



Universidad
del Atlántico

CÓDIGO: FOR-DO-109

VERSIÓN: 0

FECHA: 03/06/2020

**AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL
TEXTO COMPLETO**

Puerto Colombia, **24 de Junio de 2021**

Señores

DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECAS

Universidad del Atlántico

Asunto: Autorización Trabajo de Grado

Cordial saludo,

Yo, **ARTURO JUNIOR NARVÁEZ MARTÍNEZ**, identificado(a) con **C.C. No. 1.045.681.568** de **BARRANQUILLA**, autor(a) del trabajo de grado titulado **EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA VÍA HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL** presentado y aprobado en el año **2021** como requisito para optar al título Profesional de **QUÍMICO**; autorizo al Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico para que, con fines académicos, la producción académica, literaria, intelectual de la Universidad del Atlántico sea divulgada a nivel nacional e internacional a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios del Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web institucional, en el Repositorio Digital y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad del Atlántico.
- Permitir consulta, reproducción y citación a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

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

Atentamente,

Firma

ARTURO JUNIOR NARVÁEZ MARTÍNEZ

C.C. No. 1.045.681.568 de BARRANQUILLA

DECLARACIÓN DE AUSENCIA DE PLAGIO EN TRABAJO ACADÉMICO PARA GRADO

Este documento debe ser diligenciado de manera clara y completa, sin tachaduras o enmendaduras y las firmas consignadas deben corresponder al (los) autor (es) identificado en el mismo.

Puerto Colombia, **24 de Junio de 2021**

Una vez obtenido el visto bueno del director del trabajo y los evaluadores, presento al **Departamento de Bibliotecas** el resultado académico de mi formación profesional o posgradual. Asimismo, declaro y entiendo lo siguiente:

- El trabajo académico es original y se realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, en consecuencia, la obra es de mi exclusiva autoría y detento la titularidad sobre la misma.
- Asumo total responsabilidad por el contenido del trabajo académico.
- Eximo a la Universidad del Atlántico, quien actúa como un tercero de buena fe, contra cualquier daño o perjuicio originado en la reclamación de los derechos de este documento, por parte de terceros.
- Las fuentes citadas han sido debidamente referenciadas en el mismo.
- El (los) autor (es) declara (n) que conoce (n) lo consignado en el trabajo académico debido a que contribuyeron en su elaboración y aprobaron esta versión adjunta.

Título del trabajo académico:	EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA VÍA HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL
Programa académico:	QUÍMICA

Firma de Autor 1:							
Nombres y Apellidos:	ARTURO JUNIOR NARVÁEZ MARTÍNEZ						
Documento de Identificación:	CC	X	CE		PA	Número:	BARRANQUILLA
Nacionalidad:	COLOMBIANA			Lugar de residencia:			
Dirección de residencia:	CRA 67 # 74 – 170						
Teléfono:	3000464			Celular:		3012894046	



FORMULARIO DESCRIPTIVO DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO DE GRADO	EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA VÍA HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL
AUTOR(A) (ES)	ARTURO JUNIOR NARVÁEZ MARTÍNEZ
DIRECTOR (A)	ARACELLY CASELLES OSORIO
CO-DIRECTOR (A)	LOURDES VARELA PRIETO
JURADOS	-
TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE	QUÍMICO
PROGRAMA	QUÍMICA
PREGRADO / POSTGRADO	PREGRADO
FACULTAD	CIENCIAS BÁSICAS
SEDE INSTITUCIONAL	SEDE NORTE
AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	2021
NÚMERO DE PÁGINAS	97
TIPO DE ILUSTRACIONES	TABLAS, GRÁFICOS, DIAGRAMAS, Y FOTOGRAFÍAS
MATERIAL ANEXO (VIDEO, AUDIO, MULTIMEDIA O PRODUCCIÓN ELECTRÓNICA)	NO APLICA
PREMIO O RECONOCIMIENTO	NO APLICA



**EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES DEL AGUA
RESIDUAL DOMÉSTICA VÍA HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUB
SUPERFICIAL HORIZONTAL**

Arturo Junior Narváez Martínez

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE QUÍMICO

**PROGRAMA DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO
PUERTO COLOMBIA**

2021



**EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES DEL AGUA
RESIDUAL DOMÉSTICA VÍA HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUB
SUPERFICIAL HORIZONTAL**

Arturo Junior Narváez Martínez

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE QUÍMICO

Aracelly Caselles Osorio

Biología, PH D

**PROGRAMA DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO
PUERTO COLOMBIA**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

4.4

DIRECTOR(A)

ARACELLY CASELLES OSORIO

JURADO(A)S

VÍCTOR VACCA JIMENO

MARÍA LILIANA OSPINA CASTRO

DEDICATORIA

Dedico esta tesis....

A mi amada hija Ariadna Sofía Narváez Rodríguez, por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más.

A mi madre Ibeth Martínez Chávez, por su esfuerzo y sacrificio, por darme una educación para mi futuro y por creer en mi pesar de los momentos difíciles

A mi esposa Katherine Rodríguez Herrera, por brindarme su apoyo, su amor incondicional y su dedicación para culminar este trabajo de grado

A toda mi familia y amigos que de una u otra manera me brindaron su apoyo para poder concluir con éxito este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Doy las gracias...

A Dios por darme la mano, la fuerza y la perseverancia para culminar este proyecto a pesar de los obstáculos.

A mi madre, mi padre, mi hermana, mi esposa y a toda mi familia por brindarme el apoyo, su tiempo y su comprensión.

A la Universidad Del Atlántico por ofrecerme las herramientas necesarias para culminar mi etapa formativa, en especial a la profesora Aracelly Caselles, Henry Casierra y al equipo de trabajo en el LAFA, por el apoyo técnico, sus guías y su entrega para culminar este trabajo de investigación.

Al profesor Álvaro Salas Infante por ilustrarme y aportarme sus conocimientos referentes al tratamiento del agua

Muchas gracias, este logro en gran parte es de ustedes.

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA VÍA HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL

RESUMEN

En este estudio, se evaluó experimentalmente, la eficiencia del tratamiento de agua residual doméstica con humedales construidos sembrados con dos tipos de plantas tropicales versus los sistemas sin plantas. Para ello, se construyeron seis (6) humedales de 1 m² de área con flujo sub superficial horizontal y se cuantificó la eliminación de materia orgánica (DQO), nitrógeno (N-NH₄⁺, N-NO₂⁻ y NO₃⁻), ortofosfatos (PO₄⁻³) y sulfatos (SO₄⁻²). Dos humedales fueron plantados con *Thalia geniculata*, otros dos con *Cyperus articulatus* y los últimos dos sistemas sin plantación. Durante seis meses de investigación se suministró un caudal de 29 L/día a cada unidad de humedal. La columna de agua residual dentro de cada celda alcanzó una altura de 0.3 metros con un tiempo de residencia hidráulico de 3 días. Las muestras del afluente y los efluentes, se recogieron tres veces por semana para determinar las concentraciones de contaminantes y nutrientes. También fueron medidos los parámetros de pH, conductividad eléctrica, potencial redox, turbiedad, oxígeno disuelto y temperatura.

Los resultados mostraron que en los sistemas plantados con *T. geniculata*, la eficiencia de eliminación de DQO y nutrientes, fue superior al 80%, mientras que los plantados con *C. articulatus* lograron reducciones promedio del 60%. Por otro lado, para los no plantados fue, en general, del 50%. El análisis de Anova multifactorial evidenció diferencias significativas (P<0.05) entre las especies de plantas y entre los humedales sin plantas. *T. geniculata* eliminó más Amonio, Nitritos, Nitratos, Ortofosfatos y Sulfatos (87%, 70%, 71%, 82% y 92% respectivamente) que *C. articulatus*, (62%, 41%, 52%, 69% y 72%, respectivamente) debido, probablemente, a la mayor tasa de crecimiento (> 1 cm/día), condiciones óxido-reductoras, aporte de carbono lábil y biomasa seca total producida (2.36 kg/m²). Estos resultados, sugieren a la especie *Thalia geniculata* con mejor rendimiento de remoción en estos humedales construidos en zonas tropicales.

Palabras claves: *Cyperus articulatus*, *Thalia geniculata*, Agua residual, Nutrientes, macrófitas, DQO, Eficiencia.

ABSTRACT

In this study, the efficiency of domestic wastewater treatment with constructed wetlands planted with two types of tropical plants versus systems without plants was evaluated experimentally. For this, six (6) wetlands of 1 m² of area with horizontal sub-surface flow were constructed and the elimination of organic matter (COD), nitrogen (N-NH₄⁺, N-NO₂⁻ and N-NO₃⁻), orthophosphates (PO₄⁻³) and sulfates (SO₄²⁻) was quantified. Two wetlands were planted with *Thalia geniculata*, two others with *Cyperus articulatus* and the last two systems without plantation. During six months of research, a flow of 29 L / day was provided to each wetland unit. The column of residual water within each cell reached a height of 0.3 meters with a hydraulic residence time of 3 days. The affluent samples and the effluents are recognized three times a week to determine the concentrations of contaminants, in the same way, the parameters of pH, electrical conductivity, redox potential, turbidity, dissolved oxygen and temperature were measured.

The results showed that in the systems planted with *T. geniculata*, the efficiency of elimination of COD and nutrients, was higher than 80%, while those planted with *C. articulatus* achieved average reductions of 60%. On the other hand for those not planted it was, in general, 50%. The analysis of multivariate Anova showed significant differences (P <0.05) between plant species and between wetlands without plants. *T. geniculata* eliminated more Ammonium, Nitrites, Nitrates, Orthophosphates and Sulphates (87%, 70%, 71%, 82% and 92% respectively) than *C. articulatus*, (62%, 41%, 52%, 72% and 68%). %, respectively) probably due to the higher growth rate (> 1 cm/día), oxide-reductive conditions, contribution of labile carbon and total dry biomass produced (2.36 kg/m²) in the six months that the experiment lasted. These results suggest the *Thalia geniculata* species with better removal performance in these constructed wetlands in tropical areas.

Keywords: *Cyperus articulatus*, *Thalia geniculata*, Wastewater, Nutrients, macrophytes, COD, Efficiency

CONTENIDO

RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN	13
2. MARCO DE REFERENCIA Y ESTADO DEL ARTE	15
2.1 MARCO TEÓRICO.....	15
2.1.1 Humedales construidos (HC).....	15
2.1.1.1 Clasificación de los Humedales Construidos.....	16
2.1.2 Modos de operación hidráulicos de un HC FSSH.....	18
2.1.3 Componentes de los HC FSSH.....	19
2.1.4 Microorganismos en los Humedales Construidos.....	26
2.1.5 Mecanismos de remoción de contaminantes en HC FSSH.....	27
2.1.5.1 Remoción de materia orgánica.....	28
2.1.5.2 Remoción de nitrógeno.....	29
2.1.5.3 Remoción de fósforo.....	31
2.1.6 Evapotranspiración (ET).....	32
2.2 MARCO LEGAL.....	32
2.3 MARCO CONTEXTUAL.....	33
3. METODOLOGÍA.....	35
3.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	35
3.2 DESCRIPCIÓN DE UNIDADES EXPERIMENTALES.....	35
3.3 ACLIMATACIÓN DE LAS MACRÓFITAS DE ESTUDIO.....	36
3.4 MEDICIÓN DE CAUDAL Y TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICO.....	36
3.5 MODO DE OPERACIÓN HIDRÁULICO.....	38
3.6 MUESTREO Y ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL EN HC FSSH.....	38
3.7 MEDICIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN (EVT) OBSERVADA.....	40
3.8 CUANTIFICACIÓN DE LA BIOMASA VEGETAL.....	40
3.9 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	41
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL.....	42

