el hombre, en el que se han sembrado plantas acuáticas y contando con los procesos naturales para tratar el agua residual. Los wetlands (humedales en inglés) construidos tienen ventajas respecto de los sistemas de tratamiento alternativos, debido a que requieren poca o ninguna energía para operar (Llagas Chafloque and Guadalupe Gómez, 2006).

Son sistemas complejos e integrados en los que tienen lugar interacciones entre el agua, plantas, animales, microorganismos, energía solar, suelo y aire; con el propósito de mejorar la calidad del agua residual y proveer mejoramiento ambiental (Ortiz, 2014).

D. Humedales construidos: los humedales construidos consisten principalmente en estanques poco profundos en los que se implantan especies vegetales adaptables a la vida acuática y en los que la depuración se basa en procesos naturales de tipo microbiológico, biológico, físico y químico. Su diseño es muy variado, pero siempre incluye canalizaciones, aislamiento del suelo para evitar el paso de la contaminación a los ecosistemas circundantes y el control del flujo efluente en cuanto a su dirección, flujo, tiempo de retención y nivel del agua (Vidal, 2018).

Figura 2. Clasificación de los humedales



Fuente: Propia

Se cuenta con una clasificación de estos según su tipo de vegetación, y a partir de esto se generan sub-clasificaciones mostrada en la Figura 2.

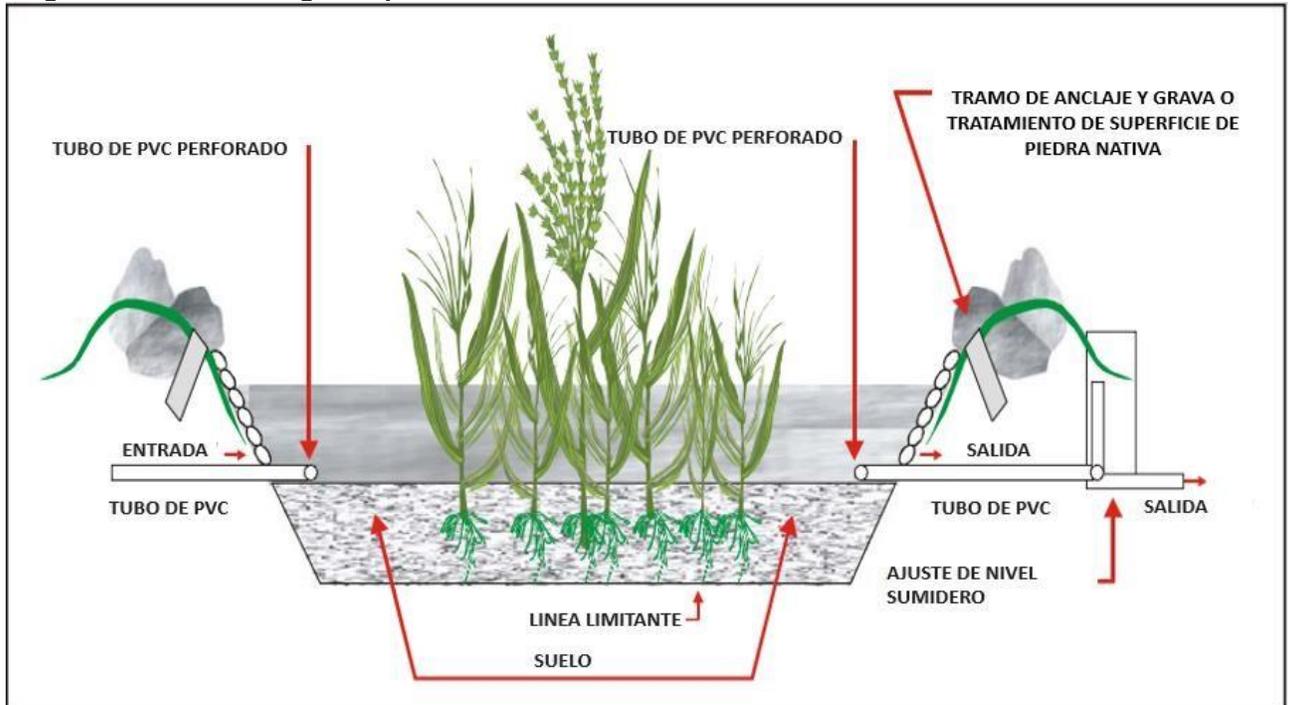
Se establecen dos tipos de humedales construidos, aquellos que su sistema se encuentra superficial libre y sistemas de flujo bajo superficie.

- **Sistema de agua superficial libre (SAL):** estos sistemas consisten de estanques o canales, con una clase de barrera subterránea para prevenir la filtración, suelo u otro medio conveniente a fin de soportar la vegetación emergente, y agua en una profundidad relativamente baja (0,1 a 0,6 m) que atraviesa la unidad. La profundidad baja del agua, la velocidad baja del flujo, y la presencia de tallos de planta y basura regulan el flujo del agua. Se aplica agua residual pre-tratada a estos sistemas, y el tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente el tallo y la raíz de la vegetación

emergente (Llagas Chafloque and Guadalupe Gómez, 2006).

En la Figura 3 se muestra el esquema básico de un humedal con sistema de agua a superficie libre explicado anteriormente.

Figura 3. Sistema de agua superficial libre

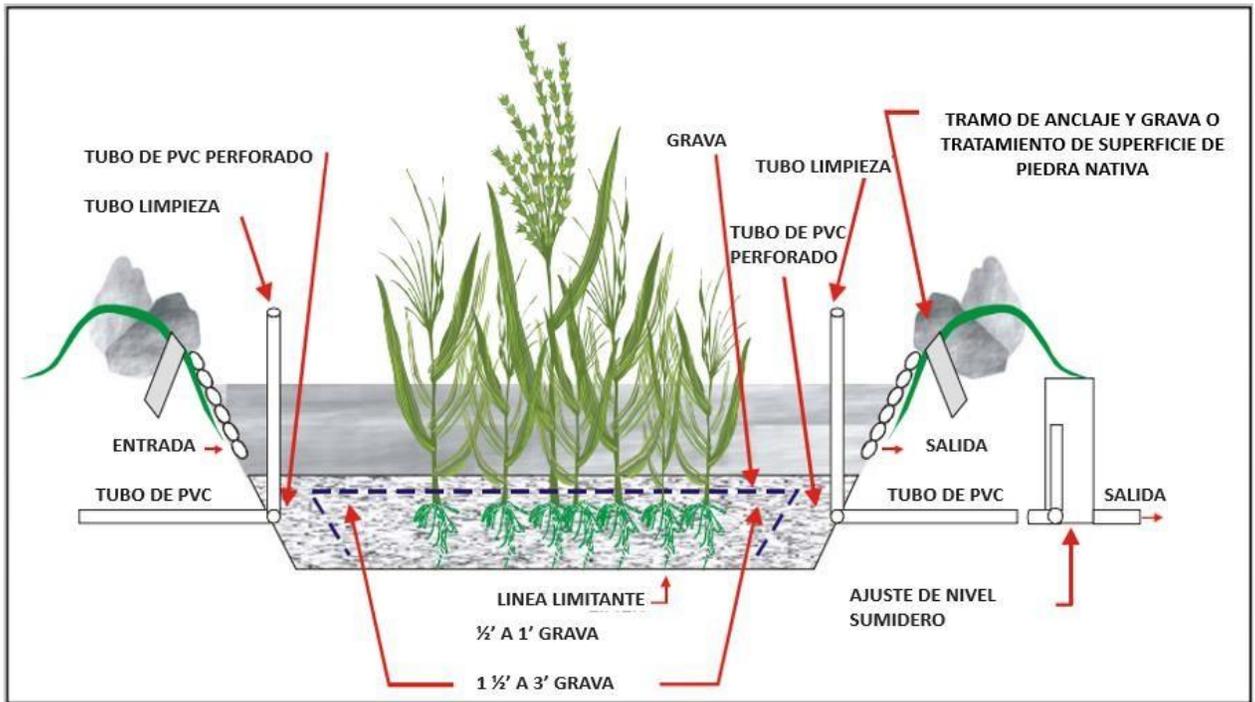


Fuente: (Llagas Chafloque and Guadalupe Gómez, 2006).

- **Sistemas de flujo bajo la superficie (SFBS):** estos sistemas son similares a los filtros horizontales por goteo en las plantas de tratamiento convencionales. Se caracterizan por el crecimiento de plantas emergentes usando el suelo, grava o piedras como sustrato de crecimiento en el lecho del canal. Dentro del lecho los microbios facultativos atacan al medio y las raíces de las plantas, contactando de este modo el agua residual que fluye horizontalmente a través del lecho, mientras que el sobrante baja a la superficie del medio (Llagas Chafloque and Guadalupe Gómez, 2006).

En la Figura 4 se muestra el esquema básico de un humedal con sistema de flujo bajo la superficie, el cual se explicó anteriormente.

Figura 4. Sistemas de flujo bajo la superficie



Fuente: (Llagas Chafloque and Guadalupe Gómez, 2006).

- E. Humedal flujo subsuperficial:** los sistemas de flujo subsuperficial están contruidos típicamente en forma de un lecho o canal, que puede o no tener una barrera que impida la percolación del agua hacia el subsuelo, además contiene un medio apropiado (grava, arena u otro material) que soporta el crecimiento de las plantas. La profundidad del medio en estos humedales de flujo subsuperficial tiene un rango de 0.3 a 0.9 metros, siendo el valor más común el de 0.6 metros. El nivel del agua está por debajo de la superficie del soporte y fluye únicamente a través del medio que sirve para el crecimiento de la película microbiana, que es la responsable en gran parte del tratamiento que ocurre al agua residual, en donde las raíces penetran hasta el fondo del lecho, para lo cual el material que conforma el lecho filtrante debe ser suficientemente grande para permitir un flujo subterráneo a largo plazo sin obstrucciones. Las raíces y tubérculos (rizomas) de las plantas crecen en los espacios de poros de la grava (Ortiz, 2014).

Figura 5. Ventajas y desventajas de un sistema de humedal de flujo subsuperficial

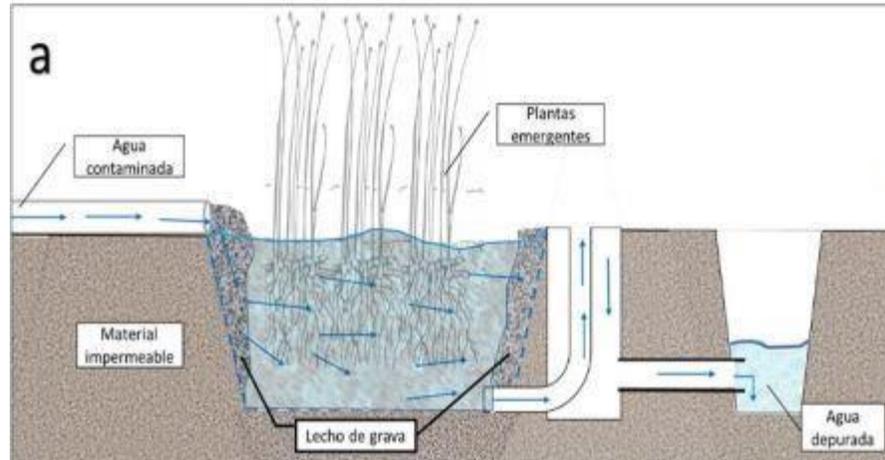
Ventajas	Desventajas
Proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de personal especializado.	El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
Pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento.	Un humedal de flujo subsuperficial requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
La configuración de los humedales de flujo subsuperficial proporciona una mayor protección térmica que los humedales de flujo libre.	La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo subsuperficial es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
No producen biosólidos ni lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente y disposición.	En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, NH ₃ y NO ₃ .
La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles puede ser también efectiva con un tiempo de retención significativamente mayor.	Los humedales de flujo subsuperficial no pueden ser diseñados para lograr una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias Coliformes. Los ciclos ecológicos en estos humedales producen concentraciones naturales de esos compuestos.
Los mosquitos y otros insectos vectores similares no son un problema con los humedales de flujo subsuperficial, mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial de flujo se mantenga.	Si bien los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de menor superficie que los humedales de flujo libre, para la remoción de la mayoría de los constituyentes del agua residual, el costo mayor del medio de grava en los sistemas de flujo subsuperficial puede dar como resultado costos de construcción más altos para sistemas con una capacidad mayor a 227 m ³ por día (60.000 galones por día).

Fuente: (Ortiz, 2014).

La Figura 5 especifica aquellas ventajas y desventajas denotadas en el sistema de flujo subsuperficial, ahora bien existe una sub-clasificación en este sistema el cual es flujo horizontal y vertical, sistemas explicados a continuación:

- Humedales Subsuperficiales de flujo horizontal:** En estos sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular, los rizomas y raíces de las plantas, ingresando en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. La profundidad del lecho varía entre 0.45 m a 1 m y tiene una pendiente entre 0.5% a 1% (Ortiz, 2014).

Figura 6. Esquema simplificado de un humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal (a)

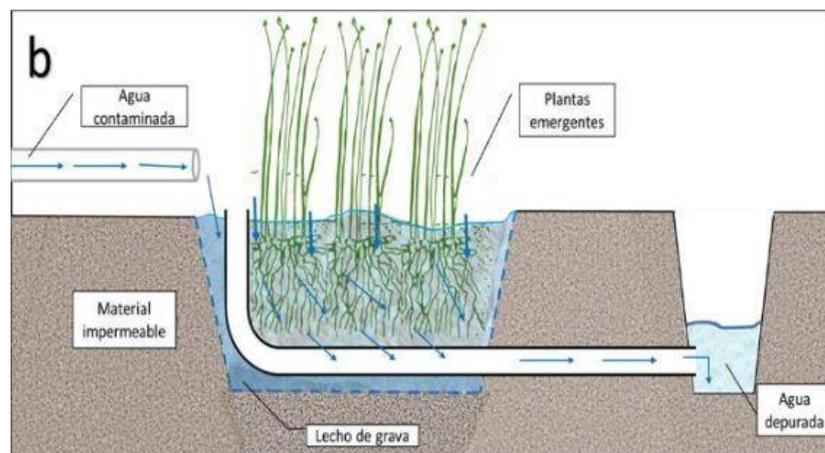


Fuente: (Vidal, 2018).

En la Figura 6 muestra el esquema de humedal de flujo sub-superficial horizontal, la cual especifica cómo se conforma dicho sistema.

- **Humedales subsuperficiales de flujo vertical:** este tipo de humedal recibe las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua. Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La vegetación emergente se planta también en este medio granular- La profundidad del medio granular está entre 0.5 y 0.8 m y operan con cargas alrededor de 20 a 40 g DBO/m² d, produciendo efluentes de mayor oxigenación y están libres de malos olores (Ortiz, 2014).

Figura 7. Esquema simplificado de un humedal artificial de flujo sub-superficial vertical (b)



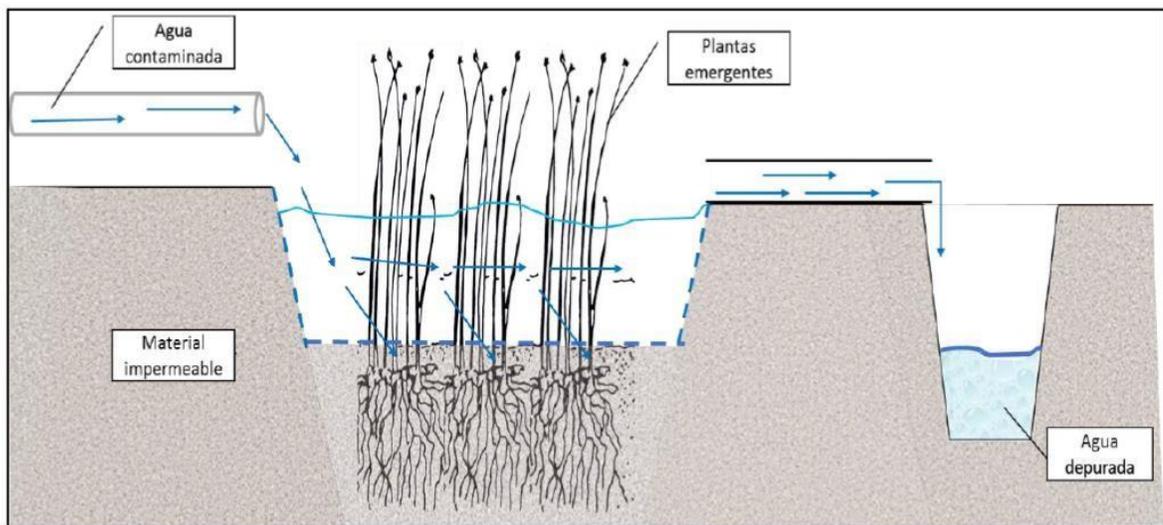
Fuente: (Vidal, 2018).

En la Figura 7 se muestra el esquema típico de humedal de flujo subsuperficial explicado anteriormente.

F. Humedal flujo superficial: los humedales de flujo superficial, consisten en un sistema de baja profundidad, con alguna clase de barrera subterránea para prevenir la percolación al agua freática susceptible a contaminación, y una capa sumergida de gravilla u otro medio como soporte para las raíces de la vegetación macrófita emergente seleccionada. Además, se emplea una estructura reguladora de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual aplicada entre niveles de 0,1 a 0,6 m. Este tipo de sistema es capaz de imitar a los sistemas naturales, tanto en apariencia como en función, ya que el flujo de agua pasa sobre la superficie y es filtrado a través de un soporte denso de plantas –acuáticas (Vidal, 2018).

Este sistema de humedal de flujo superficial cuenta con la capacidad de remover parte de la materia orgánica y los sólidos suspendidos de la muestra de agua. En la Figura 8. Se muestra el esquema de un humedal de flujo superficial donde se evidencia el funcionamiento del sistema explicado anteriormente.

Figura 8. Esquema humedal flujo superficial



Fuente: (Vidal, 2018).

G. Humedal natural: son medios semi-terrestres con un elevado grado de humedad y una vegetación profunda que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial de auto depurador. Los humedales naturales pueden alcanzar gran complejidad, con un mosaico de lámina de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie (Llagas Chafloque and Guadalupe Gómez, 2006).

Se consideran humedales las extensiones de marismas, pantanos, turberas o superficies cubiertas de agua, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salubres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros (Secretaría General de Medio Ambiente España, 2002).

Figura 9. Humedal córdoba.



Fuente: Propio

En la Figura 9 se muestra una fotografía tomada en el humedal Córdoba, lugar de donde fueron recogidos los Juncos para ser utilizados en el prototipo de humedal artificial.

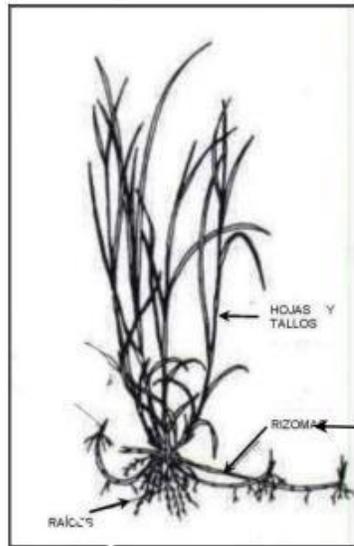
- H. Junco:** es una planta de la familia de las juncáceas, su tamaño habitual es de 90 cm de altura. Vive en suelos húmedos, en riberas y pantanos. La hoja es cilíndrica, alargada, recta y flexible (KewScience, 2017).

Los contaminantes que son también formas de nutrientes esenciales para las plantas, tales como nitrato, amonio y fosfato, son tomadas fácilmente por las plantas de un humedal (Llagas Chafloque and Guadalupe Gómez, 2006).

- I. Microorganismo:** se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmosfera, se desarrollan colonias de microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, eliminación de nutrientes, elementos traza y desinfección (Ortiz, 2014).
- J. Planta subacuática:** planta que lleva a cabo gran parte de su ciclo de vida en el agua, no puede sobrevivir por largos periodos de tiempo en suelos completamente secos. (Córdoba, 2000). Las plantas emergentes que frecuentemente se encuentran en la mayoría de los humedales para aguas residuales son las espadañas, carrizos y juncos. Los juncos y las espadañas o una combinación de estas dos especies son las dominantes en la mayoría de los humedales artificiales en los Estados Unidos (Ortiz, 2014).

La Figura 10 es un esquema típico de una planta emergente, el cual se compone de hojas, tallos, rizoma y raíces.

Figura 10. Esquema típico de una planta emergente



Fuente: (ORTIZ, 2014).

K. Reúso: es un verbo que está vinculado a volver a usar algo. En este sentido, el término puede usarse como sinónimo de reciclar (que consiste en someter un producto o un material a un determinado proceso para que se pueda volver a utilizar) (Definición.DE, 2018).

Utilización de las aguas residuales tratadas cumpliendo con los criterios de calidad requeridos para el uso que se va a destinar (Ambiente, 2004).

L. Sustrato (medio granular): en los humedales el sustrato está formado por suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso de agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5mm aproximadamente y con pocos finos (Ortiz, 2014).

M. Tratamiento de agua: es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico, fisicoquímico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación o características no deseables en el agua bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales. La finalidad de estas operaciones es obtener agua con características adecuadas al uso que se les vaya a dar, por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades del agua como de su destino final (VENTRAT S.A, 2017).

RESUMEN

Las aguas residuales de origen residencial, industrial, comercial, entre otras evidencian la existencia de altos niveles de contaminación. Entre los elementos que las contienen se encuentran los “sólidos suspendidos, coliformes fecales, materia orgánica, metales pesados y otros contribuyentes como aceites, grasas e hidrocarburos” (Peña & Guzmán, 2012). Este tipo de agua es vertida a cuerpos hídricos generando una disminución en la calidad del agua y por ende en las condiciones naturales del mismo. A nivel mundial se han desarrollado diferentes tecnologías para el tratamiento del agua, y entre ellas se destacan los humedales artificiales que se caracterizan por tener una eficiencia en la remoción de cargas contaminantes, reducción de sólidos, remoción de metales por sedimentación, supresión de bacterias por procesos como “filtración, radiación solar, sedimentación”(Vera *et al.*, 2016), (Santana Díaz, 2007). Además, generan una buena relación costo beneficio.

En esta investigación son presentados los resultados del diseño de un prototipo de humedal artificial, que sirve como modelo didáctico para el laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia. Donde se han venido llevando a cabo investigaciones durante los últimos años, para el desarrollo de sistemas de tratamiento de agua en comunidades rurales al interior del Semillero de Investigación EcoCivil. Este diseño tiene como propósito la depuración de agua residual del río Arzobispo (Bogotá) y la reutilización de esta para riego de plantas.

Allí se desarrolla un proceso de recirculación y se utilizan diferentes materiales filtrantes y de soporte: grava, arena y juncos (Primera configuración). Además, se utilizó un nuevo material como medio filtrante, el cual es la antracita que tiene propiedades de absorción dado que es un carbón activado (Primera configuración más antracita conforma la segunda configuración). Para la toma de resultados y comprobación de la efectividad en el sistema de recirculación, el humedal se diseña con dos tiempos de retención de 5 y 21 días.

En el laboratorio fueron medidos los parámetros de pH, turbiedad, sólidos disueltos suspendidos, salinidad, % oxígeno, oxígeno disuelto, conductividad, resistividad, alcalinidad y temperatura. La primera configuración del humedal, tuvo resultados satisfactorios ya que la mayoría de los parámetros se redujeron mejorando las condiciones del agua tratada. Para la segunda configuración se toman las mismas pruebas, donde los resultados fueron óptimos y algunos de los parámetros tuvieron mejores resultados que en la anterior configuración. Esto evidencia porcentajes altos de eficiencia, a excepción de lo sólidos disueltos suspendidos.

Se puede concluir, que los modelos de prototipo de humedal fueron óptimos respecto a los propósitos del proyecto y el agua producto del tratamiento puede ser reusada en riego acorde con la Normatividad Colombiana dada por la Resolución 1207 del 2014 Aguas Residuales Tratadas y la WHO (World Health Organization 2016). Este tipo de tecnologías evidencia que, utilizando sistemas de tratamiento no convencionales, se pueden dar soluciones sustentables para la gestión del agua y con esto aumentar los niveles de resiliencia en las comunidades. Además, son sistemas que tienen un mantenimiento sencillo, que funcionan de manera armónica con diferentes entornos naturales.

1. INTRODUCCIÓN

A partir de este documento se abarcará la importancia de investigar en la temática de tratamiento y reutilización de aguas residuales en Colombia, ya que solo se “trata el 10% de las aguas residuales a pesar de contar con una capacidad instalada que alcanzaría el 20%” (Twenergy, 2014).

