

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE COLIFORMES  
TOTALES Y FECALIS EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS UTILIZANDO  
UN SISTEMA DE TRATAMIENTO TIPO HUMEDAL CONSTRUIDO EN UNA  
ZONA RURAL DEL MUNICIPIO DE SOTARÁ, CAUCA**



**GINNA ALEXANDRA BURBANO MEJIA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN**

**DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA**

**POPAYÁN**

**2019**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE COLIFORMES  
TOTALES Y FECALES EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS UTILIZANDO  
UN SISTEMA DE TRATAMIENTO TIPO HUMEDAL CONSTRUIDO EN UNA  
ZONA RURAL DEL MUNICIPIO DE SOTARÁ, CAUCA**

**Trabajo de grado como requisito para obtener el título de Bióloga**

**GINNA ALEXANDRA BURBANO MEJIA**

**Director**

**Mg. Darwin Hoyos Martínez**

**Departamento de Ingeniería Ambiental**

**Codirectora**

**Mg. Clara Inés Giraldo Aristizabal**

**Departamento de Biología**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN**

**DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA**

**POPAYÁN**

**2019**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---



Director: \_\_\_\_\_  
Mg. Darwin Hoyos Martínez

Codirectora: \_\_\_\_\_  
Mg. Clara Inés Giraldo

Jurado: \_\_\_\_\_  
Mg. Sandra Carlina Rivas

Jurado: \_\_\_\_\_  
Mg. Mónica Alexandra Luna

Fecha y lugar de sustentación: Popayán, agosto 08 de 2019

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme la oportunidad de culminar esta etapa en mi vida, a Concepción Gómez, Elizabeth Mejía y Juan Carlos Muñoz que siempre apoyan mis proyectos, a mi adorada hermana Natalia Muñoz Mejía, a Inés Gómez por enseñarme sobre la nobleza y dulzura.

A Jaime Mejía y Guillermina Capote por sus consejos y apoyo en mi formación personal y profesional. A Angélica Mejía por su apoyo incondicional. A mis primos Carolina Mejía y Camilo Mejía, a mi tía Yolanda Mejía.

A mis directores Darwin Hoyos y Clara Giraldo, por su orientación. A mis profesores por dirigir y apoyar mi formación académica. A Camilo Andrade por su mano amiga. A Javier Rosero por su amor y apoyo en el inicio y culminación de este proceso, a mis amigos por los gratos momentos y enseñanzas.

A la organización Alianza por el Agua, Acueducto Veredal Aires del Campo y Universidad del Cauca por su compromiso con la gestión del recurso hídrico.

## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	8
1. PROBLEMÁTICA .....	9
2. JUSTIFICACIÓN .....	11
3. OBJETIVOS .....	13
4. MARCO TEÓRICO.....	14
4.1. AGUAS RESIDUALES.....	14
4.1.1. Clasificación de aguas residuales. ....	14
4.2. MICROORGANISMOS EN AGUAS RESIDUALES.....	15
4.2.1. Bacterias Enterobacteriaceae.. ....	15
4.2.2. Coliformes totales. ....	15
4.2.3. Coliformes fecales.....	16
4.2.4. Transmisión de enfermedades al ser humano por enterobacterias.....	16
4.3. HUMEDALES CONSTRUIDOS Y SU IMPORTANCIA BIOLÓGICA....	17
4.3.1. Dinámica.. ....	17
4.3.2. Función de los microorganismos. ....	17
4.3.3. Función de la vegetación. ....	18
4.3.4. Cartucho blanco ( <i>Zantedeschia aethiopica</i> ). ....	18
4.3.5. Clasificación de los humedales construidos.....	18
4.3.6. Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal.....	19
4.3.7. Tratamiento primario: tanque sedimentador.....	19

5. ANTECEDENTES .....	21
6. METODOLOGÍA.....	24
6.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	24
6.2. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO .....	25
6.3. CUANTIFICACIÓN DE COLIFORMES .....	26
6.4. INCIDENCIA DEL CARTUCHO BLANCO.....	27
6.4. ANÁLISIS DE DATOS.....	27
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
7.1. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO .....	28
7.1.1. Caracterización general.....	30
7.1.2. Dimensiones.....	30
7.1.3. Granulometría.....	30
7.1.4. Macrófita.....	30
7.1.5. Diagnóstico.....	30
7.2. CUANTIFICACIÓN DE COLIFORMES .....	32
7.2.1. Condiciones físicas y efectos en los coliformes.....	33
7.2.1.1. Relación con el Oxígeno disuelto .....	34
7.2.1.2. Relación con los Sólidos suspendidos.....	35
7.2.1.3 Relación con la Demanda Biológica de oxígeno.....	35
7.2.2. Remociones obtenidas.....	38
7.2.2.1 Importancia de las remociones obtenidas.....	43
7.3. INCIDENCIA DEL CARTUCHO BLANCO ( <i>Zantedechia aethiopica</i> ).....	45
8. CONCLUSIONES .....	47

9 RECOMENDACIONES .....48  
BIBLIOGRAFÍA.....49

## RESUMEN

Los vertimientos de aguas residuales a fuentes hídricas generan contaminación del agua alterando su composición fisicoquímica y biológica, además promueve enfermedades debido a la presencia de microorganismos patógenos como especies pertenecientes a la familia Enterobacteriaceae que están asociadas a la materia orgánica y a heces fecales. El presente estudio se llevó a cabo en el Hostal El Molino “Francisco José de Caldas”, ubicado en la zona rural de Paispamba, Municipio de Sotará, donde se encuentra un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas tipo humedal construido plantado con cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*). En este sistema se realizó un diagnóstico del funcionamiento y se evaluó la eficiencia de remoción de bacterias coliformes totales y fecales. En cuanto al diagnóstico realizado al sistema de tratamiento, este cumplió con los requerimientos para su adecuado funcionamiento, sin embargo se indican aspectos a considerar para lograr un mejor desempeño del sistema. Los resultados microbiológicos evidencian una eficiencia de remoción de coliformes totales del 97.3 (1.77 log NMP/mL) y coliformes fecales del 77% (1.66 log NMP/mL) así como una eliminación de sólidos suspendidos totales (SST) del 98.6 % siendo esta variable importante ya que promueve la proliferación de microorganismos como las bacterias en estudio. Finalmente el sistema de tratamiento favorece de manera significativa ( $p < 0.05$ ) la remoción de bacterias coliformes totales y fecales en las estaciones muestras (afluente y efluente del humedal), así como el desarrollo morfológico de la macrófita asociada al humedal *Zantedeschia aethiopica*, la cual brindó un aspecto llamativo para la comunidad.

**Palabras clave:** Enterobacterias, bacterias patógenas, *Zantedeschia aethiopica*, Humedal construido, Aguas residuales domésticas.

## 1. PROBLEMÁTICA

En la actualidad de los 7300 millones de habitantes de la población mundial, 3600 millones de personas viven en áreas con riesgo de sufrir escasez de agua al menos un mes al año, esta población podría llegar a alcanzar entre 4800 y 5700 millones en 2050. Desde los años 90 la contaminación del agua ha aumentado en los ríos de América Latina, África y Asia, se estima entonces que la calidad del agua se deteriore aún más en las próximas décadas, lo que aumentará las amenazas para la salud humana, el medio ambiente y el desarrollo sostenible (WWAP, 2018).

Un factor clave que genera contaminación en los cuerpos hídricos son las aguas residuales que carecen de un adecuado tratamiento y sistema de recolección; sin embargo, países con un alto desarrollo tratan cerca del 70 % de las aguas residuales municipales e industriales que generan; este promedio cae a un 38 % en países en vía de desarrollo, un 28 % en países de ingresos medios-bajos y en países de ingresos bajos solo el 8 % recibe algún tratamiento. Esas apreciaciones sustentan la aproximación que en el mundo más del 80 % de las aguas residuales son vertidas sin tratamiento alguno (WWAP, 2017).

El agua residual de origen doméstico vertida directamente a los cuerpos de agua aporta altos porcentajes de materia orgánica y microorganismos; con respecto a esto, los microorganismos patógenos presentes en el agua son un factor que a nivel mundial promueve el desarrollo de enfermedades como cólera y resistencia antimicrobiana; es por esto, que el control de la calidad microbiológica del agua tanto de consumo como de vertimientos es de gran interés, porque además implica el deterioro de ecosistemas acuáticos al alterar las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas (Torres Martínez, 2013).

En Colombia se generan problemas de salubridad y de calidad del agua en varias regiones, debido a la inadecuada o inexistente recolección, tratamiento y disposición de los vertimientos generados por actividades como la agricultura, industria, y aguas residuales de origen doméstico, al respecto 989 localidades

colombianas en áreas con menos de 30000 habitantes, el 78 % no tiene tratamiento alguno de aguas residuales (Lizarazo & Orjuela, 2013). A su vez muchas de las comunidades rurales sufren limitaciones para el desarrollo de infraestructuras sofisticadas y oportunidades de ingresos para el adecuado tratamiento de los desechos domésticos.

No ajeno a lo anterior, en el departamento del Cauca; el municipio de Sotará con una población de 16918 habitantes aproximadamente (INCA, 2015), solo un 3 % pertenecen a zonas urbanas, siendo así, la zona rural una población significativa donde sus comunidades utilizan letrinas para dar un fin a los desechos biológicos o los canalizan directamente a los cuerpos de agua que forman parte de las microcuencas que suministra el agua destinada para el consumo humano y producción agropecuaria (Alcaldía de Sotará-Cauca, 2015).

Se comprende entonces, que las aguas vertidas en los cursos naturales generan grandes alteraciones ambientales y sanitarias, por eso la necesidad de gestionar y monitorear el tratamiento de las aguas residuales; con este proyecto se busca responder la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es la eficiencia de remoción de coliformes totales y fecales en aguas residuales domésticas utilizando un sistema de tratamiento tipo humedal construido plantado con cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*) en zona rural del municipio de Sotará, Cauca?

## 2. JUSTIFICACIÓN

En el 2015, el informe nacional de calidad del agua para consumo humano consolidado del departamento del Cauca presentó para comunidades rurales un porcentaje de aceptabilidad microbiológico promedio del 57.2 % (INCA, 2015) indicando que buena parte de las muestras de agua contenían residuos de materia fecal; esto muestra la importancia de implementar acciones encaminadas al tratamiento de las aguas residuales antes de ser depositadas en las fuentes receptoras y mejorar la calidad del agua en zonas rurales en el departamento del Cauca.

Un diagnóstico realizado en la zona rural del municipio de Sotará por Londoño (2017), muestra que las aguas residuales no cuentan con una adecuada disposición final, vertiendo dichos residuos a tan solo un kilómetro aguas arriba de la bocatoma del acueducto Aires del Campo - Timbío, exponiendo a esta comunidad a adquirir enfermedades de origen hídrico. Para disminuir el riesgo se han implementado sistemas de tratamiento de aguas residuales que buscan mejorar la calidad del agua que se vierte en los cuerpos receptores. Sin embargo, dichos sistemas no han sido evaluados para conocer la eficiencia de remoción de materia orgánica y microorganismos potencialmente patógenos, entre estas las bacterias coliformes totales y fecales que son de importancia clínica en el desarrollo de enfermedades gastrointestinales (Pérez *et al.*, 2013).

Como alternativa para mitigar la situación problemática que presentan estas comunidades rurales, en el presente trabajo de investigación se evaluó el funcionamiento de un sistema de tratamiento con humedales construidos en la eficiencia de remoción de los mencionados grupos de bacterias que representan un riesgo sanitario para la población. Además se busca implementar el uso de la planta *Zantedeschia aethiopica* (Cartucho blanco) en el sistema de tratamiento, que es una especie que crece con facilidad en sitios donde se disponen inadecuadamente las

aguas residuales del sector y además es una planta ornamental que genera el valor agregado de un aspecto estético y llamativo al humedal.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. GENERAL**

Evaluar la eficiencia de remoción de coliformes totales y fecales en aguas residuales domésticas rurales, utilizando un sistema de tratamiento tipo humedal construido, plantado con cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*).