4.1.1 pH (Potencial de Hidrógeno).....	43
4.1.2 Temperatura.....	45
4.1.3 Potencial Redox o Potencial de Oxido-Reducción (ORP).....	45
4.1.4 Oxígeno Disuelto (OD).....	46
4.1.5 Evapotranspiración (EVT).....	48
4.1.6 Conductividad Eléctrica (CE).....	50
4.1.7 Turbiedad.....	51
4.1.8 Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	51
4.2 Crecimiento y obtención de biomasa de <i>T. geniculata</i> y <i>C. articulatus</i>	52
4.3 Eficiencia de eliminación de contaminantes en los HC FSSH.....	52
4.3.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	54
4.3.2 Nitrógeno amoniacal o Amonio (N-NH ₃ o NH ₄ ⁺).....	57
4.3.3 Nitritos (N-NO ₂).....	60
4.3.4 Nitratos (N-NO ₃).....	66
4.3.5 Ortofosfatos (PO ₄ ³⁻).....	70
4.3.6 Sulfatos (SO ₄ ²⁻).....	73
5. CONCLUSIONES.....	74
6. RECOMENDACIONES.....	76
7. REFERENCIAS.....	78
8. ANEXOS.....	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla taxonómica de <i>Cyperus articulatus</i>	23
Tabla 2. Tabla taxonómica de <i>Thalia geniculata</i>	26
Tabla 3. Características del metabolismo microbial según potencial Redox	27
Tabla 4. Especificaciones del diseño de los humedales de flujo subsuperficial horizontal	37
Tabla 5. Métodos de medición para calidad del agua residual	39
Tabla 6. Resultados de parámetros físicos y químicos	42
Tabla 7. Tasa de Evapotranspiración/Volumen reducido	50
Tabla 8. Biomasa seca, aérea y radicular de <i>T. geniculata</i> y <i>C. articulatus</i> cosechada durante el periodo de estudio	52
Tabla 9. Concentraciones promedio, en mg/L de los contaminantes	53
Tabla 10. Concentraciones típicas de aguas residuales domésticas	54
Tabla 11. Resultados Prueba Anova DQO entre sistemas plantados y no plantados	56
Tabla 12. Resultados análisis de varianza para DQO	56
Tabla 13. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Amonio	58
Tabla 14. Comparación de concentraciones promedio en mg/L de amonio, <i>Cyperus ligularis</i> vs <i>Cyperus articulatus</i>	59
Tabla 15. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Nitritos	66
Tabla 16. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Nitratos	69
Tabla 17. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Fosfatos	70
Tabla 18. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Sulfatos	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Humedal construido de flujo libre. Tomado de García y Corzo, 2008	16
Figura 2. Humedal construido de flujo subsuperficial vertical.	17
Figura 3. Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Horizontal (HC FSSH)	18
Figura 4. Fotografía <i>Cyperus articulatus</i> , imagen propia, 2017	23
Figura 5. Fotografía <i>Thalia geniculata</i> , imagen propia, 2017	26
Figura 6. Fotografía del Sistema experimental de Humedales Construidos de Flujo Sub Superficial Horizontal (HC FSSH)	36
Figura 7. Esquema en 3D del sistema experimental de Humedales Construido de Flujo Sub Superficial Horizontal HC FSSH (HC FSSH)	36
Figura 8. Tanque de sedimentación primaria de 760 litros	37
Figura 9. Celdas de humedales construidos	37
Figura 10. Sembrado de macrófitas plantadas	37
Figura 11. Grava utilizada como relleno de los HC FSSH	37
Figura 11. Poda de macrófitas	41

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Valores de evapotranspiración para <i>T. geniculata</i> , <i>C. articulatus</i> y Sin plantas	49
Gráfica 2. Valores de la cargas de DQO	53
Gráfica 3. Porcentajes de eliminación de DQO en los HC FSSH	53
Gráfica 4. Valores de las cargas de Amonio	57
Gráfica 5. Porcentaje de eliminación de Amonio en los HC FSSH	58
Gráfica 6. Valores de las cargas de Nitritos	60
Gráfica 7. Porcentaje de eliminación de Nitritos en los HC FSSH	61
Gráfica 8. Valores de las cargas de Nitratos	68
Gráfica 9. Porcentaje de eliminación de Nitratos en los HC FSSH	68
Gráfica 10. Valores de las cargas de Ortofosfatos	70
Gráfica 11. Porcentaje de eliminación de Ortofosfatos en los HC FSSH	71
Gráfica 12. Valores de las cargas de Sulfatos	73
Gráfica 13. Porcentaje de eliminación de Sulfatos en los HC FSSH	74

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES DEL
AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA VÍA HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO
SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL

ARTURO JUNIOR NARVÁEZ MARTÍNEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE QUÍMICO



PROGRAMA DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO
PUERTO COLOMBIA

2021

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES DEL
AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA VÍA HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO
SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL

ARTURO JUNIOR NARVÁEZ MARTÍNEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE QUÍMICO

DIRECTORA:

ARACELLY CASELLES OSORIO,

BIOLOGÍA, PH D

CO-DIRECTORA:

LOURDES VARELA PRIETO

PROGRAMA DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO
PUERTO COLOMBIA

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

4.4

DIRECTOR(A)

ARACELLY CASELLES OSORIO

JURADO(A)S

VÍCTOR VACCA JIMENO

MARÍA LILIANA OSPINA CASTRO

DEDICATORIA

Dedico esta tesis....

A mi amada hija Ariadna Sofía Narváez Rodríguez, por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más.

A mi madre Ibeth Martínez Chávez, por su esfuerzo y sacrificio, por darme una educación para mi futuro y por creer en mí pesar de los momentos difíciles

A mi esposa Katherine Rodríguez Herrera, por brindarme su apoyo, su amor incondicional y su dedicación para culminar este trabajo de grado

A toda mi familia y amigos que de una u otra manera me brindaron su apoyo para poder concluir con éxito este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Doy las gracias...

A Dios por darme la mano, la fuerza y la perseverancia para culminar este proyecto a pesar de los obstáculos.

A mi madre, mi padre, mi hermana, mi esposa y a toda mi familia por brindarme el apoyo, su tiempo y su comprensión.

A la Universidad Del Atlántico por ofrecerme las herramientas necesarias para culminar mi etapa formativa, en especial a la profesora Aracelly Caselles, Henry Casierra y al equipo de trabajo en el LAFA, por el apoyo técnico, sus guías y su entrega para culminar este trabajo de investigación.

Al profesor Álvaro Salas Infante por ilustrarme y aportarme sus conocimientos referentes al tratamiento del agua

Muchas gracias, este logro en gran parte es de ustedes.

RESUMEN

En este estudio, se evaluó experimentalmente, la eficiencia del tratamiento de agua residual doméstica con humedales construidos sembrados con dos tipos de plantas tropicales versus los sistemas sin plantas. Para ello, se construyeron seis (6) humedales de 1 m² de área con flujo sub superficial horizontal y se cuantificó la eliminación de materia orgánica (DQO), nitrógeno (N-NH₄⁺, N-NO₂⁻ y NO₃⁻), ortofosfatos (PO₄⁻³) y sulfatos (SO₄⁻²). Dos humedales fueron plantados con *Thalia geniculata*, otros dos con *Cyperus articulatus* y los últimos dos sistemas sin plantación. Durante seis meses de investigación se suministró un caudal de 29 L/día a cada unidad de humedal. La columna de agua residual dentro de cada celda alcanzó una altura de 0.3 metros con un tiempo de residencia hidráulico de 3 días. Las muestras del afluente y los efluentes, se recogieron tres veces por semana para determinar las concentraciones de contaminantes y nutrientes. También fueron medidos los parámetros de pH, conductividad eléctrica, potencial redox, turbiedad, oxígeno disuelto y temperatura.

Los resultados mostraron que en los sistemas plantados con *T. geniculata*, la eficiencia de eliminación de DQO y nutrientes, fue superior al 80%, mientras que los plantados con *C. articulatus* lograron reducciones promedio del 60%. Por otro lado, para los no plantados fue, en general, del 50%. El análisis de Anova multifactorial evidenció diferencias significativas (P<0.05) entre las especies de plantas y entre los humedales sin plantas. *T. geniculata* eliminó más Amonio, Nitritos, Nitratos, Ortofosfatos y Sulfatos (87%, 70%, 71%, 82% y 92% respectivamente) que *C. articulatus*, (62%, 41%, 52%, 69% y 72%, respectivamente) debido, probablemente, a la mayor tasa de crecimiento (> 1 cm/día), condiciones óxido-reductivas, aporte de carbono lábil y biomasa seca total producida (2.36 kg/m²). Estos resultados, sugieren a la especie *Thalia geniculata* con mejor rendimiento de remoción en estos humedales construidos en zonas tropicales.

Palabras claves: *Cyperus articulatus*, *Thalia geniculata*, Agua residual, Nutrientes, macrófitas, DQO, Eficiencia.

ABSTRACT

In this study, the efficiency of domestic wastewater treatment with constructed wetlands planted with two types of tropical plants versus systems without plants was evaluated experimentally. For this, six (6) wetlands of 1 m² of area with horizontal sub-surface flow were constructed and the elimination of organic matter (COD), nitrogen (N-NH₄⁺, N-NO₂⁻ and N-NO₃⁻), orthophosphates (PO₄⁻³) and sulfates (SO₄²⁻) was quantified. Two wetlands were planted with *Thalia geniculata*, two others with *Cyperus articulatus* and the last two systems without plantation. During six months of research, a flow of 29 L / day was provided to each wetland unit. The column of residual water within each cell reached a height of 0.3 meters with a hydraulic residence time of 3 days. The affluent samples and the effluents are recognized three times a week to determine the concentrations of contaminants, in the same way, the parameters of pH, electrical conductivity, redox potential, turbidity, dissolved oxygen and temperature were measured.

The results showed that in the systems planted with *T. geniculata*, the efficiency of elimination of COD and nutrients, was higher than 80%, while those planted with *C. articulatus* achieved average reductions of 60%. On the other hand for those not planted it was, in general, 50%. The analysis of multivariate Anova showed significant differences (P <0.05) between plant species and between wetlands without plants. *T. geniculata* eliminated more Ammonium, Nitrites, Nitrates, Orthophosphates and Sulphates (87%, 70%, 71%, 82% and 92% respectively) than *C. articulatus*, (62%, 41%, 52%, 72% and 68%). %, respectively) probably due to the higher growth rate (> 1 cm/día), oxide-reductive conditions, contribution of labile carbon and total dry biomass produced (2.36 kg/m²) in the six months that the experiment lasted. These results suggest the *Thalia geniculata* species with better removal performance in these constructed wetlands in tropical areas.

Keywords: *Cyperus articulatus*, *Thalia geniculata*, Wastewater, Nutrients, macrophytes, COD, Efficiency

CONTENIDO

RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN	13
2. MARCO DE REFERENCIA Y ESTADO DEL ARTE	15
2.1 MARCO TEÓRICO.....	15
2.1.1 Humedales construidos (HC).....	15
2.1.1.1 Clasificación de los Humedales Construidos.....	16
2.1.2 Modos de operación hidráulicos de un HC FSSH.....	18
2.1.3 Componentes de los HC FSSH.....	19
2.1.4 Microorganismos en los Humedales Construidos.....	26
2.1.5 Mecanismos de remoción de contaminantes en HC FSSH.....	27
2.1.5.1 Remoción de materia orgánica.....	28
2.1.5.2 Remoción de nitrógeno.....	29
2.1.5.3 Remoción de fósforo.....	31
2.1.6 Evapotranspiración (ET).....	32
2.2 MARCO LEGAL.....	32
2.3 MARCO CONTEXTUAL.....	33
3. METODOLOGÍA.....	35
3.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	35
3.2 DESCRIPCIÓN DE UNIDADES EXPERIMENTALES.....	35
3.3 ACLIMATACIÓN DE LAS MACRÓFITAS DE ESTUDIO.....	36
3.4 MEDICIÓN DE CAUDAL Y TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICO.....	36
3.5 MODO DE OPERACIÓN HIDRÁULICO.....	38
3.6 MUESTREO Y ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL EN HC FSSH.....	38
3.7 MEDICIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN (EVT) OBSERVADA.....	40
3.8 CUANTIFICACIÓN DE LA BIOMASA VEGETAL.....	40
3.9 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	41
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL.....	42
4.1.1 pH (Potencial de Hidrógeno).....	43

4.1.2 Temperatura.....	45
4.1.3 Potencial Redox o Potencial de Oxido-Reducción (ORP).....	45
4.1.4 Oxígeno Disuelto (OD).....	46
4.1.5 Evapotranspiración (EVT).....	48
4.1.6 Conductividad Eléctrica (CE).....	50
4.1.7 Turbiedad.....	51
4.1.8 Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	51
4.2 Crecimiento y obtención de biomasa de <i>T. geniculata</i> y <i>C. articulatus</i>	52
4.3 Eficiencia de eliminación de contaminantes en los HC FSSH.....	52
4.3.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	54
4.3.2 Nitrógeno amoniacal o Amonio (N-NH ₃ o NH ₄ ⁺).....	57
4.3.3 Nitritos (N-NO ₂).....	60
4.3.4 Nitratos (N-NO ₃).....	66
4.3.5 Ortofosfatos (PO ₄ ³⁻).....	70
4.3.6 Sulfatos (SO ₄ ²⁻).....	73
5. CONCLUSIONES.....	74
6. RECOMENDACIONES.....	76
7. REFERENCIAS.....	78
8. ANEXOS.....	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla taxonómica de <i>Cyperus articulatus</i>	23
Tabla 2. Tabla taxonómica de <i>Thalia geniculata</i>	26
Tabla 3. Características del metabolismo microbial según potencial Redox	27
Tabla 4. Especificaciones del diseño de los humedales de flujo subsuperficial horizontal	37
Tabla 5. Métodos de medición para calidad del agua residual	39
Tabla 6. Resultados de parámetros físicos y químicos	42
Tabla 7. Tasa de Evapotranspiración/Volumen reducido	50
Tabla 8. Biomasa seca, aérea y radicular de <i>T. geniculata</i> y <i>C. articulatus</i> cosechada durante el periodo de estudio	52
Tabla 9. Concentraciones promedio, en mg/L de los contaminantes	53
Tabla 10. Concentraciones típicas de aguas residuales domésticas	54
Tabla 11. Resultados Prueba Anova DQO entre sistemas plantados y no plantados	56
Tabla 12. Resultados análisis de varianza para DQO	56
Tabla 13. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Amonio	58
Tabla 14. Comparación de concentraciones promedio en mg/L de amonio, <i>Cyperus ligularis</i> vs <i>Cyperus articulatus</i>	59
Tabla 15. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Nitritos	66
Tabla 16. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Nitratos	69
Tabla 17. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Fosfatos	70
Tabla 18. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Sulfatos	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Humedal construido de flujo libre. Tomado de García y Corzo, 2008	16
Figura 2. Humedal construido de flujo subsuperficial vertical.	17
Figura 3. Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Horizontal (HC FSSH)	18
Figura 4. Fotografía <i>Cyperus articulatus</i> , imagen propia, 2017	23
Figura 5. Fotografía <i>Thalia geniculata</i> , imagen propia, 2017	26
Figura 6. Fotografía del Sistema experimental de Humedales Construidos de Flujo Sub Superficial Horizontal (HC FSSH)	36
Figura 7. Esquema en 3D del sistema experimental de Humedales Construido de Flujo Sub Superficial Horizontal HC FSSH (HC FSSH)	36
Figura 8. Tanque de sedimentación primaria de 760 litros	37
Figura 9. Celdas de humedales construidos	37
Figura 10. Sembrado de macrófitas plantadas	37
Figura 11. Grava utilizada como relleno de los HC FSSH	37
Figura 11. Poda de macrófitas	41