En el proceso de investigación del Semillero de investigación EcoCivil se ha identificado la necesidad de avanzar en el estudio de sistemas de manejo de aguas residuales, los cuales deben ser reforzados y aplicados. Para el caso de esta investigación la temática central son los humedales artificiales, donde “se lleva a cabo la interacción de sus componentes: agua, grava, plantas, microorganismos, que permiten la descontaminación de aguas residuales” (Jaramillo-Gallego, Agudelo-Cadavid and Peñuela-Mesa, 2016). Este tipo de sistemas se caracteriza por ser económico y eficaz en su utilización, garantizando ser totalmente aplicable para la depuración de aguas residuales.

En Colombia se está empezando a implementar humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales como alternativa para mejorar la calidad de agua en poblaciones pequeñas, donde las autoridades ambientales empiezan a promover su implementación para la reducción de costos ya que la construcción y mantenimiento de estos requieren menor inversión económica a comparación de los tratamientos de agua convencionales usados. Como normativa se encuentra el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). Título J, donde “se detalla cómo los humedales pueden ser usados como soluciones descentralizadas en las zonas rurales o como tratamiento terciario en otros esquemas” (Siegua, 2018).

Este documento contiene el desarrollo del trabajo de grado para optar al título de ingenieras civiles, donde se presenta el rediseño de un humedal artificial elaborado en la Universidad Católica de Colombia por estudiantes de anteriores semestres en el año 2012. Con este rediseño se pretende obtener mejores resultados en el proceso de depuración de agua, evaluando la calidad de la misma por medio de los diferentes ensayos de laboratorio. Se presenta la comparación de los resultados del presente proyecto con las conclusiones del proyecto anterior y así se determina el mejor método para usar en la depuración de agua la cual podrá ser implementada en el riego de plantas de la universidad.

No solo se realiza la comparación del sistema con respecto al otro, también se demuestra como este tipo de tratamiento es totalmente aplicable para depuración de agua residual. Siendo este un sistema totalmente natural que puede suplir parcialmente a un sistema mecánico, que abarca gran complejidad a la hora de su desarrollo, viendo, así como un humedal artificial es un sistema que es fácil de construir por los elementos que lo componen (grava, arena, planta subacuática). De igual manera este tipo de tratamiento no requiere de costos elevados y garantiza ser un sistema que no causa un impacto ambiental que afecte al ecosistema.

Este documento se divide en 3 capítulos, en donde el capítulo 1, se evidencia todo el proceso investigativo para realizar el prototipo de humedal artificial planteado; el capítulo 2 consta de la explicación del procedimiento de diseño del humedal artificial generado por estudiantes de semestres anteriores en el semillero Eco Civil de la Universidad católica de Colombia y por último en el capítulo 3 se evidencia como se generó el rediseño del humedal artificial y el análisis de los datos encontrados en esta investigación.

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

La utilización de sistemas depuradores es un tema importante en la actualidad ya que estos reducen el impacto ambiental de las aguas residuales sin tratar y generan diferentes tipos de usos como lo son: limpieza de vías y andenes, riego de parques y jardines, fuentes decorativas, riego agrícola, limpieza en la minería, entre otros.

Donde “solo el tercio de la población cuenta con nuevas tecnologías y mejorías en los sistemas de saneamiento” (Hernández, Molinos and Sala, 2012), un país como Colombia no se encuentra entre estos, siendo un factor lo suficientemente importante para querer implementar sistemas de mejoría de aguas residuales. Es aquí donde se ve la importancia a nivel nacional e internacional de sistemas depuradores de agua; por lo que este proyecto abarca un enfoque en humedales artificiales los cuales garantizan la depuración de agua.

Los sistemas de humedales artificiales son una tecnología sostenible, para el tratamiento de aguas residuales y se han extendido a lo largo del mundo “mostrando crecimiento importante en la década de 1990” (Vera *et al.*, 2016) ya que “son de fácil mantenimiento y operación... sistema sencillo de construir y poner en funcionamiento” (Jaramillo-Gallego, Agudelo-Cadavid and Peñuela-Mesa, 2016).

A partir de investigaciones estos sistemas tienden a ser óptimos por factores como “remoción de sólidos en suspensión totales (SST) entre 74-84%, eliminación demanda química de oxígeno (DQO) cerca de 50%, nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) debajo al 35%” (Vera *et al.*, 2016). Estos son algunos de los parámetros evaluados para la calidad de agua a nivel nacional e internacional, adaptados por la WHO (Organización mundial de la salud), Real Decreto Español, USEPA (Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos), Decreto 1594 de 1984 Colombiano, entre otros. Mostrando con lo anterior, ser un sistema viable para implementar y argumentando, así como el uso de este ha ido aumentando.

Por otro lado, se han generado investigaciones como la efectuada hace 6 años por estudiantes de la Universidad Católica del grupo de Semillero (EcoCivil), donde se desarrolló un modelo didáctico de humedal artificial. Apartir de esta experiencia surge la idea de realizar un rediseño de este, para garantizar mejorías en calidad del agua y así mismo comparar resultados ya efectuados para demostrar la optimización que se quiere generar.

También se quiso no solo realizar una comparación con respecto al modelo de los estudiantes de la Universidad Católica del año 2012, sino generar un uso en el agua tratada, en este caso para riego en plantas. Se tomó de referencia las normas internacionales y nacionales como el Decreto 3930 de 2010 y OMS (Organización Mundial de la Salud) para analizar los parámetros de calidad del agua respecto al uso de riego de plantas.

La Universidad Católica de Colombia al apoyar proyectos donde se generan sistemas no convencionales como lo son los humedales artificiales; garantiza que nuevos estudiantes podrán aplicar estos métodos para observar el comportamiento que se da en estos sistemas naturales para la depuración de agua. Así como determinar aquellas ventajas que prevalecen sobre los sistemas convencionales. Además la Universidad puede hacer uso del agua tratada para riego en plantas lo cual genera que el sistema garantice un beneficio adicional.

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Descripción del problema

El tratamiento de agua en Colombia está generando una gran problemática, ya que en la actualidad “solo el 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de agua residuales (PTAR), es decir de 1.122 municipios en el país, solo 541 cuentan con sistemas de saneamiento” (Venegas, 2018), siendo Cundinamarca el departamento con mayor cantidad de PTAR.

La baja cantidad de PTAR en el país genera que las poblaciones más vulnerables se vean en la necesidad de obtener agua en lugares aledaños a donde estos se encuentran, esta agua es utilizada sin ningún tipo de tratamiento previo, en su mayoría el agua recolectada es para consumo humano, cocina, baños, riego de cultivos, entre otras. Esta situación conduce a la propagación de diferentes enfermedades por la no descontaminación de agua, enfermedades como “hepatitis A, enfermedad diarreica aguda EDA, enfermedades transmitidas por alimentos ETA y fiebre tifoidea y paratifoidea” (Rodríguez, Garcia and Garcia, 2016).

En la TABLA 1 se pueden observar las principales enfermedades transmitidas por el agua en Colombia, estas son “de acuerdo a la evidencia científica reportada entre 1998 y el 2012, las importantes en términos de salud pública.” (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2012).

Tabla 1. Enfermedades transmitidas por el agua

Enfermedades transmitidas por agua

Enfermedades diarreicas

Cólera

Fiebre tifoidea – Fiebre paratifoidea

Otras infecciones por *Salmonella*

Shigelosis

Otras infecciones bacterianas intestinales

Otras intoxicaciones alimentarias bacterianas

Amebiasis

Otras infecciones intestinales debidas a protozoarios

Otras infecciones intestinales organismos especificados

Diarrea y gastroenteritis de presunto origen infeccioso

Hepatitis A

Tracoma

Esquistosomiasis

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

En Colombia actualmente existen varios métodos para la depuración de aguas residuales teniendo una tendencia a “tratamientos secundarios (lodos activados, filtros bacterianos o lagunaje), lagunas de estabilización, sistemas de aireación extendidas y filtros biológicos” (Twenergy, 2014), donde en Colombia solo se “trata el 10% de las aguas residuales a pesar de contar con una capacidad instalada que alcanzaría el 20%” (Twenergy, 2014). A partir de esta problemática surge la priorización de mejoras en sistemas de depuración de agua residual, siendo el caso tratado de humedales artificiales que garantizan eficiencia, los cuales “proveen sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos” (Santana Díaz, 2007) son sistemas económicos de fácil mantenimiento, además de ser un método totalmente natural.

Por otra parte realizar el reusó de agua es muy importante ya que se ha demostrado que es “posible desarrollar empresas que gestionen integradamente el reusó de aguas residuales, lo cual permitiría generar empleo en la región y desarrollo económico” (Manga and Logreira, 2001). También el reúso del agua contribuye con el cuidado del agua en el país, resaltando que existen muchas poblaciones las cuales no tienen acceso a un sistema de agua potable, por esto es necesario la implementación de capacitaciones a las personas de poblaciones vulnerables, con el fin de generar la depuración de agua con sistemas no convencionales, pero de fácil manejo.

Es importante destacar que el riego es la principal forma de reutilización de aguas residuales. “La aplicación agrícola de aguas reutilizadas requiere de una adecuada gestión ya que se deben controlar los niveles de macronutrientes y de salinidad, el caso de la salinidad si se presenta un incremento en este parámetro puede afectar el sistema agua-suelo-planta, y esto a su vez, da como pérdida el rendimiento de las cosechas y de la calidad del fruto” (Manga and Logreira, 2001).

Teniendo en cuenta la información anterior es importante resaltar que son pocos los humedales en Colombia que son construidos para el tratamiento de agua, por esto se destaca el realizar el análisis de los sistemas de humedales.

1.2.2 Formulación del problema.

Como se expresó en la descripción del problema, se estudian los humedales y los diferentes prototipos de humedales, con el fin de elaborar el rediseño de un humedal artificial implementado en el año 2012 por estudiantes de la Universidad Católica de Colombia. De esta manera se pretendió así realizar mejoras en la calidad del agua residual, así como analizar un sistema de reuso para riego de plantas, teniendo en cuenta la normatividad de calidad de aguas vigente. De esta manera, se desarrollaron progresos con los que se pretende garantizar resultados óptimos frente al sistema anterior.

El tema que se quiere abarcar es de gran relevancia debido a la disminución de impactos ambientales y potencial de enfermedades producidas por el inadecuado manejo de aguas residuales. Tal y como se expresa en el ítem anterior, actualmente solo el 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de agua residuales, lo cual genera que gran parte de la población se vea afectada con el uso de agua sin tratar ya que esta es utilizada en su mayoría para uso agrícola (riego de cultivos, jardines, parques), lavado, descarga de sanitarios; el uso de esta agua, puede generar a la población diversas enfermedades, entre ellas la que tiene mayor impacto en la sociedad son las enfermedades diarreicas. “De acuerdo al DANE, en Colombia aproximadamente el 7.3 por ciento de la mortalidad infantil se atribuye a enfermedades diarreicas (1,450 a 1,820 muertes por año). Se estima del 90% de los casos y de las hospitalizaciones de esta causa, se puede atribuir al agua, al saneamiento y la higiene, es más frecuente en las zonas rurales habitadas por los segmentos más pobres de la población, como es el caso de la población que habita en los departamentos de Chocó, Cauca, Valle del Cauca y Nariño” (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2012). Por esto mismo es importante que se tenga la oportunidad de conocer los diferentes métodos de tratamiento secundario como lo son los Humedales.

Teniendo, así como objetivo principal, garantizar la depuración de agua residual, con un proceso de recirculación del sistema de humedal artificial que podría generar resultados óptimos y satisfactorios para la investigación.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Rediseñar un modelo de humedal artificial para la depuración de aguas residuales y reúso en plantas de la Universidad Católica de Colombia.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar el diagnóstico del humedal didáctico diseñado por estudiantes de la Universidad Católica, que se encuentra en el laboratorio de recursos hídricos.
- Proponer e implementar el rediseño del humedal que genere la circulación y un mejor tratamiento del agua y la posibilidad de reúso. Esto con el fin de mejorar el modelo didáctico que se encuentra en el laboratorio de recursos hídricos del Programa de Ingeniería Civil.
- Analizar la eficiencia del sistema de depuración de aguas residuales dado por el humedal artificial rediseñado.

1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.4.1 Alcances

El presente proyecto tiene como fin desarrollar el rediseño de un modelo didáctico de humedal artificial, generado anteriormente en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia en el año 2012 para la depuración de agua. En este proyecto se realiza el proceso de depuración de varias fuentes de agua implementando diferentes medios filtrantes. Adicional se hace la implementación de un sistema de recirculación del agua con el fin de obtener mejores resultados en el proceso de depuración del agua residual, resultados que son comparados con la normatividad vigente y así mismo con los datos obtenidos en el diseño inicial del humedal artificial.

Este modelo es desarrollado en los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia, el agua depurada obtenida es analizada para verificar que cumpla los criterios de calidad y según los resultados, pueda ser usada en el riego de plantas que están en las instalaciones de las instalaciones.

Se tomó como referencia para la elaboración de este proyecto el modelo de simulación de humedal artificial generado anteriormente desde el semillero EcoCivil en la universidad, además las investigaciones realizadas en diferentes ciudades de Colombia y a nivel mundial.

1.4.2 Limitaciones

El proceso establecido para la solicitud de prácticas libres en los laboratorios de la Universidad en donde se llevó a cabo tanto los ensayos de laboratorios, como la elaboración del modelo propuesto, supera los ocho días de respuesta. Por ende, esta situación generó atrasos en la elaboración del proyecto afectando la debida toma de resultados, ya que los tiempos de retención suelen darse entre (5-6) días. Siendo este un factor limitante para el proyecto efectuado; sin embargo se realizó la modificación del plan de monitoreo para cumplir con la meta propuesta, es por esto que se establecen tiempos de retención de 5 días y 21 días.

Adicional a esto, no se encuentran las herramientas adecuadas y tampoco se cuenta con ensayos de laboratorio como: coliformes y DBO que son parámetros estipulados en la normatividad colombiana (Decreto 3930 de 2010), también en la OMS (Organización mundial de la salud) y en la resolución 1207 de 2014 para calidad de agua en riego.

1.5 MARCO TEÓRICO

Dentro de los contaminantes del agua ya sea residencial, industrial, comercial entre otras se evidencia la existencia de “sólidos suspendidos, coliformes fecales, materia orgánica, metales pesados y otros contribuyentes como aceites, grasas e hidrocarburos” (Peña & Guzmán, 2012). Este tipo de agua contaminada es vertida a cuerpos hídricos, lo cual genera que disminuyan las condiciones de calidad natural de los mismos. Con el fin de contrarrestar estos impactos, se hacen uso de diferentes métodos para tratar estos factores que disminuyen las condiciones de calidad del agua como lo son los humedales artificiales; caracterizándose por tener una eficiencia en la remoción de cargas contaminantes, reducción de sólidos, remoción de metales por sedimentación, supresión de bacterias por procesos como “filtración, radiación solar, sedimentación” y además teniendo una buena relación costo beneficio.

“Los humedales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociado con un material particulado. El agua superficial se mueve lentamente a través de los humedales debido al flujo laminar característico y la resistencia proporcionada por las raíces y las plantas flotantes. La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad del flujo y por el hecho de que este es con frecuencia laminar en los humedales. Las esteras de plantas en los humedales pueden servir como trampas de sedimentos, pero su rol primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la re-suspensión de material particulado” (Santana Díaz, 2007).

“El desprendimiento de gas resulta a partir de gases como el oxígeno, a partir de la fotosíntesis del agua, metano y dióxido de carbono, producido por los microorganismos en el sedimento durante la descomposición de la materia orgánica.

La remoción biológica es quizá el camino más importante para la remoción de contaminantes en los wetlands es la captación de la planta. Los contaminantes que son también formas de nutrientes esenciales para las plantas, tales como nitrato, amonio y fosfato, son tomados fácilmente por las plantas del humedal” (Llagas Chafloque and Guadalupe Gómez, 2006).

La eficiencia de estos sistemas depende en gran medida al tipo de agua tratada y también el tipo de planta usada en este caso el *Juncus effusus*, el cual es implementado en este proyecto como medio filtrante, y también el diseño que se realice por medio de los investigadores. En el diseño para tratar aguas residuales se debe tener en cuenta variables como: concentración inicial del agua, caudal de entrada, carga hidráulica y concentración requerida a la salida. Siendo estos parámetros de gran relevancia para el proyecto que se realizó donde se buscó el mejoramiento del modelo de humedal artificial de la Universidad Católica de Colombia.

1.5.1 Estado actual y evolución del saneamiento y la depuración de aguas residuales en el contexto nacional e internacional

El siguiente artículo fue desarrollado por María Molinos, Francesc Hernández y Ramón Sala de la Universidad de Valencia. Ellos presentaron una investigación que tiene como objetivo el análisis de

la depuración de aguas residuales en el ámbito ambiental y sanitario, la implementación de alcantarillados y el desarrollo de nuevas tecnologías en este campo.

En este se plantean algunos de los aspectos históricos más relevantes del tema, como lo fue la implementación de problemas relacionados con el saneamiento de aguas realizado por el Imperio Mesopotámico, la conexión de casas a canales de desagüe por la civilización hindú, sistemas de saneamiento modernos que transportaban el agua residual fuera de la ciudad dado por la civilización griega y por último las experiencias de los Romanos quienes hicieron mejoras en los sistemas de alcantarillado. Lo que dio lugar a la gestión del ciclo urbano del agua desde el abastecimiento de agua potable y recogida de aguas residuales.

Pasado el contexto histórico se abarca el actual; donde se enfatiza la mejoría en la implementación de los sistemas de saneamiento de aguas que se han llevado los últimos veinte años, pero a pesar de ello estos sistemas se reducen en un tercio de la población. Se estipulan porcentajes de zonas del mundo sin accesibilidad a servicios de saneamiento entre los cuales están Sur Asia, Este de Asia, África Subsahariana, Sur Este Asia, Latinoamérica, Oeste de Asia, Norte de África y Oceanía.

Una vez presentado el análisis mundial, se prioriza el estado actual y evolución de saneamiento en la Unión Europea donde se han dado mejorías en la depuración de aguas garantizando un tratamiento adecuado de sus vertimientos. Se exponen estudios concretos de 18 países de la Unión Europea los cuales son: “Alemania, Austria, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Estonia, Eslovaquia, Eslovenia, Finlandia, Francia, Hungría, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Países Bajos, Portugal, Rumania y Suecia” (Molinos-Senante, Hernández Sancho and Sala Garrido, 2012) donde la mayoría de estos indican que el agua residual es llevada a estaciones depuradoras en las que se realiza un tratamiento adecuado.

Estos países también cuentan con la debida identificación de las zonas sensibles a la eutrofización (acumulación de residuos orgánicos en el litoral marino en un lago, laguna, embalse, etc.) con una revisión periódica de cada 4 años. Así con estos resultados es posible implementar las medidas necesarias para mitigar el impacto producido en estas zonas. Se observa un mayor nivel de eutrofización en países como Bélgica, Eslovaquia, Suecia, Alemania, Bulgaria, Chipre, Eslovenia, España, Francia, Hungría, Italia, Malta, Portugal y Reino Unido.

Parte de las medidas llevadas a cabo son tratamientos de distintos niveles, donde el primario implica la separación de la contaminación del agua por medio de suspensión, flotación o arrastre; la secundaria busca a través de tratamientos biológicos transformar la materia orgánica del agua residual a minerales, y el tercero eliminar la presencia de virus y gérmenes en el agua. Estos tipos de tratamientos han ido avanzando en la Unión Europea significativamente, con una mayor proporción en el método terciario llevándose a cabo un 71% de implementación de este tratamiento en el año 2006.

También se reconocen las medidas específicas de España, donde en los últimos años se da uso de fuentes de agua no convencionales, como la reutilización de agua regenerada y desalación de agua

de mar. El reúso se genera para riego agrícola, jardines, urbano, golf, acuicultura, industrial, recarga de acuíferos y otros.

El documento desarrolla un amplio énfasis respecto al uso de sistemas de depuración en la Unión Europea, generando así conocimientos de cómo se han mostrado avances en diferentes partes del mundo. El artículo aporta a esta investigación el querer implementar sistemas no convencionales que pueden dar un mayor enfoque o utilización de este, para usar en un país como Colombia.

1.5.2 Tratamiento aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción orgánica.

El presente artículo fue desarrollado por Mariana Romero, Arturo Colín, Enrique Sánchez y Laura Ortiz de la Universidad Autónoma del Estado de México. Ellos presentan una investigación que tiene como objetivo demostrar los alcances físicos y químicos de agua residual de tipo municipal tratada con humedales artificiales.

Para la realización de dicho análisis se inicia el proceso con tres diferentes tipos de humedales artificiales los cuales son diferenciados por el tipo de planta subacuática que se usó (carrizo, tule y ambas), teniendo como fin analizar cuál de los tres tipos sería el más óptimo. También dentro de los materiales usados se hace uso de grava de tezontle y arena siendo estos "... soporte para las plantas y un medio de fijación para los microorganismos en el sistema y funciona como conductor hidráulico" (Romero-Aguilar *et al.*, 2009)

El montaje de humedal artificial se basa en contenedores de fibra de vidrio (dimensiones 0.8m de alto, 0.6m de ancho y 0.9m de largo), los cuales se instalaron de manera secuencial y dándoles una pendiente de 1% para permitir el flujo del agua, teniendo a la salida de estas una llave para la recolección del agua tratada. A través de investigaciones realizadas dependiendo el tipo de planta subacuática usada se fija un tiempo de depuración en el humedal artificial, donde el contenedor con carrizo tiene un tiempo de duración de 9 días y para el tule de 7.

Tabla 2. Valores de las concentraciones de DQO de las muestras obtenidas durante la temporada de estiaje y porcentaje de remoción de la carga orgánica de aguas residuales

Tiempo de retención (días)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Remoción del sistema (%)
2	353,33 ± 25,40	110,70 ± 18,92	68,67
3	325,80 ± 32,45	80,30 ± 22,59	75,36
4	280,50 ± 18,50	40,00 ± 12,56	85,40
5*	355,30 ± 14,56	50,00 ± 15,83	85,93

6	295,40 ± 44,83	140,00 ± 28,91	52,61
7	315,40 ± 35,65	110,30 ± 33,75	65,03
8	335,20 ± 64,33	140,30 ± 35,83	58,15
Tiempo de retención (días)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Remoción del sistema (%)
9	279,69 ± 56,83	100,00 ± 28,70	64,25

**Menor concentración DQO detectada al final de los módulos experimentales*

FUENTE: (Romero-Aguilar et al., 2009).

A partir de los resultados expuestos en la TABLA 2 se denota que la concentración de DQO (Demanda Química de Oxígeno) óptima se da a los 5 días de tiempo de retención, y la remoción del sistema igualmente se da en este tiempo; fijándose este lapso para los monitoreos posteriores a realizar.

También se toman otros resultados como lo son: sólidos en suspensión, eficiencia de remoción de la carga orgánica fósforo, nitrógeno y análisis bacteriológicos, con el fin de ver las mejoras que presenta el agua residual en estos aspectos.

Estos resultados determinaron que el tercer modelo es el más óptimo; contando con dos tipos de plantas como medio filtrante (carrizo y tule), demostrando que la utilización de dos plantas diferentes mejora la calidad del agua.

El estudio realizado planteó como objetivo demostrar nuevas tecnologías que aporten a la depuración del agua residual y que sean económicas de realizar, aportando a la presente investigación significativamente ya que plantean diferentes usos de plantas para mejorar la calidad de los humedales, en este proyecto se plantearan dos alternativas de medio filtrante para evidenciar lo factible del caso. Pero además afirman que el tiempo de retención óptimo es de cinco días para el parámetro DQO.

1.5.3 Biofiltro con cascarilla de arroz y pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) para el tratamiento del efluente de la PTAR del INPEC – Yopal, Casanare, Colombia

Este artículo fue realizado por Sandy Katheryne Higuera, Ingeniera Ambiental del grupo de investigación Cazao. Tuvo como propósito realizar un humedal artificial con cascarilla de arroz y grava, este proyecto es generado a escala de laboratorio, con el fin de lograr una calidad óptima del agua para su uso en ganadería.