#### **3.2 ESPECÍFICOS**

- Diagnosticar las condiciones de funcionamiento del sistema de tratamiento tipo humedal construido, plantado con cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*) para mejorar la remoción de bacterias.
- Cuantificar el contenido de bacterias indicadoras de contaminación como muestra de depuración en el sistema de tratamiento tipo humedal construido.
- Determinar la incidencia del cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*) como alternativa para la remoción de las bacterias de estudio en un sistema de tratamiento tipo humedal construido.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. AGUAS RESIDUALES.

La mayoría de las actividades humanas que utilizan el recurso hídrico generan aguas residuales (WWAP, 2017). Las aguas residuales se originan en los hogares, instituciones, oficinas e industrias, y pueden ser diluidas con agua de lluvia, aguas subterráneas y aguas superficiales (López *et al.*, 2017). A su vez las aguas residuales dependiendo de su origen contienen grasas, materia orgánica, detergentes, residuos industriales y sustancias tóxicas (Revilla, 2017).

**4.1.1. Clasificación de aguas residuales.** Según Pulido *et al.*, (2014) las aguas residuales se clasifican según su fuente de origen:

**Aguas residuales industriales:** son aquellas que proceden de cualquier actividad o negocio cuyo proceso de producción, transformación, manipulación utiliza el agua. Estas son más contaminadas que las aguas residuales urbanas, además con una contaminación mucho más difícil de eliminar (Muñoz, 2008).

**Aguas residuales urbanas:** se componen fundamentalmente de aguas residuales domésticas, que tienen una contaminación predominantemente orgánica. Ello hace que las aguas residuales urbanas sean parcialmente biodegradables (Vilanova & Pedret, 2017).

**Aguas residuales domésticas:** son las procedentes de los hogares, así como las de instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios. Corresponden a: 1) Descargas de los retretes y servicios sanitarios. 2) Descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial (Resolución 0631/2015 Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible). Las viviendas generan residuos líquidos y sólidos que cuentan con

pocos nutrientes entre ellos los que provienen de duchas, lavadoras y cocinas, otros son residuos sólidos biodegradables y heces diluidas con orina que contiene varios nutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio (Otterpohl *et al.*, 2016).

## **4.2. MICROORGANISMOS EN AGUAS RESIDUALES**

Si bien el incremento de bacterias, parásitos, virus y hongos en el agua está asociado generalmente a efectos directos e indirectos del crecimiento industrial y poblacional, es la inadecuada disposición final y tratamiento de los residuos generados los que promueven las diferentes enfermedades a las comunidades, pues esto lleva a incrementar la cantidad de materia orgánica en los cuerpos de agua y así dar paso a la proliferación de microorganismos patógenos (Ríos *et al.*, 2017).

**4.2.1. Bacterias Enterobacteriaceae.** La familia de las enterobacterias incluye múltiples géneros y especies de bacilos gramnegativos, algunos de los cuales son patógenos para el ser humano. Tienen una amplia distribución: en el agua, el suelo, las plantas y la flora intestinal de muchos animales y del ser humano (Fariñas & Martínez, 2013). Es la familia con el grupo más grande y heterogéneo de bacilos gramnegativos con importancia clínica (Dávila, 2017). Aunque se trata de una familia compleja, la mayoría de las infecciones en seres humanos están causadas por relativamente pocas especies (Guerrero *et al.*, 2014).

**4.2.2. Coliformes totales.** Son enterobacterias gram negativas en forma de bastoncillos, no esporulados, aerobios y anaerobios facultativos que fermentan la lactosa a una temperatura de 35-37°C produciendo ácido, gas y aldehído en un periodo de 24-48 horas (Ramírez, 2016). Parte de los microorganismos que conforman el grupo de coliformes totales son: *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwardsiella* y *Citrobacter*, los cuales viven como saprófitos independientes o como bacterias intestinales (Branda *et al.*, 2016).

**4.2.3. Coliformes fecales.** Este grupo de microorganismos son considerados termotolerantes, puesto que soportan temperaturas hasta de 45°C, son indol positivo, e indicadores de calidad ya que son de origen fecal tanto de ser humano como animal, presentes en la flora intestinal (Magallanes, 2018). El representante principal de este grupo es *Escherichia coli*, estas bacterias se identifican con el resto de los coliformes en cuanto a su resistencia al medio ambiente, agentes químicos y factores que favorecen o impiden su desarrollo (Ramírez, 2016). Es la especie más encontrada en el tracto gastrointestinal humano y también el patógeno más frecuentemente hallado de la familia Enterobacteriaceae (Noguera, 2014).

**4.2.4 Transmisión de enfermedades al ser humano por enterobacterias.** Uno de los aspectos más importantes que tiene repercusiones en la salud, es el consumo de aguas potencialmente contaminadas, puesto que es una de las causas más frecuentes en cuanto afecciones gastrointestinales en humanos (Colina & Negrín, 2015). El agua contaminada puede transmitir enfermedades como la diarrea, cólera y fiebre tifoidea. Las dos causas más frecuentes de diarrea moderada a grave en países de ingresos bajos son los rotavirus y *Escherichia coli* (OMS, 2017).

Las enfermedades diarreicas son una causa principal de mortalidad y morbilidad en la niñez en el mundo, y por lo general son consecuencia de la exposición a alimentos o agua contaminados.

Cabe mencionar que consumir agua no tratada es un factor de riesgo para contraer infecciones por *Helicobacter pylori*, esta bacteria patógena está asociada al desarrollo de cáncer gástrico (Acosta *et al.*, 2015), además es más resistente al cloro que las bacterias coliformes comunes y permanece viable en el agua varios días, lo que favorece su transmisión (Monsalve, 2017). Es claro que la ruta fecal-oral es bastante plausible para la transmisión de *Helicobacter pylori*, en la que el agua juega un rol importante como vector.

### **4.3. HUMEDALES CONSTRUIDOS Y SU IMPORTANCIA BIOLÓGICA**

Los humedales artificiales o construidos son sistemas de fitodepuración de aguas residuales, este sistema consiste en el desarrollo de un cultivo generalmente de macrófitas enraizadas sobre un lecho impermeabilizado. La acción de la vegetación asociada hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente (Delgadillo *et al.*, 2010).

**4.3.1. Dinámica.** Los procesos y mecanismos que son necesarios para el tratamiento del agua residual que ingresa a los humedales incluye: sedimentación, filtración, adsorción, degradación microbiológica, así como, captación de nutrientes por parte de la vegetación. Durante el paso del agua residual a través del medio poroso contenido por el humedal, se produce un contacto con zonas aerobias y anaerobias (Mena, 2014). En este proceso los microorganismos realizan una acción reguladora donde se ven involucrados bacterias, levaduras, hongos, y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes. La actividad microbiana, transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles (Guerra *et al.*, 2018).

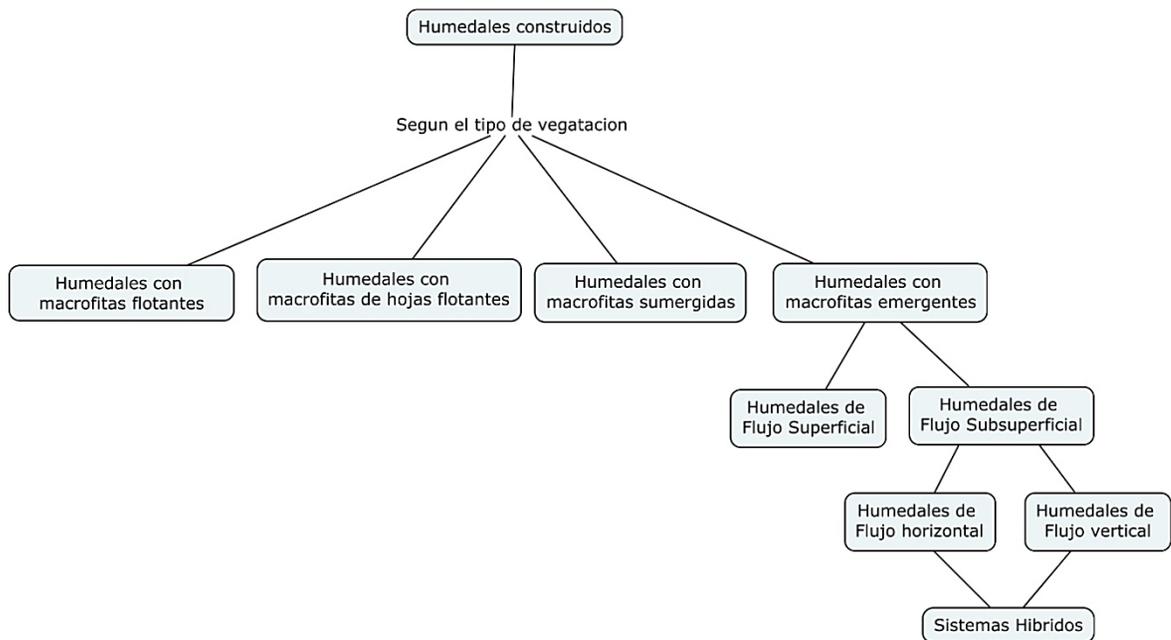
**4.3.2. Función de los microorganismos.** Los procesos microbiológicos por los cuales los microorganismos depuran el agua residual en el humedal se debe a que estos utilizan los nutrientes y el carbono tanto como fuente de energía como para la formación de nueva biomasa microbiana (Sarango, 2016). El tratamiento del agua residual con humedales artificiales está basado en la acción de los microorganismos que viven en la zona más próxima de las plantas que habitan estas aguas. En estos sistema artificiales los microorganismos, plantas y el sustrato de los humedales actúan como agentes biogeoquímicos.

Estos microorganismos, fundamentalmente bacterias, son los responsables de la mineralización de los agentes contaminantes que se encuentran en las aguas residuales (Marin, A. 2010).

**4.3.3. Función de la vegetación.** Las plantas juegan un papel fundamental en estos sistemas, realizando funciones como airear el sistema radicular y facilitar oxígeno a los microorganismos que viven en la rizosfera, absorción de nutrientes (nitrógeno y fósforo), eliminación de contaminantes asimilándolos directamente en sus tejidos, filtración de los sólidos a través del entramado que forma su sistema radicular (González, J. F, 2004). La selección de las especies vegetales se debe realizar de acuerdo a la adaptabilidad de las mismas al clima local, su capacidad de transportar oxígeno desde las hojas hasta la raíz, su tolerancia a concentraciones elevadas de contaminantes, su capacidad asimiladora de los mismos, su tolerancia a condiciones climáticas diversas, su resistencia a insectos y enfermedades y su facilidad de manejo.

**4.3.4. Cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*).** El cartucho blanco *Zantedeschia aethiopica* (L.) Spreng hace parte de la familia Araceae, es una planta robusta de hoja perenne de hasta 60 cm de altura. En las plantas típicas, el espádice es de color amarillo brillante. Pecíolo suave, sin cerdas; flores femeninas intercaladas con estaminodios (GBIF, 2017). Esta planta se adapta a altitudes entre los 600 y 3100 msnm, las condiciones óptimas se encuentran a temperaturas diurnas entre los 12 y 23 °C, siendo muy susceptibles a las temperaturas extremas (Viana, C. 2015). La planta requiere un sustrato con bastante humedad pero a la vez que tenga un buen drenaje. El cartucho se desarrolla de forma ideal en clima de montaña, en donde todo el año se presentan condiciones de constante humedad, suelos profundos y abundante materia orgánica (Soto, 2014).