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Valores de evapotranspiración para <i>T. geniculata</i> , <i>C. articulatus</i> y Sin plantas	49
Gráfica 2. Valores de la cargas de DQO	53
Gráfica 3. Porcentajes de eliminación de DQO en los HC FSSH	53
Gráfica 4. Valores de las cargas de Amonio	57
Gráfica 5. Porcentaje de eliminación de Amonio en los HC FSSH	58
Gráfica 6. Valores de las cargas de Nitritos	60
Gráfica 7. Porcentaje de eliminación de Nitritos en los HC FSSH	61
Gráfica 8. Valores de las cargas de Nitratos	68
Gráfica 9. Porcentaje de eliminación de Nitratos en los HC FSSH	68
Gráfica 10. Valores de las cargas de Ortofosfatos	70
Gráfica 11. Porcentaje de eliminación de Ortofosfatos en los HC FSSH	71
Gráfica 12. Valores de las cargas de Sulfatos	73
Gráfica 13. Porcentaje de eliminación de Sulfatos en los HC FSSH	74

1. INTRODUCCIÓN

La falta de abastecimiento adecuado de agua potable y de servicios de saneamiento, causa cerca de 1 millón de muertes al año, de las cuales, la mayoría se registran en naciones en vía de desarrollo [1]. Estos problemas de salud se dan por causa de las enfermedades transmitidas a través de los cuerpos de agua contaminados, asociado al inadecuado e inexistente tratamiento de las aguas residuales. Estos cuerpos hídricos son receptores de todo tipo de vertimientos, disminuyendo su calidad, poniendo en riesgo la salud de los habitantes, reduciendo la productividad y aumentando los costos de tratamiento del recurso hídrico; En Colombia, Aproximadamente el 48.2% de los municipios cuentan con algún sistema de tratamiento para el correcto manejo de sus aguas residuales [2].

A nivel rural, o en poblaciones aisladas del país, la disposición de redes de alcantarillado y sistemas convencionales de tratamiento son inaccesibles, condición que propicia el uso y consumo de agua de mala calidad, a través de cuerpos de agua contaminados, con la posibilidad de contraer enfermedades [3]. Para encontrar soluciones a este tipo de problemática, se cuenta con diferentes alternativas para el tratamiento de las aguas residuales, sin embargo la falta de información y conocimiento sobre el funcionamiento, operación y mantenimiento de dichas tecnologías, sumado a la inadecuada adaptación al medio y la precaria capacidad local para su sostenimiento, han llevado a la ejecución de sistemas totalmente inoperantes.

La tecnología de tratamiento más adecuada en dichas zonas, corresponde a sistemas naturales como la fitodepuración, debido a sus bajos costos, cómoda operación y fácil mantenimiento. Los humedales construidos (HC) constituyen una tecnología alternativa para reducir la contaminación por aguas residuales ya que son sencillos de construir, operar y mantener. Mediante procesos físicos, químicos y biológicos el sustrato, los microorganismos y las plantas depuran el agua residual (doméstica y no doméstica) eliminando contaminantes como materia orgánica, nutrientes, patógenos y demás sustancias

presentes en ella. Esta tecnología es considerada eficiente para eliminar materia orgánica (> 90%), sólidos suspendidos totales (> 90%), y nutrientes (40-60%). [4]

El papel de las macrófitas en la remoción de contaminantes es uno de los aspectos más controversiales de la tecnología de HC; muchos estudios han encontrado poca o ninguna diferencia entre el rendimiento del tratamiento de sistemas plantados y no plantados a pequeña escala, además, no se conoce cuantitativamente la cantidad de oxígeno liberado por las raíces de las plantas [5],[6]. Las macrófitas cumplen diferentes funciones a través del complejo “sustrato-raíces-microorganismos”, que facilita el desarrollo de biopelículas responsables de las reacciones bioquímicas de transformación de contaminantes, es decir proporcionan un medio de soporte para el crecimiento microbiano; sumado a esto, tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran sus rizomas, creando regiones aeróbicas que contribuyen a las diversas reacciones bioquímicas, además, las macrófitas pueden asimilar nutrientes (en especial nitrógeno y fósforo), que son retirados del agua residual e incorporados al tejido vegetal a través de sus rutas metabólicas. [7], [8], [9], [10].

En la región del Caribe colombiano se han llevado a cabo investigaciones con sistemas de HC, aportando información para el desarrollo de estos sistemas de fitodepuración, sin embargo es necesario generar mayor aporte para entender el funcionamiento de esta tecnología alternativa en las condiciones ambientales propias del trópico caribeño, el cual presenta variedad de macrófitas, cuyo potencial fitodepurador en humedales construidos es aún desconocido. Por ello es pertinente realizar investigaciones para la viable aplicación en pequeñas poblaciones, áreas aisladas o rurales en esta región del país.

Con el propósito de evaluar, tanto el efecto, como el tipo de macrófita en la eficiencia de eliminación de contaminantes y nutrientes de agua residual doméstica, se realizó un estudio de un sistema de humedales construidos plantados con *Thalia geniculata* y *Cyperus articulatus* en condiciones climáticas de la región del Caribe colombiano. La investigación

se realizó con el agua residual producida por la comunidad de la Universidad del Atlántico en Puerto Colombia-Atlántico (Colombia).

2. MARCO DE REFERENCIA Y ESTADO DEL ARTE

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Humedales Construidos (HC)

Los humedales construidos son sistemas de tratamiento diseñados para la depuración de agua residual. Albergan el conjunto de vegetación, agua y sustrato bajo condiciones controladas, sin estar sujetos a las limitaciones de vertidos a ecosistemas. Tienen base impermeable con un lecho de gravas, suelo u otro medio para el desarrollo de las plantas o macrófitas [3],[11],[16].

Otra definición es la siguiente: *“Sistemas de ingeniería, diseñados y construidos para utilizar las funciones naturales de los humedales, de la vegetación, los suelos y de sus poblaciones microbianas para el tratamiento de contaminantes en aguas residuales”* (Technical and regulatory guidance document for constructed treatment wetlands, 2003, p 29) citado en [12].

Los HC son sistemas de tratamiento que pretenden simular los mecanismos de depuración de los humedales naturales para las aguas residuales, en estos, se presentan procesos físicos, químicos y biológicos, que ocurren cuando interactúa el agua con el suelo, las plantas (macrófitas), los microorganismos y la atmósfera; como resultado, se dan procesos de sedimentación, filtración, adsorción, degradación biológica, fotosíntesis, oxidación y toma de nutrientes a través de la vegetación [13]. Esta tecnología cuenta con funciones combinadas de tratamiento secundario y terciario de depuración de aguas residuales, ya que es un sistema biológico, donde microorganismos aeróbicos y anaerobios descomponen la materia orgánica y se combinan con la retención de nutrientes.[12]

2.1.1.1 Clasificación de los Humedales Construidos

Existen dos tipos de HC diseñados para el tratamiento de aguas residuales dependiendo de la forma como el agua se distribuye en el lecho del humedal, los de flujo superficial (FS) y los de flujo subsuperficial (FSS). En los de FS, el agua circula por encima de la superficie del sustrato y está en contacto permanente con la atmósfera, mientras que en el de FSS, el agua circula subterráneamente por debajo del sustrato sin aflorar a la superficie. [14]

Humedales Construidos de Flujo Superficial (HC FS)

Estos sistemas consisten en estanques o canales, con una capa impermeabilizante para prevenir la filtración, un suelo u otro medio a fin de soportar la vegetación emergente, y la lámina de agua a una profundidad relativamente baja (0.1 a 0.6 m) (Figura 1) [2]. Los humedales con flujo superficial generalmente, son diseñados con cargas orgánicas inferiores a 6 DBO₅ g/m²día [14], [15].

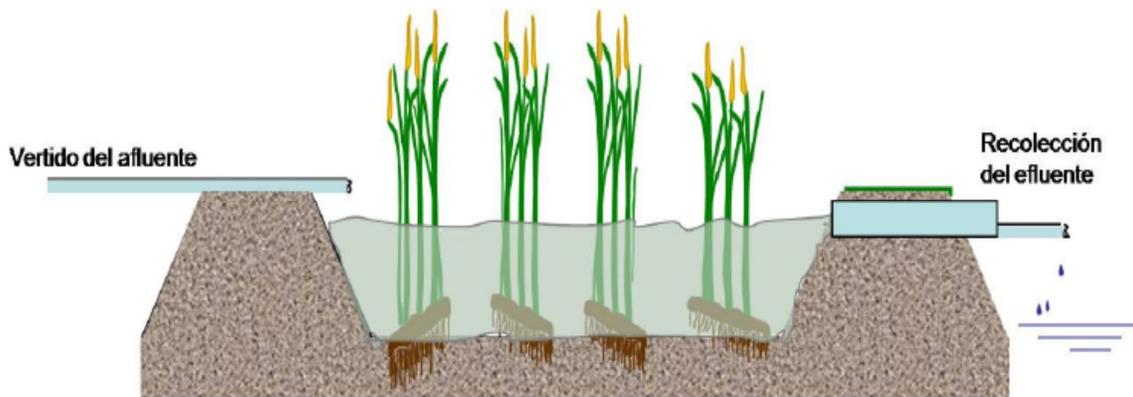


Figura 1. Humedal construido de flujo libre. Tomado de García y Corzo, 2008. [16]

Humedales construidos de flujo subsuperficial (HC FSS)

Los HC FSS, llamados lechos filtrantes con grava, constan de canales impermeabilizados compuestos por capas de suelo y grava, los cuales se utilizan como soporte de las macrófitas. En estos sistemas la lámina de agua se mantiene por debajo de la superficie del sustrato, permitiendo que la biopelícula crezca sobre el sustrato saturado de agua y sea la responsable, en gran parte, de los procesos biológicos que ocurren en los humedales

construidos. Según su configuración hidráulica, pueden ser de flujo horizontal o flujo vertical. [17]

Humedales construidos de flujo subsuperficial vertical (HC FSSV)

En estos sistemas, el modo de ingreso de agua residual se realiza en periodos de llenado y vaciado, a pulsos o por cargas de caudal a toda la superficie. A nivel de suelo, estos sistemas disponen de una conexión de tuberías que trasporta el agua a través del lecho a una salida. La profundidad efectiva del medio filtrante es de alrededor de 1 m (Figura 2) [13].

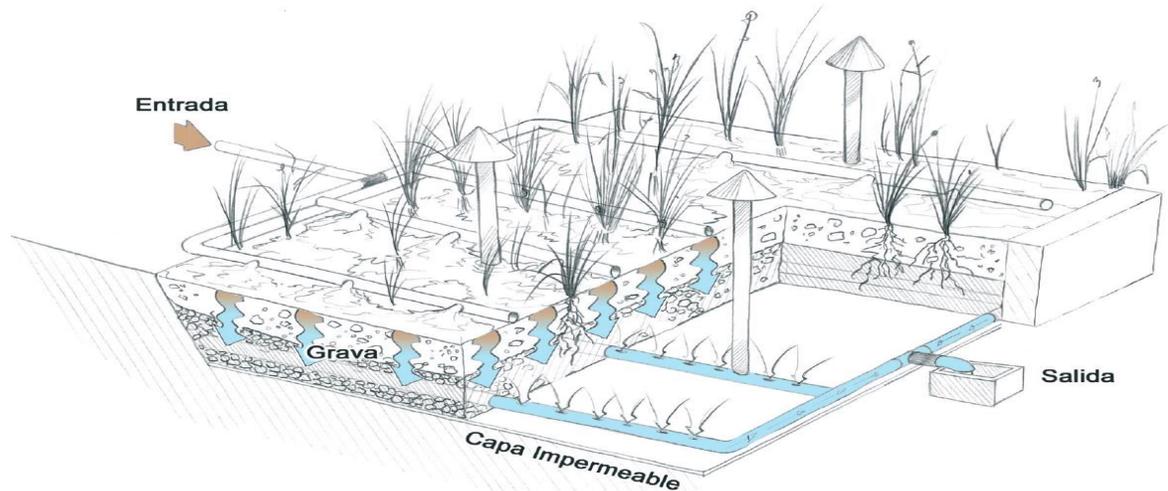


Figura 2. Humedal construido de flujo subsuperficial vertical. Tomado de Delgadillo, 2010. [18]

Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HC FSSH)

Se llaman de flujo horizontal debido a que el agua residual fluye lentamente a través del medio granular y las raíces de la vegetación, desde una zona de entrada a otra de salida en forma horizontal. El agua en contacto con los rizomas y raíces de las macrófitas, llega a la zona del control de nivel en la salida, en donde se recoge en una red de drenaje (Figura 3). Los sistemas de FSSH se diseñan con el objeto de eliminar materia orgánica, nutrientes

(fósforo y nitrógeno) y, agentes patógenos contenidos en el agua residual [19], [20], [3]. En este tipo de celdas el lecho es relativamente poco profundo (0.3 a 0.6 m) con revestimiento sintético y rellenos con grava como medio poroso o de soporte; se utilizan con macrófitas que proporcionan un área de superficie para el crecimiento microbiano.