La problemática planteada en el artículo es la escasez del agua en el mundo en la que se ha visto al ser humano obligado a buscar otras alternativas para la dotación de agua, como lo son el reúso de las aguas residuales. En este proceso para el tratamiento de agua se deben tener en cuenta los

criterios de calidad dependiendo del uso que se le vaya a dar a la misma. “Según el IDEAM se prevé que para el año 2016 aproximadamente el 70% de la población urbana en Colombia tendrá un déficit en el suministro de Agua Potable” (Higuera, 2016), esta es una problemática evidente en Colombia a la cual se le debe empezar a buscar soluciones, ya que afecta al país tanto económico, social y ambientalmente. Una de las posibles soluciones sería el desarrollo de este humedal para el tratamiento de aguas residuales.

El estudio se realizó sobre la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR ubicada en las instalaciones del INPEC (Instituto Nacional Penitenciario y Carcelario) en el establecimiento penitenciario, kilómetro 12 vía Yopal, donde aproximadamente 375.000 m² de área son destinados para agricultura a la cual se espera emplear el riego del agua depurada con el humedal artificial. Se diseñó el prototipo del humedal con dimensiones 1,5 m de largo y 50 cm de ancho, profundidad construida con vidrio de 4 mm de espesor y para un caudal de 24 ml/min. Está compuesto por capas de cascarilla de arroz y grava, posteriormente se sembró el vetiver (planta de origen hindú), pero que actualmente se encuentra en zonas aledañas al INPEC. Esta planta ayuda al tratamiento de aguas residuales. También se implementó un sistema de bombeo al humedal artificial que se generó mediante una manguera que va del tanque de salida a el tanque de entrada de agua del humedal artificial, este sistema de bombeo se llevó a cabo durante un tiempo aproximado de un mes, tiempo en el cual se realizaron 2 muestras cada 15 días para verificar la calidad de agua in situ.

De los resultados obtenidos en el laboratorio se identificó, que a medida del tiempo iba mejorando la calidad de agua para agricultura según los requerimientos de la normatividad colombiana, “resolución 1207/2014 para el reúso del agua residual” (Higuera, 2016). Se evidencia que el humedal logro un 99% de efectividad con la remoción de coliformes, lo cual es apto de acuerdo con la resolución mencionada anteriormente. Como se observa en la TABLA 3, se muestran los porcentajes de remoción obtenidos del laboratorio final.

Tabla 3. Valores obtenidos del análisis de laboratorio en el cuarto muestreo

Parámetro	Resultado			Unidades	% Remoción	Resolución 1207/2014
	Entrada	Salida-Humedal	Salida-Cloro			
Conductividad Eléctrica	312	319	4800	µsiemens/cm	No hubo remoción	1500,00
DBO5	4,2	9,9	<4,4	Mg O2/L	No hubo remoción	
Coliformes totales	287800	5012	<10	NMP/100 ml	98,25% entre entrada y salida, pero 100% después de la cloración.	
Escherichia coli	1000	20	<10	NMP/100 ml	98% entre entrada y salida, pero 100% después de la cloración.	1,0*E(+5)

FUENTE: (Higuera, 2016).

Este artículo trata varios temas, desde la problemática en Colombia hasta la posible solución implementada en este caso para las instalaciones del INPEC. Por los resultados obtenidos en laboratorios sobre el agua residual tratada, se puede decir que es un sistema óptimo que se puede implementar para el desarrollo del proyecto actual ya que los resultados obtenidos fueron de acuerdo con la resolución vigente y aportan parámetros a evaluar en los diferentes ensayos que se deben realizar. Cabe resaltar que para este proyecto es necesario identificar y planificar los costos de realización tanto del humedal como de los laboratorios in situ ya que estos costos ayudan a tener una visual de la proyección a futuro para el desarrollo del humedal.

1.5.4 Remoción de contaminantes presentes en aguas superficiales empleando carbón activado generado a partir de materiales de desecho agroindustrial.

Este artículo fue realizado por Alby Aguilar, Diana Navarrete, Nadia Quijano, Cristian Vélez y Juan María Menéndez, de la escuela Superior Politécnica del Litoral de Ecuador. Tiene como propósito dar a conocer los diferentes tipos de carbón activado que se pueden utilizar para la depuración de contaminantes presentes en el agua, específicamente obtenida de los ríos Daule y Tenguel de Ecuador.

El carbón activado es usualmente usado en los filtros para purificar el agua. Este carbón puede remover las diferentes partículas que le proporcionan al agua características como olor, sabor, y color que hacen que esta no sea apta para el consumo humano u otros usos como riego de plantas o alimentación de animales. En este caso se fabricó el carbón activado con residuos del sector agroindustrial, dando la oportunidad de reciclar estos insumos. Se utilizaron 3 residuos: cascara de plátano, cascarilla de arroz y semilla de zapote, se comparan los resultados obtenidos de estos con el de carbón activado que se vende comercialmente.

La elaboración del carbón activado se realizó de la siguiente manera, primero se puso a secar los residuos al sol, una vez secos se pasó por la molienda y se le aplicaron los químicos necesarios para la elaboración. Se procedió a realizar tratamiento térmico a 110°C para retirar la humedad del material y se almacenó en diferentes recipientes hasta la utilización del carbón. Se realizaron también los diferentes filtros con una tubería de 50 cm y diámetro de 1 ½ pulgadas. Después del proceso de decantación se evaluó además del desempeño del carbón activado, la turbidez y dureza del agua, coliformes, contenido de arsénico, cobre y la demanda biológica de oxígeno (DBO₅).

Con los resultados obtenidos de laboratorio se puede decir que el carbón activado que presenta mejores condiciones en el proceso de depuración es el material 3, fabricado con la pepa de zapote. Los resultados de este se asemejan más al carbón activado de venta comercial ya que obtuvo una remoción total de los coliformes presentes en el agua. Además los resultados de laboratorio de la pepa de zapote en comparación con la cascarilla de arroz o la cascara de plátano son más favorables. Como se observa en la TABLA 4 se evidencian los resultados de laboratorio con los porcentajes de remoción por cada parámetro.

Tabla 4. Resultados de remoción

Resultados de remoción alcanzados con las tres muestras de carbón activado elaborado a partir de desechos industriales									
Parámetros Analizados	Concentración contaminante inicia (S _i)	Cargas Contaminante Final (S _f)				% de Remoción ((S _i -S _f)/S _i)			
		A (Cascara de plátano)	B (Cascarilla de arroz)	C (Pepa de Zapote)	D (Carbón Activado Comercial)	A	B	C	D
Turbidez (UNT)	8,00	2,00	0,50	0,50	1,00	75,00	93,80	93,80	87,50
DBO5 (mg O2/L)	0,90	0,20	0,30	0,20	0,50	77,80	66,70	77,80	44,40
Coliformes totales (NMP/100ml)	500,0	Ausencia	400,0	Ausencia	Ausencia	100,00	20,00	100,00	100,00
Dureza (mg/L)	56,40	54,00	2,80	31,20	54,40	4,30	95,00	44,70	4,30
Arsénico (mg/L)	0,06000	< 0,0031	0,0035	< 0,0031	0,01	> 94,80	94,20	> 94,80	89,00
Cobre (mg/L)	0,06290	0,0087	0,0094	0,0047	< 0,037	86,20	85,10	92,50	> 94,1

FUENTE: (Aguilar et al., 2016).

Este artículo pretende mostrar la posibilidad de un beneficio para el país al reutilizar los desechos agroindustriales para la depuración del agua por medio del carbón activado. Lo cual da la idea de utilizarlo en el presente proyecto de humedal artificial, para lograr una depuración de agua óptima y con mejores resultados. Se puede resaltar que en este artículo no se evidencia el uso que le dieron al agua recién depurada de los ríos Daule y Tenguel de Ecuador.

1.5.5 Modelo didáctico para simular el funcionamiento en un humedal en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia

Este trabajo de investigación fue realizado por Mauricio Charry Agudelo y Nelson Fabián Achipiz de la Universidad Católica de Colombia, en el semillero EcoCivil. Ellos realizaron un modelo didáctico de humedal artificial para determinar su funcionamiento.

A través de la realización de este modelo didáctico de humedal artificial se pretende mostrar sistemas depuradores de agua que sean económicos y fáciles de implementar en cualquier medio, se recomienda que estos sistemas deben usarse en zonas cálidas ya que “en climas fríos se reduce la eficacia de remoción” (Charry & Achipiz, 2012).

Se hace la recolección de la planta subacuática (Junco) la cual tiene como función purificar el agua mediante procesos naturales, estas son tomadas del Humedal la Conejera con alturas entre (40-50) cm. Los investigadores toman una cantidad suficiente de lecho o tierra tomado de la Conejera para usarlo como medio filtrante en el humedal artificial y de esta manera evitan un cambio brusco en el nuevo hábitat del junco.

Para el montaje de prototipo de humedal artificial se hace uso de un recipiente de plástico con dimensiones (66 cm de largo, 40 cm de ancho y 31 cm de altura), el cual va a actuar como depósito de todos los materiales necesarios para generar el tratamiento del agua. Como capa principal para este se deposita grava llegando a una altura de 20 cm, y dentro de esta se pone el junco con tierra para que este quede adherido. Siguiendo a esto, se procede a poner la capa de lecho o tierra la cual alcanza a llegar al borde del recipiente; por último, se pone agua residual de cualquier tipo para generar durante 15 días la adaptación de las plantas al nuevo ambiente. Siguiendo a estos días, se inicia el proceso de depuración de agua residual del Río Arzobispo, iniciando el proceso con la obtención de las características principales para la calidad del agua como lo son: sólidos en suspensión, pH, turbiedad, demanda biológica de oxígeno (DBO₅), caudal, carga hidráulica, conductividad, temperatura, color aparente, dureza y alcalinidad.

Tabla 5. Resultados de pruebas y análisis de laboratorio

Resultados pruebas y análisis de laboratorio			
Nombre de prueba	Muestra condiciones iniciales	Muestra tratada	Muestra tratada con recirculación
pH	7,3	5,7	4,6
Conductividad (µs/cm)	72,4	340	340
Resistividad (KΩ/cm)	13,77	2,9	2,9
Sólidos en suspensión (mg/l)	38,7	181	181
Salinidad	0	0,2	0,2
Temperatura °C	17,1	15,8	15,8
Oxígeno (mg/l)	0,77	0,78	0,78
Porcentaje de oxígeno (%)	10,8	10,7	10,6

Turbiedad (NTU)	31,2	2,64	16,4
Resultados pruebas y análisis de laboratorio			
Nombre de prueba	Muestra condiciones iniciales	Muestra tratada	Muestra tratada con recirculación
Color aparente (unid. De PtCo)	338	25	107
Dureza (mg/l CaCO3)	3,08	3,08	2,95
Alcalinidad (mg/l CaCO3)	32	27	27
DBO5	32,7	2,65	No aplica

FUENTE: (Charry & Achipiz, 2012).

En la TABLA 5 se muestran los resultados de las pruebas elaboradas en este sistema de tratamiento de agua residual, observando que los resultados tienden a mejorar debido al proceso de depuración que generan estos sistemas naturales. Los resultados a las pruebas fueron satisfactorios “ya que estos demuestran una disminución de la carga contaminante, y los parámetros físicos y químicos en su mayoría producen el comportamiento esperado” (Charry & Achipiz, 2012).

A partir de este prototipo de humedal artificial se plantea un rediseño el cual se basa en cambios del material y tiempos más largos de recirculación del agua residual, para así generar resultados que garanticen agua apta para el riego de plantas.

1.5.6 Filtración con antracita y arena caso práctico en el Reino Unido

Este artículo fue desarrollado por el ingeniero químico Derek Miller por parte de la Asociación de Investigación sobre el agua, el cual muestra los beneficios encontrados en la utilización de antracita y arena como filtro en plantas piloto.

La planta de tratamiento de agua de la junta de agua de Makerfield, Inglaterra contaba con problemas en el proceso de filtración, donde tenían doce filtros que no estaban cubriendo con la eficiencia esperada. Es ahí donde realizan estudios de materiales que se puedan implementar y que garanticen eficiencia y bajos costos para su producción, siendo la arena y la antracita la opción optada, señalando que se realizaron encuestas los últimos años que muestran la eficiencia de los mismos.

A continuación se muestran resultados de pruebas de laboratorio con el uso de arena y antracita:

Tabla 6. Resultados de pruebas

**PLANTA DE TRATAMIENTO DE WORTHINGTON
CALIDAD DEL AGUA ANTES Y DESPUES DE LA FILTRACION**

	Antes de la filtración	Después de la filtración
Color (Hazen)	22	6
Turbiedad (mg/litro escala de sílice)	11	0,8
	mg/litro	
Nitrógeno amoniacal como N	0,26	0,12
Nitrógeno albuminoide como N	0,26	0,17
Nitrógeno, nitritos como N	0,04	nada
Nitrógeno, nitratos como N	1,67	2,7
O ₂ de KMnO ₄ (4 horas a 27°C)	6,5	1,2
Hierro como Fe	0,16	0,02
Manganeso como Mn	0,45	0,04
Aluminio como Al	0,04	0,12

FUENTE:(Miller, 2006).

La TABLA 6 muestra los resultados de calidad de agua que se obtuvieron en laboratorio luego del proceso de filtración haciendo uso de antracita y arena, mostrándose así resultados óptimos que muestran como los valores iniciales disminuyen con respecto al proceso realizado.

“En base a los resultados de los exámenes en la planta piloto, se decidió eliminar la sedimentación y construir 4 filtros rápidos por gravedad” (Miller, 2006) donde los medios utilizados consistieron en arena de 7” y 15”, y también antracita de 18”.

A partir de la reestructuración en la planta piloto, se obtuvieron resultados que generaron un rendimiento del 43% y un ahorro del capital considerable. Sin embargo “debido a problemas de humedad inicialmente se produjo una cierta pérdida de antracita, demostrándose que era necesario mantener la antracita sumergida en agua antes del primer lavado” (Siegua, 2018). Como conclusión se lleva a la opción de estos materiales por su eficiencia y los bajos costos que se dan.

Este artículo muestra un aspecto relevante en la investigación realizada, dado que la antracita fue implementada como medio filtrante en el prototipo de humedal artificial, demostrando a partir del artículo anterior su eficiencia en práctica además de que los resultados obtenidos redujeron significativamente determinantes necesarios para la depuración de agua como lo fue la turbiedad con un reducción del 7.3 %, y demás factores mostrados en la TABLA 6.

1.6 MARCO LEGAL

1.6.1 Especificaciones toma de parámetros.

Tabla 7. Especificaciones de toma de parámetros

Parámetros	Especificaciones	Agua	Proceso de almacenamiento
Alcalinidad con Fenolftaleína	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varíe. Se hace uso de 150 ml de agua.	150 ml	Refrigerar mínimo a 4°C
Color aparente	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varíe.	50 ml	Refrigerar mínimo a 4°C
Conductividad	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varíe.	50 ml	Refrigerar mínimo a 4°C
Nitritos	Uso de equipo espectrofotómetro hach y celdas de medición, ajuste de programa 8507 donde se deja 20 minutos de calibración. Es necesario de 10 ml de agua destilada.	20 ml	Temperatura de 2-8°C
Oxígeno	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varíe. Se hace uso de 100 ml de agua.	100 ml	Refrigerar mínimo a 4°C
Porcentaje de Oxígeno	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varíe.	100 ml	Refrigerar mínimo a 4°C
pH	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varíe. Se hace uso de 100 ml de agua.	100 ml	Temperatura ambiente
Resistividad	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varíe.	50 ml	Refrigerar mínimo a 4°C
Salinidad	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varíe.	50 ml	Refrigerar mínimo a 4°C
Sólidos disueltos totales (TDS).	Tomar la muestra de tal forma que no contenga partículas flotantes grandes, utilizar frascos de plásticos de polipropileno de por lo menos 500 ml de capacidad. Antes de iniciar prueba llevar a temperatura ambiente. Efectuar dentro de los 7 días siguientes	500 ml	Refrigerar la muestra a 4°C hasta momento de análisis
Temperatura	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varíe.	50 ml	Refrigerar mínimo a 4°C
Turbiedad	Uso de equipo espectrofotómetro hach y celdas de medición y encenderlo durante 10 minutos antes de la práctica, para ajuste.	10 ml	Tomar en sitio o en su defecto durante 24 H siguientes del muestreo.

FUENTE: (fuente propia).

La tabla 7 contiene información sobre los parámetros analizados en el laboratorio de recursos hídricos de la Universidad Católica de Colombia, Estos datos son obtenidos de las guías de laboratorio usadas en la materia de plantas de tratamiento de agua potable suministradas por el laboratorio.

1.6.2 Normatividad para la calidad de agua.

Tabla 8. Guías que establecen límites para algunos parámetros de calidad del agua empleada para riego

Guía	Unidad	WHO (1989)	USEPA (2012)	ANZECC (2000)	Real Decreto Español (2007)	Decreto Italiano (2003)	Norma Chilena NCh 1333 (1987)
Tipo de guía/Parámetro		Calidad de agua residual para agricultura	Calidad de agua tratada para riego	Calidad de agua para riego	Calidad de agua tratada para riego	Calidad de agua residual tratada para reúso	Calidad de agua para riego
(Vera <i>et al.</i> , 2016) Conductividad eléctrica (CE)	dS/m	-	-	<0,65; 0,65 - 1,3 2,9 - 5,2 ^e	3	-	<0,75; 0,75 - 1,5 1,5 - 3,0 3,0 - 7,5 ^g
pH	-	-	6	-	-	6 - 9,5	5,5 - 9,0
Nitratos (N-NO3)	mg/l	-	-	-	5	-	-
Nitrógeno total (NT)	mg/l	-	10 ^{b,c}	5; 25 - 125 ^f	10	15	-
Fósforo total (P)	mg/l	-	5 ^{b,d}	0,05; 0,8 - 12 ^f	-	2	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/l	-	-	-	20	10	-
Coliformes fecales (CF)	UFC/100ml	≤ 1000 ^a	-	-	-	-	<1000 ^h

WHO: World Health Organization (Organización Mundial de la Salud); USEPA: United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos); ANZECC: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (Consejo para la Conservación y Medio Ambiente de Australia y Nueva Zelanda). a Riego para cultivos susceptibles de ser consumidos crudos, cultivo de cereales, cultivos industriales; b cultivos alimentarios; c parámetro exclusivo del estado de New Jersey; d parámetro exclusivo del estado de Michigan; e cultivo sensible, moderadamente sensible, tolerante, respectivamente; f máxima concentración (mg/l) que puede ser tolerada para 20 y 100 años, respectivamente; g sin efecto, efecto en cultivos sensibles, efectos adversos en mayoría de cultivos, cultivos tolerantes, respectivamente; h cultivo de frutas y verduras en estado crudo.

FUENTE: (Vera et al., 2016).

La 1.6.2 Normatividad para la calidad de agua Tabla 8. Guías que establecen límites para algunos parámetros de calidad del agua empleada para riego, tal como lo indica su nombre específica algunos de los parámetros admisibles para calidad de agua implementada para riego.

Tabla 9. Parámetros de calidad de agua para uso agrícola según la normatividad colombiana

Variable	Unidad de Medida	Valor Limite Máximo Permissible
FISICOS		
pH	Unidades de pH	6,0 – 9,0
Conductividad	μS/cm	1.500,0
MICROBIOLÓGICOS		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0*E(+5)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1,0*E(2)
Helminthos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1,0
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100 mL	1,0
QUÍMICOS		
Fenoles Totales	mg/L	1,5
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0
Iones		
Cianuro Libre	mg CN ⁻ /L	0,2
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	300,0
Fluoruros	mg F ⁻ /L	1,0
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	500,0
Metales		
Aluminio	mg Al/L	5,0
Berilio	mg Be/L	0,1
Cadmio	mg Cd/L	0,01
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobalto	mg Co/L	0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0
Cromo	mg Cr/L	0,1
Hierro	mg Fe/L	5,0
Mercurio	mg Hg/L	0,002
Litio	mg Li/L	2,5
Manganeso	mg Mn/L	0,2
Molibdeno	mg Mo/L	0,07
Níquel	mg Ni/L	0,2
Plomo	mg Pb/L	5,0
Sodio	mg Na/L	200,0
Vanadio	mg V/L	0,1
Metaloides		
Arsénico	mg As/L	0,1
Boro	mg B/L	0,4
No metales		
Selenio	mg Se/L	0,02
Otros parámetros		
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl ₂ /L	Menor a 1,0
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N)	mg/L	5,0

FUENTE: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

En la Tabla 9 se encuentran los parámetros que exige la normatividad colombiana en la resolución 1207 del 2014 Aguas residuales tratadas para el caso de agua empleada en reúso agrícola. Estos

parámetros son evaluados y comparados con las demás normatividades que se evidencian en la 1.6.2 Normatividad para la calidad de agua.

Tabla 10. Límites de clases norma secundaria de calidad ambiental de agua para riego

	GRUPO DE COMPUESTOS O ELEMENTOS	Unidad	CLASE DE EXCEPCION	CLASE 1.	CLASE 2.	CLASE 3.
INDICADORES FISICOS y QUIMICOS						
1.	Conductividad eléctrica	µS/cm	<600	750	1.500	2.250
2.	DBO ₅	mg/L	<2	5	10	20
3.	Color aparente	Pt-Co	<16	20	100	>100
4.	Oxígeno Disuelto ¹	mg/L	>7,5	7,5	5,5	5
5.	pH ²	Unidad	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
6.	RAS ³	-	<2,4	3	6	9
7.	Sólidos disueltos	mg/L	<400	500	1.000	1.500
8.	Sólidos suspendidos	mg/L	<24	30	50	80
9.	Temperatura ⁴	ΔT°C	<0,5	1,5	1,5	3

FUENTE:(Sancha et al., 2005)

Excepcional: indica un agua de mejor calidad que la clase 1, que, por su extraordinaria pureza y escasez, forma parte del patrimonio ambiental de la Republica. Esta calidad es adecuada también para la conservación de las comunidades acuáticas y demás usos definidos en esta norma cuyos requerimientos de calidad son inferiores a esta clase.

Clase 1: muy buena calidad. Indica un agua apta para la protección y conservación de las comunidades acuáticas, para el riego irrestricto y para los usos comprendidos en las clases 2 y 3.

Clase 2: buena calidad. Indica un agua apta para el desarrollo de la acuicultura, de la pesca deportiva y recreativa, y para los usos comprendidos en la clase 3.

Clase 3: regular calidad. Indica un agua adecuada para bebida de animales y para riego restringido.

En la Tabla 10. Límites de clases norma secundaria de calidad ambiental de agua para riego (Sancha et al., 2005), se evidencian parámetros físicos y químicos para diferentes categorías de uso en el agua, la cual servirá para caracterizar según estos parámetros si los resultados obtenidos se abarcan para la utilización que se quiere generar la cual es; riego.

1.7 METODOLOGÍA

Se presentan las fases correspondientes para la elaboración del prototipo de humedal artificial para la depuración de aguas residuales.

FASE I: se realiza la evaluación del humedal que se encuentra en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia elaborado por estudiantes de semestres anteriores, con el fin de pronosticar el tiempo de rehabilitación y recuperación de este. Para esto se revisó inicialmente la metodología de diseño y la estrategia de construcción, información que se encuentra en el documento final del trabajo de grado. Esto incluye los materiales y dimensiones. Este humedal fue fabricado inicialmente con el fin de investigar el funcionamiento, mantenimiento y diseño de un humedal; también se utilizó el diseño del humedal artificial para la remoción de contaminantes presentes en el agua.

En este proyecto se plantea la continuación de la anterior investigación, pero implementando el estudio de los beneficios de la recirculación en el humedal artificial, también se estudió que otros materiales son aptos para usar como medio filtrante y pueden aportar mayores propiedades al agua en el proceso de depuración. Así mismo se analizaron los ensayos realizados al humedal actual, así como el marco normativo el cual fue empleado para realizar la comparación de la calidad del agua.

FASE II: se genera la investigación de los diferentes humedales artificiales desarrollados en otras ciudades y modelos didácticos, además se revisan metodologías de diseño de humedales. Con base en estos dos insumos, se realizó el rediseño del humedal artificial, el cual fue implementado al diseño actual un sistema para la recirculación de agua de manera automática. El objetivo fue determinar mejores resultados en la depuración del agua del río Arzobispo.

Se planteó un esquema del humedal elaborado desde el software AutoCAD. Se realizaron dos tipos de humedales que serán diferenciados por el tipo de material filtrante usado, donde el primero se compone de grava y arena, y el segundo de antracita, grava y arena; a partir de esto se realizó el correspondiente análisis y la verificación de los materiales ya dichos anteriormente con los ensayos del agua antes y después del tratamiento. A partir de la calidad del agua obtenida, son analizadas las posibilidades de reuso de esta para riego de plantas de la Universidad Católica de Colombia.