**4.3.5. Clasificación de los humedales construidos.** Los humedales construidos se clasifican según el tipo de vegetación asociada al sistema.



**Figura 1.** Diagrama de los tipos de humedales construidos según el tipo de vegetación. Fuente: modificado de Patiño & Zhinín (2015).

**4.3.6. Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal.** Este tipo de humedal se caracteriza por que el influente circula a través de un medio inerte, que consiste en un lecho de arena y/o grava de grosor variable, que sostiene un tipo de vegetación. Este lecho se diseña de modo que permita la circulación del agua residual a través del sistema radicular de la vegetación (Fernández *et al.*, 2005). El agua en este sistema circula horizontalmente a través del medio granular, rizomas y raíces de plantas, la profundidad de la lámina de agua oscila entre 0.3 y 0.9 metros. Este sistema es utilizado como tratamiento secundario o terciario de las aguas residuales (Peña *et al.*, 2011).

**4.3.7. Tratamiento primario: tanque sedimentador.** El tratamiento primario permite quitar entre el 60 a 70% de sólidos suspendidos totales y hasta un 30% de la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) presente en el agua residual (Olivos,

2010). La sedimentación es una operación física que aprovecha la diferencia de densidad y peso entre el líquido y las partículas suspendidas. Los sólidos más pesados que el agua, se sedimentan produciendo su separación (Lizarazo & Orejuela, 2013).

## 5. ANTECEDENTES

A medida que las sociedades se desarrollan enfrentan problemas cada vez más complejos, entre ellos los factores de riesgo en la seguridad hídrica (Escobar *et al.*, 2016). La búsqueda de alternativas para el tratamiento de aguas residuales ha estado encaminada a combinar sistemas de tratamiento y uso de diferente material vegetal para tomar decisiones que promuevan el manejo eficiente del recurso hídrico. Dentro de este contexto, la contaminación fecal ha sido y seguirá siendo el principal riesgo sanitario en el agua, ya que supone la incorporación de microorganismos patógenos que pueden provocar enfermedades en la salud humana (Ramos *et al.*, 2008).

En cuanto a la remoción de microorganismos, Kaushal *et al.*, (2015) evaluaron la posible eliminación de microorganismos patógenos (coliformes fecales) junto con la diversidad de la población microbiana desarrollada para comprender mejor la eficiencia a largo plazo y la estabilidad potencial de los humedales construidos, para el tratamiento de las aguas residuales domésticas generadas por una comunidad de aproximadamente 1000 habitantes. Este estudio obtuvo para coliformes fecales una reducción del 64% y 81% teniendo en cuenta el humedal construido sin y con vegetación respectivamente.

A esto se añade Calderón *et al.*, (2017) realizando la evaluación preliminar del funcionamiento de un sistema prototipo de humedales construidos empleando *Heliconia psittacorum* y *Cyperus papyrus* para el tratamiento de aguas residuales. El sistema de tratamiento realizó las siguientes remociones: DBO<sub>5</sub> (31%), DQO (93%), OD (14.1%) en el efluente. La concentración de Coliformes Fecales a través del sistema tuvo una tendencia a la baja; se alcanzó un porcentaje de remoción general de este parámetro del 95.2%. La remoción total del sistema para coliformes totales fue del 98.3%. Los resultados encontrados en este estudio apoyan que la implementación de humedales construidos de flujo subsuperficial, empleando

plantas ornamentales en este caso *Heliconia psittacorum* y *Cyperus papyrus* en el tratamiento de las aguas residuales domésticas es una solución ambientalmente sostenible y de fácil acceso a pequeñas comunidades.

Dentro de este marco se ha considerado el uso de plantas ornamentales en humedales construidos, es así como Morales *et al.*, (2013) realizaron una revisión bibliográfica cuyo objetivo fue mostrar la factibilidad de usar especies ornamentales entre ellas *Zantedeschia aethiopica* en humedales construidos de flujo subsuperficial, para la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en las aguas servidas. Se encontró valores de remoción de materia orgánica del 70% y 93 % y plantearon que son condiciones similares a las presentadas por plantas comunes como lo es *Phragmites* spp; por otra parte se resaltó que las plantas ornamentales aportan un valor estético y posible beneficio monetario.

Teniendo en cuenta que la vegetación emergente presente en el humedal construido de estudio es cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*), investigación como la de Leiva *et al.*, (2018) evaluaron el efecto de dos plantas ornamentales (*Cyperus papyrus* y *Zantedeschia aethiopica*) en humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) para el tratamiento de aguas residuales. Los resultados obtenidos para la eliminación de materia orgánica, sólidos en suspensión, nutrientes y patógenos estuvieron por encima del 60%, 90%, 10% y 1.8 Log número más probable (NMP)/100 mL, respectivamente. En cuanto al contenido de nitrógeno total (TN) y fósforo total (TP) en todos los tejidos de las plantas *Zantedeschia aethiopica* presentó el mayor contenido (59.6 g N / kg · DW y 8.28 g P / kg · DW). Finalmente concluyeron que los humedales construidos de policultivos representan una buena alternativa al sistema de tratamiento porque brindan beneficios sociales a la comunidad, como la mejora del panorama del sistema y una mejor calidad del hábitat.

Aportando a estos estudios Zurita *et al.*, (2015) buscaron comparar la eficiencia en la remoción de coliformes totales y *Escherichia coli* en sistemas de humedales construidos híbridos a escala piloto. Entre ellos evaluaron humedales construido de flujo subsuperficial horizontal con individuos de *Zantedeschia aethiopica*, donde se presentaron eficiencias globales de remoción del 99.93 % coliformes totales y 99.99 % para *E- coli*. Los resultados mostraron que es posible lograr la desinfección natural de las aguas residuales mediante sistemas de humedales híbridos de dos etapas combinados apropiadamente.

En Colombia el uso de plantas ornamentales para el tratamiento de aguas residuales domésticas lo presenta Flórez, A (2016), quien utilizó *Heliconia psittacorum* en humedales de flujo subsuperficial vertical, para la remoción de contaminantes presentes en este tipo de agua. Los resultados evidenciaron que la remoción de *E. coli* y coliformes fecales en los humedales fue más eficientes a la menor carga aplicada con remoción de hasta de 1.5 unidades logarítmicas en coliformes fecales y 1.3 en *E. coli*, tanto en el humedal plantado con *Heliconia psittacorum* como en el humedal sin plantar.

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Sotará se encuentra ubicado en el flanco oriental de la cordillera central en el departamento del Cauca, a una altura de 2600 msnm, su cabecera municipal Paispamba tiene una precipitación promedio anual de 1500 - 2000 mm, temperatura media de 8 a 12°C y clima frío húmedo (IDEAM, 2010). El municipio de Sotará cuenta con una zona de vida de bosque húmedo montano bajo según Holdrige (1967).

El sistema de tratamiento tipo humedal construido se encuentra ubicado en la vereda El Molino a dos kilómetros del casco urbano, el cual recibe las aguas residuales domésticas canalizadas de las baterías sanitarias del hostel “El Molino Francisco José de Caldas”.

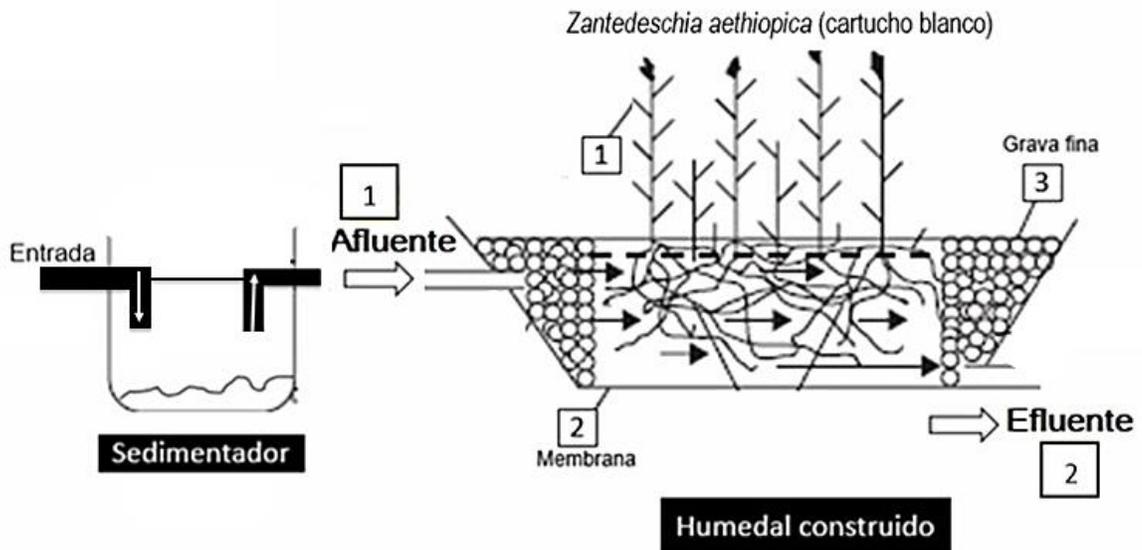


**Figura 2.** Sistema de tratamiento con un humedal construido en el Hostal El Molino-corregimiento de Paispamba, Sotará (2°11'59.5"N 76°38'55.5" W).

## 6.2 DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

El sistema de tratamiento evaluado corresponde a una unidad construida por personal del acueducto veredal Aires del Campo – Timbio, los cuales recibieron asesorías técnicas para su elaboración; sin embargo, su operabilidad y eficiencia no habían sido monitoreadas desde su creación, desconociendo los aportes realizados en su propósito de disminuir la carga contaminante que llega a las fuentes hídricas y suelos aledaños.

Para desarrollar el diagnóstico se verificaron los componentes hidráulicos, a su vez se realizaron las correspondientes mediciones para dimensionar el sistema de tratamiento, el tipo de macrófitas que poseía, densidad de siembra, tamaño de grava y su condición general. La figura 3, muestra un esquema del sistema de tratamiento existente en el Hostal El Molino.



**Figura 3.** Esquema del sistema de tratamiento en el Hostal El Molino y las dos estaciones de muestreo: Afluente = 1 y Efluente = 2.

### 6.3. CUANTIFICACIÓN DE COLIFORMES

- **Muestreo en campo.** La cuantificación del contenido de coliformes totales (CT) y fecales (CF) en el sistema de tratamiento se realizó en dos puntos de control: entrada al humedal construido (afluente) y efluente del sistema de humedal construido (Figura 3), en un intervalo de tiempo de una hora.

- **Tipo y tiempo de muestreo.** En los puntos de control se realizaron muestreos simples para representar la composición de la fuente en dicho tiempo y lugar específico, con una frecuencia quincenal durante 16 semanas (diciembre a marzo) que permitieron monitorear los cambios en el número de bacterias en el agua residual al pasar por el sistema. Se colectaron tres muestras en cada punto de control en frascos de vidrio de 250 ml previamente esterilizados y se conservaron en nevera portátil a 4°C.

Adicional a la evaluación bacteriológica se midieron parámetros fisicoquímicos como: pH, oxígeno disuelto, conductividad y temperatura hídrica mediante una sonda multiparamétrica marca Hach y se complementó con información de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), cuyo protocolo fue adaptado de APHA; AWWA; WEF, (1992).

- **Recuento de microorganismos indicadores de contaminación.** El recuento de CT y CF se realizó a través del método número más probable (NMP), utilizando Caldo BRILLA (Brillant- Green Bile Lactosa) como medio de cultivo; se realizaron diluciones seriadas con agua peptonada al 0.1% para reducir la carga microbiana y posteriormente se incubaron las muestras debidamente rotuladas a 37°C para coliformes totales y 44°C para coliformes fecales durante 24 horas en baño maría. La presencia de *E-coli* se confirmó en agar MacConkey. Se realizaron las debidas medidas de esterilización, uso de instalaciones y equipos de laboratorio requeridos para realizar el análisis de muestras utilizando el protocolo adoptado de APHA-AWWA-WEF (2017).