Figura 3. Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Horizontal. Tomado de Delgadillo, 2010. [18]

2.1.2 Modos de operación hidráulicos de un HC FSSH

Los modos de operación hidráulicos se refieren a la forma en la que el agua residual llega al sistema, para su operación. Se conocen tres modos de operación hidráulica: continuo, intermitente y por lotes.

Modo de operación en Continuo

El flujo del agua en el humedal es constante con una corriente estable y en condiciones de inundación permanente. Bajo este modo de operación hidráulica, prevalecen condiciones anaeróbicas. [4]

Modo de operación intermitente

El flujo de agua es descargada por pulsos, desplazando un volumen de agua en un tiempo determinado. De esta forma, el humedal permanece siempre inundado y puede propiciarse un flujo turbulento interno en comparación con un sistema operado en forma continua [21]. Este tipo de operación en los humedales construidos es sugerido para sistemas a gran escala y ha sido escogido como el modo de operación utilizada en este proyecto de investigación.

Modo de operación por lotes

En el modo de operación por lotes o también llamado modo batch, el humedal tiene una fase de llenado y otra de vaciado, facilitando la difusión de oxígeno disuelto del medio poroso, y por tanto, favoreciendo condiciones de oxigenación para un mayor rendimiento respecto del modo continuo.

2.1.3 Componentes de los HC FSSH

Los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal están constituidos básicamente por cuatro elementos: agua residual, sustrato, vegetación y microorganismos.

Agua Residual

Una definición de aguas residuales domésticas viene dada por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en la resolución 0631 (2015):

“Aguas Residuales Domésticas – ARD: Son las procedentes de los hogares, así como de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que 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 cocina 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)” (p.2) [22]*

Por otra parte, la FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2006), define aguas residuales como:

“Agua que no tiene valor inmediato para el fin para el que se utilizó ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella. No obstante, las aguas residuales de un usuario pueden servir de suministro para otro usuario en otro lugar”. (p.56) [12]

Los principales componentes de las aguas residuales domésticas pueden ser de origen sintético o animal. Las proteínas, lípidos e hidratos de carbono son los compuestos orgánicos que principales en este tipo de aguas. Los sólidos de origen mineral como las arenas, gravas y compuestos como sulfatos y carbonatos se catalogan como componentes inorgánicos en las aguas residuales. Los gases que se encuentran en las aguas residuales son el oxígeno disuelto (O₂), metano (CH₄), anhídrido carbónico (CO₂) y ácido sulfhídrico (H₂S) entre otros.[12]

Sustrato (medio granular)

En los humedales construidos, el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, y sedimentos. La principal característica del medio granular se basa en tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él [83]. El sustrato y sedimentos en los humedales construidos son importantes por varias razones:

- Soportan a muchos de los microorganismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento (flujo) del agua a través del humedal, permitiendo una mayor o menor conductividad hidráulica.
- Diversas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato. [23]

De forma indirecta, el medio granular contribuye a la eliminación de contaminantes y/o nutrientes mediante interacciones físicas y químicas, además sirve de soporte de crecimiento de las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad

biodegradadora (biopelículas). El sustrato debe presentar poca o nula aportación de sales al contenido de agua residual evitando así el aumento de la conductividad eléctrica de la misma, para ello se obtiene sustrato previamente lavado. La grava utilizada como sustrato debe presentar características de tamaño efectivo (mm), porosidad (%) y conductividad hidráulica (m/día) indicados que se ajusten al diseño elegido para el buen funcionamiento de la celda o humedal construido de flujo subsuperficial horizontal. [18]

Vegetación (Macrófitas)

Las plantas acuáticas del tipo macrófitas, se han empleado para el tratamiento secundario alternativo y complementario de aguas residuales, resultando ser eficiente en la eliminación de sustancias orgánicas así como nutrientes y metales pesados. [12]

El papel de la vegetación en los HC está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el área radicular, creando regiones aerobias, facilita la formación de películas bacterianas, que utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación, entre otras [17],[33],[2].

Las plantas macrófitas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas, favoreciendo la sedimentación de los sólidos suspendidos
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- Asimilan nutrientes (en especial nitrógeno y fósforo), que son retirados del medio e incorporados al tejido vegetal.
- Controlan el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar.

- Actúan a modo de soporte y dan lugar a sitios para la fijación y el desarrollo de biopelículas de microorganismos, que actúan depurando el agua mediante procesos de degradación. [18]

Descripción general de las plantas utilizadas en la investigación

En este estudio se implementaron las macrófitas *Thalia geniculata* L y *Cyperus articulatus* L.

- ***Cyperus articulatus* L**

Es una planta perenne rizomatosa, hidrofita tropical y helfítica, conocida como “piripiri”, que es nativa de África, Asia, Australia, América del Norte y del Sur y naturalizada en otros lugares. Habita en estanques, zanjas, ríos, pantanos, lagos y orillas de canales de aguas poco profundas, mientras que forma grandes pantanos de junco en suelos temporales no inundados [24]. La planta se caracteriza por un tallo segmentado, que crece rápidamente a una altura de hasta 2.0 m [25], Con brácteas de inflorescencias pardas, ramificadas, terminales cortas (5-9 mm), rígidas y afiladas. [26]

Tamaño: de 1 a 2 m de alto por hasta 10-15 cm de ancho.

Tallo: atenuado (con márgenes rectos o cóncavos que forman un ángulo menor de 45°), por lo general conspicuamente septado (con divisiones interiores), ascendentes (ramas dirigidas hacia arriba) de 5 a 10 cm o más de alto desde un rizoma (tallo modificado) subterráneo, duro y escamoso.

Hojas: vainas (base de hojas, en este caso una estructura tubular que rodea al tallo) sin láminas en la base de 2 a 3, hasta de 25 cm de largo; márgenes y costilla media en el envés escábrida (algo áspero al tacto) y con nervaduras transversales prominentes.

Inflorescencia: brácteas (hoja modificada en la inflorescencia) raramente de más de 10 mm, escuamiformes (con forma de escama), erectas, la inferior se presenta como una continuación del tallo. Rayos, la mayoría de 4 a 12 cm de largo; rayos secundarios a veces desarrollados hasta 2 cm de largo. Espigas con perfil redondeado o subumbeladas

(donde casi todas las flores se originan en un solo punto); raquis (eje) de 5 a 15 mm de largo.

Flores: espiguillas (espiga secundaria y generalmente más pequeña) la mayoría de 10 a 35 mm de largo por 1 a 1.5 mm de ancho, laxamente ascendentes, linear-elípticas, comprimidas, pardo-amarillento-rojizas; raquilla (eje de una espiguilla) recta, persistente, con alas angostas. Glumas (par de brácteas que acompañan a la espiguilla) de 3 a 3.5 mm de largo por 1 a 1.5 mm de ancho, ovado-elípticas, agudas, de 5 a 7 veces nervadas tardíamente deciduas. [27]

Tabla 1.Tabla taxonómica de *Cyperus articulatus* [28]

Nombre científico	<i>Cyperus articulatus</i>
Reino	Plantae
División	Tracheophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Poales
Familia	Cyperaceae
Género	<i>Cyperus</i> L
Especie	<i>articulatus</i>



Figura 4. Fotografía *Cyperus articulatus* (imagen propia)

- **Thalia geniculata L**

Thalia geniculata, denominada “peguajó”, es una especie del género *Thalia*, perteneciente a la familia Marantaceae. Es una robusta hierba palustre perenne, que habita en los pantanos tropicales y subtropicales de América. Es una planta acuática rizomatosa, de hasta 3 metros de altura. [116]

La raíz: presenta largos pecíolos envainantes y esponjosos, que portan grandes hojas, de hasta 63 centímetros de largo por 26 centímetros de ancho, con la base redondeada y el ápice en punta. La mayoría son basales, de forma variable, puntiagudas y con la base

redondeada, sin pelos; el pulvínulo de un tono de verde. El cáliz de 3 sépalos pequeños (hasta 2 milímetros de largo), parecidos a escamas, translúcidos o verdosos, con el margen seco y con pelillos; la corola de 3 pétalos de hasta 1.3 centímetros de largo, morados, raramente con pelillos; uno de los estambres estériles (estaminodio), parecido a un pétalo más grande y vistoso que los verdaderos pétalos (de hasta 2 centímetros de largo), otro de los estambres estériles es firme y carnoso y presenta una pestaña angosta y doblada hacia atrás. El fruto es una cápsula de 1 centímetro, casi esférica. [117]

Inflorescencia: las flores se disponen en pares, sésiles, sobre ejes en zig-zag, ramificados, formando una inflorescencia terminal. En la base de cada par de flores se encuentra una bráctea caediza, verde o rayada de morado, de hasta 3 centímetros de largo, a veces cubierta de pelillos [29].

Tabla 2. Tabla taxonómica de *Thalia geniculata*

Nombre científico	<i>Thalia geniculata</i>
Reino	Plantae
División	Tracheophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Zingiberales
Familia	Marantaceae
Género	Thalia
Especie	<i>geniculata</i>



Figura 5. Fotografía *Thalia geniculata* (imagen propia)

2.1.4 Microorganismos en los Humedales Construidos

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. Estos se encuentran en el biofilm de los humedales construidos como bacterias, levaduras, hongos y protozoarios; dichos microorganismos se desarrollan, sobre el medio de soporte y adheridos, en mayor proporción, a las raíces de las macrófitas [30]. En la zona superior del humedal construido, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas se desarrollan colonias de microorganismos aerobios.

En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. Muchas especies microbianas son facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales [74]. En la Tabla 3 se muestra los rangos de potencial redox en los cuales se presentan las clases de metabolismo microbial. Esta tabla permite, según los valores observados de potencial redox, observar e inferir los posibles ambientes y procesos metabólicos ocurridos dentro de los humedales construidos, además de las actividades microbianas presentadas y la implicación de estas en la remoción de los contaminantes y nutrientes. [32], [77], [58].

Tabla 3. Características del metabolismo microbial según potencial Redox. Tomado de Marín, Correa y Paredes (2010)

Anaerobio		Facultativo				Aerobio			Metabolismo microbial
-300	-200	-100	0	+100	+200	+300	+400	+500	Potencial redox (mV)

Los microorganismos realizan la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza. La actividad microbiana tiene la función de transformar las sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles, alterando el pH, potencial de óxido-reducción, reduciendo contaminantes y afectando así a la capacidad de proceso del humedal [2]. Los microorganismos heterótrofos necesitan material orgánico como fuente de carbono para sintetizar nuevas células, en cambio, los autótrofos requieren de dióxido de carbono como fuente de carbono. Ambos grupos utilizan luz solar o una reacción química de oxidación-reducción como fuente de energía y son catalogados como fotótrofos y quimiótrofos, respectivamente. [18]

2.1.5 Mecanismos de remoción de contaminantes en HC FSSH

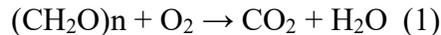
Se mencionara a continuación algunos de los más importantes contaminantes en las aguas residuales domésticas y sus mecanismos de remoción dentro de los HC FSSH.

2.1.5.1 Remoción de materia orgánica

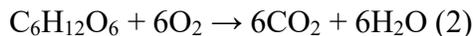
La materia orgánica se presenta en forma particulada y disuelta. El material en suspensión se elimina, principalmente, mediante procesos físicos de filtración y posterior sedimentación a través del medio granular dentro de los HC; la eliminación de materia orgánica disuelta tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. La biodegradación es realizada mayoritariamente por los microorganismos, ayudados por la captación de las plantas y la presencia de oxígeno [30], [110].

Degradación aeróbica

La oxidación de la materia orgánica soluble es realizada por *bacterias heterotróficas aeróbicas* (Ecuación 1 y 2) [31].



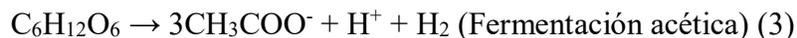
Donde $(\text{CH}_2\text{O})_n$, representa a la materia orgánica soluble.