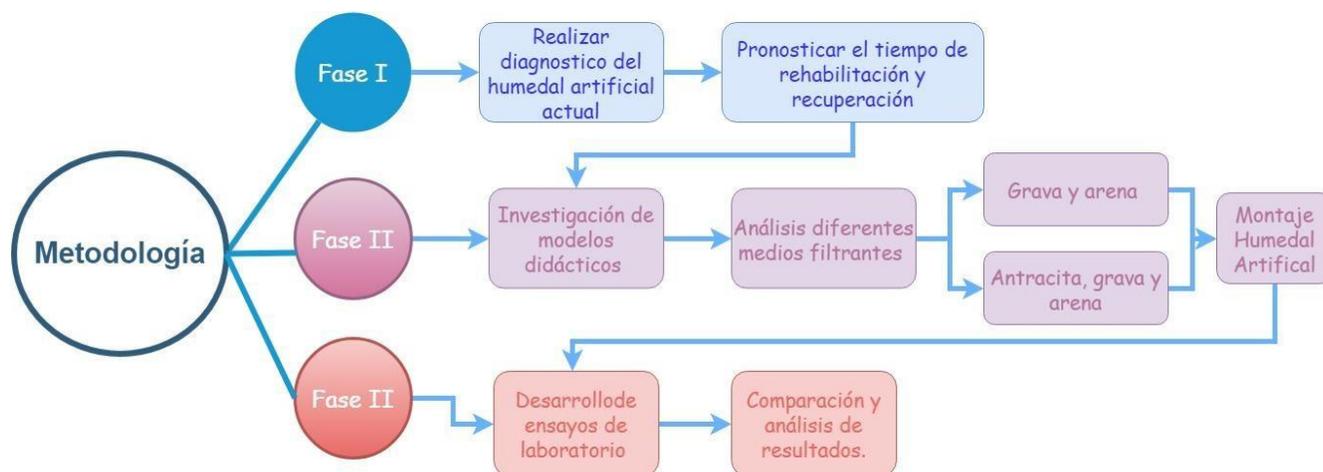
FASE III: teniendo en cuenta la información obtenida en las fases anteriores se realizaron los ensayos correspondientes basándose en la

Se realizó la comparación y el análisis con la normatividad colombiana (Decreto 3930 del 2010), también en OMS (Organización mundial de la salud) y la resolución 1207 de 2014 para calidad de agua en riego.

Se realizó un plan de monitoreo el cual se evidencia en la Tabla 11 para la evaluación de los diferentes parámetros que exige la norma, como lo son pH, turbiedad, % de oxígeno, color aparente, entre otros. Considerando solo los que se tienen disponibles en el laboratorio de hidráulica de la Universidad.

Para la elaboración de todas las fases mencionadas se hizo uso de agua residual, la cual fue obtenida del río Arzobispo y se realizó la comparación de los resultados con los obtenidos en el proyecto anterior por los estudiantes del grupo EcoCivil y así se obtuvo un comparativo que mostrara la eficiencia del humedal artificial rediseñado como depurador de agua.

En la Figura 11 se muestra el desarrollo de las fases a emplear en la metodología.
Figura 11. Esquema desarrollo de las fases.



Fuente: Propio

En la Tabla 11 se observa el desarrollo del plan de monitoreo para cada prototipo, en el caso del prototipo 1 (grava y vegetación) se tomó la muestra del río Arzobispo el día 18 de julio 2018, ese mismo día se tomaron las muestras iniciales y se procedió a dejar el sistema recirculando durante 5 días para tomar la muestra el día 23 julio 2018, por último se dejó el sistema otros 15 días para un total de 21 días recirculando, así tomar la muestra final el 8 de agosto 2018.

En el caso del prototipo 2 (grava, antracita y vegetación) se tomó la muestra del río Arzobispo el día 17 de agosto 2018, ese mismo día se tomaron las muestras iniciales y se procedió a dejar el sistema recirculando durante 5 días para tomar la muestra el día 22 agosto 2018, por último, se dejó el sistema otros 15 días para un total de 21 días recirculando, así tomar la muestra final el 7 de septiembre.

También se desarrolló un plan de monitoreo para evaluar el parámetro de Nitritos visto en la Tabla 12, en el que al igual que el prototipo 1 y 2 se recogió la muestra del río Arzobispo el 17 septiembre 2018. Ese día se tomaron las muestras iniciales y se procedió a dejar el sistema recirculando durante 3 días para tomar la muestra el día 19 septiembre 2018. Por último se dejó el sistema otros 2 días para un total de 5 días recirculando, así tomar la muestra final el 21 de septiembre. Para evaluar este parámetro solo se realizó en el prototipo 2 ya que no se tenían los insumos correspondientes durante el desarrollo del prototipo 1.

Tabla 11. Plan de monitoreo para desarrollo laboratorios.

Plan de monitoreo												
Parámetros	Especificaciones	Agua	Prototipo 1				Prototipo 2					
			MI 18-Jul*	R**	23-jul	R	8-ago	MI 17-ago	R	22-ago	R	7-sep
Alcalinidad con Fenolftaleína	Uso de equipo multiparametrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varié. Se hace uso de 150 ml de agua.	150 ml	X		X		X	X		X		X
Color aparente	Uso de equipo multiparametrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varié.	50 ml	X		X		X	X		X		X
Conductividad	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varié.	50 ml	X		X		X	X		X		X
Oxígeno	Uso de equipo multiparametrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varié. Se hace uso de 100 ml de agua.	100 ml	X		X		X	X		X		X
Porcentaje de Oxígeno	Uso de equipo multiparametrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varié.	100 ml	X		X		X	X		X		X
PH	Uso de equipo multiparametrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varié. Se hace uso de 100 ml de agua.	100 ml	X	5 días	X	21 días	X	X	5 días	X	21 días	X
Resistividad	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varié.	50 ml	X		X		X	X		X		X
Salinidad	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varié.	50 ml	X		X		X	X		X		X
Sólidos disueltos totales (TDS).	Tomar la muestra de tal forma que no contenga partículas flotantes grandes, utilizar frascos de plásticos de polipropileno de por lo menos 500 ml de capacidad. Antes de iniciar prueba llevar a temperatura ambiente. Efectuar dentro de los 7 días siguientes	500 ml	X		X		X	X		X		X
Temperatura	Uso de equipo multiparamétrico. El tiempo se da a partir del equipo usado hasta que mantenga un valor que no varié.	50 ml	X		X		X	X		X		X
Turbiedad	Uso de turbidímetro y encenderlo durante 10 minutos antes de la práctica, para ajuste.	1ml	X		X		X	X		X		X

* MI: Medidas iniciales **R: Tiempo de recirculación total

Fuente: (fuente propia)

Tabla 12. Plan de monitoreo para nitritos.

Plan de monitoreo							
Parámetros	Especificaciones	Agua	Prototipo 2				
			MI 17-sep*	R**	19-sep	R	21-sep
Nitritos	Uso de equipo espectrofotómetro hach y celdas de medición, ajuste de programa 8507 donde se deja 20 minutos de calibración. Es necesario de 10 ml de agua destilada.	20 ml	X	3 días	X	5 días	X

Fuente: (fuente propia)

2. DIAGNÓSTICO PROCESO DE DISEÑO MODELO HUMEDAL ARTIFICIAL 2012

En el siguiente capítulo se evidencia el procedimiento de diseño y montaje que fue generado por los estudiantes de la Universidad Católica de Colombia en el semillero Eco Civil del año 2012.

2.1 MÉTODO DE VACIADO Y LLENADO REED

El modelo de diseño recomendado es REED. “Con esta ecuación, se ajusta el caudal para obtener la eficiencia deseada, se utilizan dos variables, el área o el caudal. Al tener el área fija, se modifica el caudal y si el caudal es la condicionante el área es la respuesta del diseño. La profundidad es la estimación del tiempo de retención hidráulica” (Charry & Achipiz, 2012).

Se evaluó la ecuación de REED, la cual es:

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{Q \cdot A_s}{m \cdot k_s} \right)^{0.5}$$

Donde:

Q: caudal (m³/día).

W: ancho de celda del humedal (m).

Ks: Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo (m³/m²/d).

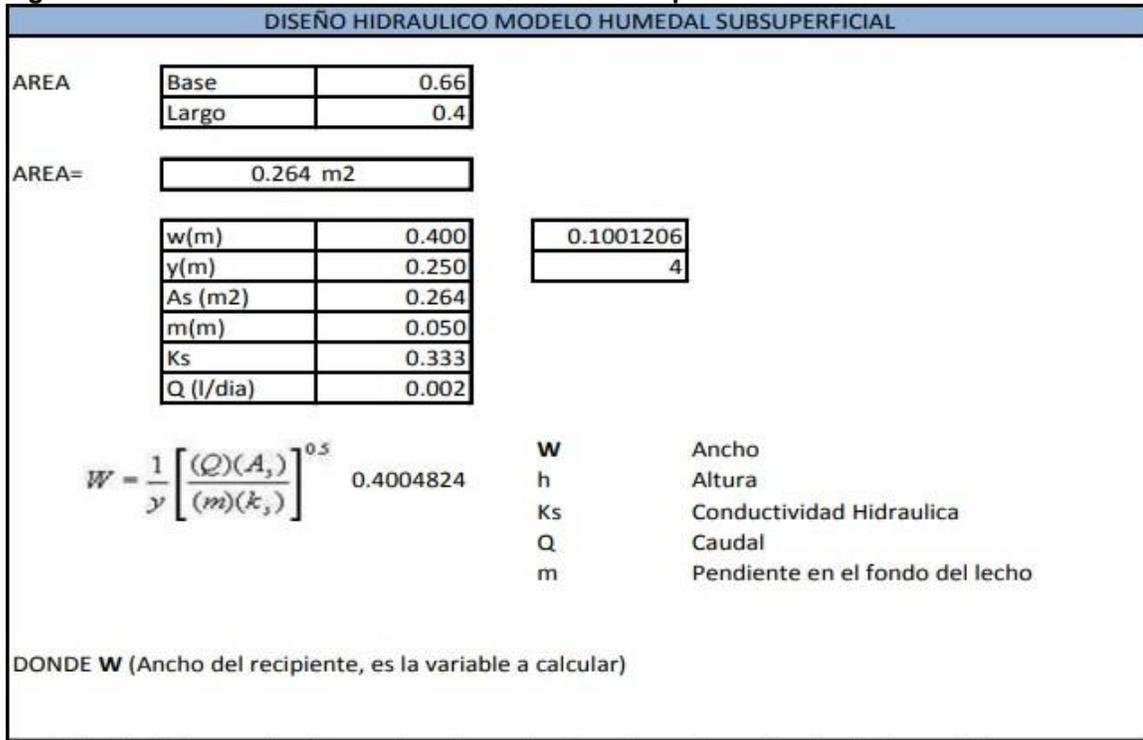
As: área superficial del humedal (m²).

m: pendiente del fondo del lecho, (% expresado como decimal).

y: profundidad del agua en el humedal (m).

Del cual se obtiene los siguientes resultados (Figura 12):

Figura 12. Diseño hidráulico modelo humedal sub-superficial 2012



Fuente: (Charry and Achipiz, 2012).

“Solucionando la ecuación, se obtiene que el valor para Q que satisface la ecuación es 0.002 l/día” (Charry and Achipiz, 2012).

Para el método de vaciado llenado “se realizó la alimentación haciendo llenado completo con el TRH (tiempo de retención hidráulico) definido el cual es un mínimo de 5 días tiempo dado que los caudales para un humedal de laboratorio son muy bajos para que trabaje en continuo” (Charry and Achipiz, 2012).

El diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento. “Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo a pistón y que además no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento” (Charry & Achipiz, 2012).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

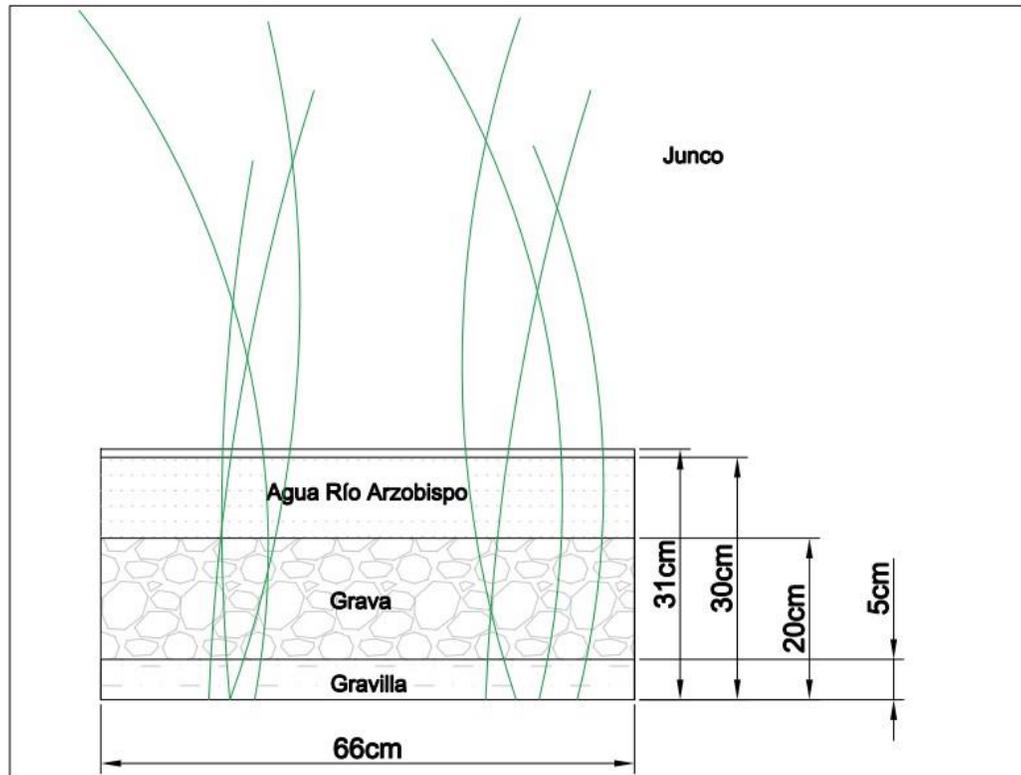
De acuerdo con el diseño anterior, se tuvieron en cuenta las siguientes características para iniciar con la modelación del humedal artificial.

- Se tiene en cuenta el diseño anterior para la determinación del lecho filtrante.

- Base de grava 20 cm.
- Base de lecho orgánico 5 cm
- Altura del cuerpo de agua 30cm.

En la Figura 13 se evidencia el diseño del humedal artificial generado por los estudiantes de semillero EcoCivil en el 2012 con su dimensionamiento.

Figura 13. Diseño humedal artificial



Fuente: (Charry and Achipiz, 2012).

- La vegetación (Junco) fue tomada del humedal La Conejera ubicado en la localidad de Suba, los cuales son plantados a lo largo del humedal artificial, teniendo en cuenta un tiempo para la adecuación de la vegetación a su nuevo ambiente y así mismo se garantizó el crecimiento de los juncos dentro del modelo humedal artificial.
- Como afluente se tomaron muestras de agua del río Arzobispo, el cual es el más cercano a la universidad donde se evidenció alto contenido de sólidos y materia orgánica.

2.3 DESCRIPCIÓN MODELO DIDÁCTICO 2012

En el año 2012 fue elaborado por parte de los estudiantes de la Universidad Católica en el grupo de semilleros EcoCivil un modelo didáctico para la simulación de un humedal, el cual tuvo como objetivo la observación de su comportamiento y los resultados con la puesta de agua residual en el sistema.

A partir del análisis realizado por los estudiantes, elaboraron el prototipo haciendo uso de un recipiente de plástico con dimensiones de (66x40x31) cm. Para la base del mismo se usa grava a una altura de 20 cm, seguido se hace uso de lecho orgánico, como planta acuática se utiliza Junco y por último el agua a tratar tomada del río Arzobispo.

Figura 14. Proceso de recirculación de agua tratada en humedal artificial



Fuente: (Charry and Achipiz, 2012).

Como se muestra en la Figura 14 se observa el humedal realizado por los estudiantes donde se evidencia la composición ya antes explicada.

Luego de introducir el agua residual, tomaron un tiempo de retención de 5 días los cuales garantizan una correcta depuración del agua tratada.

Tabla 13. Resultados de pruebas y análisis de laboratorio

RESULTADOS DE PRUEBAS Y ANALISIS DE LABORATORIO			
NOMBRE DE LA PRUEBA	MUESTRA CONDICIONES INICIALES	MUESTRA TRATADA	MUESTRA TRATADA CON RECIRCULACION
PH	7,3	5,7	4,6
CONDUCTIVIDAD (µs/cm)	72,4	340	340
RESISTIBILIDAD (KΩ/cm)	13,77	2,9	2,9
SOLIDOS EN SUSPENSION (mg/l)	38,7	181	181
SALINIDAD	0	0,2	0,2
TEMPERATURA °C	17,1	15,8	15,8
OXIGENO (mg/l)	0,77	0,78	0,78
PORCENTAJE DE OXIGENO (%)	10,8	10,7	10,6
TURBIEDAD (NTU)	31,2	2,64	16,4
COLOR APARENTE (Unid. De PtCo)	338	25	107
DUREZA (mg/l CaCO ₃)	3,08	3,08	2,95
ALCALINIDAD (mg/l CaCO ₃)	32	37	27
DBO ₅	32,7	2,65	NO APLICA

FUENTE: (Charry and Achipiz, 2012).

Los resultados que los estudiantes obtuvieron se evidencian en la Tabla 13. Mostrando un comportamiento favorable en los ensayos ya que si se realiza uso de tablas de especificaciones técnicas, con las características obtenidas se podría determinar los diferentes usos del agua resultante. A continuación, se muestra el análisis de cada parámetro realizado por los estudiantes en el año 2012

“**PH:** Presenta variación hacia una base acida; es evidente porque el agua presenta un aspecto transparente en comparación a la muestra inicial.

CONDUTIVIDAD: Aumenta y se mantiene en las dos muestras posteriores.

SOLIDOS EN SUSPENSION: Aumenta drásticamente, esto puede determinarse por el agregado utilizado para el filtro (grava con diferente tamizaje) y por las rices del junco empleado como agente procesador.

SALINIDAD: Aumenta, también se puede aducir al agregado.

PORCENTAJE DE OXIGENO: Se mantiene estable, la variación es mínima.

TURBIEDAD: Se presenta una notable disminución en la prueba filtrada y en la recirculada en comparación con la prueba inicial; pero entre la muestra filtrada y recirculada, esta segunda

presenta aumento del parámetro siendo consecuente el resultado, pues al realizarse el proceso de recirculación los sólidos que se decantan se activan y hacen parte de la muestra.

COLOR APARENTE: Los resultados obtenidos presentan notable disminución con respecto a la prueba inicial, se pueden decir que entre la prueba filtrada y la recirculada esta presenta un mayor color aparente por los mismos aspectos que se tienen con la turbiedad. (Proceso de filtrado).

DUREZA: Se mantiene, baja un poco en la muestra recirculada, se aduce al proceso de recirculación.

ALCALINIDAD: Aumenta en la prueba filtrada, se aduce al agregado utilizado como filtro, pero disminuye en la recirculada, se puede aducir al proceso a proceso de recirculación.

Este sistema mostro ser viable, dado que su elaboración no requiere grandes costos ni complejidad a la hora de la construcción, además de que su uso garantiza una eficiencia en los resultados del agua obtenida” (Charry & Achipiz, 2012).

3. REDISEÑO PROTOTIPO HUMEDAL ARTIFICIAL.

En este capítulo, se mostrará la implementación y rediseño del humedal anterior realizado en el año 2012, con el fin de mejorar la depuración del agua.

3.1 USO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL GENERADO EN 2012

Se realizó uso del recipiente (Figura 15), el cual inicialmente se encontraba en condiciones de abandono y completamente deteriorado, ya que tenía una gran capa de moho.

Se procedió a realizar el lavado y desinfección del recipiente para efectuar la adecuación del prototipo de humedal artificial.

Figura 15. Limpieza y desinfección recipiente humedal artificial.



Fuente: Propio

3.2 MATERIALES EMPLEADOS PARA MODELACIÓN DE HUMEDAL.

A continuación, se mostrarán los diferentes materiales que se emplearon para la adecuación del humedal artificial.

- **Sustrato (medio Granular):** se hizo uso de grava y arena, (Figura 16 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) que tiene como principal característica “la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua través de él”.(Ortiz, 2014), también teniendo como ventaja de este medio el aumento de la conductividad hidráulica.

Figura 16. Grava para prototipo.



Fuente: Propio

En la Figura 16 se muestra la grava utilizada como material granular, distribuida a lo largo del recipiente.

- **Vegetación:** se obtuvo junco suficiente para cubrir el área del recipiente, donde la vegetación tiene como beneficio “la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera profunda de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión” (Ortiz, 2014).

Los juncos son “originarios de América del Norte, sus tallos pueden llegar a medir 4 metros, habita en la mayoría de los Humedales de la ciudad, en los Humedales de Capellanía, Jaboque y el separador de la Autopista Norte en Bogotá, existen poblaciones numerosas. El Biofiltro del Humedal La Vaca se construyó con esta especie, también se destacan los usos de esta especie ya que sus semillas son consumidas por algunas aves y roedores, en algunas regiones se utilizan para hacer harina. En los Humedales de Bogotá son frecuentemente usadas por la fauna como hábitat y sitio de reproducción” (Escobar, 2012).

Para la obtención de esta vegetación se realizó la visita a los humedales Córdoba, La Conejera y Santa María del Lago, donde se pudo observar gran biodiversidad de Flora y Fauna. Se determinó que el mejor sitio para la extracción del junco era el humedal Córdoba, ya que la vegetación se encontraba más cercana a los andenes transitables por el público. En este caso el junco no se encontraba bajo nivel freático, por esto con ayuda de los elementos propios para la extracción de la vegetación, se pudo obtener el junco sin causar daños en las raíces o a lo largo de la planta.

Figura 17. Sembrado de junco



Fuente: Propio

Se evidencia en la Figura 17 se evidencia el sembrado del junco extraído del humedal Córdoba, como se indicó anteriormente este es sembrado a lo largo del prototipo.

- **Agua residual (río Arzobispo):** se usó agua proveniente del Rio Arzobispo el cual nace en el cerro oriental de la ciudad de Bogotá. El lugar de captación de las muestras es durante el recorrido canalizado del Parque Nacional. Este será el agua correspondiente para tratar en el prototipo de humedal artificial.

Figura 18. Recolección agua rio arzobispo. I



Fuente: Propio

Figura 19. Recolección agua rio arzobispo. II



Fuente: Propio

La Figura 18 y Figura 19, muestran la recolección de agua del Rio Arzobispo en un balde de 15 litros, la cual fue utilizada para introducirla en el sistema de humedal artificial y posteriormente realizar el proceso de depuración.

- **ANTRACITA:** como posible mejora en el humedal se hace uso de antracita (Figura 20) como medio filtrante para la depuración de agua, la cual es un carbón activado con estructura porosa que posee propiedades de absorción y mejoramiento de la turbiedad, características convenientes para mejoras en el sistema.