#### **6.4. INCIDENCIA DEL CARTUCHO BLANCO**

Para evaluar la incidencia de la macrófita en la degradación de la materia orgánica, se buscaba utilizar un humedal construido al cual no se le hubiera realizado la siembra de las plantas para conocer como variaba el contenido de coliformes por el hecho de pasar por el lecho filtrante, y contrastarlo con los resultados obtenidos después del proceso de siembra. Asimismo, realizar mediciones directamente en las plantas de cartucho blanco, tales como: altura de la planta, número de hojas, floración, estado sanitario, penetración de la raíz en el lecho de grava, cobertura y tamaño de la rizosfera. Dado que el sistema de tratamiento ubicado en la vereda El Molino ya contaba con las macrófitas, se propuso realizarlo en un humedal construido que se encuentra ubicado en la vereda de El Líbano-Sotará.

#### **6.5 ANÁLISIS DE DATOS**

Se usó el software estadístico *Rwizard* versión 3.5 (Guisande *et al.*, 2014) para demostrar si existe normalidad u homogeneidad de varianzas o un test no paramétrico y así evidenciar si hay diferencia significativa entre los dos puntos de control, resultado de la variación de los microorganismos removidos.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

**7.1.1 Caracterización general.** El caudal de ingreso del agua residual doméstica es de 398.53 litros por día y cuenta con un tanque de 1m<sup>3</sup> como sedimentador realizando un tratamiento primario. El humedal construido es utilizado como tratamiento secundario, donde el agua a tratar ingresa por uno de sus extremos a través de una tubería de 3 pulgadas y se distribuye atravesando un lecho de grava con plantas de cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*), finalmente el agua es recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior (Figura 4), lo cual es característico de un humedal construido de tipo subsuperficial horizontal según Suárez *et al.*, (2014).



**Figura 4.** Sistema de tratamiento. A) Tanque de sedimentación y B) Humedal construido con cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*).

**7.1.2 Dimensiones.** En cuanto a las dimensiones del sistema de tratamiento, este cuenta con un tanque sedimentador de 1m<sup>3</sup> el cual está conectado al humedal construido cuyas medidas son: 1.20 metros de ancho, 4.5 metros de longitud, lo cual respeta la relación largo/ancho de 3:1 para la construcción de los humedales y 0.7 metros de profundidad, estas medidas se encuentran entre lo recomendado por Garcia & Corzo (2008). La entrada y salida de la tubería del tanque se encuentran a 40 cm de la superficie del mismo.

**7.1.3 Granulometría.** El lecho filtrante contiene grava mezclada de ½ y ¾ pulgada, el cual está encargado de retener sólidos suspendidos totales y los coliformes totales y fecales que lleva el agua residual, permitiendo además el enraizamiento de las plantas (Burga & Fiorela, 2016). La base del lecho cuenta con un recubrimiento de membrana de polietileno impermeable calibre 6, el cual previene infiltraciones y el control del nivel del agua se ajusta con una pendiente aproximadamente del 0.5%.

**7.1.4 Macrófita.** Tres meses después de la puesta en funcionamiento del sistema, se realizó la siembra del material vegetal emergente con el acompañamiento de la comunidad y los tesisistas de la Universidad del Cauca involucrados en el marco del proyecto, quienes siguiendo a Viana (2015) estimaron la densidad de siembra: cuatro plantas de cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*) por m<sup>2</sup> para un total de 14 plantas.

**7.1.5 Diagnóstico.** Después de hacer observaciones y mediciones del trabajo realizado por la comunidad rural para la puesta en funcionamiento del humedal construido, se encontró que en términos generales el sistema cumplía con los requerimientos básicos para una adecuada operación; en cuanto a la ubicación del humedal se debe indicar que este fue construido a aproximadamente cuatro metros del hostal, lo que aparentemente no es una distancia suficiente para evitar la presencia de olores indeseables, sin embargo la comunidad no manifestó inconformidades al respecto.

Por otro lado, las dimensiones en la relación largo-ancho y profundidad, cumplieron con los requerimientos técnicos, debido a que la comunidad recibió asesoría del personal del acueducto veredal Aires del Campo y de profesionales en ingeniería de la Universidad del Cauca que participan en el proyecto Cicaficultura. En cuanto a la disposición de la tubería en la entrada del tanque sedimentador, esta permitió que por la densidad de los fluidos, se formara un sobrenadante y las grasas y demás material no ingresaran a la tubería de la salida del tanque, cumpliendo el papel de trampa de grasas.

El análisis del lecho filtrante mostró que las gravas corresponden a las dimensiones típicas utilizadas en estos sistemas de tratamiento, sin embargo el material filtrante fue adicionado de forma mezclada, siendo esto contrario a lo expuesto por autores como Burga & Fiorela (2016); Mena (2014); Vergara (2015), que han utilizado un solo tamaño de grava para dar uniformidad al medio filtrante o la disponen de forma estratificada, utilizando gravas de diferentes calibres. Por otro lado Delgadillo *et al.*, 2010 recomiendan utilizar grava con menos de 30 mm ( $\frac{3}{4}$ " de diámetro en sistemas de flujo subsuperficial horizontal para reducir la velocidad del paso de agua originando una mayor área superficial para la actividad microbiana y la adsorción. A pesar de que no es lo que se recomienda en la literatura, la grava mezclada y no estratificada en el sistema de tratamiento no presentó taponamientos y como se describirá más adelante hace importantes reducciones de las cargas de materia orgánica y microbiana.

Para el caso de la macrófita, la densidad de siembra que refiere Garcia & Corzo (2008) es de tres plantas por m<sup>2</sup>, siendo la plantación de estudio un referente aproximado. Respecto al crecimiento y adaptación de la planta es conveniente reportar que un porcentaje del 71% de las plántulas sembradas en el humedal presentó una adaptación positiva, puesto que morfológicamente se observó un crecimiento y aumento en el número de hojas, así como inflorescencias sanas (Figura 5); reconociendo que tal como lo menciona Soto, T (2014) la planta requiere

para su desarrollo un sustrato con bastante humedad pero que a la vez tenga un buen drenaje, lo cual es brindado por la pendiente de aproximadamente 0.5 % del sistema.

Es de resaltar que la tasa de propagación de *Z. aethiopica* según Morales *et al.*, (2013) es lenta y su profundidad de implantación en el sustrato llega a 10-15 cm, por ello al aumentar la cantidad de plantas en el humedal permitirá el incremento de la rizosfera y así el contacto con los microorganismos aerobios para promover la posible asimilación y transformación de nutrientes.



**Figura 5.** Desarrollo morfológico de las plantas de cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*) en el humedal construido. A) Etapa1- Diciembre, B) Etapa2- Enero, C) Etapa3- Abril.

**- Modificaciones para mejorar la operación del sistema.**

Un mes después de la siembra de las plantas, se removieron aquellos individuos que no progresaron siendo remplazadas por unas nuevas plántulas, estas fueron tomadas del mismo lugar de donde se recolectaron las primeras y con la misma metodología de sustracción. El nuevo material vegetal tuvo una buena adaptación.

En el transcurso del muestreo se evidenció la formación de una sobrenadante de varios centímetros de espesor en el tanque de sedimentación, así que esta capa fue removida de forma física, posteriormente se enterró y agregó  $\text{CaCO}_3$  o cal viva para evitar la proliferación de microorganismos patógenos en el suelo y también posibles olores.

## **7.2 CUANTIFICACIÓN DE COLIFORMES**

**7.2.1 Condiciones físicas e impacto en las bacterias coliformes.** Se realizó un análisis de cómo cada uno de los parámetros fisicoquímicos: oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ) y sólidos suspendidos totales (SST) influyeron en la cantidad de coliformes totales (CT) y fecales (CF), así como la relación con los parámetros control al pasar por el sistema de tratamiento.

En referencia al valor de pH reportado para el afluente fue  $6.94 \pm 0.6$  y  $7.3 \pm 0.5$  para el efluente, estos valores se encuentran en el rango de pH (5.5 -7.5) que reporta León, R (2017) como ambiente ideal para el desarrollo de coliformes y microorganismos asociados a aguas residuales. La temperatura reportada para el afluente fue de  $21.1 \pm 1.3$  °C y  $21.0 \pm 1.4$  °C para el efluente, siendo una variable que incide en la eliminación de las bacterias de estudio, ya que su rango de acción se encuentra entre 35 a 37 °C para coliformes totales y 45 °C coliformes fecales (Tabla 1).

### **7.2.1.1 Relación con Oxígeno Disuelto y materia orgánica**

Según Acosta et al (2016) refieren que en los humedales con vegetación la provisión de oxígeno al agua se da a través de las raíces, lo cual facilita la oxidación bioquímica dentro del humedal, de manera que la rizosfera puede ser colonizada por bacterias aeróbicas que también degradan el material orgánico.

En cuanto al oxígeno disuelto del sistema este fue de  $1.9 \pm 1.1$  mg/L en el afluente, mostrando que el agua que ingresa al sistema de tratamiento posee altas

cantidades de materia orgánica, que presuntamente está siendo degradada de manera aerobia, lo que reduce significativamente el oxígeno disuelto en el agua.

Los valores de oxígeno disuelto del efluente ( $3.6 \pm 1.6$  mg/L) indican que el agua debe contener menor cantidad de materia orgánica ya que al encontrarse al interior del sistema de tratamiento que es esencialmente anóxico ha logrado elevarse de 1.9 a 3.6 mg/L, sin aun haber recibido aireación mecánica fuerte.

#### **7.2.1.2 Relación con los Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

El sustrato cumple con la función de ser el medio de soporte de los microorganismos y de las plantas, según Gallardo & Veintimilla (2015) este además, es el medio filtrante para retener los sólidos suspendidos que se depositan en la superficie del sustrato, para luego ser degradados por los microorganismos. La presencia de sólidos suspendidos totales (SST) de origen orgánico sirve como fuente de alimento para las bacterias, brindándoles la posibilidad de proliferarse. Para este estudio los valores de SST del afluente fueron  $245 \pm 81$  mg/L y al compararlos con el efluente:  $9 \pm 0.9$  mg/L se obtuvo una remoción del 96.08 % en la concentración de SST en el sistema, estos resultados muestran que al interior del humedal se están reteniendo los sólidos que ayudarán a que las colonias de microorganismos heterótrofos puedan poblar el sistema de tratamiento y realizar procesos que permitan la reducción de organismos patógenos en el agua del efluente estudiado. Cabe resaltar que según León, R. (2017) la retención de sólidos suspendidos totales se puede ver influenciada por el crecimiento radicular de las plantas ya que ralentizan el flujo hidráulico y provocan la precipitación de los sólidos suspendidos (Tabla 1).

**Tabla 1.** Valores promedio, desviación estándar (SD  $\pm$ ), valores máximo y mínimos de las variables fisicoquímicas en las estaciones de muestreo (Afluente- Efluente).

Estación	Variable	pH	Temperatura (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	SST (mg/L)	Conductividad (µs/cm)
<b>Afluente</b>	Promedio	6.9	21.1	1.9	245	1018.2
	SD (±)	0.6	1.3	1.1	81	182.5
	Valor Máximo	7.89	22.4	3.4	348	1339
	Valor Mínimo	6.37	19.2	0.15	154	801
<b>Efluente</b>	Promedio	7.3	21	3.6	9	691.8
	SD (±)	0.5	1.4	1.6	0.9	210.4
	Valor Máximo	8.0	22.5	5.4	9.5	918
	Valor Mínimo	6.69	18.9	1.05	7.22	675

### 7.2.1.3 Relación con la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

Lo establecido para los sólidos suspendidos se puede corroborar con lo encontrado para la DBO<sub>5</sub>, ya que el valor de ingreso fue de 387.7 mg/ L para el afluente, valor catalogado como alto según la clasificación de Lizarazo *et al.*, (2013) que indican que valores asociados a este rango están entre 100 – 500 mg/L de DBO<sub>5</sub>. Este alto contenido de materia orgánica biodegradable queda atrapada al interior del humedal sirviendo como sustrato para los microorganismos promoviendo su proliferación, aumentando el consumo de oxígeno; con ello posibles protozoos y algas empiezan el pastoreo provocando una reducción en la población de bacterias, logrando una competencia y depredación en el sistema (Okafor, 2011) y por lo tanto la reducción de patógenos como CT y CF.