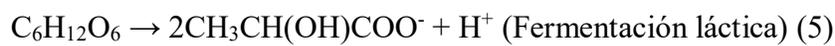


La degradación aeróbica se regirá por la cantidad de materia orgánica disponible y la cantidad suficiente de oxígeno. El rendimiento de la oxidación biológica aeróbica disminuye al presentarse un reducido suministro de oxígeno. [12]

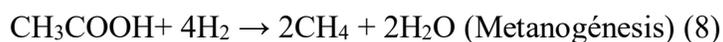
Degradación anaeróbica

En los HC FSSH, cuando disminuye la concentración de oxígeno disuelto, predominan procesos anaerobios. La degradación anaerobia de la materia orgánica es un proceso en varias etapas que puede ser desarrollado por *bacterias heterotróficas facultativas o anaerobias "obligadas"* dentro de los HC. En la primera etapa los productos finales primarios de las fermentaciones son ácidos grasos como ácido acético, butírico y láctico (ecuaciones 3, 4 y 5), alcoholes (ecuación 6) y gases como el CO_2 y H_2 . [11],[30].





El ácido acético es un compuesto primario formado en muchos suelos saturados y en sedimentos presentes en humedales. Bacterias *anaerobias estrictas*, tanto *sulfatoreductoras* (ecuación 7) como *metanogeneratoras o metanogénicas* (ecuación 8), utilizan los productos finales primarios generando gas sulfhídrico y metano (ecuación 9).[51], [12].



Las bacterias sulfatoreductoras (SBR), utilizan como principales donantes de electrones al hidrógeno y las bacterias metanogénicas al acetato. Estas bacterias compiten por el mismo sustrato pero dependiendo de las condiciones ambientales y químicas que se encuentren en el humedal, unas predominarán más que otras. Las SBR realizan reducción de sulfato desasimilativo tomando como agente oxidante y aceptor final de electrones al sulfato, reduciéndolo a compuestos de sulfuro [30]. Las bacterias metanogénicas realizan descarboxilación del acetato a expensas de hidrógeno para formar metano, el cual se libera a la atmósfera o se oxida a CO₂ por bacterias metanotróficas tan pronto ingresa a la zona de oxígeno [4].

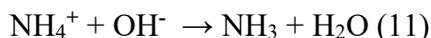
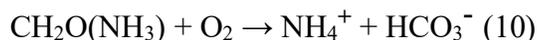
2.1.5.2 Remoción de nitrógeno

Los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la denitrificación (o desnitrificación), que ocurren en diferentes zonas del sustrato del HC [32],[11],[17]. El nitrógeno tiene un complejo ciclo biogeoquímico el cual se divide en diferentes pasos, iniciando con la *amonificación*, seguido por la *nitrificación* y *desnitrificación* [18].

Existen otros procesos que contribuyen a la eliminación del nitrógeno, como la adsorción y la asimilación realizada por las macrófitas y la biopelícula, el cual es incorporado a la biomasa y por tanto eliminado del agua residual [16].

Amonificación

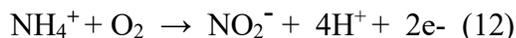
El nitrógeno amoniacal se produce toda vez que compuestos que contienen nitrógeno se hidrolizan para formar aminoácidos que se pueden descomponer (desaminación oxidativa), para producir iones amonio (NH_4^+); a este proceso se le conoce como *amonificación*, *hidrólisis* o *mineralización* [11]. En el agua residual, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio o en forma de un compuesto inestable, que es fácilmente transformado a amonio (ecuación 10 y 11) [18].



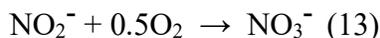
La amonificación en los sistemas de HC FSSH ocurre tanto en zonas aeróbicas, como anaeróbicas, debido a la mineralización del nitrógeno contenido en los compuestos orgánicos que contiene el agua residual doméstica. [18]

Nitrificación

En la nitrificación dentro de los HC, el ion amonio se oxida en un proceso de dos pasos: primero a nitritos, “nitritación” ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$) y luego a *nitratos*, “nitratación” ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$), cada uno involucra diferentes especies de bacterias *nitrificantes quimioautótrofas* [33]. El primer paso es la oxidación de iones amonio a nitrito; el género bacterial para catalizar esta reacción es el *Nitrosomona* (ecuación 12). [33]



El siguiente paso es la transformación de nitrito a nitrato (ecuación 13). El género bacterial para catalizar esta reacción es el *Nitrobacter*.



La reacción global de nitrificación se observa en la ecuación 14.



En la reacción de nitratación (ecuación 13), la especie nitrato puede reducirse a nitrito, “desnitrificación parcial” ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$), convirtiéndose al nitrito, en la especie intermedia inestable de reacción de la nitrificación completa.

Denitrificación

En los HC, la denitrificación es el paso final en la remoción de nitrógeno; en esta etapa el nitrato es reducido a N_2 . Ocurre bajo condiciones anóxicas, o con oxígeno presente, pero este está disponible en fuentes tales como el *nitrato*, *nitrito* o incluso *sulfato*, los cuales sirven como aceptores finales de electrones en la cadena de transporte de electrones [18]. Un amplio rango de bacterias anaeróbicas facultativas, siendo las más comunes *Pseudomona* sp., *Achromobacter* sp. y *Aerobacter* sp., realizan el proceso utilizando como fuente de energía carbono en forma de materia orgánica. La reacción incluye como primer paso la reducción de nitrato a nitrito, “desnitrificación parcial” ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$) [18],[32], seguida por la producción de óxido nítrico, óxido nitroso y gas (ecuación 15) [34],[31], para este proceso se requiere entre 6.5 – 7.5 unidades de pH, temperaturas de 20 – 25 °C, condiciones anóxicas, carbono orgánico lábil y la especie química nitrato como sustrato, la cual aporta oxígeno [4],[35],[32],[33]. Estos productos gaseosos son perdidos hacia la atmósfera, mayoritariamente el N_2 , a través del sustrato en los HC FSSH [36].



2.1.5.3 Remoción de fósforo

El fósforo está presente en las aguas residuales en tres distintas formas: como *ortofosfato*, *polifosfato* y *fósforo orgánico* que es un constituyente menor de las aguas residuales. El fósforo total fijado en las aguas residuales está presente como ortofosfatos tales como: PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4 , H_3PO_4 . [18]

Los mecanismos de eliminación del fósforo en los HC pueden ser de tipo biótico y abiótico; los bióticos incluyen la asimilación por parte de las plantas y los microorganismos.

Los abióticos abarcan fundamentalmente la adsorción por el medio granular, siendo este el tipo de eliminación más observado en los HC FSSH. Este proceso depende de las características del medio granular y su capacidad para la asimilación o retención de fósforo, sin embargo, en general, dicho proceso puede ocurrir a largo plazo, y es probable que los procesos de desorción devuelvan el fósforo al agua de forma gradual, aumentando la concentración [12],[16]. Puesto que no hay componentes gaseosos en el ciclo biogeoquímico del fósforo, este tiende a acumularse en los sedimentos de los HC, siendo este, el mecanismo principal para la eliminación; el suelo de los HC es un sumidero a largo plazo [37],[38].

2.1.6 Evapotranspiración (ET)

La evapotranspiración es un proceso complejo y de múltiples facetas que incluye la pérdida de agua hacia la atmósfera como resultado de la combinación de dos procesos separados por los que el agua se transforma:

- 1) a través de la superficie del suelo por evaporación
- 2) mediante transpiración del cultivo.

En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero cuando este cultivo cubre el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal [4]. Estos factores intervienen en el balance hídrico del sistema de HC, afectando así los procesos químicos y metabólicos que se llevan a cabo dentro del mismo y que, inciden en las eficiencias de remoción de cada contaminante/nutriente. La presencia de las diferentes especies de macrófitas en los HC FSSH determina el efecto de la evapotranspiración, sobre el balance de agua en el humedal. [19],[39]

2.2 MARCO LEGAL

En Colombia, los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, están regulados mediante la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Este documento contiene la norma de los

parámetros y valores límites permisibles, buscando reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los ríos, embalses, lagunas, cuerpos de agua naturales o artificiales, y al sistema de alcantarillado público [22]. Estas normativas constituyen el principal marco legal a tener en cuenta al evaluar el tratamiento del agua residual doméstica y no doméstica, mediante humedales construidos y su aplicación, principalmente, en zonas rurales que carecen de sistemas de saneamiento básico. Para el vertimiento de las aguas residuales en la universidad del atlántico, estas se envían hasta una laguna de oxidación y por último se utilizan para regadío en las canchas deportivas de la universidad, de acuerdo a los límites permisibles de los parámetros físicoquímicos contemplados en el artículo 8, de la resolución 0631 de 2015.

2.3 MARCO CONTEXTUAL

El término *humedal construido* es relativamente nuevo, aunque el concepto es antiguo, ya que el uso de humedales naturales para la mejora de la calidad del agua no es una idea de la sociedad moderna. Desde que el hombre ha tenido la práctica de descargar aguas residuales, los humedales se han visto implicados de alguna manera en la limpieza o depuración de esas aguas. Antiguas civilizaciones descargaban las aguas residuales producidas en humedales naturales cercanos, práctica que llevó a muchos humedales a la saturación, con la consecuente degradación ambiental [12].

Los primeros trabajos científicos sobre humedales construidos fueron realizados en el Instituto Max-Planck (Alemania, 1953); la Dra. Käthe Seidel presentó por primera vez métodos para mejorar y controlar los cuerpos de agua afectados por los vertimientos de aguas residuales empleando macrófitas acuáticas. Con el uso del junco de laguna o junco lacustre (*Schoenoplectus lacustris*) se obtuvo la eliminación de grandes cantidades de sustancias orgánicas e inorgánicas de las aguas residuales [40]. En 1982, Seidel junto con el Dr. R. Kickuth del Instituto für Bodenkunde de la Universidad de Göttingen, demostraron la capacidad de las plantas de transportar oxígeno a través de los tallos y las raíces al suelo, el aporte de carbono desde las plantas a las bacterias como fuente de energía, la precipitación de fosfatos, y los procesos de nitrificación y desnitrificación.

En el año 2000, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) publicó un manual para el diseño de humedales construidos y plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. En la actualidad este tipo de sistemas se aplica en varios países de Europa, América, África y Oceanía, no solamente para tratar aguas residuales domésticas sino también para tratar efluentes con muy distintas características. La utilización de humedales construidos en África se ha convertido en una alternativa a fosas sépticas o lagunas de oxidación [41]. Hoy en día se encuentran humedales de flujo subsuperficial en muchos países desarrollados y en desarrollo, reconocidos como alternativa atractiva a los tratamientos de aguas residuales convencionales [12].

En los últimos 10 años los estudios sobre HC en países como Colombia han incrementado notoriamente. En la Universidad Tecnológica de Pereira han trabajado en estudios para evaluar la eficiencia y factibilidad de la utilización de algunos tipos de humedales en pequeñas comunidades del municipio de Pereira, los cuales condujeron a la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales que incluye humedales de flujo subsuperficial que inició su operación en el año 2003 [11]. En el año 2010 en Antioquia, realizaron estudios para evaluar la influencia de la vegetación (*Heliconia psittacorum*) en la eliminación de nitrógeno en un HFSS, utilizando balance de masas pudieron deducir que el principal mecanismo de remoción de N fue la nitrificación/desnitrificación; por otra parte la influencia indirecta de la macrófita contribuyó en la eliminación de nitrógeno [42]. En la Universidad Javeriana, se diseñaron e implantaron HFSS para el servicio de la estación experimental de tratamiento de la Javeriana en el municipio de Cogua, Cundinamarca, tratando las aguas residuales domésticas provenientes de las viviendas y las aulas [43]. En la Universidad de Cartagena, en el año 2016, mediante HFSS se cuantificó la capacidad depuradora de la *Rhizophora mangle* (Mangle rojo), encontrando remociones de fósforo y nitrógeno total de 70% y 90% respectivamente [19]. En la Universidad del Atlántico, se realizó un estudio para evaluar experimentalmente la eficiencia de remoción de las aguas residuales en HFSS sembrados con *Echinochloa colonum* y *Cyperus ligularis*, cuantificando

la eliminación de materia orgánica, nitrógeno, ortofosfatos, sulfatos y Coliformes (totales y fecales), encontraron remociones superiores al 60% para la especie *Cyperus ligularis* [44].

3. METODOLOGÍA

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad del Atlántico (Puerto Colombia, Atlántico) 11° 01' 08'' N y 74° 52' 19'' O [45]. En esta zona del país, se registran temperaturas, precipitación y humedad relativa de 28°C, 67 mm y 81% respectivamente. Al igual que muchos sitios del Caribe colombiano, dos épocas climáticas marcan los periodos de sequía (Febrero-Marzo) y lluvia (Abril, Octubre y Noviembre) [46],[47].

3.2 DESCRIPCIÓN DE UNIDADES EXPERIMENTALES

El sistema de humedales construidos experimentales consistió de seis (6) contenedores en concreto con flujo subsuperficial horizontal, dispuestos en configuración paralela y de aproximadamente 1 m².

Las Figuras 6 y 7 ilustran los sistemas en operación. Se tomó un volumen de aguas residuales de la universidad del Atlántico; este volumen fue conducido hasta un tanque de sedimentación primaria (Figura 8) con THR de 2 horas, y a través de tuberías PVC de 1" de diámetro, los HC FSSH recibieron por gravedad dichas aguas residuales. Por ser los humedales construidos diseñados para el tratamiento secundario, se tomó el tanque de sedimentación primaria como el tratamiento primario de las aguas residuales, para posteriormente distribuirla a los sistemas de humedales.