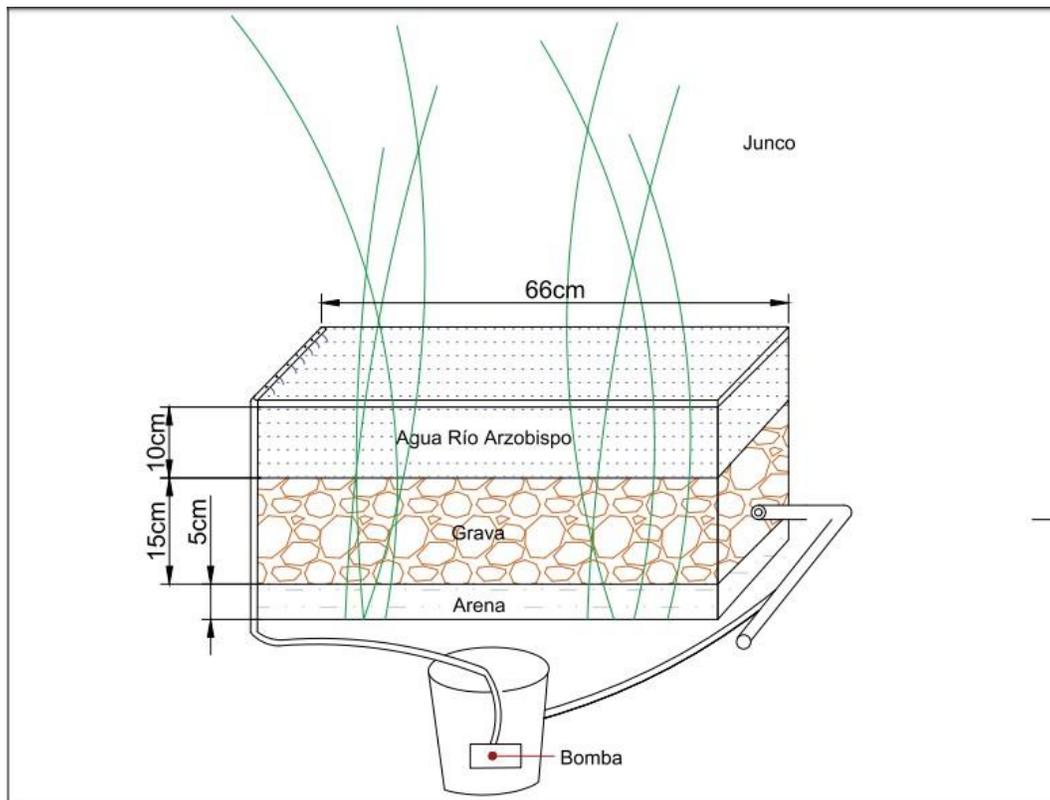
Figura 20. Antracita en el sistema de humedal



Fuente: Propio

A continuación en la Figura 21 se puede observar el rediseño de humedal artificial realizado donde se observa el proceso de recirculación con las dimensiones del recipiente y alturas del lecho filtrante (grava-arena).

Figura 21. Rediseño humedal artificial



Fuente: Propio

En la Figura 22 se observa con más detalle cada elemento utilizado en la modelación del humedal artificial y el nombre de los materiales que fueron usados para la debida recirculación.

Figura 22. Detalle de rediseño humedal artificial.



Fuente: Propio

En la Figura 22 se muestra la configuración del humedal artificial realizado el cual cuenta con un sistema de recirculación. Para que este funcione, cuenta con una tubería a la salida y entrada del sistema, y una bomba la cual permite que el agua llegue al punto de salida.

El recipiente de plástico tiene las siguientes dimensiones: un largo de 66 cm, altura de 25 cm y un ancho de 31 cm. Allí se incluye grava, arena y las plantas subacuáticas. Para este caso se utilizó el Junco Carrizo obtenido del humedal Córdoba ubicado en la localidad de Suba (Bogotá).

3.3 CONDICIONES MUESTRA A TRATAR

Se deben tener en cuenta las mediciones correspondientes para la muestra de agua que se va a depurar en el humedal ya que es importante realizar el análisis de los resultados de entrada al humedal, donde estos son los factores de comparación después del periodo de recirculación.

Las muestras en el momento de la recolección presentaban las siguientes características.

- Muestra para prototipo 1 (medio filtrante de grava y arena)
 - Se presenta con olor fétido.
 - Agua espumosa.
 - Color aparentemente traslucido.
 - Se evidencian solidos suspendidos

- Muestra para prototipo 2 (medio filtrante de antracita, grava y arena)
 - Se presenta con olor fétido.
 - Color aparentemente traslucido.
 - Se evidencian solidos suspendidos

3.4 ENSAYOS DE LABORATORIO Y RESULTADOS

Para realizar un correcto análisis de resultados se tomaron seis ensayos de laboratorio, los cuales se dividen en 3 ensayos para el humedal artificial con medio filtrante de grava y arena y 3 ensayos para el humedal artificial con medio filtrante de antracita, grava y arena. En todos los casos se realizó la medición de los parámetros pH, Turbiedad, Color, Salinidad, Conductividad, Resistividad, Solidos Suspendidos, Temperatura, porcentaje de oxígeno, oxígeno y Alcalinidad, dado que son los parámetros que se pueden medir en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Católica.

Es deseable para futuras investigaciones medir parámetros como lo son: DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno), coliformes fecales, nitratos, nitrógeno total y fosforo total, ya que la toma de estos parámetros garantiza mayor precisión

respecto a la utilización que se puede dar en el agua tratada. A continuación, se muestra los datos tomados en laboratorio.

Se obtienen los resultados para el prototipo 1 mostrados en la Tabla 14 y para el prototipo 2 Tabla 15.

Tabla 14. Resultados laboratorio humedal artificial prototipo 1.

Parámetro	Unidades	Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3
		Entrada	5 días	21 días
pH	Adimensional	7,55	7,73	6,93
Conductividad:	μs/cm	285,00	228,00	180,40
Resistividad	kΩ/cm	3,50	4,39	5,46
Turbiedad	NTU	26,00	2,00	4,00
Color	PtCo	273,00	29,00	27,00
Salinidad	Sal	0,10	0,10	0,10
%O	%	0,00	10,00	0,00
O	mg/l	0,60	0,70	0,00
Solidos Suspendidos	mg/l	152,00	121,00	98,40
Temperatura	°C	17,00	19,50	17,20
Alcalinidad	CaCO3/l	75,00	39,00	38,00

FUENTE: (fuente propia)

Tabla 15. Resultados laboratorio humedal artificial prototipo 2.

Parámetro	Unidades	Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3
		Entrada	5 días	21 días
pH	Adimensional	7,06	6,93	7,17
Conductividad:	μs/cm	127,70	247,00	325,00
Resistividad	kΩ/cm	7,83	4,07	3,07
Turbiedad	NTU	10,00	5,00	0,99
Color	PtCo	133,00	60,00	31,00
Salinidad	Sal	0,10	0,10	0,20
%O	%	22,00	20,00	34,00
O	mg/l	1,60	1,40	2,40
Solidos Suspendidos	mg/l	67,90	131,00	173,00
Temperatura	°C	15,30	18,40	17,10
Alcalinidad	CaCO3/l	33,00	57,00	33,00
Nitritos	mg/l NO2-N	0,065	0,020	0,019

FUENTE: (fuente propia)

3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se evidencian los resultados obtenidos con cada ensayo de laboratorio y se realiza el análisis correspondiente de cada parámetro medido en los laboratorios de la Universidad católica de Colombia. Se tiene en cuenta que se realizaron dos composiciones de prototipo, el prototipo 1 con grava y arena, en cuanto al prototipo 2 cuenta con grava, arena y antracita.

3.5.1 pH

El pH es uno de los parámetros a los cuales se le realizó la medición, con el fin de determinar si el agua a tratada cumplía con la normatividad vigente para reúso después del proceso de recirculación. En el caso del pH se realiza el comparativo con la resolución 1207 de 2014, la cual establece un rango en el cual puede estar la medición del agua a reutilizar.

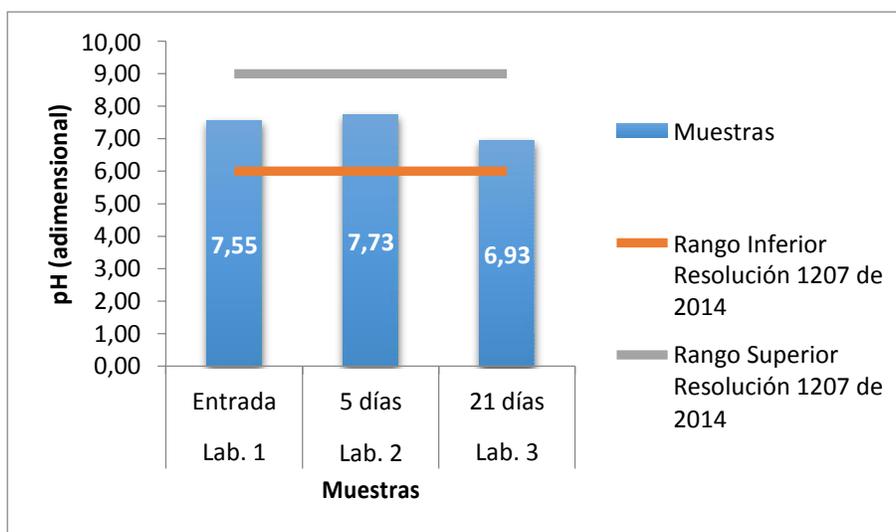


Gráfico 1. Resultados de pH para prototipo No 1.

Se muestra en el Gráfico 1 se encuentran los valores de pH obtenido en las en las tres muestras realizadas desde el inicio hasta los 21 días de recirculación, donde se evidencia que los resultados son óptimos en la reutilización del agua para riego, esto según la resolución 1207 de 2014 para reúso. Se especifica que el pH se debe encontrar en el rango de 6 y 9, es decir que en los tres casos de ensayo el agua de entrada y depurada cumple con el requisito exigido por la normatividad. el

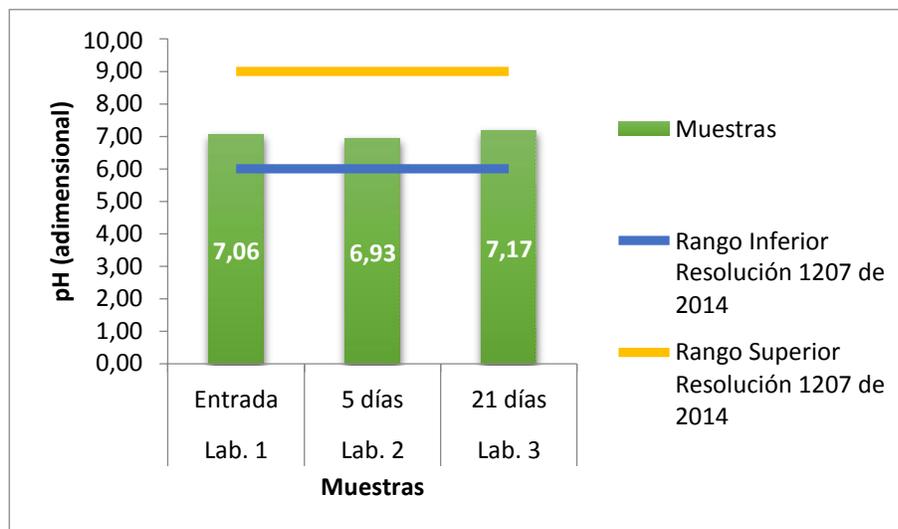


Gráfico 2. Resultados de pH para prototipo No 2

El Gráfico 2 corresponde al prototipo 2, donde el pH se encuentra en el rango que establece la resolución 1207 de 2014 con un pH neutro. De igual manera se puede resaltar que en el prototipo 1, existe una variabilidad del 6,3% promedio entre los datos de los tres ensayos, y en el prototipo 2 se tiene una variabilidad del 2,6% promedio.

3.5.2 CONDUCTIVIDAD

Es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es indicativa de la presencia de iones. (Digesa, 2008). Si el agua tratada va a ser utilizada en riego es necesario no tener altos valores de conductividad ya que esto genera que se marchiten las plantas.

El "Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece un valor máximo de conductividad de 1.500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ para aguas destinadas a riego" (Ambiente, 2004).

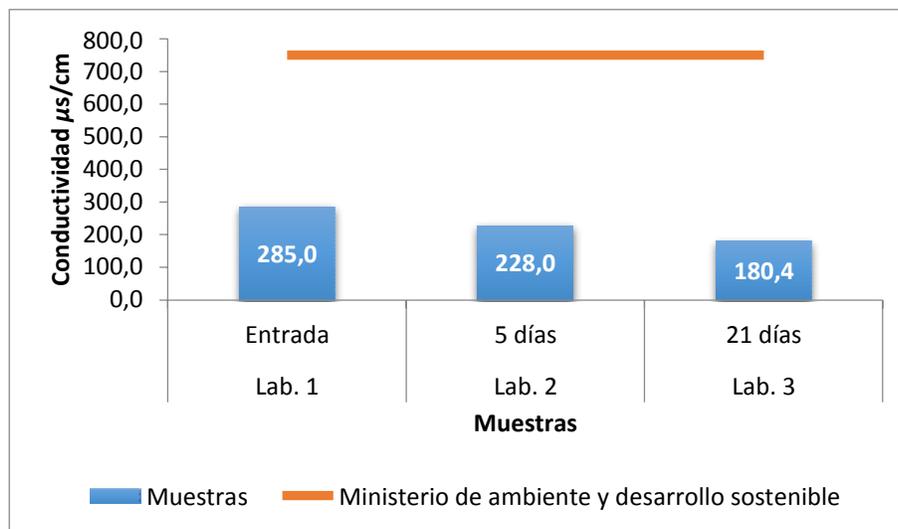


Gráfico 3. Resultados de conductividad para prototipo No 1.

Se muestra en las tablas valores de conductividad en las tres muestras realizadas, donde todos los resultados sirven para utilización de riego.

Como reducción respecto a la muestra inicial y la muestra luego de 5 días de retención, se consigue un 20% de mejoras, y como reducción entre los 5 y 21 días de retención un 21% de reducción.

Resultados satisfactorios ya que cumplen con valores menores a 1.500 µs/cm según la normatividad colombiana para uso en riego, y estos resultados garantizan que no se produzcan “pérdidas en la absorción del agua”(Digesa, 2008).

Este parámetro también tiene una relación directa con la salinidad, donde “resultados altos significa presencia de salinidad lo cual no es deseable para uso en riego puesto que este factor afecta el crecimiento de las plantas y su rendimiento”(RedAgrícola, 2002).

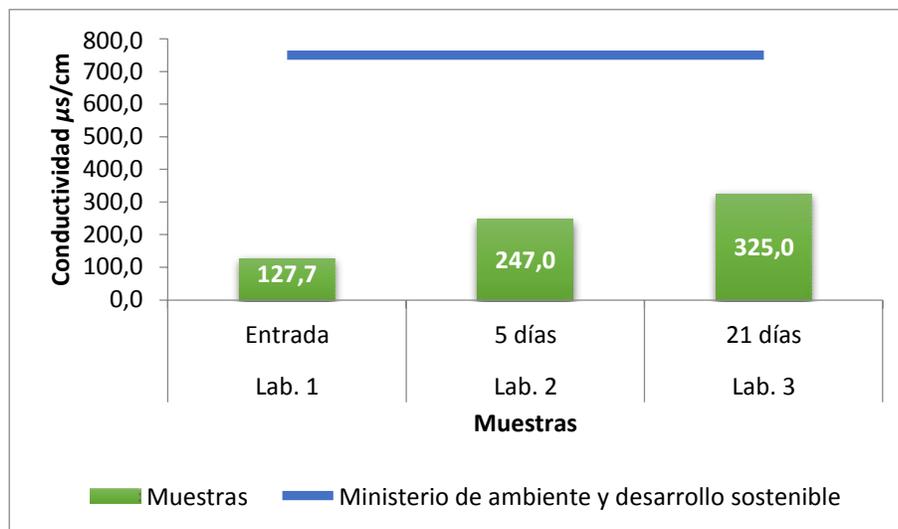


Gráfico 4. Resultados de conductividad para prototipo No 2.

Se muestra en el Gráfico 4 resultados de las tres muestras realizadas para el prototipo 2, donde según la normatividad colombiana se mantiene un rango máximo de 1.500 $\mu\text{s/cm}$ denotándose que los tres resultados cumplirían para ser utilizadas en riego.

El parámetro de conductividad tuvo un aumento respecto uno del otro, en la muestra inicial con la tomada a los 5 días se da un aumento del 93.42 %, y la comparación de la muestra tomada a los 5 y 21 días se da un aumento del 31.6 %.

Resultados que a pesar de incrementar siguen cumpliendo con el rango analizado, el “aumento de este parámetro se relaciona directamente con la salinidad parámetro que no es deseado para riego, dado que la presencia que salinidad afecta el crecimiento de las plantas y su rendimiento” (RedAgrícola, 2002). También significa que el aumento de este parámetro muestra presencia de iones lo cual hace que en los cultivos no se produzca una absorción en el agua y genere que se marchiten las plantas.

Se pueden comparar los resultados obtenidos del prototipo 1 y 2, mostrándose que el prototipo 1 para el parámetro de conductividad tuvo mejores resultados respecto a la reducción de este parámetro, sin embargo, se denota que los dos modelos cumplen con la normatividad requerida.

3.5.3 RESISTIVIDAD

La resistividad es una medida recíproca a la conductividad, como se explicó en la sección 3.5.2. La conductividad es la capacidad que tiene el agua para conducir electricidad. En este caso la resistividad se entiende como la resistencia del material para no transmitir la energía, a su vez tanto la conductividad como la resistividad del agua dependen del contenido de sales en el agua y la temperatura, ya que “la conductividad eléctrica del agua aumenta en un 2-3% para un aumento de

1 grado Celsius de la temperatura del agua” (Smart-fertilizer, 2017) y como se observara en la sección 3.5.11 existe una variación en la temperatura de cada ensayo.

Como se observa en el Gráfico 5 existe un aumento de la resistividad en la muestra inicial con la tomada a los 5 días del 20,8%, y la muestra tomada a los 5 y 21 días da un aumento del 19,6%. Si se realiza la comparación con los resultados obtenidos de conductividad para el prototipo 1, en el Gráfico 3 la conductividad disminuye, es decir que los resultados de resistividad son acorde a la reacción propia de la resistividad ya que está aumentando su valor.



Gráfico 5. Resultados de resistividad para prototipo No 1.

Como se observa en el Gráfico 6 del prototipo 2 tiene un comportamiento similar al del Gráfico 5, pero en este caso se observa que la resistividad está disminuyendo, en la muestra inicial con la tomada a los 5 días se da una disminución del 48%, y la comparación de la muestra tomada a los 5 y 21 días disminuye el 24%.

Si se realiza la comparación entre el Gráfico 4 el cual corresponde al prototipo 2 de conductividad y el Gráfico 6 valores de resistividad para prototipo 2, se evidencia que mientras la conductividad aumenta la resistividad disminuye, lo que quiere decir que el comportamiento de la resistividad es inversamente proporcional al de la conductividad.



Gráfico 6. Resultados de resistividad para prototipo No 2.

3.5.4 TURBIEDAD

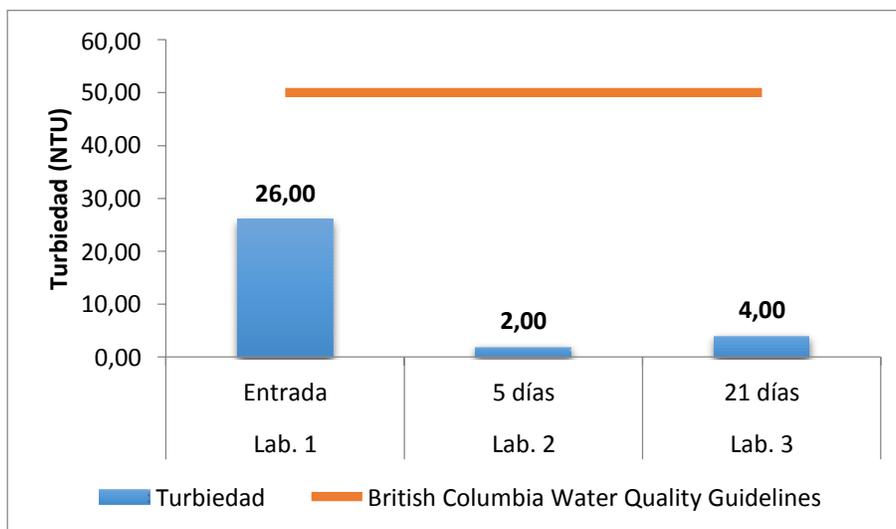


Gráfico 7. Resultados de turbiedad para prototipo No 1.

La turbiedad es una “medida o indicador del grado de transparencia de un líquido; siendo un indicador importante como parámetro de reúso, este se ve influenciado negativamente, es decir que aumenta su valor, en función de la presencia de sólidos en suspensión.” (Instruments, 2016)

Donde el parámetro de turbiedad tuvo una reducción significativa favorable, como primer control a los 5 días de retención se obtuvo una reducción del 92.3 % y luego de 21 días de retención un

pequeño aumento en el parámetro; resultados que cumplen con la utilización requerida para el agua depurada y además factor que garantiza una reducción significativa respecto a los sólidos o partículas presentes en el agua tratada.

Según “British Columbia Water Quality Guidelines se tiene como parámetro de turbiedad valores < 50 NTU para uso en riego” (Sancha *et al.*, 2005); se toma este rango ya que la normatividad colombiana no cuenta con rango para turbiedad en riego. Se evidencia que las tres muestras cumplen con la normatividad donde se garantiza que se tiene un grado de transparencia deseable en el agua y se tendrá “actividad fotosintética y brote de semillas” (Sancha *et al.*, 2005), lo cual es deseable para el uso que se generara al agua tratada.

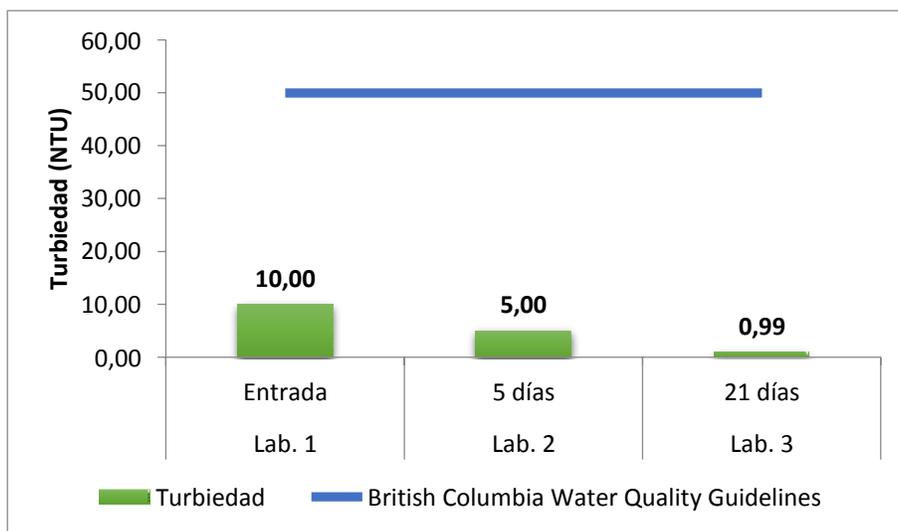


Gráfico 8. Resultados de turbiedad para prototipo No 2.

El parámetro de turbiedad tuvo una reducción respecto a la inicial y la tomada a los 5 días del 50% y la tomada a los 5 y 21 días del 82%, donde se observa en la gráfica el rango estipulado por “British Columbia Water Quality Guidelines se tiene como parámetro de turbiedad valores < 50 NTU para uso en riego” (Sancha *et al.*, 2005). Mostrando así que todos los resultados cumplen para ser usado en riego.

La turbiedad es un parámetro que mide la transparencia del líquido y se relaciona con los sólidos en suspensión, donde un aumento de turbiedad indica también aumento de los sólidos suspendidos lo cual se ve influenciado negativamente para ser usado en riego; sin embargo, los resultados obtenidos muestran cómo no se da un aumento del parámetro.

La comparación de los prototipos realizados, muestra mejores resultados de reducción en el prototipo 2 sin embargo los dos prototipos cumplen con la normatividad para uso en riego.

3.5.5 COLOR APARENTE

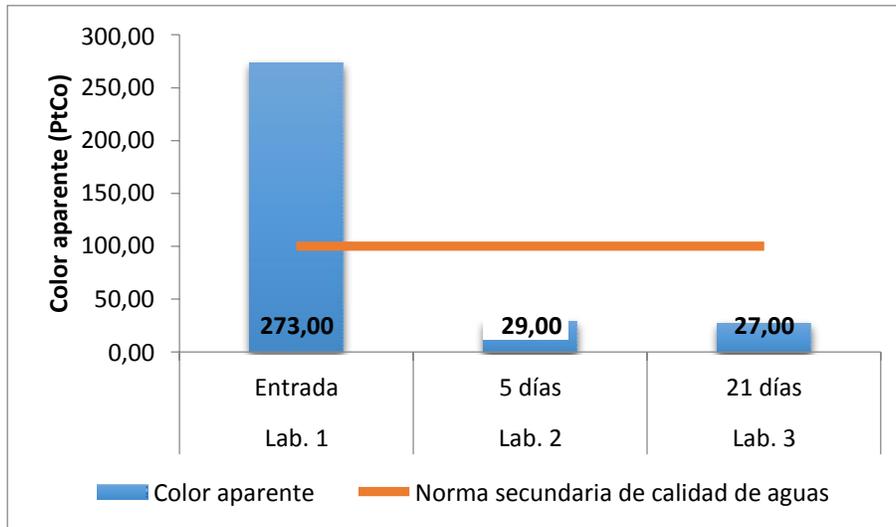


Gráfico 9. Resultados de color aparente para prototipo No 1.