Los valores de DBO<sub>5</sub> en el efluente fueron en promedio de 119.1 mg/L (Tabla 2) mostrando que hay procesos internos de conversión de materia que permite la depuración de la materia orgánica. Esta reducción de materia orgánica a través del humedal evita que en las fuentes de agua receptoras se incrementen los microorganismos que afecten el ambiente y la salud de las personas que consumen el recurso aguas abajo.

**Tabla 2.** Valores promedio, desviación estándar (SD ±), valores máximo y mínimos de las variables DQO y DBO<sub>5</sub> en las estaciones de muestreo (Afluente- Efluente).

Estación	Variable	DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)
Afluente	Promedio	683	387.7
	SD (±)	400	266.2
	Valor Máximo	1355	849.4
	Valor Mínimo	309	194
Efluente	Promedio	117	119.1
	SD (±)	115.8	38.5
	Valor Máximo	320	150
	Valor Mínimo	53	58

- **Relación con la Resolución 631 de 2015.** Normatividad de vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales.

Los parámetros analizados reflejan que en el marco de la normatividad legal colombiana, el sistema de tratamiento de agua residual ubicado en la vereda el Molino, cumple los parámetros fisicoquímicos del vertimiento exigidos, como se observa en la tabla 3. El parámetro de grasas y aceites no fue medido, sin embargo, los valores aportados por el efluente se encuentran muy cercanos a lo exigido por la norma. En general se puede afirmar que el humedal construido funciona como agente mitigador ante los posibles impactos negativos que las descargas del agua residual generarían sin pasar por un previo tratamiento.

**Tabla 3.** Parámetros fisicoquímicos exigidos por la normatividad colombiana para el vertimiento puntual de aguas residuales a aguas superficiales.

Parámetro	Unidades	Promedio (Efluente)	SD (±)	Resolución 631 / 2015
pH	-	7.3	0.5	6.00 a 9.00
<b>Demanda Química de Oxígeno</b>	(mg/L O <sub>2</sub> )	177	115.8	200
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno</b>	(mg/L O <sub>2</sub> )	119.1	38.5	
<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>	(mg/L)	9	0.9	90
<b>Grasas y Aceites</b>	(mg/L)	-	-	20

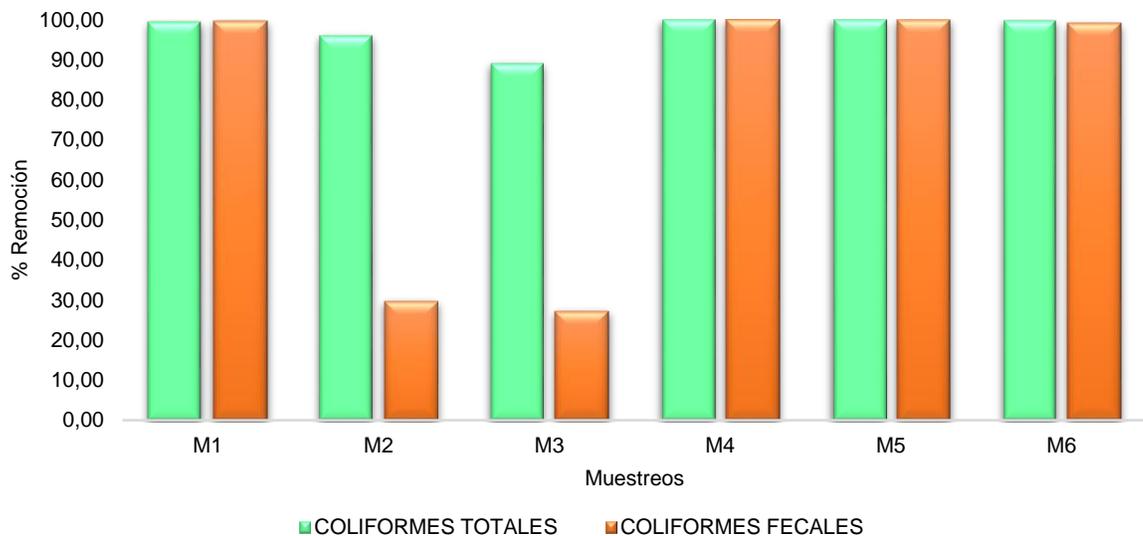
Con lo anterior es de anotar, que se evidenció la reducción de coliformes como lo muestran los siguientes valores: para coliformes totales, en el afluente el valor promedio fue de  $6.0 \text{ E}+05 \pm 4.94\text{E}+05$  NMP/mL y en el efluente fue de  $1.01\text{E}+04 \pm 1.71\text{E}+04$  NMP/mL y para coliformes fecales, en el afluente el valor promedio fue de  $1.2 \text{ E}+05 \pm 1.70\text{E}+05$  NMP/mL y en el efluente fue de  $2.65 \text{ E}+03 \pm 4.28\text{E}+03$  NMP/mL (Tabla 4). Según Okafor (2011) este resultado puede explicarse debido a que las condiciones físicas, químicas y estructurales del sistema brindan a los microorganismos en general un ambiente favorable para que sus poblaciones proliferen, conllevando a una serie de interacciones, que concluyen en la reducción poblacional de ciertos grupos de microorganismos, para este caso los coliformes.

**Tabla 4.** Valores del NMP/mL obtenido para coliformes totales (CT) coliformes fecales (CF) en las estaciones de muestreo.

Estación	Muestras	CT (NMP/ mL)	CF (NMP/ mL)
Afluente	M1	1.8 E+05	3.6 E+03
	M2	1.1 E+06	4.3 E+03
	M3	1.0 E+05	1.5 E+04
	M4	6.7 E+05	4.4 E+05
	M5	2.8 E+05	1.1 E+05
	M6	1.3 E+06	1.7 E+05
	Promedio	6.0 E+05	1.2 E+05
Desviación estándar	4.9 E+05	1.7 E+05	
Valor Máximo	1.3 E+06	4.4 E+05	
Valor Mínimo	1.0 E+05	3.6 E+03	
Efluente	M1	1.1 E+03	1.0 E+01
	M2	4.4 E+04	3.0 E+03
	M3	1.1 E+04	1.1 E+04
	M4	2.6 E+02	1.5 E+02
	M5	2.5 E+02	1.4 E+02
	M6	4.0 E+03	1.5 E+03
	Promedio	1.0 E+04	2.6 E+03
Desviación estándar	1.7 E+04	4.2 E+03	
Valor Máximo	4.4 E+04	1.1 E+04	
Valor Mínimo	2.5 E+02	1.0 E+01	

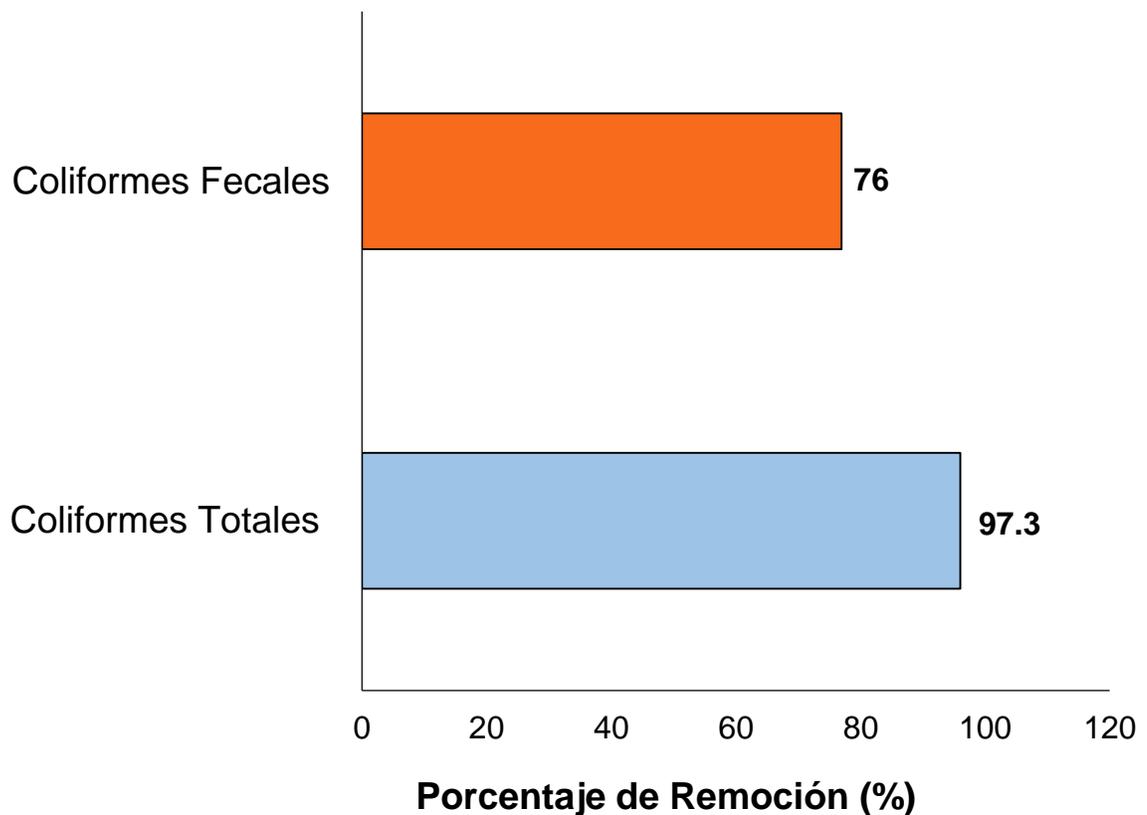
### 7.2.2 Remociones obtenidas

En este punto cabe resaltar que el humedal al recibir aguas residuales domésticas de un hostel, durante una época de alta ocupación en el sitio (diciembre - enero), se pudo evidenciar que eficiencia del tratamiento para las variable coliformes fecales fue 28.4 % y para coliformes totales presentó un promedio del 92.5 %, indicando que la capacidad de carga del sistema se ve afectada por las descargas generadas en esa etapa, sin embargo al pasar esta época el sistema de tratamiento retoma eficiencias cercanas al 95% (Figura 6).



**Figura 6.** Porcentajes de remoción de coliformes totales y fecales en cada muestreo.

Ahora bien los porcentajes de remoción de coliformes totales y fecales en el sistema de tratamiento estudiado fueron del 97.3% (1.77 log NMP/mL) para coliformes totales y 76% (1.66 log NMP/mL) para coliformes fecales (Figura 7). Estos resultados fueron satisfactorios al compararlos con los resultados de Calderón, G *et al.*, (2017) y Morales, R *et al.*, (2017) dónde obtuvieron porcentajes de remoción del 95.2 % para el grupo coliformes, utilizando sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas con plantas ornamentales entre ellas cartucho blanco para la eliminación de microorganismos patógenos y materia orgánica.