Cada una de las unidades de tratamiento de humedales midió 1.01 m de largo×0.61 m de ancho×0.45 m de profundidad (Figura 9), se insertaron tubos perforados aireadores (Figura 10) y los sistemas se rellenaron con sustrato de grava local de dimensiones promedio de 8 a 10 mm , porosidad del 40% (Figura 11).



Figura 6. Fotografía del Sistema Experimental de Humedales Construidos de Flujo Sub Superficial Horizontal (HC FSSH)

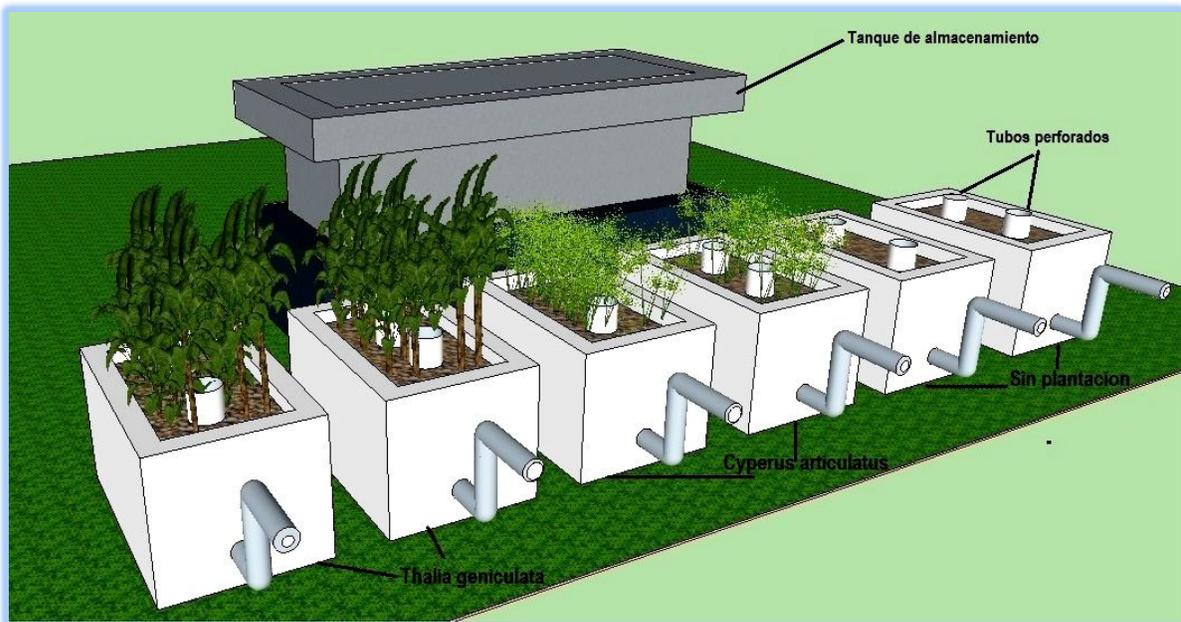


Figura 7. Esquema en 3D del Sistema Experimental de Humedales Construidos de Flujo Sub Superficial Horizontal HC FSSH (HC FSSH)



Figura 8. Tanque de sedimentación primaria de 760 litros



Figura 9. Celdas de humedales construidos



Figura 10. Sembrado de macrófitas plantadas

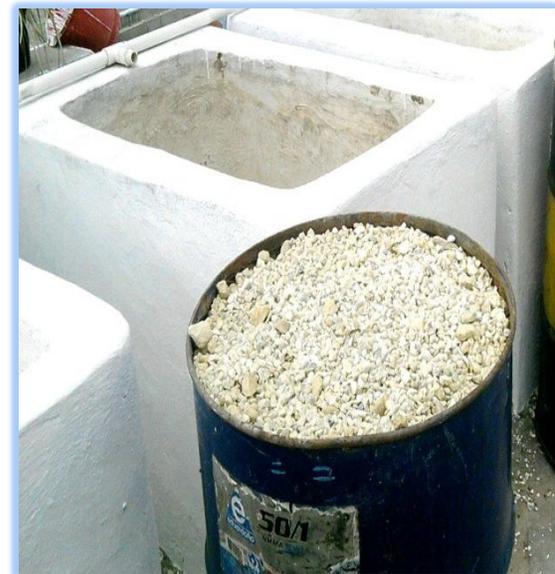


Figura 11. Grava utilizada como relleno de los HC FSSH

Los seis HC contaron con estructuras de entrada y salida de agua en tubería de PVC perforada. El tanque de sedimentación primaria fue acondicionado con un sistema de

desagüe de 2” que reguló el tiempo de almacenamiento del agua y, a su vez, se usó como mecanismo de limpieza del mismo.

3.3 ACLIMATACIÓN DE LAS MACRÓFITAS DE ESTUDIO

Las macrófitas utilizadas en esta investigación se recolectaron en las ciénagas del municipio de Sabanagrande, para su aclimatación fueron usadas macetas rellenas con tierra y regadas con agua residual cada dos días durante dos meses. Dos de las unidades (celda 5 y 6) de tratamiento sirvieron como un control (no plantas, solo grava); cada uno de los 4 humedales restantes se plantaron de la siguiente forma: 16 rizomas de *Thalia geniculata* para las celdas 1 y 2 fueron sembradas guardando una distancia de 12 cm de espacio, para obtener una densidad inicial de 16 plantas por m² y 16 rizomas de *Cyperus articulatus* para las celdas 3 y 4 fueron sembradas guardando una distancia de 12 cm de espacio.

3.4 MEDICIÓN DE CAUDAL Y TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICO (TRH)

Los valores de caudal de entrada fueron obtenidos usando medidores de agua mecánico-magnéticos y un cronómetro. Los caudales de salida se obtuvieron utilizando 6 tanques de 100 L, uno para cada humedal, en los cuales se recogía el volumen de agua efluente y con ayuda de un cronometro digital se determinaba el aforo. Para la determinación del caudal (Q), se calculó el volumen efectivo:

$$V_{\text{efectivo}} = L \times A \times H \times \varepsilon \quad (16)$$

Dónde:

V_{efectivo} = Volumen efectivo, m³

L = Longitud del humedal, en m

A = ancho del humedal, en m

H = Altura efectiva de agua en el humedal, en m

ε = Porosidad del medio

La porosidad se estimó mediante una probeta de 1000 mL, la cual fue rellena con grava de los humedales y se agregó agua hasta completar el volumen de la misma para resolver la siguiente ecuación:

$$\% \epsilon = \frac{\text{Volumen de agua obtenido}}{\text{Volumen probeta}} \times 100 \quad (17)$$

En la tabla 4 se describen las características del diseño de los sistemas estudiados.

Tabla 4. Especificaciones del diseño de los humedales de flujo sub superficial horizontal

PARÁMETRO DE DISEÑO	VALOR
Área superficial (m ²)	0.62
Altura; Largo; Ancho (m)	0.45; 1.01; 0.61
Altura grava (m)	0.05
Altura efectiva de agua (m)	0.34
Porosidad de grava (ϵ) (%)	42
Tamaño de grava (pulgadas)	1
Tipo de grava	Granítica
Caudal teórico (L/día)	29
TRH Teórico (día)	3
Tipo de flujo	Intermitente
Tipo de planta	<i>T. geniculata/C. articulatus</i>
Densidad de Siembra (Plantas.m ⁻²)	16 plantas.m ⁻²

De la ecuación 16 y los datos de la tabla 4, se obtiene entonces:

$$L = 1.01 \text{ m de HC}$$

$$A = 0.61 \text{ m de HC}$$

$$H = 0.34 \text{ m altura efectiva del agua}$$

$$V_{\text{efectivo}} = (1.01\text{m}) \times (0.61\text{m}) \times (0.34\text{m}) \times (0.42)$$

$$V_{\text{efectivo}} = 0.087\text{m}^3 = 87 \text{ L}$$

$$\text{TRH} = \frac{\text{Volumen efectivo}(V_{\text{efectivo}})}{\text{Caudal (Q)}} \quad (18)$$

De la ecuación 18, se obtiene el caudal;

$$\text{Caudal (Q)} = \frac{\text{Volumen efectivo}(V_{\text{efectivo}})}{\text{TRH}} \quad (19)$$

$$\text{Caudal (Q)} = \frac{87 \text{ L}}{3 \text{ días}}$$

$$Q = 29 \text{ L/día}$$

El valor del caudal diario permitió mantener el tiempo de retención hidráulica de 3 días, para un tipo de flujo intermitente.

3.5 MODO DE OPERACIÓN HIDRÁULICO

El modo de operación hidráulico fue de flujo intermitente, y consistió en ingresar 29 L/día en cada uno de los humedales construidos, para asegurar un tiempo de retención hidráulica (TRH) aproximado de 3 días. Para controlar el flujo de agua fueron instalados medidores de agua mecánico-magnéticos en la entrada de cada una de los 6 humedales, los cuales funcionaron abriendo la válvula de paso ubicada en el tanque de sedimentación primaria, y las válvulas ubicadas en la entrada de cada sistema, estas válvulas fueron cerradas una vez que los medidores marcaron el paso de 29 litros en cada unidad de humedal. El volumen de agua desplazada fue recogido en tanques plásticos como medida de caudal efluente en cada HC FSSH.

3.6 MUESTREO Y ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL EN HC FSSH

Se tuvieron dos puntos de toma de muestra, el primero, en el tanque de sedimentación primaria, representando el agua de afluente a los HC FSSH y el segundo, en cada uno de

los efluentes de cada unidad de tratamiento. Las muestras de agua residual se recolectaron y posteriormente fueron trasladadas al Laboratorio de Análisis Físicoquímico del Agua (LAFA) de la Universidad del Atlántico para su análisis. Se tomaron durante los meses de investigación tres (3) muestras semanales de agua afluente y los diferentes efluentes. Las concentraciones de materia orgánica y nutrientes, así como los parámetros físico-químicos fueron determinados siguiendo la metodología indicada en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, tal como se describe en la tabla número 5. [48]

Tabla 5. Métodos de medición para calidad del agua residual

PARÁMETRO	MÉTODO	REFERENCIA Standard Methods (APHA-AWWA- WPCF, 2012)	EQUIPO O INSTRUMENTO
Temperatura	Electrométrico	2550 A	Sonda multiparamétrica WTW Multi 3420
pH (Unidades de pH)	Electrométrico	4500 – H ⁺ B	Sonda multiparamétrica WTW Multi 3420
Oxígeno Disuelto (mgO ₂ /L)	Electrométrico	4500 – O G	Sonda multiparamétrica WTW Multi 3420
Conductividad eléctrica (μScm-1)	Electrométrico	2520 -B	Sonda multiparamétrica WTW Multi 3420
Potencial Redox (mV)	Electrométrico	2580 A	Sonda multiparamétrica WTW Multi 3420
Sólidos Suspendedos Totales	Gravimétrico	2540 D	Horno, microfiltros, balanza analítica
DQO (mgO ₂ /L)	Espectrofométrico	5220 D	Espectrofotómetro HACH DR 2700
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₄ ⁺ /L)	Espectrofométrico	4500 – NH ₃ C	Espectrofotómetro HACH DR 2700
Nitrito (mg N-NO ₂ ⁻ /L)	Espectrofométrico - Diazotización	4500 - NO ₂ ⁻ B	Espectrofotómetro HACH DR 2700
Nitrato (mg N-NO ₃ ⁻ /L)	Espectrofométrico -Método de reducción de cadmio	4500 - NO ₃ ⁻ E	Espectrofotómetro HACH DR 2700
Turbiedad (NTU)	Nefelométrico	2130 B	Turbidímetro HACH 2100Q
Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L)	Espectrofométrico	4500 - SO ₄ ²⁻	Espectrofotómetro HACH DR 2700
Ortofosfatos (mg PO ₄ ³⁻ /L)	Espectrofométrico - Ácido Ascórbico	4500- P E	Espectrofotómetro HACH DR 2700

Para el cálculo de la carga de contaminantes y su relación con el área superficial del humedal, se utilizó la ecuación 20:

$$\text{Carga Superficial, CS } \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{ día}} \right) = \frac{\text{Concentración del contaminante } \left(\frac{\text{g}}{\text{L}} \right) \times \text{Caudal } \left(\frac{\text{L}}{\text{día}} \right)}{\text{Área superficial del humedal } (\text{m}^2)} \quad (20)$$

La eficiencia de eliminación de los contaminantes se determinó de acuerdo a la ecuación 21:

$$E (\%) = \frac{CA - CE}{CA} \times 100 \quad (21)$$

Dónde:

E = Eficiencia de eliminación, en porcentaje

CA= Carga contaminante del afluente

CE= Carga contaminante del efluente

3.7 MEDICIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN (EVT) OBSERVADA

La evapotranspiración observada fue calculada a partir de la diferencia diaria del volumen de agua en el afluente y el efluente, dividido entre el área superficial del humedal. Para el cálculo de la EVT observada, se utilizó la siguiente ecuación [49]:

$$EVT = \frac{\text{Caudal Afluente } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) - \text{Caudal Efluente } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)}{\text{Área superficial del humedal } (\text{m}^2)} \times 1000 \quad (22)$$

Donde,

EVT = Evapotranspiración, en mm/día

3.8 CUANTIFICACIÓN DE LA BIOMASA VEGETAL

Se realizaron mediciones del crecimiento de las dos especies de plantas tomando medidas de la altura una vez cada dos meses usando una cinta métrica. Debido al rápido crecimiento y la alta cobertura tanto de *Thalia geniculata* como de *Cyperus articulatus* en los humedales construidos, se realizó una poda de cada ejemplar, en Noviembre/16 (Figura

10). Toda la biomasa aérea cosechada en ambas plantas fue prensada, secada en horno y cuantificada en una balanza analítica. Al final del periodo de muestreo, se realizó una cosecha de toda la biomasa, tanto aérea como radicular, siguiendo el mismo procedimiento de secado y pesado.