El “color del agua dependerá tanto de las sustancias que se encuentran disueltas, como de las partículas que se encuentren en suspensión. El color aparente es el que incluye las partículas en suspensión (que a su vez generan turbidez). El color aparente es entonces el de la muestra tal como la obtenemos en el sistema a estudiar”(Goyenola, 2007). Donde su presencia indicaría ineficiencia en el tratamiento de agua.

Observando así los resultados del Gráfico 9, que muestra una significativa reducción del parámetro respecto a la prueba inicial y la tomada a los 5 días de retención con un 89.4 % de reducción y además se genera otro tipo de reducción a los 21 días retención del 6.89 %.

Resultados que garantizan la eficiencia del sistema respecto a la disminución del color que garantiza también disminución de las partículas en suspensión del agua tratada y cumple con la “Norma Secundaria de Calidad de Aguas la cual especifica un parámetro que no supere los 100 Pt-Co” (Sancha *et al.*, 2005) para uso en riego. Consideración tomada ya que la normatividad colombiana no cuenta con un rango para este parámetro; donde se evidencia que la muestra inicial supera este parámetro y las dos siguientes luego del tratamiento cumplen con el parámetro dado; así cumpliendo con la normatividad.

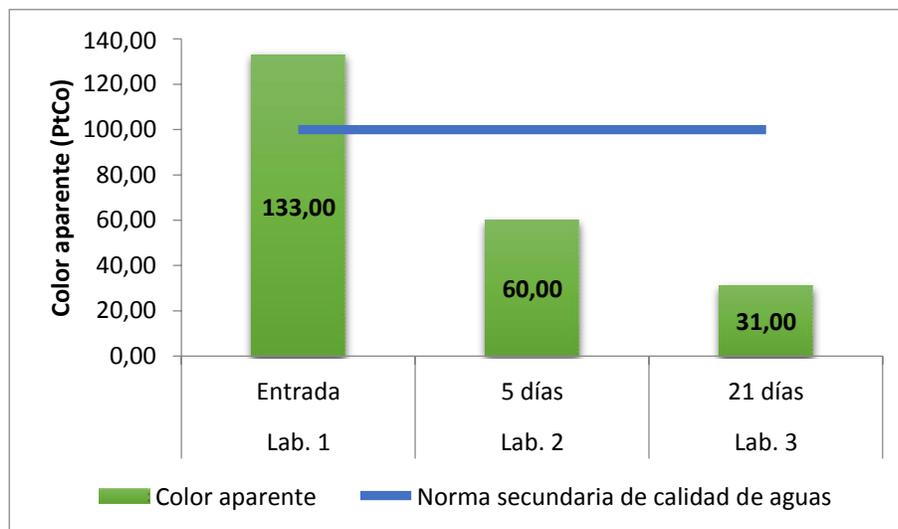


Gráfico 10. Resultados de color aparente para prototipo No 2.

Para este parámetro se tiene como rango valores que no superen los 100 Pt-Co dado por la Norma Secundaria de Calidad de Aguas, a partir de los resultados mostrados se denota como la muestra inicial no cumplía con el parámetro dado teniendo un valor de 133 Pt-Co; sin embargo, luego del tratamiento realizado se muestra como a los 5 días se reduce un 45.12 %, y entre 5 y 21 días una reducción de 51.67 %.

La presencia de un parámetro elevado de color aparente indica ineficiencia en el tratamiento de agua, donde se denota como el tratamiento del humedal cumple con su funcionalidad de mejorar las condiciones del agua inicial. Probando así que luego de tratada cumple con la especificación recomendada para uso en riego.

Al comparar los dos prototipos se puede evidenciar como en las muestras iniciales de ambas no se cumple con la normatividad recomendada de valores menores a 100 Pt-Co, y luego del tratamiento en ambos modelos se cumple el rango dado por la Norma Secundaria de Calidad de Aguas.

3.5.6 SALINIDAD

Es importante destacar que los resultados analizados en el laboratorio se relacionan entre sí, y es por esto que la salinidad se relaciona directamente con la conductividad del agua. Se dice que grandes contenidos de sal en el agua a tratar afecta la “disponibilidad de esta para riego ya que generan marchitamiento en las plantas y en el caso del cultivo afecta el rendimiento bien sea de crecimiento o de producción del insumo” (Monge Redondo, 2017).

En este caso el índice de sal que presenta la muestra de agua, se observa en el Gráfico 11 que para todos los laboratorios presento el mismo resultado por ende no afecta la muestra de agua para riego.

En este caso no se encontró una normativa para realizar la verificación de cumplimiento de calidad de agua, pero se denota que para ambos prototipos, el valor de salinidad es bajo, por esto no afectaría el sustrato del cultivo para la utilización de riego.



Gráfico 11. Resultados de salinidad para prototipo No 1.

“Por otra parte las aguas reutilizadas generan un incremento en el contenido de sales, la cual altera la salinidad en el sistema agua-suelo-planta” (Manga and Logreira, 2001), lo cual da como resultado como se había indicado anteriormente, la pérdida del fruto o del cultivo.

En el caso del prototipo 2 del Gráfico 12, se tienen resultados similares al del prototipo 1 exceptuando el ensayo final realizado a los 21 días de recirculación, ya que como se observa en el Gráfico 12 se generó un aumento significativo a comparación del resto de resultados. Esto se debe a que se generó un aumento en los sólidos disueltos como se observa en el Gráfico 18 y por ende aumenta el parámetro de salinidad.



Gráfico 12. Resultados de salinidad para prototipo No 2.

3.5.7 OXÍGENO

Es el oxígeno que esta disuelto en el agua, esto se logra por la aireación y como un producto de desecho de la fotosíntesis (Digesa, 2008).

Según la legislación de la “Republica de Honduras establece una concentración de >3 mg/l oxígeno disuelto para uso agrícola” (Digesa, 2008). Se toma normatividad de Honduras ya que la normatividad colombiana no cuenta con rango para este parámetro.

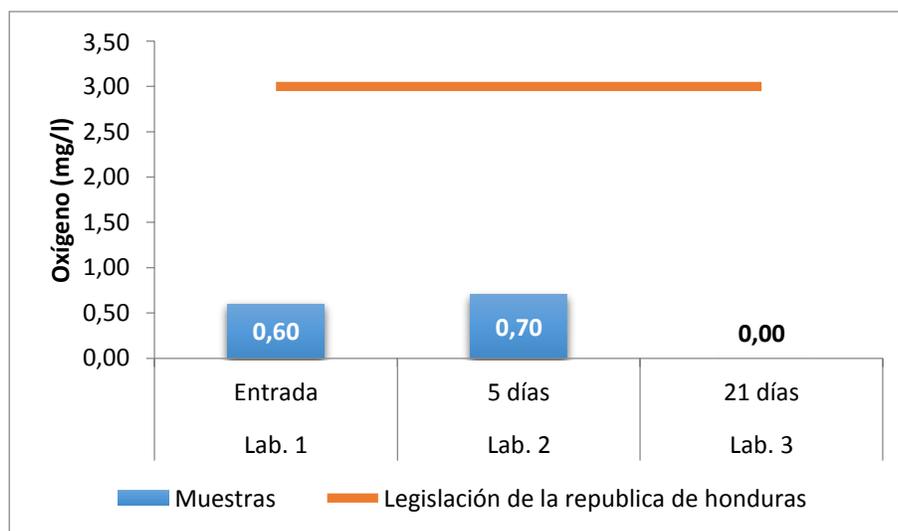


Gráfico 13. Resultados de oxígeno disuelto para prototipo No 1.

Se muestra en los resultados un aumento del 14 % entre la muestra inicial y la tomada después de 5 días de circulación. Luego una reducción del 100% de la muestra final a 21 días de retención obteniendo como resultado final un valor de 0 mg/l de oxígeno disuelto.

Resultados que no cumplen con las normatividades, ya que se tiene como parámetro un valor mayor a 3 mg/l según la Republica de Honduras, donde una concentración tan baja como los resultados obtenidos imposibilita la respiración de microorganismos aerobios, así como otras formas de vida; además de que disponer con el oxígeno suficiente evita olores desagradables en el sistema.

Dados los resultados, se puede afirmar que seguramente hubo un factor de error que probablemente insidioso en el último resultado. El valor fue de 0 mg/l. El análisis que se hace, es que pudo existir error en la toma de la muestra, debido a que el parámetro no es tomado directamente del humedal, sino que es envasado y luego medido. Sin embargo, en trabajos futuros sería importante tener otros mecanismos de medición del oxígeno, para comparar y revisar si es un error de laboratorio.

Figura 23. Envase de muestra para toma de resultados.



Fuente: Propio

En la Figura 23 se muestra el proceso de toma de muestra de oxígeno disuelto; donde de una manguera de ¼” se toma la cantidad de agua necesaria para ser puesta en los equipos y así obtener los resultados de los parámetros. Esto debido a que no existen equipos en el laboratorio donde se pueda tomar la muestra del parámetro directamente en el humedal. Al realizarse de esta manera no se garantiza la oxigenación que da el sistema de recirculación, existiendo presencia de

aireación que cambia las condiciones reales de oxígeno disuelto en los prototipos diseñados.



Gráfico 14. Resultados de oxígeno disuelto para prototipo No 2.

Se evidencia en los resultados de oxígeno disuelto para prototipo 2 una disminución de la muestra inicial con respecto a la tomada a los 5 días del 12.5% y luego un significativo aumento del 71.43%; resultados satisfactorios ya que un aumento significa más oxigenación en el sistema permitiendo así respiración de microorganismos aeróbicos, así como otras formas de vida y también el aumento de este parámetro genera reducción de malos olores.

Sin embargo, los resultados obtenidos aun no cumplen con la Legislación de la Republica de Honduras que regulan valores mayores a 3 mg/l para uso en riego, con el aumento denotado a los 21 días, podría esperarse que con más días de recirculación se obtuviera el valor requerido.

Comparando los prototipos realizados se evidencia como el segundo prototipo obtuvo mejores resultados; sin embargo, como se menciona en el ítem anterior pudo presentarse un error en la toma de muestras por lo cual no se podría dar certeza de cual prototipo en este caso sería el mejor.

3.5.8 PORCENTAJE DE OXÍGENO

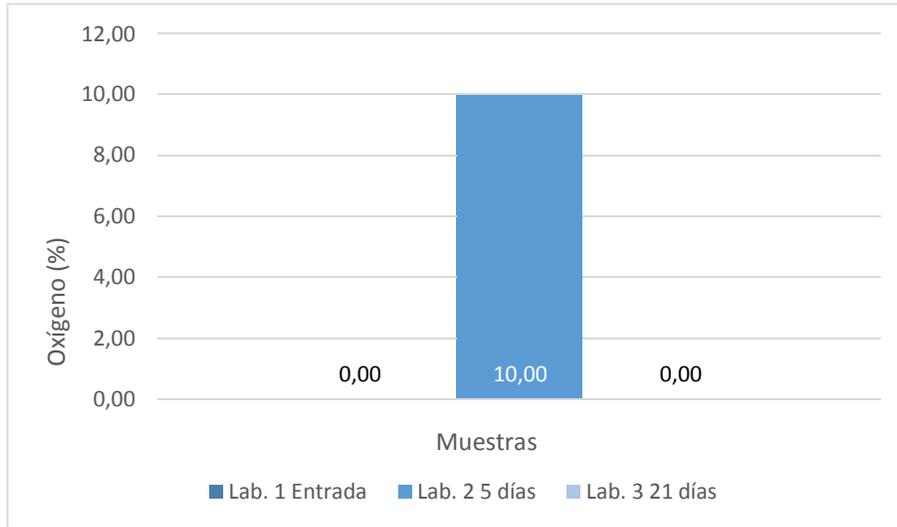


Gráfico 15. Resultados de porcentaje de oxígeno para prototipo No 1.

Los resultados de porcentaje (%) de oxígeno se ven reflejados en el Gráfico 15, donde se tiene como valor inicial de 0 % y luego de retención de 5 días se da un aumento de 10, después se observa a los 21 días una reducción en este valor. Como se menciona en el ítem anterior en este parámetro pudo existir un error en la medición ya que no se toma la muestra directamente del humedal, factor que pudo a ver causado que los resultados obtenidos sean tan bajos respecto a lo que se espera.

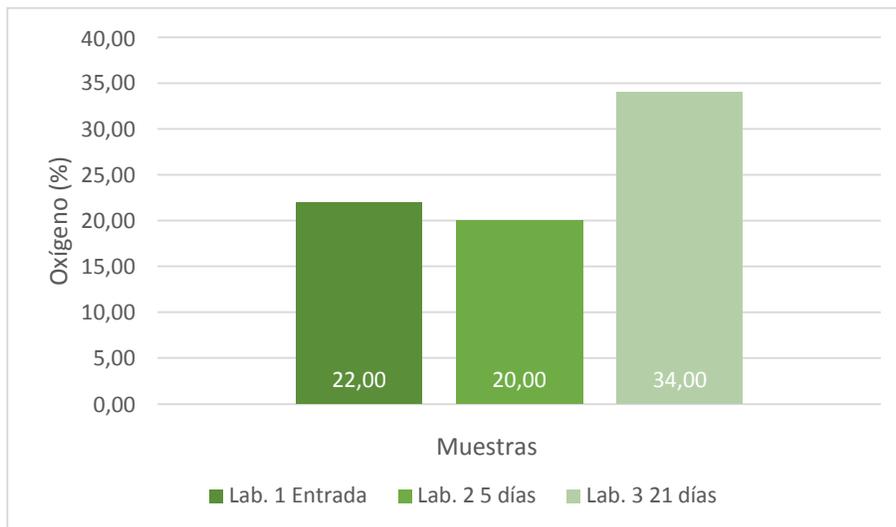


Gráfico 16. Resultados de porcentaje de oxígeno para prototipo No 2.

Los resultados de porcentaje (%) de oxígeno para el prototipo 2 evidencian en primera estancia una reducción 9.09 %, y luego un aumento del 70%. Como se menciona en el ítem anterior el aumento de este parámetro permite respiración de microorganismos aeróbicos, así como otras formas de vida y también el aumento de este parámetro genera reducción de malos olores, evidenciando así que el sistema al tener un aumento en este parámetro permitirá que no ocurra el problema ya antes mencionado.

3.5.9 SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (TDS)

Sustancias orgánicas e inorgánicas solubles en agua. Son todos los sólidos que están en solución ionizados. Las altas concentraciones de sólidos disueltos son debido al arrastre de materiales provocados por el aumento del caudal de los ríos (Digesa, 2008).

La organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO) en el año 2000 establece una concentración de <450 mg/l de sólidos disueltos totales destinadas a riego.

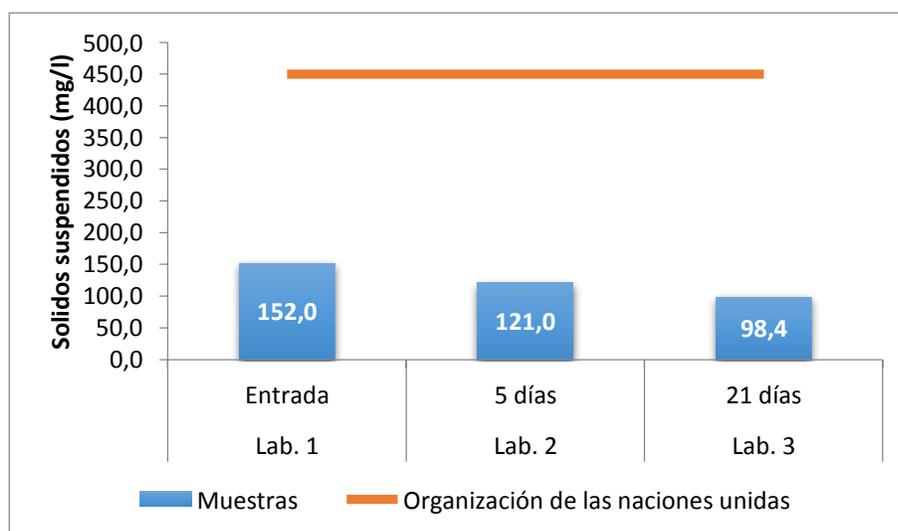


Gráfico 17. Resultados de sólidos disueltos suspendidos para prototipo No 1.

Todos los resultados obtenidos en la toma de muestra de solidos disueltos totales cumplen con la normatividad requerida por la Organización de las Naciones Unidas para utilización de esta en riego, estando por debajo del rango dado.

Se denota una disminución de 20,4 % respecto a la muestra inicial y los 5 días de retención, reducción conveniente para ser utilizado en riego, luego se realiza otra reducción a los 21 días de retención del 18,67 %; esto demostrando que, a mayores días de retención, el sistema genera una reducción respecto a los sólidos disueltos suspendidos.

Se tiene como resultado la debida disminución del parámetro, por lo tanto el arrastre de material particulado tuvo un reducción que garantiza eficiencia en el sistema; ya que un aumento en este parámetro para uso de riego “impide el brote de semillas, interfiere en la actividad fotosintética, el crecimiento y reducción en adecuación para consumo” (Sancha *et al.*, 2005). Mostrando así que con los resultados dados no se presentaran estos inconvenientes.

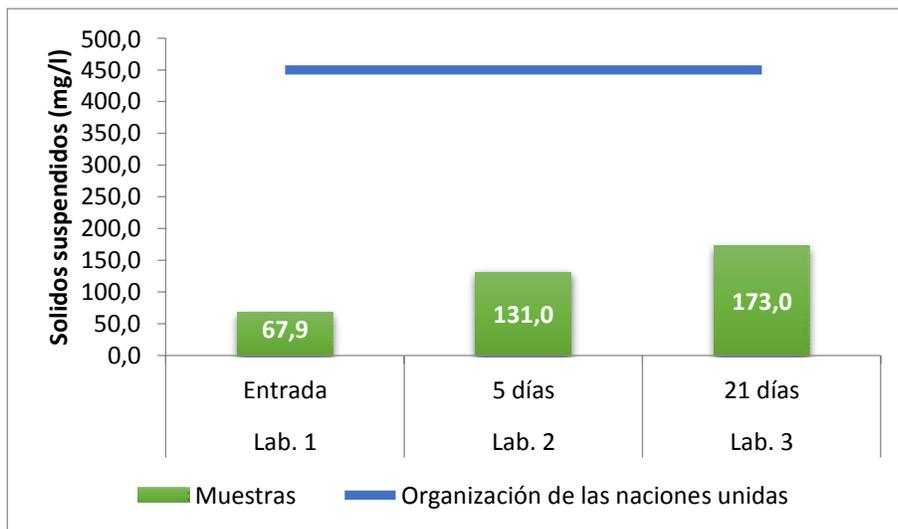


Gráfico 18. Resultados de sólidos disueltos suspendidos para prototipo No 2

Se tiene como parámetro según la Organización de las Naciones Unidas valores que no superen los 450 mg/l para uso en riego, donde se evidencia que todos los resultados obtenidos cumplen con la normatividad.

Se denota un aumento respecto a la muestra inicial y la tomada a los 5 días del 92.93 % y de nuevo un aumento entre los 5 y 21 días del 32.06 %, esto se debe seguramente a que al tener en el prototipo 2 como material adicional la antracita y está al tener un gramaje tan bajo, provocó el aumento mostrado en los sólidos disueltos suspendidos. Se recomienda poner a la salida del sistema una malla que impida el paso de la antracita para la toma de este parámetro y así evidenciar como se darían los resultados.

Al comparar los prototipos realizados, se denota como el primer prototipo tuvo mejores resultados ya que este generó una disminución en los sólidos disueltos suspendidos; sin embargo, los dos sistemas cumplen con la normatividad requerida para uso en riego.

3.5.10 ALCALINIDAD

“La alcalinidad del agua se debe a los contenidos de carbonatos y bicarbonatos en solución, los cuales son muy comunes en las aguas subterráneas” (INTAGRI S.C, 2017). Por esto es importante

tener en cuenta el parámetro de alcalinidad presente en el agua ya que si se tiene una alcalinidad con valores elevados, puede afectar el sustrato del cultivo “esto se debe a que la capacidad de amortiguamiento del mismo se agota con el paso del tiempo, por la formación de carbonatos y bicarbonatos en el sustrato” (INTAGRI S.C, 2017).

En los ensayos de laboratorio realizados a la muestra de agua, se obtiene para el prototipo 1, los datos mostrados en el Gráfico 19.

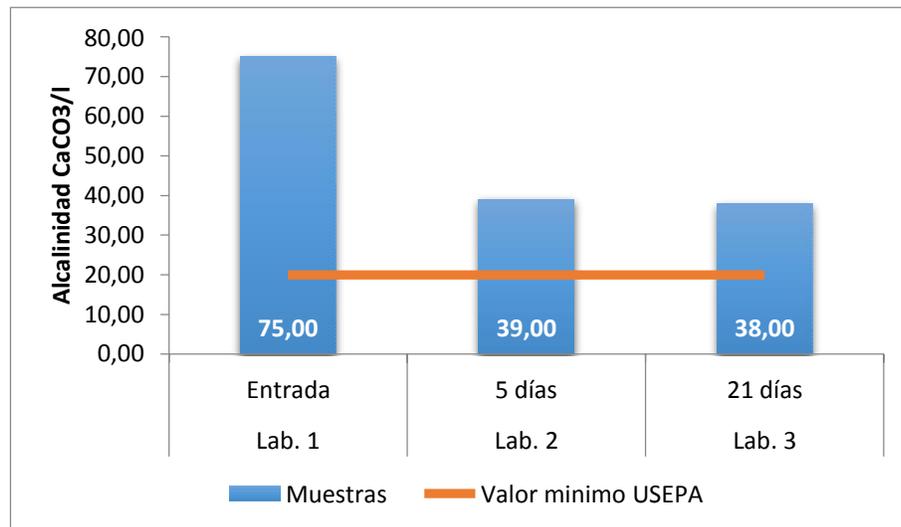


Gráfico 19. Resultados de alcalinidad para prototipo No 1.

Se evidencia que después de la recirculación se generó una disminución de la alcalinidad respecto a la muestra inicial y la tomada a los 5 días del 48% y de nuevo disminuyó entre los 5 y 21 días 2,5%. Como se especifica en la USEPA (U.S. Environmental protection agency 1976, 1986) (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), el valor mínimo aceptado es de 20 mg/l CaCo₃ (Arend, 1999) y para este caso se obtiene un valor de 38 mg/l CaCo₃ es decir que el agua en el prototipo 1 y 2 el agua es apta para riego.

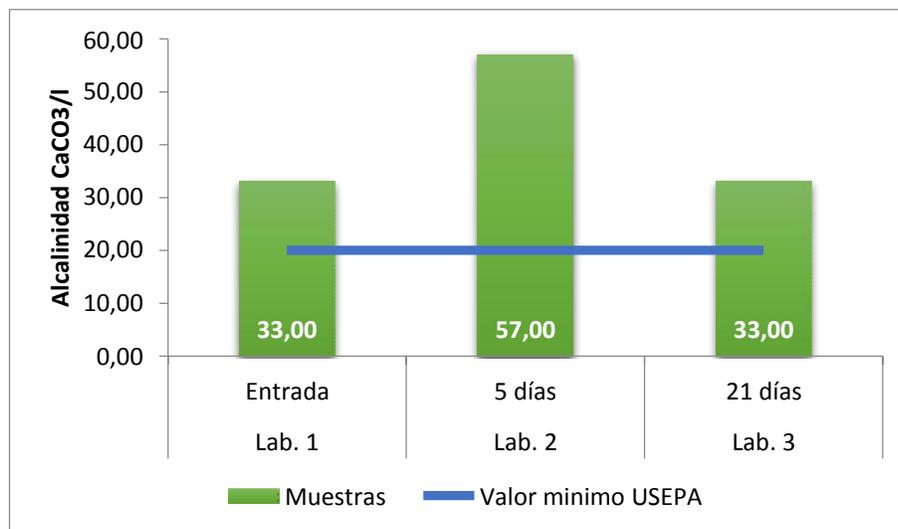


Gráfico 20. Resultados de alcalinidad para prototipo No 2.

En el caso del prototipo 2, se evidencia según el Gráfico 20 que entre la muestra inicial y la tomada a los 5 días existe un aumento de alcalinidad del 42% y disminuye entre los 5 y 21 al valor de la muestra inicial 33 mg/l CaCO₃. Esto significa que en todos los casos cumple con el valor mínimo exigido por la USEPA ya que en todos los casos el valor es mayor a 20mg/l CaCO₃.