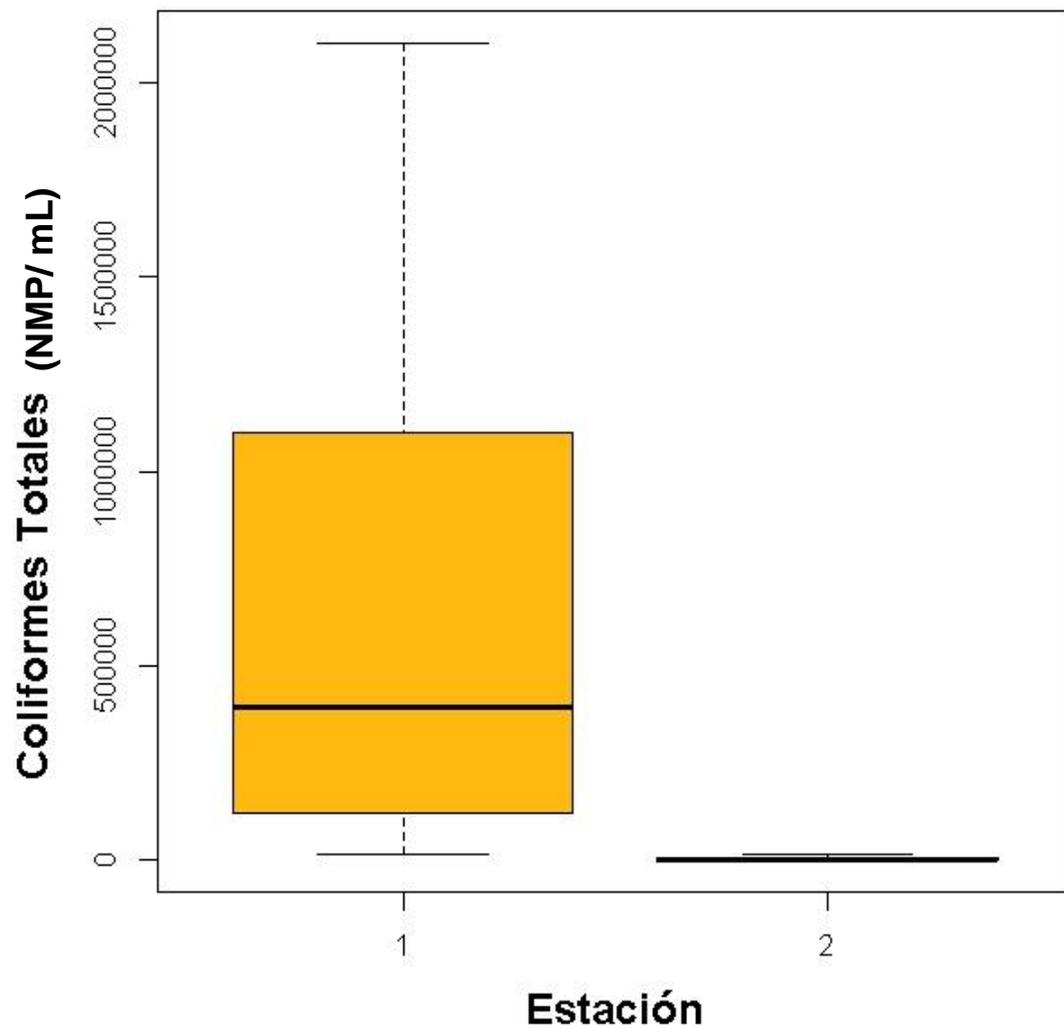
**Figura 7.** Porcentaje promedio de remoción de coliformes totales y fecales en el sistema de tratamiento.

El sistema de tratamiento evaluado al contar con un tratamiento primario y un humedal construido plantado con *Zantedeschia aethiopica*, aportó remociones que se relacionan con estudios realizados por Zurita *et al.*, (2015) donde utilizando un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas híbrido plantados con *Zantedeschia aethiopica* como macrófita emergente, obtuvieron resultados de remoción del 99 % para coliformes totales y fecales; dentro de este marco se comprende que la remoción de microorganismos patógenos presentes en el agua residual es un objetivo en común que se busca solucionar mediante la exploración de diversos sistemas de tratamiento. Cabe resaltar que los porcentajes de remoción alcanzados para coliformes totales 97.3% (1.77 log NMP/mL) se aproximan a la alta eficiencia de los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal para

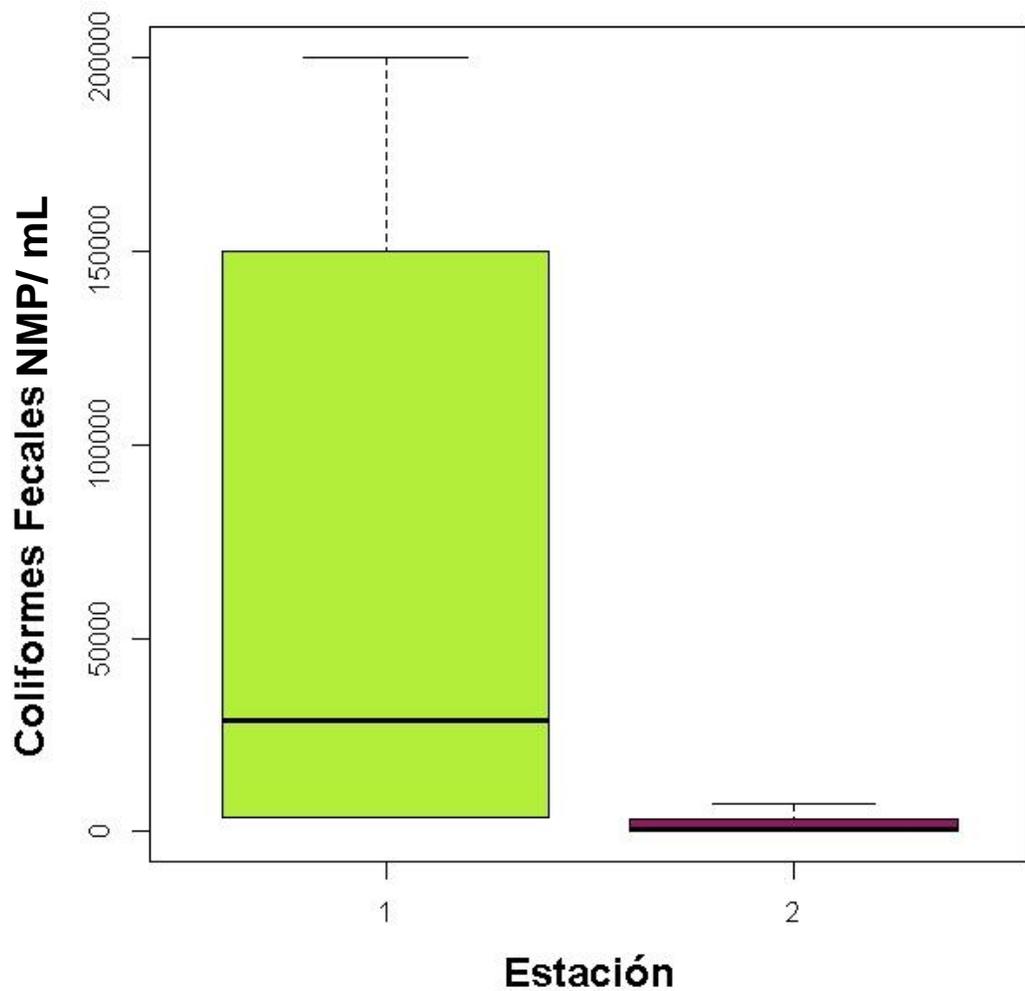
eliminar coliformes totales (99 %), tal como lo han reportado estudios bajo condiciones tropicales (García & Garcés, 2016).

La eficiencia de remoción de coliformes totales en 1.77 log NMP/mL y 1.66 log NMP/mL para coliformes fecales, tuvo similaridad con las obtenidas por Leiva *et al.*, (2018) donde utilizaron *Zantedeschia aethiopica* como alternativa para la remoción de materia orgánica y microorganismos patógenos en sistemas de tratamiento con humedales construidos removi6 en 1.8 Log NMP/mL de los microorganismos pat6genos.

Las diferencia entre la cantidad de coliformes totales en el afluente – efluente fue altamente significativo, como lo demuestra el valor arrojado por el software estadístico *Rwizard* para el test de Kolmogorov-Smirnov (p-valor = 7.453 e-06) con una significancia (p<0.001) (Figura 8). As6 mismo con un p-valor = 1.332 e-06 se evidencian las diferencias significativas (p<0.001) para la cantidad de coliformes fecales entre afluente – efluente (Figura 9).

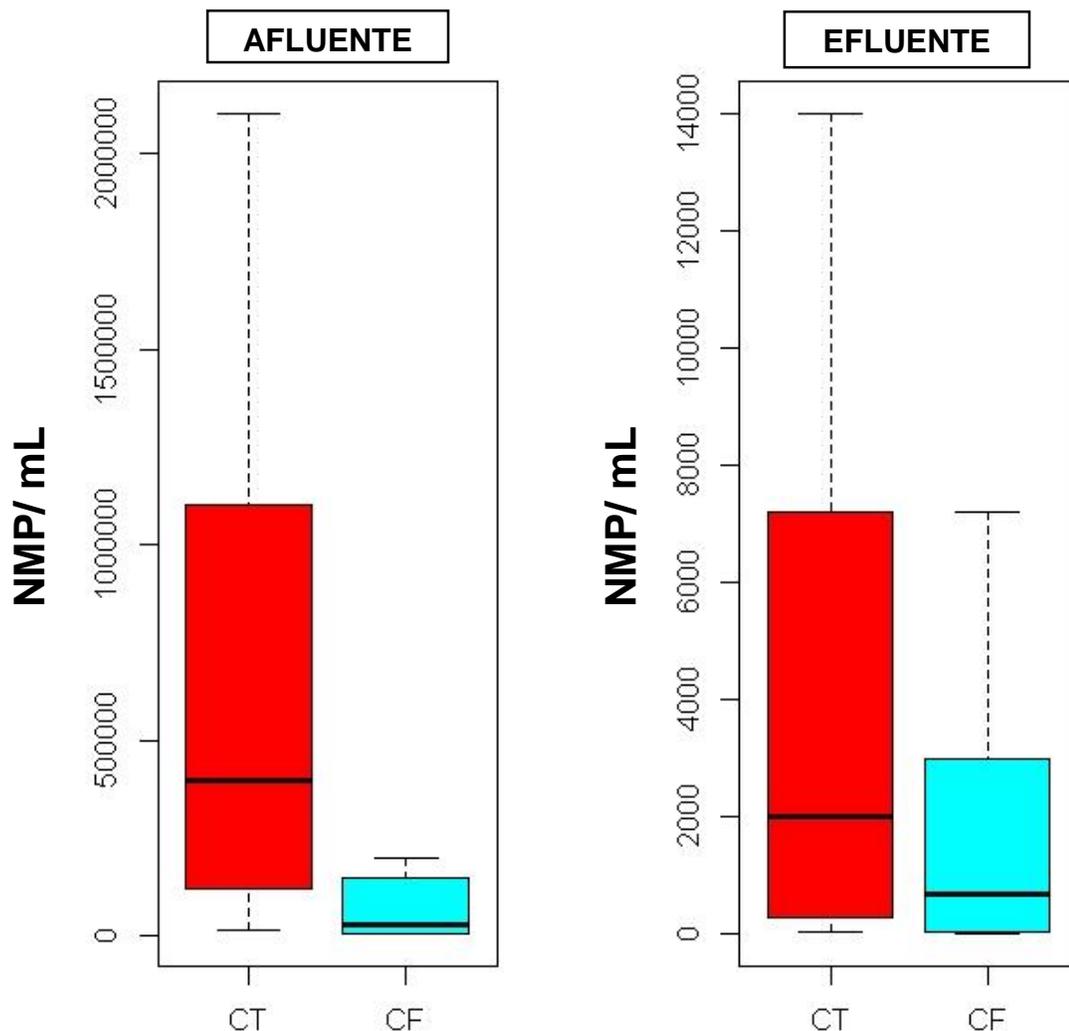


**Figura 8.** Número más probable (NMP/mL) de coliformes totales en las estaciones de muestreo. 1: Afluente del humedal, 2: Efluente del humedal.