Figura 12. Poda de macrófitas

3.9 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Toda la información fue tabulada y procesada en Microsoft Excel. Antes de realizar los análisis estadísticos, la base de datos se depuró aplicando la prueba de Grubbs para valores atípicos. Se realizó el test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para determinar si los conjuntos de datos poseían una distribución normal. Para determinar las diferencias significativas entre la eficiencia de eliminación de contaminantes entre los sistemas plantados con *Thalia geniculata*, *Cyperus articulatus* y el sistema no plantado, se realizó análisis de varianza (ANOVA) y un análisis de modelos lineales generalizados incluyendo como covariables los valores de los parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, Redox, Oxígeno Disuelto). Se consideró un nivel de significancia del 0,05. Para los análisis estadísticos se utilizó el programa Statgraphics versión Centurión XVI-I

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL

En la tabla 6, se describen los valores promedio obtenidos para las variables pH, temperatura, potencial redox, conductividad eléctrica, turbiedad, sólidos suspendidos totales y oxígeno disuelto del agua afluyente y efluente de los HC plantados con *Thalia geniculata*, *Cyperus articulatus* y los no plantados (control). El comportamiento de cada una de estas variables durante el periodo de estudio, es discutido en las siguientes secciones por separado.

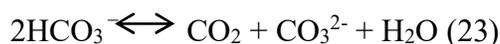
Tabla 6. Resultados de parámetros físicos y químicos. Desviación estándar entre paréntesis. (N = 30 -35)

PARÁMETRO	EFLUENTES			
	AFLUENTE	<i>T. geniculata</i>	<i>C. articulatus</i>	Control
pH (Unidades de pH)	8.3 – 8.4 (±0.3)	7.1 – 7.3 (±0.2)	7.4 – 7.7 (±0.2)	8.1 - 8.3 (±0.4)
Temperatura (°C)	26.4 – 29.7 (±1.0)	23.1 – 29.7 (±1.7)	24.3 – 29.8 (±2.0)	25.0 – 29.1 (±2.2)
Potencial redox (mV)	-122.2 (±156)	85.0 (±44)	89.0 (±45)	63.0 (±37)
Oxígeno Disuelto (mg O ₂ /L)	0.4 (±0.3)	2.8 (±0.9)	3.0 (±0.8)	2.0 (±0.4)
Conductividad Eléctrica (µScm ⁻¹)	590 (±233)	781 (±249)	751 (±241)	668 (±246)
Turbiedad (NTU)	40.9 (±40.4)	7.5 (±4.6)	9.5 (±7.9)	7.9 (±8.1)
Sólidos Suspendidos Totales (g/m ² *d)	0.20 (±0.10)	0.03 (±0.02)	0.02 (±0.03)	0.08 (±0.02)

4.1.1 pH (Potencial de Hidrógeno)

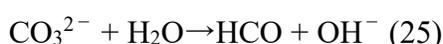
Se registran valores levemente básicos de pH del agua afluyente, sin embargo se observa una disminución hasta la neutralidad en los efluentes de los HC plantados con *Thalia geniculata* y *Cyperus articulatus*; no así en los HC sin macrófitas (no plantados) donde se registran valores de pH cercanos a los presentados en el agua de entrada. Todos los valores fueron relativamente estables, tanto para el agua de entrada, como para cada una de las unidades de tratamiento. El pH del agua residual afluyente fue similar al registrado en otros estudios realizados en esta zonas tropicales del Caribe Colombiano [25],[44], [50]. En las aguas residuales urbanas, el pH se encuentra entre 6.5 – 8.5 unidades [18]

Los efluentes de los HC plantados, fueron inferiores probablemente, por las reacciones bioquímicas de remoción ocurridos en los sistemas. En estos ambientes, los procesos de biodegradación aerobios y anaerobios originan sustancias como el ácido carbónico (H_2CO_3) y los iones hidratados H^+ (H_3O^+) (ecuación 23), que pueden disminuir los valores de pH [42]. Igualmente, las reacciones de degradación de materia orgánica por bacterias heterotróficas que producen acidogénesis, pudieron disminuir el pH del agua [51]. De otra parte en la reacción global de nitrificación (ecuación 14), se liberan iones de H^+ (H_3O^+), los cuales aportan a la disminución del pH del medio [18]. En los dos pasos de la nitrificación las bacterias del genero *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* utilizan CO_2 y bicarbonato para la síntesis celular (consume $CaCO_3$ y reducen la alcalinidad), estas reacciones teóricamente produjeron acidez [12]. Estudios realizados en HC en zonas tropicales presentaron los mismos resultados en cuanto al pH en los efluentes de las unidades plantadas [52],[53],[25].



En los HC sin plantas, el valor de pH fue levemente básico. Algunos estudios han reportado similares valores en los HC no plantados, obedeciendo al crecimiento de algas y a la presencia de bacterias tanto sulfatoreductoras, como nitrificantes [34],[112], las cuales

asimilan CO_2 disuelto para satisfacer su actividad fotosintética y metabólica respectivamente, por lo que la ecuación de disociación del ácido carbónico (ecuación 23) se desplaza hacia la derecha, consumiendo protones (H_3O^+) del medio, produciendo iones OH^- y aumentando el pH (ecuación 24 y 25); el valor de pH básico dependerá tanto de la ocurrencia como de la frecuencia de las reacciones de remociones, al igual que de la densidad poblacional de bacterias [54],[34],[55],[38],[2].



Es probable que este comportamiento haya ocurrido en los humedales sin plantas, ya que se presentó floración de algas en las tuberías de entrada, las cuales recibían luz solar sin ninguna protección y presencia de bacterias sulfatoreductoras. Posiblemente las reacciones de degradación que disminuyen el pH, fueron a menor frecuencia en estos sistemas no plantados, de este modo los valores observados puedan explicarse.

Por otra parte el arrastre y lavado del sustrato de gravas con carácter básico (sin ninguna plantación), probablemente contribuyeron en aumentar los valores de pH en el medio al aportar iones carbonatos y/o bicarbonatos [12],[36]. Básicamente en estos sistemas sin plantas, se presentaron comportamientos con reacciones químicas aportando H_3O^+ ácidos y al mismo tiempo eventos con resultados básicos en cuanto a valores de pH, como pueden ser la presencia de algas y la presencia de material de grava libre (sin interacción con planta), resultando en la posible estabilidad del pH observado, sin demasiada variación y con una leve tendencia hacia valores básicos.

Con respecto al cumplimiento de la normativa ambiental colombiana para el vertimiento de aguas residuales (Resolución 0631 de 2015), los efluentes de los humedales construidos en esta investigación cumplen con lo estipulado para el parámetro de pH [22].

4.1.2 Temperatura

Las temperaturas del agua residual utilizada en la investigación, proporcionó rangos de temperaturas (23.0 – 29.0 °C) para la acción microbiana y probablemente, ayudó en las remociones de los nutrientes y contaminantes observadas durante el estudio. La actividad bacteriana aumenta con la temperatura, por tanto, la degradación de los contaminantes es mayor a temperaturas relativamente mayores a 20°C [30]. Se registraron valores de temperatura promedio en el afluente de 27.9°C y en los humedales plantados con macrófitas de 25.2°C y 25.6°C para *Thalia geniculata* y *Cyperus articulatus* respectivamente. Estos valores se atribuyen a la sombra proporcionada por dichas macrófitas, evitando que parte de la radiación solar entrante alcance la columna de agua, además, de reducir la velocidad del viento en la superficie, es decir, estas macrófitas actúan como moderadoras de la temperatura del agua de los HC FSSH [34],[12]; Los HC sin plantas, presentaron valores similares al agua afluente, de 27.1 °C, posiblemente por no tener protección de la radiación solar.

4.1.3 Potencial redox o Potencial de óxido-reducción (ORP)

El proceso de respiración predominante en los HC FSSH depende directamente de sus condiciones óxido-reductoras, un potencial redox mayor a +400 mV está asociado con un ambiente oxidante y promoverá procesos aeróbicos; un intervalo de redox entre -100 mV hasta +400 mV se asocia a metabolismos de tipo facultativos con condiciones tanto aeróbicas como anaeróbicas, por último, potenciales redox menores a -100 mV son sinónimo de condiciones reductoras y favorecen procesos anaeróbicos [12]. El potencial redox es un parámetro más racional para indicar un entorno aeróbico o anaeróbico que el oxígeno disuelto [32],[56],[57].

Los valores de ORP observados en el afluente (Tabla 6) son característicos de condiciones reductoras favorables y de tipo anaeróbico intenso, provocando la formación de aniones sulfuros (S^{2-}) a través de las reducciones de iones sulfatos (SO_4^{2-}) con la presencia de ácido

sulfhídrico, responsable de los malos olores percibidos del agua de afluente contenida en el tanque de sedimentación primaria [58].

En el efluente de los humedales, los valores redox propiciaron condiciones reductivas moderadas con presencia de microorganismos facultativos. Probablemente microorganismos aerobios facultativos utilizaron el oxígeno presente en las zonas radiculares de las macrófitas, mientras que los microorganismos anaerobios facultativos, se desarrollaron por medio de procesos de fermentación, utilizando como fuente de energía la materia orgánica contenida en el agua residual [59],[4]. En consecuencia, la parte cercana a las raíces de las macrófitas (zona oxigenada), presentó procesos de oxidación, mientras la otra parte subyacente (interfaz raíz-suelo), exhibió condiciones reductivas anaeróbicas. La capacidad de cada macrófita para el transporte de oxígeno y las dimensiones del HC, principalmente profundidad, proporcionan las diferencias espaciales de las zonas mencionadas, ya que estas determinan la profundidad de las raíces dentro del humedal, y por consiguiente, el aporte de oxígeno disuelto [58].

Se estimó entonces que las macrófitas, aportando oxígeno, aumentaron los gradientes redox; mientras que en los HC FSSH sin plantación, se presentó leve aumento del ORP, proceso que se presenta naturalmente en todo sistema inundado [21],[20].

4.1.4 Oxígeno Disuelto (OD)

El Oxígeno Disuelto para los HC FSSH plantados con macrófitas, se mantuvo en valores superiores a 2.5 mg O₂/L (Tabla 6). El agua residual del afluente proveniente del tanque de sedimentación primaria presentó valores característicos de depósitos de fangos, que al contener materia orgánica (flotante y disuelta) provocan el agotamiento del OD [12].

Los sistemas de humedales presentaron características de ambientes aeróbicos y anaeróbicos de acuerdo con las condiciones redox mencionadas anteriormente y los valores de Oxígeno Disuelto encontrados en los efluentes. Es probable que en dichos sistemas, teóricamente, se presentaron dos capas o fases: una zona oxigenada, cercana a la superficie

y alrededor de las raíces debido a la liberación radial de oxígeno por parte de las plantas y otra zona, anaeróbica, presentando mecanismos de degradación, vía microorganismos facultativos anaeróbicos [31],[60],[61],[13]. Valores de OD como los presentados en los efluentes de esta investigación no indican, necesariamente, que existan condiciones aeróbicas en toda la matriz de los HC, posiblemente en algunos sectores o a ciertas profundidades se dieron ambientes anaerobicos, como también ambientes aeróbicos, como los resultados observados en la tabla 6; Las mediciones a diferentes profundidades podrían permitirían dilucidar el valor promedio de Oxígeno Disuelto en todo el sistema [31]. Tanto la zona aeróbica (desde la superficie hasta las más profundas raíces), como la anaeróbica (desde las raíces más profundas hasta el suelo del humedal), pueden coexistir en este tipo de humedales [62],[12],[63], de esta forma, se crea un gradiente aerobico-anaerobico, que favorece el crecimiento de microorganismos aeróbicos, anaeróbicos y facultativos. [64]

Los valores registrados en los efluentes de los sistemas plantados con *Thalia geniculata* (2.8 mg O₂/L) y *Cyperus articulatus* (3.0 mg O₂/L) son participativos e indicativos de procesos de degradación de nutrientes y contaminantes, ya que las macrófitas plantadas liberan oxígeno hacia la rizosfera de cada humedal a través de sus raíces [65],[21],[34]. *Cyperus articulatus* ha sido registrada con gran capacidad para suministrar oxígeno a la columna de agua en los HC FSSH [66],[67],[25]. Los tubos de aireación pasiva (2 por cada humedal) posiblemente también contribuyeron al suministro de oxígeno en los HC; la oxigenación atmosférica introduce oxígeno atmosférico en los HC, a través de los tubos insertados, proporcionando oxígeno disuelto a la columna de agua [4],[41],[34],[59],[65]. Un aspecto importante es que en el planteamiento metodológico, no se consideró medir la tasa de transferencia o difusión de oxígeno a través de estos tubos de aireación, los cuales se tomaron como un aporte pasivo de oxígeno para los humedales construidos.