Al comparar los prototipos se evidencia que tanto el prototipo 1 como el prototipo 2 dan resultados óptimos de alcalinidad y ninguno tiene datos menores a los exigidos en la normatividad de la USEPA, por esto el agua puede ser usada para riego.

3.5.11 TEMPERATURA

La temperatura de la muestra es un valor que puede variar directamente por el clima del entorno y la ubicación del prototipo.

Se dice que a mayor temperatura el pH se reduce, si se realiza la verificación con los datos obtenidos de pH, en el laboratorio 2 hubo un aumento de la temperatura de la muestra y a su vez una disminución del valor del pH como se observa en el Gráfico 21, esto en comparación a los datos iniciales de la muestra. Así mismo la temperatura va ligada a los resultados obtenidos de la conductividad y resistividad.

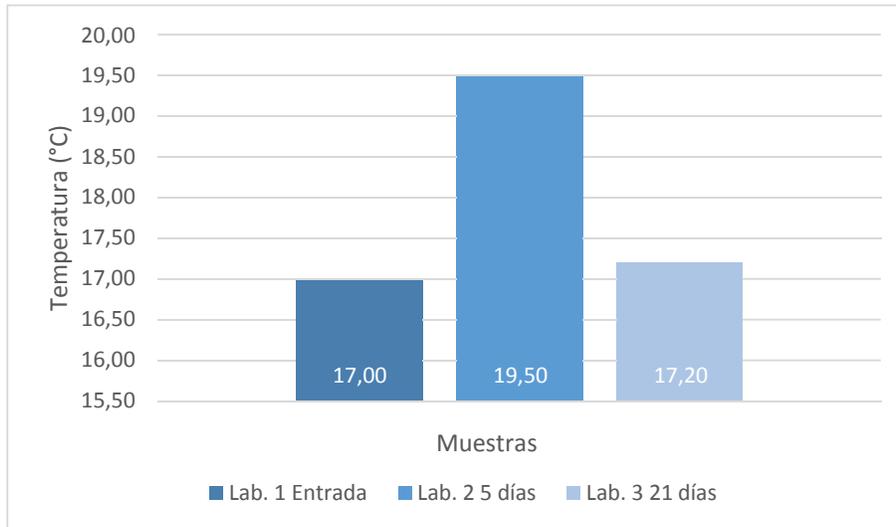


Gráfico 21. Resultados de temperatura para prototipo No 1.

Realizando la comparativa entre el Gráfico 21 y el Gráfico 22, se observa que no hay mucha variación en el resultado final, las temperaturas oscilan entre 15 °C y 20 °C, se observa que en ambos prototipos, se aumentaba la temperatura del agua después de los 5 días de recirculación, y a los 21 días disminuye la temperatura. Esto puede ser ya que el agua proveniente del río arzobispo trae diferentes temperaturas por las condiciones climáticas en el entorno y la velocidad del mismo y luego se genera un aumento en la temperatura ya que al introducir la muestra de agua en el Humedal artificial, esta toma la temperatura de ese entorno con la vegetación. Además, el nivel del agua se dejaba aproximadamente a 2 centímetros por arriba del lecho filtrante, por ende, en ese momento estaba más expuesta con la atmosfera.

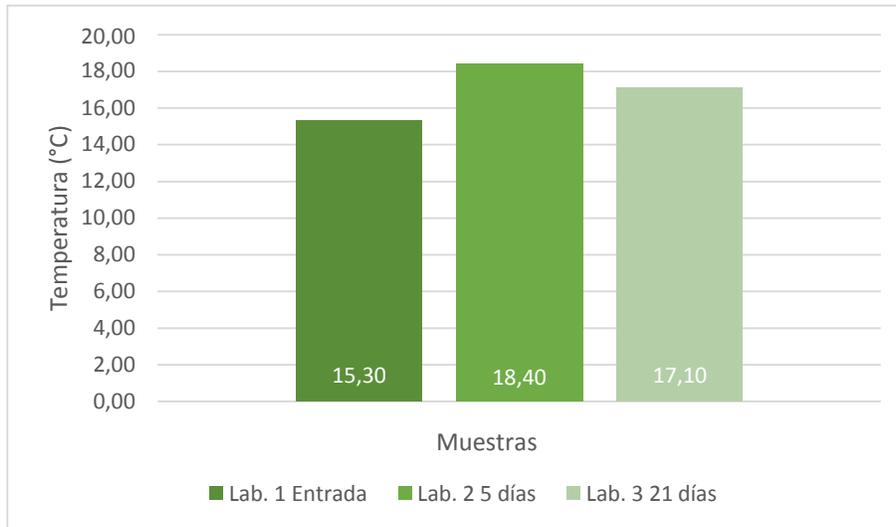


Gráfico 22. Resultados de temperatura para prototipo No 2.

3.5.12 NITRITOS

“La presencia de nitritos en el agua es indicativo de contaminación de carácter fecal reciente, en aguas superficiales, bien oxigenadas, el nivel de nitrito no suele superar el 0.1 mg/l” (upcommons, 1999).

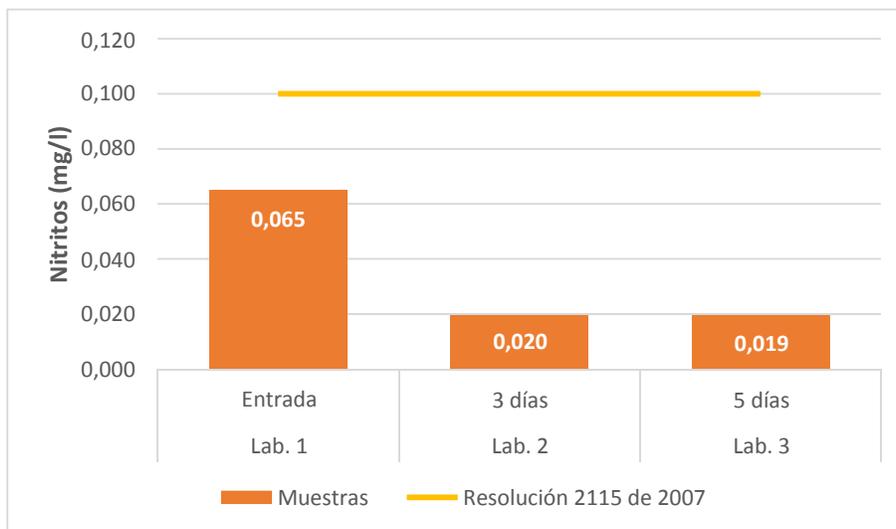


Gráfico 23. Resultados de nitritos para prototipo No 2.

Como se evidencia en el Gráfico 23, existe una disminución respecto a la muestra inicial y la tomada a los 3 días de recirculación del 70% y de nuevo disminuye entre los 3 y 5 días del 5%. Este parámetro solo se desarrolla en el prototipo 2, y como se evidencia en los resultados con tan

solo 3 días de recirculación es suficiente para llegar a un valor más óptimo de nitritos. Cabe resaltar que los tres datos obtenidos cumplen según la resolución 2115 de 2007 ya que son menores a 0,1 mg/l, demostrando que el agua obtenida es apta para riego y el sistema de recirculación es efectivo.

4. EFICIENCIA DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DADO POR EL HUMEDAL ARTIFICIAL REDISEÑADO.

A continuación, se muestra la comparación de los resultados obtenidos, con el prototipo de humedal artificial generado por los estudiantes del semillero EcoCivil en el año 2012, teniendo en cuenta que el prototipo del año 2012 generó una recirculación únicamente de 5 días. Se genera el análisis de los datos obtenidos para una recirculación de 5 días en los 3 prototipos.

- Comparación pH

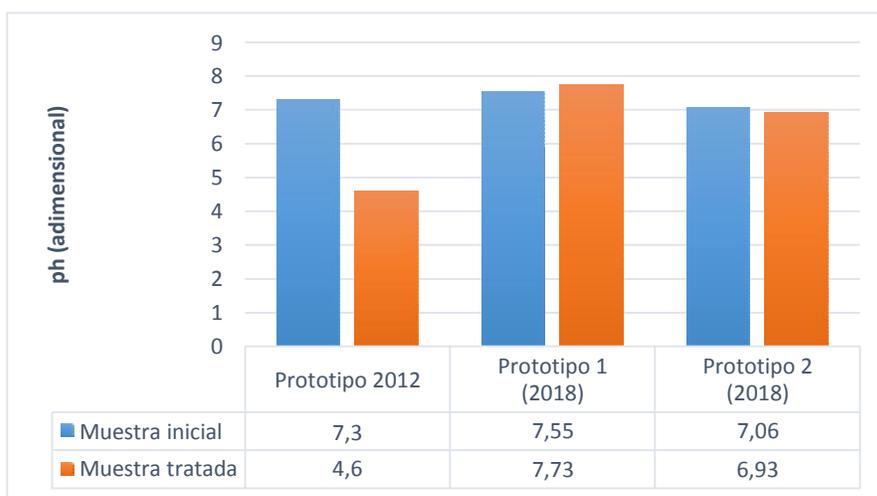


Gráfico 24. Comparación pH.

Se evidencia en el Gráfico 24 que el modelo del 2012 generó una disminución del parámetro después del tratamiento con una efectividad del sistema de 36%, esta depreciación generó que el agua quedara con un pH en estado básico, el cual no es favorable según la resolución 1207 del 2014 ya que está por debajo del parámetro permitido, en el caso del prototipo 1 y prototipo 2, se observa eficiencias de 2,3% y 1,8% respectivamente cumpliendo con la normatividad.

- Comparación Conductividad

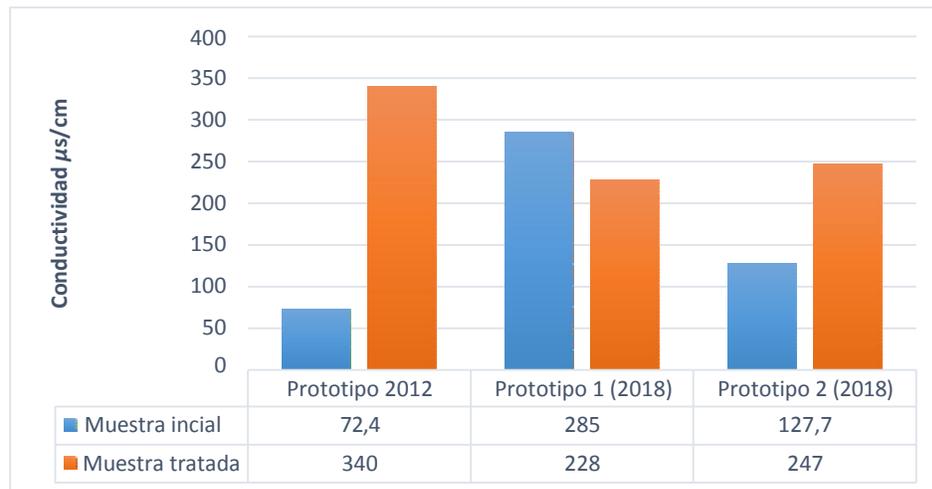


Gráfico 25. Comparación conductividad.

En el prototipo realizado en el año 2012 existió un aumento de conductividad del 369.61 % siendo un aumento muy significativo para el sistema lo cual no es favorable, ya que se cuenta con riesgos de que con una alta conductividad el agua tratada no pueda ser utilizada en riego produciendo que se marchiten las plantas. Para los prototipos realizados en el año presente primeramente se denota una reducción del 20% y para el segundo prototipo un aumento del 93.42 %; se concluye que en este parámetro se logra una mayor eficiencia del prototipo 1 (2018), ya que presenta la reducción más significativa del parámetro evaluado lo cual para el uso en riego es favorable.

- Comparación resistividad

Se evidencia en el Gráfico 26 que el prototipo realizado en el 2012, tuvo un resultado inicial alto en comparación con los valores iniciales obtenidos en los prototipos del presente año, con un valor de eficiencia de 75%. Se evidencia un comportamiento similar en los tres prototipos, ya que si la conductividad aumenta el parámetro de resistividad disminuye, esto debido a que estos dos parámetros son inversamente proporcionales entre sí.

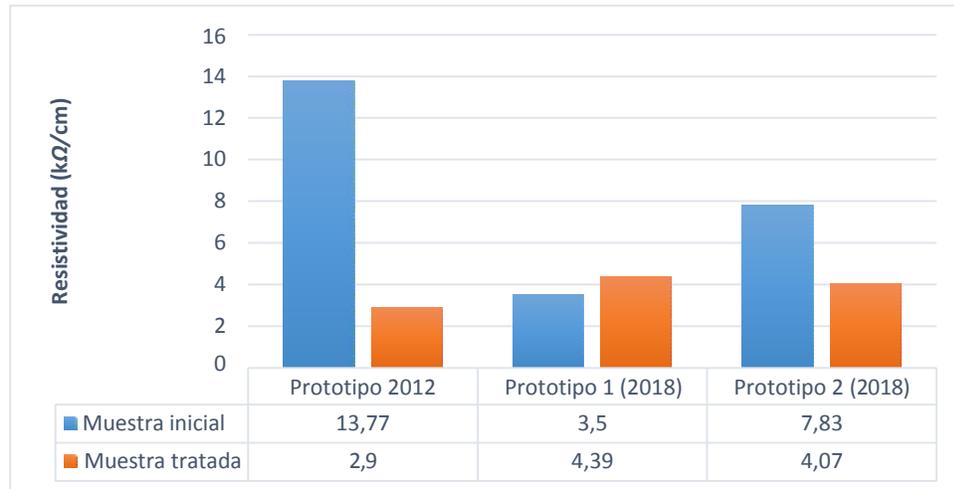


Gráfico 26. Comparación resistividad.

- Comparación turbiedad

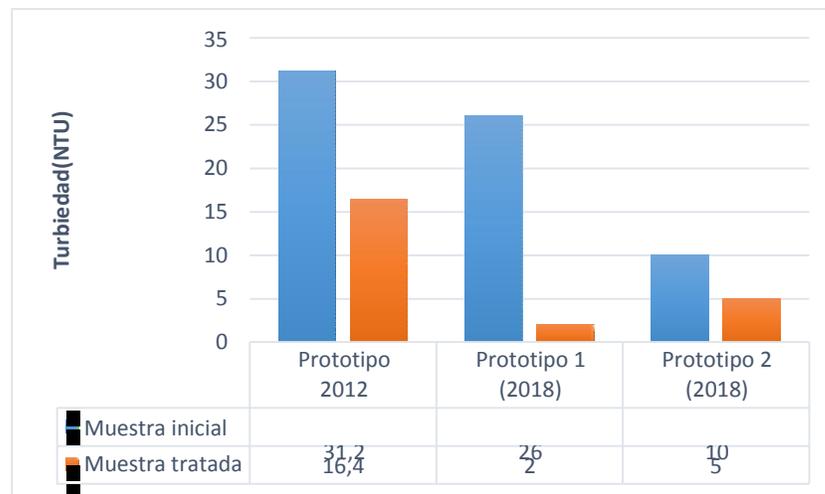


Gráfico 27. Comparación turbiedad.

Se muestra en el Gráfico 27, para el prototipo realizado en el año 2012 una reducción del parámetro de un 47.44 % siendo indicativo de transparencia en el líquido y además que valores bajos de este parámetro indican poca presencia de sólidos en suspensión siendo conveniente para el sistema. Seguidamente se observan en los prototipos realizados en el año 2018 una disminución para el prototipo 1 del 92.31% y para el prototipo 2 una reducción del 50 %.

Los modelos realizados en el presente año muestran mejores resultados con respecto al realizado en el 2012, y el prototipo 1 tiene mejores resultados con una disminución significativa que garantiza eficiencia para uso del agua en riego.

- Comparación color aparente

Se evidencia según el Gráfico 28, que el prototipo tuvo una eficiencia en la disminución del color de 68% mientras que el prototipo 1 tiene una eficiencia del 89% y el prototipo 2 de 55%, en este caso, el prototipo con mayor eficiencia es el 1, esta variación se puede presentar por las diferentes sustancias disueltas en el agua, en el caso del prototipo 2, se genera la variación por la implementación de la antracita.

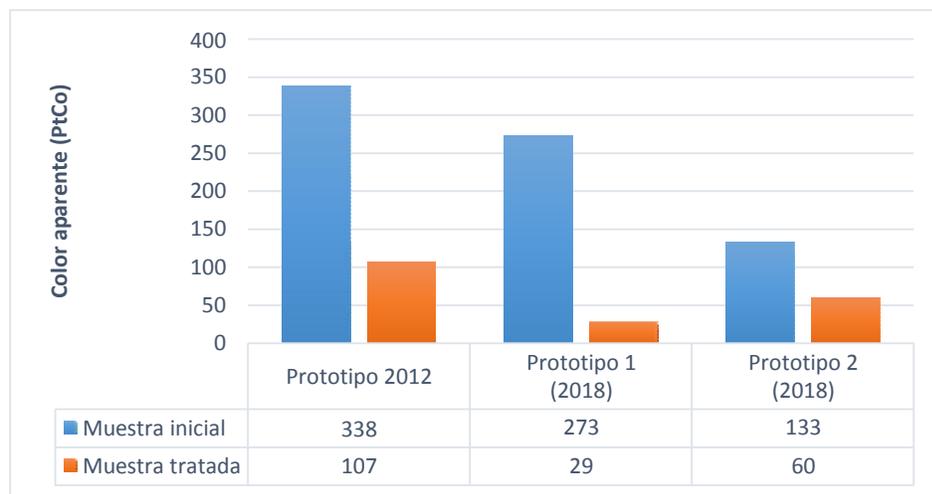


Gráfico 28. Comparación color aparente.

- Comparación salinidad

Realizando el análisis del Gráfico 29 se evidencia que el parámetro de salinidad para el prototipo del año 2012, es alta en comparación con los prototipos del presente año, esto debido a que se presenta un aumento, lo cual puede llegar a generar un marchitamiento en las plantas o afectar el crecimiento de las mismas, en este caso tanto prototipo 1 y 2 son más eficientes, ya que no hay variabilidad en este parámetro.

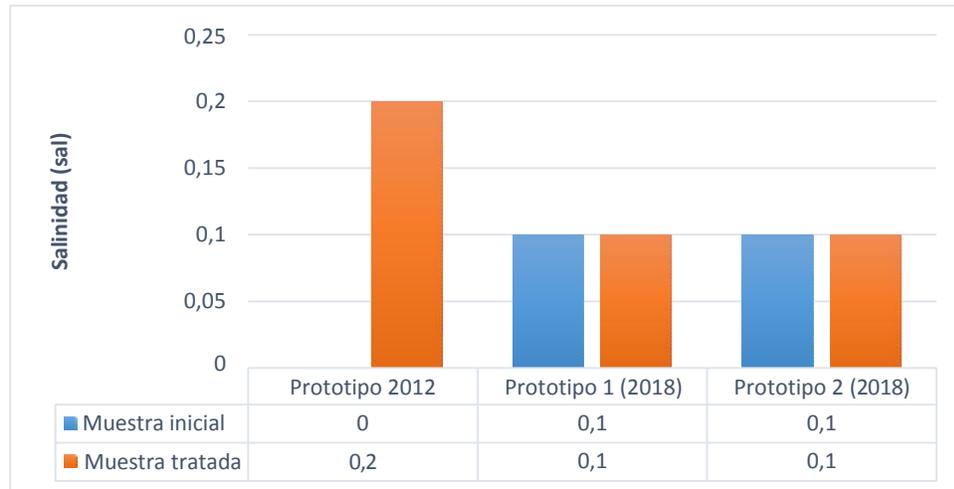


Gráfico 29. Comparación salinidad.

- Comparación Oxígeno disuelto



Gráfico 30. Comparación oxígeno disuelto.

Para el parámetro de oxígeno disuelto se obtuvo un aumento del 1.3 % del modelo realizado en el año 2012 donde el incremento de este valor “garantiza la respiración de microorganismos aeróbicos como otras formas de vida e igualmente reducen los malos olores” (Digesa, 2008) que se pueden generar en el sistema. Se denota también un aumento para el prototipo 1 (2018) del 16.67 % y una reducción en el prototipo 2 (2018) del 12.5 %; se concluye que el modelo con mejores resultados para este parámetro fue el prototipo 1 con un aumento mayor que los demás y así garantizando cumplir con el fin que se quiere generar al sistema, sin embargo este modelo tuvo una reducción mayor pero los valores aportados son

muy pequeños para el uso que se quiere dar, donde el prototipo 2 tiene condiciones más favorables para cumplir con lo estipulado según la Legislación de la República de Honduras que estipula valores mayor a 3 ml/l para uso en riego.

Como se menciona en el capítulo 3.5 (Análisis de resultados), para la obtención de este valor existe un grado de error por parte de los equipos dados por la Universidad Católica de Colombia siendo esto un factor que no garantiza la eficiencia en los resultados tomados.

- Comparación porcentaje de oxígeno.

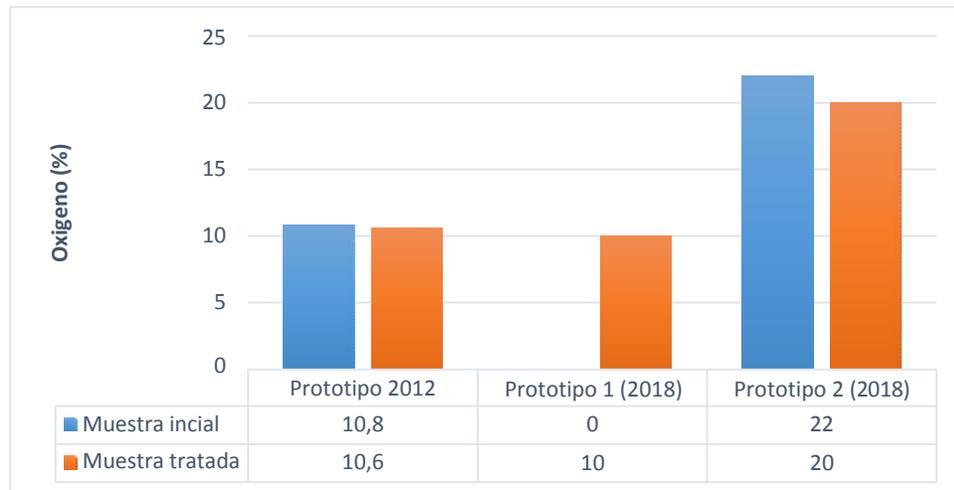


Gráfico 31. Comparación porcentaje de oxígeno.

El modelo realizado en el año 2012 denota una reducción del 1.85% y para los prototipos realizados en el año 2018 se muestra para el modelo 1 un aumento del 10% y para el 2 una reducción del 9.09%, donde el prototipo 1 tiene resultados satisfactorios con respecto a los otros ya que para este parámetro se busca un aumento que garantice la respiración de microorganismos y reducción de malos olores. Como se menciona anteriormente este parámetro tiene cierto grado de error que no garantiza eficiencia en los resultados obtenidos.

- Comparación sólidos disueltos suspendidos (SDS)

El parámetro de sólidos disueltos suspendidos (SDS) se produce por el arrastre de materiales particulados que se encuentren en la presencia del líquido y la reducción del mismo garantiza eficiencia en el sistema, donde el prototipo 2012 tuvo un aumento 367.7 % siendo un porcentaje crítico que muestra que el sistema realizado no proporciono reducción de SDS, para el prototipo 1 (2018) denota una disminución del 20.39% y para el prototipo 2 (2018) un aumento del 92.93 %. Los resultados muestran que en el prototipo 1 se encuentran los resultados más óptimos siendo el único que muestra reducción en el parámetro tomado.

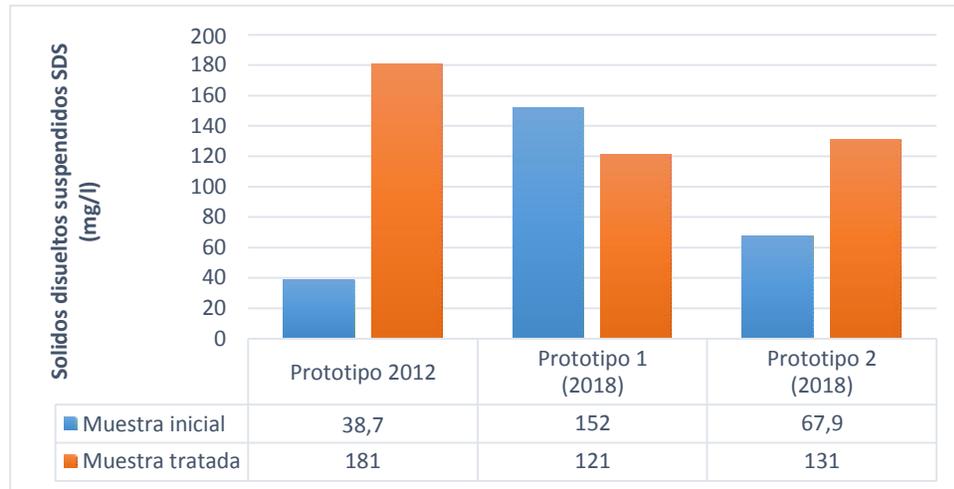


Gráfico 32. Comparación (SDS).