**Figura 9.** Número más probable (NMP/mL) de coliformes fecales en las estaciones de muestreo. 1: Afluente del humedal, 2: Efluente del humedal.

Así mismo se obtuvieron valores significativos ( $p < 0.05$ ) al comparar el NMP de coliformes totales (CT) y fecales (CF) en el afluente y efluente del humedal (Figura 10), mostrando la reducción de bacterias al pasar por el sistema de tratamiento.



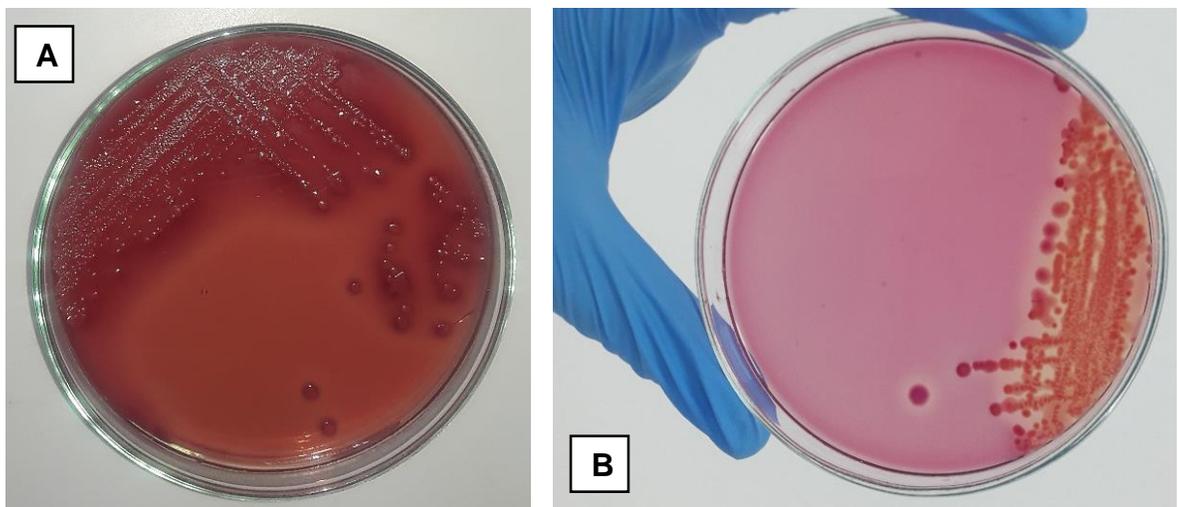
**Figura 10.** Número más probable (NMP/mL) de coliformes totales (CT) y fecales (CF) (NMP/mL) en el afluente y efluente del sistema de tratamiento.

**7.2.2.1 Importancia de las remociones obtenidas.** La importancia de este resultado está en la capacidad que tiene el sistema de retener el grupo de bacterias de estudio, y a su vez otro tipo de bacterias entéricas relacionadas con la presencia de este grupo indicador, puesto que hay una relación directa al reducir el número de coliformes en el efluente. La presencia de coliformes en cuerpos de agua de consumo y suelo es un promotor del deterioro de la salud humana y de los ecosistemas receptores del vertimiento si no se realizara el tratamiento previo (Ríos,

T *et al.*, 2017). La remoción de CT y CF en el sistema utilizado evidenció que el tratamiento de las aguas residuales es una alternativa para mitigar el impacto negativo que pueden generar las mismas.

Los coliformes y *Escherichia coli* se han utilizado como indicadores de la calidad del agua en todo el mundo (Invik, J *et al.*, 2017), por ello los porcentajes de remoción alcanzados para el grupo coliformes son relevantes ya que un tratamiento adecuado de las aguas residuales y eliminación de agentes patógenos, contribuye a reducir considerablemente el riesgo de sufrir perjuicios a causa de una gestión incorrecta de las aguas residuales (OMS & ONU-HABITAT; 2018).

Aunque se evidenció la presencia de *Escherichia coli* en las muestras (Figura 11), el promedio del número más probable (NMP) de coliformes fecales (CF) en el afluente fue de: 2.6 E+03, logrando un porcentaje de remoción fue del 77% evidenciando la reducción en 1.66 log NMP/mL de este grupo indicador.

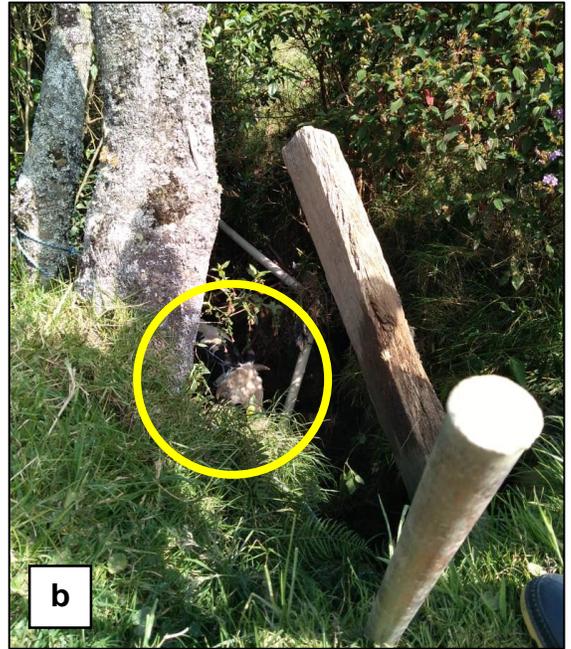
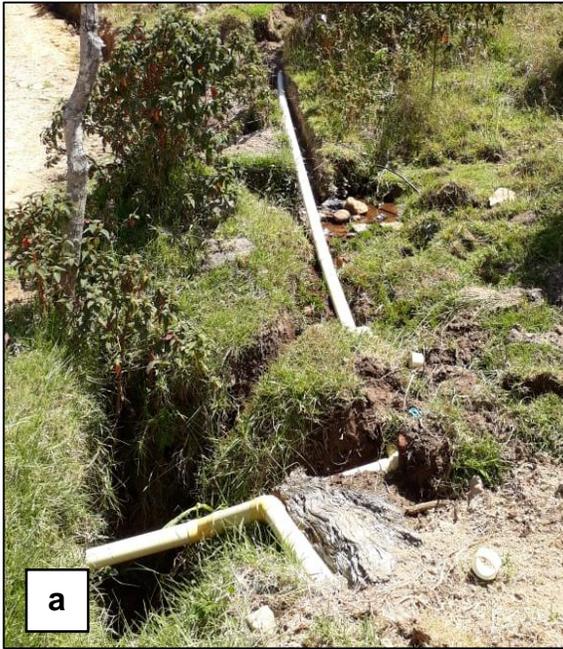


**Figura 11.** Prueba confirmativa para *E-coli* en agar MacConkey. A: Dilución  $10^{-4}$  (efluente). B: Dilución  $10^{-8}$  (afluente).

### 7.3 INCIDENCIA DEL CARTUCHO BLANCO

En cuanto al desarrollo del tercer objetivo específico en el cual se planteó: “Determinar la incidencia del cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*) como alternativa para la remoción de las bacterias de estudio en un sistema de tratamiento tipo humedal construido”; no se logró la recolección de muestras para su posterior análisis, debido a que la zona de confluencia del agua residual presentó fallas estructurales por la exposición de la tubería a cielo abierto (Figura 12.a), lo que afectó las conexiones del sistema, implicando una nueva solicitud de material de PVC a la entidad Acueducto Aires del Campo y la reprogramación de salidas técnicas para los posteriores arreglos.

Con respecto a los arreglos técnicos, cabe resaltar que se logró la reconexión del sistema (Figura 13), sin embargo, semanas después nuevamente la conexión se vió afectada por daños causados por el ganado, el cual desactivó el tubo conductor del agua residual al sistema de tratamiento (Figura 12.b); como consecuencia de esto, la instalación del sistema de tratamiento en la vereda el Líbano no cumplió con los requerimientos técnicos para dar inicio al proceso de llenado, por consiguiente no se realizaron los muestreos y los análisis microbiológicos correspondientes en este humedal.



**Figura 12.** Fallas técnicas en el sistema de tratamiento en la vereda el Líbano. a) Exposición de material de PVC, causando tuberías quebradas, b) desconexión del tubo conductor por ganado de la zona al caer en el área de empalme de la tubería.



**Figura 13.** Sistema de tratamiento ubicado en la vereda el Líbano- Sotará.

## 8. CONCLUSIONES

El diagnóstico del sistema de tratamiento permitió evidenciar que las dimensiones, granulometría y la presencia de las macrófitas, brindaron las condiciones para que ocurrieran procesos como filtración y absorción de materia orgánica, con lo cual se logró la reducción de las bacterias coliformes totales y fecales.

Las condiciones y características que presenta el sistema de tratamiento tipo humedal construido, plantado con *Z. aethiopica* en el Hostal El Molino, permitieron altas remociones para las bacterias Coliformes Totales 96% (1.77 log NMP/mL) y Fecales 77% (1.66 log NMP/mL), y a su vez parámetros de relevancia como la presencia de sólidos suspendidos totales (SST) que se redujeron en el 96,08%.

La construcción del sistema de tratamiento de aguas residuales con humedal construido, plantado con cartucho blanco, evidenció el compromiso que se tienen con la disposición final de las aguas residuales, en busca de mejorar la calidad del agua que llega a las comunidades y a la bocatoma del acueducto veredal Aires del Campo.

Los resultados de este estudio evidencian que la implementación de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, son una alternativa para las pequeñas comunidades rurales del municipio de Sotará, ya que logran disminuir la concentración de microorganismos patógenos, que están siendo vertidos a los cuerpos de agua o suelos colindantes.

Así mismo es de resaltar la afinidad del cartucho blanco (*Zantedeschia aethiopica*) en el lecho de grava, brindando un aspecto estético y atractivo al humedal.

## 8. RECOMENDACIONES

Al evidenciarse la formación del sobrenadante en el tanque de sedimentación, se recomienda extraer dicha capa al menos cada 90 días, puesto que su descomposición genera gases y olores. Por otro lado se recomienda el aumento en el número macrófitas (*Zantedeschia aethiopica*) en el humedal, lo cual podría optimizar la operatividad del mismo, así como la instalación de un tratamiento preliminar (trampa de grasas) en posteriores sistemas de tratamiento.

Realizar en estudios posteriores la evaluación del funcionamiento de un sistema de tratamiento tipo humedal construido, sin cartucho blanco con características similares de ubicación geográfica y diseño, para analizar la remoción del grupo de bacterias coliformes totales y fecales.

Se recomienda analizar en detalle la fisiología de *Zantedeschia aethiopica* asociada a humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales ubicados en ecosistemas de alta montaña.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, C. M., Silván, R. S., Ocaña, G. L., Margulis, R. G. B., & Cerino, M. J. R. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México/Constructed wastewater treatment by tropical-wetlands in Tabasco, Mexico/Treatment of water waste by wetlands artificial tropical in Tabasco. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5(10), 1-20.
- Acosta, C. P., Benavides, J. A., & Sierra, C. H. (2015). Análisis cualitativo del deterioro de la calidad del agua y la infección por *Helicobacter pylori* en una comunidad de alto riesgo de cáncer de estómago (Cauca, Colombia). *Salud colectiva*, 11, 575-590.
- Alcaldía de Sotará – Cauca. 2015. Fecha de consulta 14 de febrero 2018. [En línea]: [http://sotara-cauca.gov.co/informacion\\_general.shtml#geografia](http://sotara-cauca.gov.co/informacion_general.shtml#geografia).
- APHA-AWWA-WEF (2017) “9221 multiple-tube fermentation technique for members of the coliform group (2017)”, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
- Branda, LN, Ruíz Díaz, A, Ramírez, M, & Martínez, J. (2016). Evaluation of fecal coliforms in effluents of a swine exploitation subject to a tubular biodigester treatment with stationary freight system. *Compendio de Ciencias Veterinarias*, 6(2), 7-12. <https://dx.doi.org/10.18004/compend.cienc.vet.2016.06.02.7-12>
- Burga, N., & Fiorela, R. M. (2016). Tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel familiar, con Humedales Artificiales de flujo subsuperficial Horizontal, mediante la especie macrófita emergente *Cyperus Papyrus* (Papiro).
- Calderón, R. A. A., Collazos, A. Y. P., & Torres, M. A. P. (2017). Evaluación preliminar del funcionamiento de un sistema prototipo de humedales

artificiales empleando *Heliconia psittacorum* y *Cyperus papyrus* para el tratamiento de aguas residuales. *Agroecología: Ciencia y Tecnología*, 3(1), 51-60.