- Comparación temperatura.

Realizando la comparación de los tres prototipos, se evidencia que la variación entre temperatura no es tan significativo, ya que el parámetro de temperatura puede variar dependiendo de la temperatura ambiente y de la ubicación del prototipo, sin embargo se debe tener en cuenta que la temperatura afecta directamente parámetros como conductividad y resistividad.

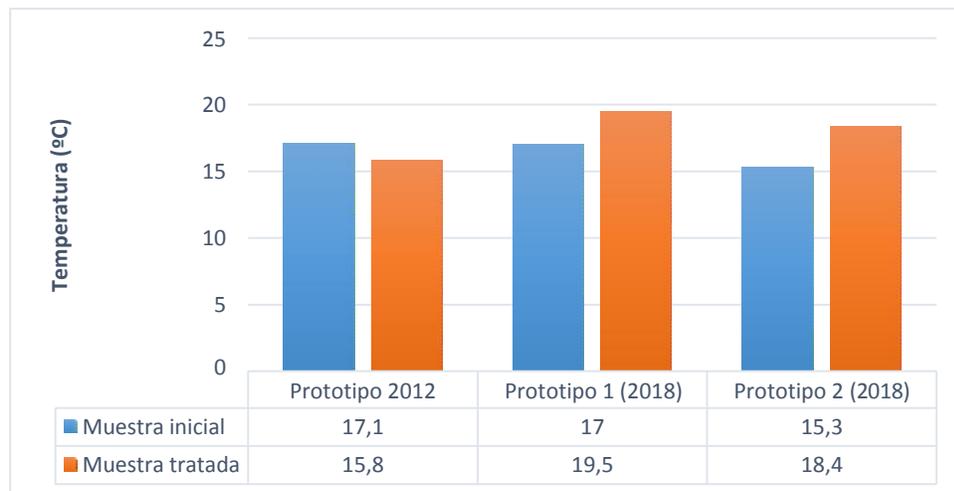


Gráfico 33. Comparación temperatura.

- Comparación Alcalinidad

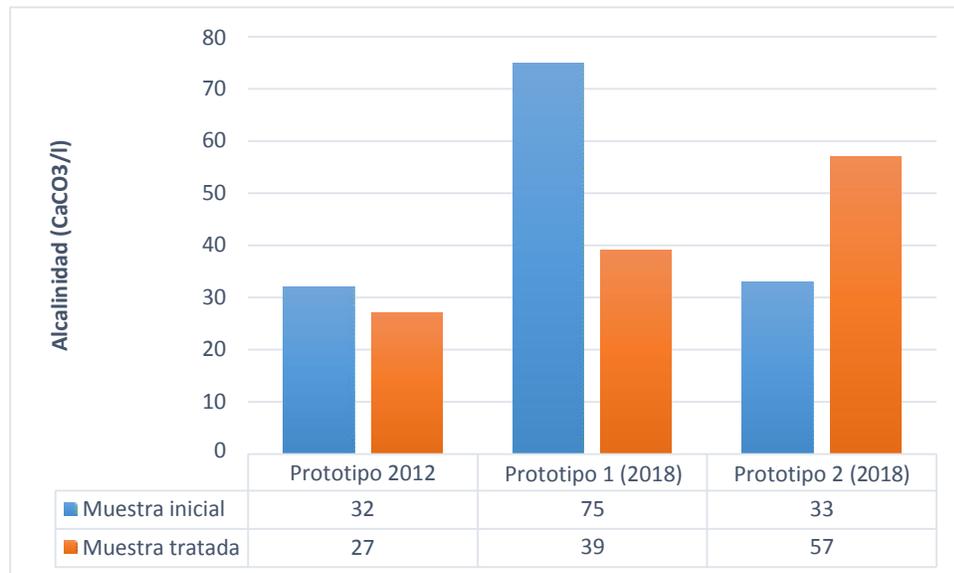


Gráfico 34. Comparación alcalinidad.

Se evidencia en el Gráfico 34, que en el prototipo del año 2012 tiene un porcentaje de eficiencia de 16%, mientras que el prototipo 1 del presente año tiene eficiencia del 48% en remoción de alcalinidad, lo cual demuestra que el prototipo 1 es más eficiente en la remoción, de este parámetro, también se evidencia que el prototipo 2 tuvo un aumento, lo cual generaría que se viera afectado el sustrato del cultivo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó el rediseño del prototipo de humedal artificial con recirculación lo cual garantizó eficiencia con respecto a los parámetros de calidad del agua realizados y también esto género que no se tuvieran malos olores en el sistema.

El modelo realizado tuvo como obtención resultados satisfactorios donde todos los parámetros obtenidos cumplen con las normatividad vigente, esto dependiendo de cada parámetro evaluado ya que solo la normatividad Colombiana (Resolución 1207 del 2014 Aguas Residuales Tratadas y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) no evalúa diferentes parámetros, es necesario consultar otras normas de calidad de agua para riego agrícola, en donde se encuentran las siguientes: British Columbia Water Quality Guidelines, la Norma Secundaria de Calidad de Aguas, Legislación de la Republica de Honduras , la WHO (World Health Organization) para uso de agua en riego y la Agencia de Protección Ambiental en los Estados Unidos.

El rediseño de prototipo de humedal artificial mejoro con respecto al realizado por estudiantes de la Universidad Católica de Colombia en el año 2012, donde se obtuvieron mejores resultados en los parámetros analizados: ph, turbiedad, alcalinidad, resistividad, conductividad, salinidad, sólidos disueltos suspendidos, oxígeno disuelto y porcentaje de oxígeno.

El modelo realizado por estudiantes de la Universidad Católica de Colombia en el año 2012, se encontró en condiciones de deterioro ya que no se siguió cuidando del sistema, donde tuvo que realizarse las mejoras para su debida implementación. Se recomienda hacer un plan de mantenimiento para los prototipos implementados.

La utilización de humedales artificiales como mecanismos de depuración de agua, son eficientes y ayudan a la disminución de los diferentes microorganismos presentes en el agua, esto con ayuda de las plantas subacuáticas presentes en el sustrato del humedal.

Se demostró por medio del análisis del parámetro nitritos, que el proceso de recirculación es eficiente en el prototipo.

Se recomienda que la Universidad Católica de Colombia cuente con más equipos para hacer toma de parámetros de calidad de agua.

Se recomienda para futuros modelos la implementación de diferentes plantas subacuáticas que puedan mejorar las condiciones del humedal realizado.

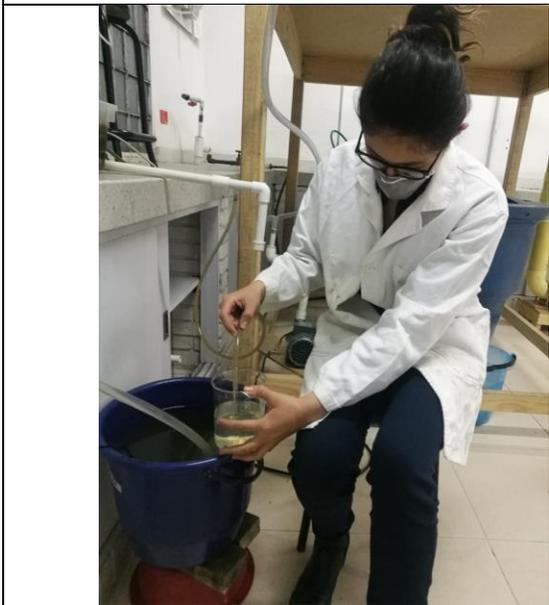
En el prototipo 2 se tuvieron resultados altos de solidos disueltos suspendidos debido a las partículas de antracita en el sistema. Por lo cual se recomienda que en la salida del sistema se implemente una malla que impida el paso de partículas.

Para fortalecer el análisis del sistema realizado, se recomienda la utilización de diferentes condiciones de agua inicial donde estos sean más críticos que los tomados en el rio Arzobispo.

La Universidad Católica de Colombia debería implementar diferentes prototipos para realizar el tratamiento y el reusó de agua residual, con el fin que los estudiantes evidencien de una manera didáctica como se genera el tratamiento de agua con sistemas no convencionales.

ANEXOS

- Fotos de realización de laboratorios.







PERMACHEM® REAGENTS
NitriVer® 3
 Nitrite Reagent
 for 10 mL sample
 Cat. 21071-69 PKJ/100
 Full pillows are marked as:
 NITRITE LR
 Store between 10° - 25° C
 MSDS No. M56555F10

HACH

IRITANT
 IRRITATING
 REIZEND
 IRRITEREND

Content: Pyrosulfate de Potassium
F: R: 36, Irritant pour les yeux.
S: 37/39, Porter des gants appropriés et un appareil de protection des yeux / du visage.

Enthal: Kaliumpyrosulfat
D: R: 36, Reizt die Augen.
S: 37/39, Bei der Arbeit geeignete Schutzhandschuhe und Schutzbrille / Gesichtsschutz tragen.

Contains: Potassium Pyrosulfate
GB: R: 36, Irritating to eyes.
S: 37/39, Wear suitable gloves and eye / face protection.
 P101+ED AR126A
 Seulement à usage du laboratoire
 For Laboratory Use Only

Bevat: Kaliumpyrosulfat
NL: R: 36, Irriterend voor de ogen.
S: 37/39, Draag geschikte handschoenen en een beschermingsmiddel voor de ogen / voor het gezicht.
 Nurfür Laborgebrauch
 Uitsluitend voor laboratoriumgebruik

HACH LANGE GmbH
 Willatstraße 11 • 40549 Düsseldorf • Germany
 Lot A/7068
 Exp. Mar-11

- Datos tomados en el desarrollo de los laboratorios.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

Resultados de Laboratorio

Laboratorio No. 1 Fecha: 18/07/2018 Cantidad de muestra: 500 ml

Descripción de ensayo:

Se realizó la toma de muestra de agua traída desde el río arzobispo, estas serán las condiciones iniciales del agua antes de introducirla en el prototipo del humedal artificial, se realizó el laboratorio midiendo los siguientes parámetros: pH, Turbiedad, Color, Salinidad, Conductividad, Resistividad, Sólidos Suspendidos, Temperatura, porcentaje de oxígeno, oxígeno y Alcalinidad

Resultados:

	Cantidad	Unidades		Cantidad	Unidades
pH	<u> 7,55 </u>		Conductividad:	<u> 285,00 </u>	µs/cm
Turbiedad	<u> 26,00 </u>	NTU	Resistividad	<u> 3,50 </u>	kΩ/cm
Color	<u> 273,00 </u>	Un PtCo	Sólidos Suspendidos	<u> 152,00 </u>	mg/l
Salinidad	<u> 0,10 </u>	Sal	Temperatura	<u> 17,00 </u>	°C
%O	<u> 0,00 </u>	%	Alcalinidad	<u> 75,00 </u>	CaCO ₃ /l
O	<u> 0,60 </u>	mg/l			

Observaciones:

Se desarrollaron todos los procedimientos de laboratorio sin ningún percance.



Resultados de Laboratorio

Laboratorio No. 2 Fecha: 23/07/2018 Cantidad de muestras: 500 ml

Descripción de ensayo:

Se realizó la toma de muestra después de un periodo de recirculación de 5 días
Se realizó el laboratorio midiendo los mismos parámetros de las condiciones iniciales: pH,
Turbiedad, Color, Salinidad, Conductividad, Resistividad, Sólidos Suspendidos, Temperatura,
porcentaje de oxígeno, oxígeno y Alcalinidad

Resultados:

	Cantidad	Unidades		Cantidad	Unidades
pH	<u> 7,73 </u>		Conductividad:	<u> 228,00 </u>	µs/cm
Turbiedad	<u> 2,00 </u>	NTU	Resistividad	<u> 4,39 </u>	kΩ/cm
Color	<u> 29,00 </u>	Un PtCo	Sólidos Suspendidos	<u> 121,00 </u>	mg/l
Salinidad	<u> 0,10 </u>	Sal	Temperatura	<u> 19,50 </u>	°C
%O	<u> 10,00 </u>	%	Alcalinidad	<u> 39,00 </u>	CaCO ₃ /l
O	<u> 0,70 </u>	mg/l			

Observaciones:

Se desarrollaron todos los procedimientos de laboratorio sin ningún percance.



Resultados de Laboratorio

Laboratorio No. 3 Fecha: 8/08/2018 Cantidad de muestras: 500 ml

Descripción de ensayo:

Se realizó la toma de muestra después de un periodo de recirculación de 21 días contando desde la muestra inicial. Se realizó el laboratorio midiendo los mismos parámetros de las condiciones iniciales: pH, Turbiedad, Color, Salinidad, Conductividad, Resistividad, Sólidos Suspendedos, Temperatura, porcentaje de oxígeno, oxígeno y Alcalinidad

Resultados:

	Cantidad	Unidades		Cantidad	Unidades
pH	<u>6,93</u>		Conductividad:	<u>180,40</u>	µs/cm
Turbiedad	<u>4,00</u>	NTU	Resistividad	<u>5,46</u>	kΩ/cm
Color	<u>27,00</u>	Un PtCo	Sólidos Suspendedos	<u>98,40</u>	mg/l
Salinidad	<u>0,10</u>	Sal	Temperatura	<u>17,20</u>	°C
%O	<u>0,00</u>	%	Alcalinidad	<u>38,00</u>	CaCO ₃ /l
O	<u>0,00</u>	mg/l			

Observaciones:

Se desarrollaron todos los procedimientos de laboratorio sin ningún percance.



Resultados de Laboratorio

Laboratorio No. 4 Fecha: 17/08/2018 Cantidad de muestras: 500 ml

Descripción de ensayo:

Se realizó la toma de muestra de agua traída desde el río arzobispo, se miden las condiciones iniciales del agua antes de introducirla en el prototipo del humedal artificial, el cual está adaptado con un lecho filtrante de grava y antracita, se realizó el laboratorio midiendo los siguientes parámetros: pH, Turbiedad, Color, Salinidad, Conductividad, Resistividad, Sólidos Suspendidos, Temperatura, porcentaje de oxígeno, oxígeno y Alcalinidad

Resultados:

	Cantidad	Unidades		Cantidad	Unidades
pH	<u>7,06</u>		Conductividad:	<u>127,70</u>	µs/cm
Turbiedad	<u>10,00</u>	NTU	Resistividad	<u>7,83</u>	kΩ/cm
Color	<u>133,00</u>	Un PtCo	Sólidos Suspendidos	<u>67,90</u>	mg/l
Salinidad	<u>0,10</u>	Sal	Temperatura	<u>15,30</u>	°C
%O	<u>22,00</u>	%	Alcalinidad	<u>33,00</u>	CaCO ₃ /l
O	<u>1,60</u>	mg/l			

Observaciones:

Se desarrollaron todos los procedimientos de laboratorio sin ningún percance.



Resultados de Laboratorio

Laboratorio No. 5 Fecha: 22/08/2018 Cantidad de muestra: 500 ml

Descripción de ensayo:

Se realizó la toma de muestra después de un periodo de recirculación de 5 días
Se realizó el laboratorio midiendo los mismos parámetros de las condiciones iniciales: pH,
Turbiedad, Color, Salinidad, Conductividad, Resistividad, Sólidos Suspendidos, Temperatura,
porcentaje de oxígeno, oxígeno y Alcalinidad

Resultados:

	Cantidad	Unidades		Cantidad	Unidades
pH	<u>6,93</u>		Conductividad:	<u>247,00</u>	µs/cm
Turbiedad	<u>5,00</u>	NTU	Resistividad	<u>4,07</u>	kΩ/cm
Color	<u>60,00</u>	Un PtCo	Sólidos Suspendidos	<u>131,00</u>	mg/l
Salinidad	<u>0,10</u>	Sal	Temperatura	<u>18,40</u>	°C
%O	<u>20,00</u>	%	Alcalinidad	<u>57,00</u>	CaCO ₃ /l
O	<u>1,40</u>	mg/l			

Observaciones:

Se desarrollaron todos los procedimientos de laboratorio sin ningún percance.



Resultados de Laboratorio

Laboratorio No. 6 Fecha: 7/09/2018 Cantidad de muestra: 500 ml

Descripción de ensayo:

Se realizó la toma de muestra después de un periodo de recirculación de 21 días contando desde la muestra inicial. Se realizó el laboratorio midiendo los mismos parámetros de las condiciones iniciales: pH, Turbiedad, Color, Salinidad, Conductividad, Resistividad, Sólidos Suspendedos, Temperatura, porcentaje de oxígeno, oxígeno y Alcalinidad

Resultados:

	Cantidad	Unidades		Cantidad	Unidades
pH	<u>7,17</u>		Conductividad:	<u>325,00</u>	µs/cm
Turbiedad	<u>0,99</u>	NTU	Resistividad	<u>3,07</u>	kΩ/cm
Color	<u>31,00</u>	Un PtCo	Sólidos Suspendedos	<u>173,00</u>	mg/l
Salinidad	<u>0,20</u>	Sal	Temperatura	<u>17,10</u>	°C
%O	<u>34,00</u>	%	Alcalinidad	<u>33,00</u>	CaCO ₃ /l
O	<u>2,40</u>	mg/l			

Observaciones:

Se desarrollaron todos los procedimientos de laboratorio sin ningún percance.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, A. *et al.* (2016) ‘Remoción de contaminantes presentes en aguas superficiales empleando carbón activado generado a partir de materiales de desecho agroindustrial’, 2(July), pp. 20–22.
- Ambiente, M. D. E. (2004) ‘Ministerio de ambiente y desarrollo’, pp. 2003–2004.
- Arend, K. K. (1999) *Macrohabitat identification, Aquatic Habitat Assessment*.
- Calidad microbiológica (2018) *Análisis Microbiológico Coliformes*. Available at: <http://www.calidadmicrobiologica.com.co/microbiologia/coliformes-totales> (Accessed: 24 April 2018).
- Charry, M. and Achipiz, N. (2012) *Modelo didáctico para simular funcionamiento en un humedal*. Universidad Católica de Colombia.
- Definición.DE (2018) *Reusar*. Available at: <https://definicion.de/reusar/> (Accessed: 24 March 2018).
- Diccionario de la lengua español (2017) *DLE: agua - Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario*. Available at: <http://dle.rae.es/?id=1BKpQj3> (Accessed: 17 March 2018).
- Digesa (2008) ‘Estándares De Calidad Ambiental De Agua’, pp. 1–134. Available at: http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO DE USO 3.pdf.
- Escobar, J. (2012) *Plantas acuáticas en los Humedales de Bogotá*. Available at: <http://humedalesbogota.com/2012/08/01/plantas-acuaticas-en-los-humedales-de-bogota/>.
- Goyenola, G. (2007) ‘Transparencia, color y turbidez’, *Guía para la utilización de valijas viajeras*.
- Hernández, F., Molinos, M. and Sala, R. (2012) ‘Estado actual y evolución del saneamiento y la depuración de aguas residuales en el contexto nacional e internacional Current status and development of sanitation and wastewater treatment in the national and international context’, 32(1), pp. 69–89. doi: 10.5209/rev_AGUC.2012.v32.n1.39309.
- Higuera, S. (2016) ‘Casanare , Colombia Biofilter with rice husk and vetiver grass (*Chrysopogon Zizanioides*) for the treatment of effluent from the WWTP of INPEC - Yopal , B iofiltro con cascarilla de arroz y pasto vetiver’, pp. 107–119.
- Instruments, H. (2016) ‘Turbiedad en agua potable’, p. 93414.
- INTAGRI S.C (2017) *La Alcalinidad del Agua y su Efecto en los Sustratos*. Available at: <https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/la-alcalinidad-del-agua-y-su-efecto-en-los-sustratos>.
- Jaramillo-Gallego, M. L., Agudelo-Cadavid, R. M. and Peñuela-Mesa, G. A. (2016) ‘Optimización del tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. (Spanish)’, *Optimization of wastewater treatment from a flower crops using a horizontal sub-surface flow constructed wetland. (English)*, 34(1), pp. 20–29. doi: 10.17533/udea.rfnsp.v34n1a03.
- KewScience (2017) ‘“*Juncus*”’, *Royal Botanic Gardens, Kew: World Checklist of Selected Plant Families*. Available at: http://apps.kew.org/wcsp/namedetail.do?accepted_id=314232&repSynonym_id=-9998&name_id=314232&status=true (Accessed: 17 March 2018).
- Llagas Chafloque, W. and Guadalupe Gómez, E. (2006) ‘Diseño de Humedales Artificiales para el Tratamiento de aguas Residuales en la UNMSM’, *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMG*, 15(17), pp. 85–96.
- Manga, J. and Logreira, N. (2001) ‘Reuso De Aguas Residuales: Un Recurso Hidrico Disponible’, *Revista Científica*

Ingeniería y Desarrollo, pp. 12–2. doi: No 9.

Miller, D. (2006) 'Filtración con antracita y arena caso práctico en el Reino Unido.pdf'.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2012) 'Diagnostico nacional de salud ambiental.', <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambienta%20compilado.pdf>, p. 368.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014) 'RESOLUCION-1207-DE-2014-REUSO.pdf'.

Ministerio de la Protección Social and Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2017) *Resolución Numero 2115, Minambiente*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Molinos-Senante, M., Hernández Sancho, F. and Sala Garrido, R. (2012) 'Estado actual y evolución del saneamiento y la depuración de aguas residuales en el contexto nacional e internacional', *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 32(1), pp. 69–89. doi: 10.5209/rev_AGUC.2012.v32.n1.39309.

Monge Redondo, M. A. (2017) *Interpretación de un análisis de agua para riego*. Available at: <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/interpretacion-analisis-agua-riego> (Accessed: 20 August 2018).

Ortiz, C. E. E. (2014) 'Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes', *Escuela Colombiana de Ingeniería*, pp. 1–81.

Peña, C. and Guzmán, A. (2012) 'TRATAMIENTO DE AGUAS DE ESCORRENTÍA MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES: ESTADO DEL ARTE/A RUN-OFF TREATMENT BY MADE WETLANDS - A REVIEW', 22, pp. 39–61.

RedAgrícola (2002) *CONDUCTIVIDAD ELECTRICA Y SALINIDAD - Redagrícola*. Available at: <http://www.redagricola.com/cl/conductividad-electrica-salinidad/> (Accessed: 3 October 2018).

Rodríguez, J., García, C. and García, J. (2016) 'Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia Waterborne diseases and basic sanitation in Colombia', *Rev. Salud Pública*, 18(5), pp. 738–745. doi: 10.15446/rsap.v18n5.54869.

Romero-Aguilar, M. *et al.* (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), pp. 157–167.

Sancha, A. M. *et al.* (2005) 'Criterios De Calidad De Aguas O Efluentes Tratados Para Uso En Riego', *División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile*, p. 254.

Santana Díaz, D. (2007) *ESTUDIO DEL USO DE PLANTAS ACUATICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*.

Secretaría General de Medio Ambiente España (2002) 'Plan Estratégico Español para la Conservación y el Uso Racional de los Humedales', pp. 1–95.

Siegua (2018) *Humedales artificiales (Filtros Verdes) en Colombia*. Available at: <http://siegua.com/2017/06/01/humedales-artificiales/> (Accessed: 1 April 2018).

Smart-fertilizer (2017) *La conductividad Eléctrica del Agua*. Available at: <https://www.smart-fertilizer.com/es/articulos/electrical-conductivity>.

Twenergy (2014) *El tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Available at: <https://twenergy.com/co/a/el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-colombia-1142> (Accessed: 17 March 2018).

upcommons (1999) 'Componentes agua', (1996), pp. 1998–2000.

Venegas, A. (2018) *Solamente 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales*. Available at: <https://www.larepublica.co/infraestructura/solamente-482-de-los-municipios-cuentan-con-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-2611155>.

VENTRAT S.A (2017) *Artículo | Eliminación de materia en suspensión*, *ventrat.com*. Available at: http://ventrat.com/pag/universia/materia_suspension.html (Accessed: 17 March 2018).

Vera, I. *et al.* (2016) 'Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: Reflexiones', *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(3), pp. 19–35.

Vidal, G. (2018) *Humedales de tratamiento : alternativa de saneamiento de aguas*.