Colina, R., Romero, J., & Negrín, R. (2015). Condiciones sanitarias en pueblos rurales: aguas contaminadas. *Revista de Ciencias Sociales*, v. 28, n. 36, pp. 121-144.

Dávila Campoverde, J. M. (2017). Prevalencia de infecciones producidas Por Enterobacterias Productoras de Carbapenemasas (EPC) en el Hospital Vicente Corral Moscoso. Periodo enero-diciembre 2016 Cuenca-Ecuador (Bachelor's thesis, Universidad Católica de Cuenca).

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., Andrade, M (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales: Nelson Antequera. Centro AGUA de la UMSS (Bolivia) y el Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología de la Universidad de Barcelona (España).

Escobar, M. C., Tovar, L. F., & Romero Cuéllar, J. (2016). DISEÑO DE UN SISTEMA EXPERTO PARA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 26(2).

Fariñas, María C., Martínez, M Luis (2013). Infecciones causadas por bacterias gramnegativas multirresistentes: enterobacterias, *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter baumannii* y otros bacilos gramnegativos no fermentadores. *Enferm Infecc Microbiol Clin*. 2013; 31(6):402–409.

Fernández, J., De Miguel, E., De Miguel, J., & Curt, M. (2005). Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación, 61-77.

Flórez, A. N. R. (2016). *Evaluación de la respuesta al incremento simultáneo de la carga hidráulica y la carga orgánica en humedales de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales domésticas bajo condiciones tropicales* (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Química Industrial).

- Gallardo, J. L. M., & Veintimilla, F. G. (2015). Humedales artificiales en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la mina Barrick. *ARNALDOA*, 20(2), 433-444.
- García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial.
- García, I. Garcés, A. (2016). *Evaluación de dos configuraciones de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales urbanas* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- GBIF Backbone Taxonomy. *Zantedeschia aethiopica* Spreng. In GBIF Secretariat (2017). GBIF Backbone Taxonomy. Checklist dataset <https://doi.org/10.15468/39omei> accessed via GBIF.org on 2019-05-29.
- González, J. F. (2004). Humedales artificiales para depuración. Tomado de: <https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%E Dtulos%20Manual/Cap%EDtulos%201%20a%202.pdf>
- Guerra, J. D. T., Vargas, J. S. M., Aguirre, R. R. P., & Huaranga, M. A. C. (2018). Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales Artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, en Carapongo-Lurigancho. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 1(2).
- Guerrero, P. P., Sánchez, F. G., Saborido, D. G., & Lozano, I. G. (2014). Infecciones por enterobacterias. *Medicine-Programa de Formación Médica Continuada Acreditado*, 11(55), 3276-3282.
- Guisande, C., Vaamonde, A., & Barreiro, A. (2014). RWizard Software, Package 'StatR' version 1.0 University of Vigo. Spain. *Recuperado de: <http://www.ipez.es/RWizard>*.

- Holdridge, L. (1967). Clasificación de zonas de vida según el sistema de clasificación de Holdridge. *San Jose. Centro Científico Tropical*.
- IDEAM (1998-2010). Atlas interactivo climatológico. Tomado de: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html#>. Fecha de consulta: 30 de marzo 2018.
- INCA (2015). AMBIENTAL, S. D. S. INFORME NACIONAL DE CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO (INCA).
- Invik, J., Barkema, H. W., Massolo, A., Neumann, N. F., & Checkley, S. (2017). Total coliform and *Escherichia coli* contamination in rural well water: Analysis for passive surveillance. *Journal of water and health*, 15(5), 729-740.
- Jiménez Rodríguez, A. A., & Cantor Acosta, N. S. (2016). Estudio de factibilidad de reúso de aguas residuales domésticas tratadas en condominios de estrato alto para riego de zonas verdes en la sabana de Bogotá. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_civil/96](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/96).
- Kaushal, M., Wani, S. P., Patil, M. D., & Datta, A. (2016). Monitoring efficacy of constructed wetland for treating domestic effluent—microbiological approach. *Current Science*, 110(09), 1710-1715
- Leiva, A. M., Núñez, R., Gómez, G., López, D., & Vidal, G. (2018). Performance of ornamental plants in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow constructed wetlands for treating wastewater. *Ecological Engineering*, 120, 116-125.
- León Suarez, R. J. (2017). *Inventario de plantas recomendadas para fitorremediación de coliformes fecales en aguas negras* (Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias Naturales. Universidad de Guayaquil).
- Lizarazo Becerra, J. M., & Orjuela Gutiérrez, M. I. (2013). Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Universidad Nacional de Colombia.

- Londoño, Sevilla. P. (2017). Diagnóstico biofísico y socioeconómico de la microcuenca río molino fuente de abastecimiento del acueducto aires del campo, municipio de Timbío-cauca. Universidad del cauca, facultad de ciencias agrarias - ingeniería forestal.
- Lopez-Vazquez, C. M., Méndez, G. B., Carrillo, F. C., & García, H. H. (Eds.). (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño*. IWA Publishing.
- Magallanes Bajaña, I. J. (2018). *Determinación de los niveles de Coliformes totales y Escherichia coli en suero y leche cruda* (Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias Naturales. Universidad de Guayaquil).
- Marin, A (2011). Identifican las bacterias presentes en humedales artificiales para optimizar estos sistemas de depuración. Agencia Iberoamericana para la difusión de la Ciencia. Tomado de: <http://www.dicyt.com/noticias/identifican-las-bacterias-presentes-en-humedales-artificiales-para-optimizar-estos-sistemas-de-depuracion>. Fecha de consulta: marzo 15 de 2018.
- Mena, P. (2014). *Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el colegio comfamiliar siglo XXI, sede campestre corregimiento de San Fernando, Municipio de Pasto, Colombia*(Doctoral dissertation, Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires).
- Monsalve, B., & Angel, L. (2017). Prevalencia de Helicobacter pylori en el agua de consumo humano de pacientes diagnosticados con cáncer gástrico Helicobacter pylori positivo en el Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas 2015-2016.
- Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). HUMEDALES CONSTRUIDOS CON PLANTAS ORNAMENTALES PARA EL TRATAMIENTO DE MATERIA

ORGÁNICA Y NUTRIENTES CONTENIDOS EN AGUAS SERVIDAS.  
Theoria, 22(1).

Muñoz Cruz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales.

Noguera Moya, O. V. (2014). Resistencias a Fluoroquinolonas en aislados clínicos de *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae* productores y no productores de Betalactamasas de espectro extendido: Epidemiología en nuestro medio y análisis genético de este fenómeno.

Okafor, N. (2011). *Environmental microbiology of aquatic and waste systems*. Springer Science & Business Media.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Enfermedades diarreicas. Tomado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs330/es/>. Fecha de consulta: 27 de marzo 2018.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). Fiebre Tifoidea. Tomado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/typhoid/es/>. Fecha de consulta: 27 de marzo 2018.

Otterpohl, R., Grottker, M., & Lange, J. (2016). Gestión sostenible del agua y de los residuos en zonas urbanas. Boletín CF+ S (2) Ríos-Tobón, S., Agudelo-Cadavid, R. M., & Gutiérrez-Builes, L. A. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. Revista Facultad Nacional de Salud Pública, 35(2), 236-247.

Patiño Chávez, J. F., & Zhinín Chimbo, F. L. (2015). *Estudio comparativo de la capacidad depuradora de Phragmites Australis y Cyperus Papyrus en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales en el cantón Santa Isabel* (Bachelor's thesis).

Peña Varón, M. R., Van Ginneken, M., & Madera P, C. A. (2011). Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas

Residuales Domésticas en Zonas Tropicales. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 5(1), 27-35. <https://doi.org/10.25100/iyv.v5i1.2302>

Pérez, R., Chinchilla, C. A., Marín, J. S., & Pérez, J. A. (2013). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Uniciencia*, 27(1), 332-340.

Pulido, S., Miranda, v., Guzman, M., Molano, E. (2014). Origen y Características de las aguas residuales. Tomado de: <https://sites.google.com/site/ptaruniminuto/origen-y-caracteristicas-de-las-aguas-residuales>.

Ramírez, L. Á. (2016). Diagnóstico de la calidad microbiológica del agua durante un ciclo de cultivo de camarón marino del grupo de cooperativas del sector El Zompopero, Bahía de Jiquilisco, Usulután.

Ramos, L. M., Vidal, L., Vilardy, S., & Saavedra, L. (2008). Análisis de la contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la Bahía de Santa Marta, Caribe colombiano. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3), 87-98.

Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015. 2015, 62. Sostenible, M. d. MA y. D.

Revilla, P., & Anthony, D. (2017). Sistema Tohá, para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad Cesar Vallejo.

Ríos-Tobón, S., Agudelo-Cadavid, R. M., & Gutiérrez-Builes, L. A. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 35(2), 236-247.

Sarango González, B. R. (2016). *Diseño e implementación de un sistema de humedales artificiales para la depuración de las aguas residuales, procedentes de una vivienda ubicada en la comunidad de San Vicente perteneciente al Cantón Yantzaza* (Bachelor's thesis).

- Soto de Paz, Gabriela E. (2014). ANÁLISIS DE LA CADENA DE VALOR DE LOS CARTUCHOS (*Zantedeschia aethiopica*) EN CUATRO DEPARTAMENTOS DE GUATEMALA. Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Licenciatura en Ciencias Agrícolas con énfasis en Gerencia Agrícola.
- Suárez, A., Agudelo, N., Rincón, J., & Millán, N. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Mutis*, 4(1), 8-14.
- Torres Martínez, D. L. (2013). Caracterización microbiológica del agua residual de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), ubicada en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada Sede Cajicá. Universidad Militar Nueva Granada,
- Vergara, D. A. R. (2015). Humedales de flujo subsuperficial como biofiltros de aguas residuales en Colombia. *Cuaderno Activa*, (7), 99-108.
- Viana Caicedo, D. F. (2015). *Respuesta a la aplicación de fertilización química complementado con bioestimulantes foliares en el cultivo de Cartucho Blanco (Zantedeschia aethiopica) en la zona de El Ángel, provincia del Carchi*(Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2015).
- Viana Caicedo, D. F. (2015). *Respuesta a la aplicación de fertilización química complementado con bioestimulantes foliares en el cultivo de Cartucho Blanco (Zantedeschia aethiopica) en la zona de El Ángel, provincia del Carchi* (Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2015).
- Vilanova, R., Santín, I., & Pedret, C. (2017). Control y operacion de estaciones depuradoras de aguas residuales: Modelado y simulacion. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 14(3), 217-233.

WWAP (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. París, UNESCO.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2018. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions. Paris, UNESCO."

Zurita Martínez, F., Rojas Bravo, D., Carreón Álvarez, A., & Gutiérrez Lomelí, M. (2015). Desinfección de aguas residuales en tres sistemas de humedales construidos híbridos. *Interciencia*, 40(6).