Por otra parte, el modo de operación intermitente en los humedales construidos pudo ayudar en el incremento de OD, tal como ha sido evidenciado en otros estudios; esta forma de alimentación permite la presencia de mayor turbulencia interna, en términos de flujos, con escenarios de aeración o reoxigenación [4],[21],[31],[44]. La liberación, disponibilidad y contribución neta de oxígeno por parte de las macrófitas en los procesos de degradación

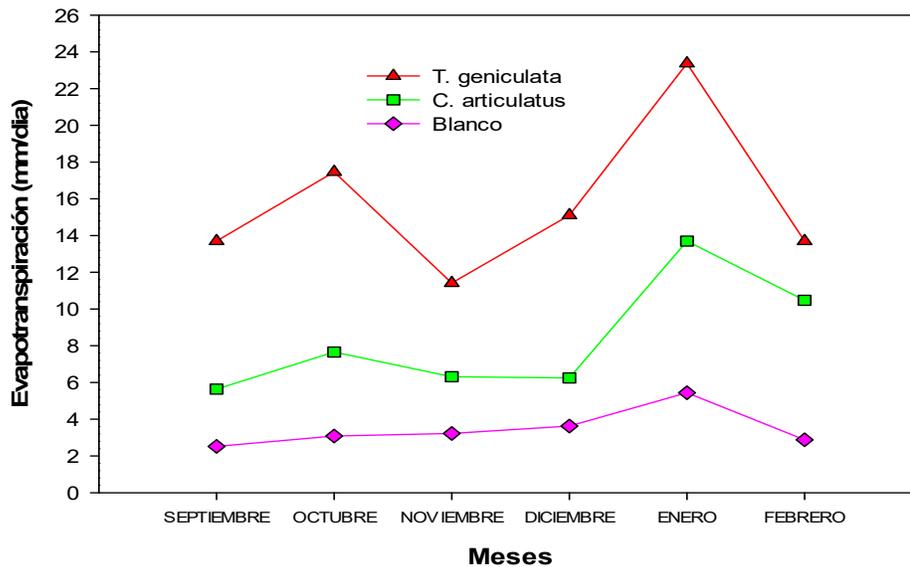
de los contaminantes sigue siendo un aspecto por dilucidar en la tecnología de HC FSSH [21],[6],[40].

Los valores de OD presentados en humedales no plantados se debió posiblemente a tres factores predominantes; uno hace mención al modo intermitente como se ingresaba el agua residual (turbulencia interna), otro a los tubos de aeración pasiva presentando escenarios de reoxigenación y por ultimo a la aparición de algas en las tuberías y primeros tramos de dichos sistemas [21],[41],[44]. La presencia de microalgas o fitoplancton probablemente aumentó los niveles de oxígeno disuelto en el agua de los humedales construidos debido a la fotosíntesis realizada por estos organismos de acuerdo con la ecuación 24 en el apartado de pH, donde estos organismos incorporan CO₂ y permiten la aparición de O₂ [52], [68]. Cabe mencionar que las algas presentan mayor metabolismo al extraer directamente el CO₂ disuelto del agua, mientras que la materia orgánica presente en forma coloidal, en suspensión, o sin alguna degradación anterior, requiere de mayores procesos. [69], [12], [4]. Es importante mencionar que las algas se presentaron en un pequeño tramo de la tubería de entrada hacia los humedales sin plantación, nunca ingresaron al sistema; además las algas fueron retiradas de las tuberías periódicamente, para evitar taponamiento. Posiblemente la biomasa de algas poco a poco fue aportando materia orgánica al agua de entrada.

Algunos estudios con HC FSSH plantados han reportado valores de OD incluso por encima de 5 mg O₂/L [40], lo cual permite inferir que aquellos sistemas con macrófitas, podrían presentar contenido de OD mayor en que los sistemas no plantados [12],[21],[67].

4.1.5 Evapotranspiración (EVT)

La gráfica 1 muestra los valores de evapotranspiración obtenidos por cada mes para las dos especies de macrófitas. *Thalia geniculata* requirió mayor cantidad de agua, por lo tanto la EVT para esta especie siempre fue mayor respecto de *Cyperus articulatus*.



Gráfica 1. Valores de evapotranspiración para *T. geniculata*, *C. articulatus* y Sin plantas

El consumo de agua para las dos especies se incrementó en los dos primeros meses de investigación y, disminuyó en los meses de noviembre y diciembre como consecuencia de la época de lluvias (septiembre - octubre) y la estabilidad en cuanto al crecimiento de las especies macrófitas respectivamente. El mayor valor de EVT en el mes de enero para los dos sistemas plantados, es como resultado del periodo de sequía mayor y a la baja carga contaminante debido al cese de actividades dentro de la universidad, lo cual obligó a las especies a requerir mayores cantidades de agua y nutrientes. Los valores de EVT por parte de los sistemas de HC se dio en mayor proporción por la transpiración de las plantas y su requerimiento de nutrientes, que por la evaporación del sustrato [39]. *Thalia geniculata* requirió en promedio un 35% (9.8 L/día) más de agua, mientras que *Cyperus articulatus* demandó un 18% (5.2 L/día). Los mayores valores de EVT en *T. geniculata* no afectaron las eficiencias de eliminación, probablemente, la disminución del volumétrico hídrico (por transpiración de las plantas), mejoró los tiempos de contacto de los microorganismos degradadores con los contaminantes del agua residual [49], [73], [4]. Igualmente, el aumento de la EVT en *Thalia geniculata* se reflejó en los niveles, ligeramente más altos, de conductividad eléctrica [67], [6]

4.1.6 Conductividad eléctrica (CE)

Los valores de la conductividad eléctrica en el afluente son característicos de aguas residuales domésticas; este valor de 590 $\mu\text{S/cm}$ encaja en el grado de agua no salina, según la clasificación de salinidad, basados en la conductividad eléctrica propuesta por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) [36], [12].

La CE del agua residual efluente aumento luego de los tratamientos con los HC; en estos sistemas, probablemente el sustrato de grava liberó sales por fricción con el agua a medida que esta atravesaba el humedal construido. Se observaron diferencias en cuanto al aumento de los valores de CE para sistemas plantados y los no plantados. En los sistemas plantados con *Thalia geniculata* (781 $\mu\text{S/cm}$) y *Cyperus articulatus* (751 $\mu\text{S/cm}$) se presentaron valores de CE mayores que para el sistema no plantado (668 $\mu\text{S/cm}$).

La evapotranspiración, redujo el volumen hídrico de los HC plantados, provocando el aumento en la concentración de los iones y las sales disueltas del agua residual [36], [70],[53],[30],[25],[71]. La Tabla 7 muestra que a mayor evapotranspiración promedio, mayor volumen reducido por parte de los HC; *Thalia geniculata* presento mayores concentraciones de CE debido a la mayor cantidad de volumen reducido de agua. Caso contrario, los sistemas sin plantación mostraron las más bajas concentraciones de CE.

Tabla 7. Tasa de Evapotranspiración/Volumen reducido

Humedal	Evapotranspiración y evaporación promedio(mm/día)	Volumen reducido promedio (L)
<i>Thalia geniculata</i>	15.7	9.8
<i>Cyperus articulatus</i>	8.3	5.2
Sin plantas	3.4*	2.2

***Solamente se midió evaporación**

4.1.7 Turbiedad

Resultados característicos de afluentes se encontraron en el agua residual del tanque de sedimentación primaria, debido a la presencia de partículas en suspensión de naturaleza orgánica e inorgánica [12]. En la tabla 6, se observan los resultados presentados en los sistemas de tratamiento, la turbiedad disminuyó en todos los HC FSSH, esto debido al proceso filtrante de los sistemas. En general, los sistemas se comportaron como lechos filtrantes reteniendo las partículas suspendidas y el material coloidal proveniente del tanque de sedimentación primaria [37].

4.1.8 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

El agua residual afluente presento bajos valores de SST, comparado con lo reportado para aguas residuales domésticas, posiblemente, estos valores son atribuibles a la sedimentación ocurrida en el tanque de sedimentación primaria.

La concentración y el flujo másico de SST en los efluentes de todos los sistemas de tratamiento, fueron menores que en el afluente. Los procesos físicos como la filtración mecánica, sedimentación, y la adsorción, además de los procesos bioquímicos de biodegradación son favorables en la disminución de los SST [51],[31],[18]. Estos resultados demuestran, entonces, que el HC FSSH se comporta como un efectivo filtro, disminuyendo SST [36],[40],[15],[72].

En los sistemas plantados con las macrófitas *Thalia geniculata* (0.03 g/m²*día) y *Cyperus articulatus* (0.02 g/m²*día) se presentaron remociones de 81% y 82% respectivamente, mientras que en el sistema sin plantas (0.08 g/m²*día) la remoción fue de 59 %, demostrando así mayores eficiencias de remoción en los sistemas plantados. Esto es explicado por la disminución de la velocidad del flujo de agua (efecto que provocan las raíces), favoreciendo los procesos de filtración y sedimentación de SST [18],[14],[12]. En los sistemas sin plantación la presencia de biomasa algal, pudo aumentar el contenido de

material en suspensión, tal como se ha evidenciado en otros estudios con humedales construidos [34].

Con respecto al cumplimiento de la normativa ambiental colombiana para el vertimiento de aguas residuales (Resolución 0631 de 2015), los efluentes de los humedales construidos en esta investigación cumplen con lo estipulado para el parámetro de SST [22].

4.2 Crecimiento y obtención de biomasa de *T. geniculata* y *C. articulatus*

Se obtuvo una biomasa seca total en *Thalia geniculata* de 2.3 kg/m² (1.7 kg de biomasa radicular y 0.6 kg de biomasa aérea) y para *Cyperus articulatus*, la biomasa seca total fue de 1.7 kg/m² (biomasa radicular 0.9 kg y biomasa aérea de 0.8 kg) (Tabla 8). El rápido crecimiento para generar biomasa en estas especies, ha sido registrado para plantas que crecen en zonas inundables donde aprovechan las características del agua para invadir y convertirse en malezas. En el periodo de poda (noviembre/16), la especie *Thalia geniculata* alcanzó una altura máxima de 178 ± 1 cm, mientras *Cyperus articulatus* superó los 144 ± 1 cm.

Tabla 8. Biomasa seca, aérea y radicular de *Thalia geniculata* y *Cyperus articulatus* cosechada durante el periodo de estudio

Especies	Biomasa Radicular (kg/m²)	Biomasa Aérea (kg/m²)	Biomasa Total (kg/m²)
<i>T. geniculata</i>	1.7	0.6	2.3
<i>C. articulatus</i>	0.9	0.8	1.7

4.3 Eficiencia de eliminación de contaminantes en los HC FSSH

El rendimiento de los sistemas de HC FSSH en la eliminación de los contaminantes se evaluó sobre la base de las concentraciones medias sin omitir los efectos de la evapotranspiración; para esto, las concentraciones promedio del afluente y efluente se convirtieron en cargas máxicas (g/m²d), multiplicando los valores de concentración por las velocidades de flujo (ecuación 16) [74],[75].

Las concentraciones de materia orgánica (DQO) nutrientes (formas de N y P) y sulfatos registradas en el afluente y efluente de los HC FSSSH se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Concentraciones promedio, en mg/L de los contaminantes, desviaciones estándar (DE) en paréntesis. (N=30-35).

PARÁMETRO	AFLUENTE	EFLUENTES		
		<i>T. geniculata</i>	<i>C. articulatus</i>	Control
DQO	143 (±56)	28 (±14)	21 (±12)	29 (±15)
Amonio (N-NH ₄ ⁺)	54 (±35)	11 (±11)	24 (±21)	32 (±22)
Nitrito (N-NO ₂ ⁻)	0.025 (±0.034)	0.008 (±0.005)	0.013 (±0.013)	0.015 (±0.011)
Nitrato (N-NO ₃ ⁻)	1.9 (±1.9)	0.7 (±0.2)	0.9 (±0.4)	1.0 (±0.5)
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	21.0 (±6.2)	2.6 (±3.1)	8.2 (±7.8)	13.0 (±5.8)
Ortofosfatos (PO ₄ ³⁻)	14 (±8.3)	6.0 (±10.6)	5.1 (±5.1)	8.9 (±5.5)

En el afluente, la mayoría de las concentraciones de los contaminantes, excepto sulfato y fosfatos, son menores que los valores típicos reportados para aguas residuales domésticas (Tabla 10). Probablemente, el agua residual doméstica proveniente del tanque de sedimentación primaria, ocasiona un mayor grado de eliminación de sólidos y contaminantes. De acuerdo con las concentraciones de DQO (Tabla 9), esta podría ser clasificada como un agua residual urbana diluida o débil (Tabla 10).

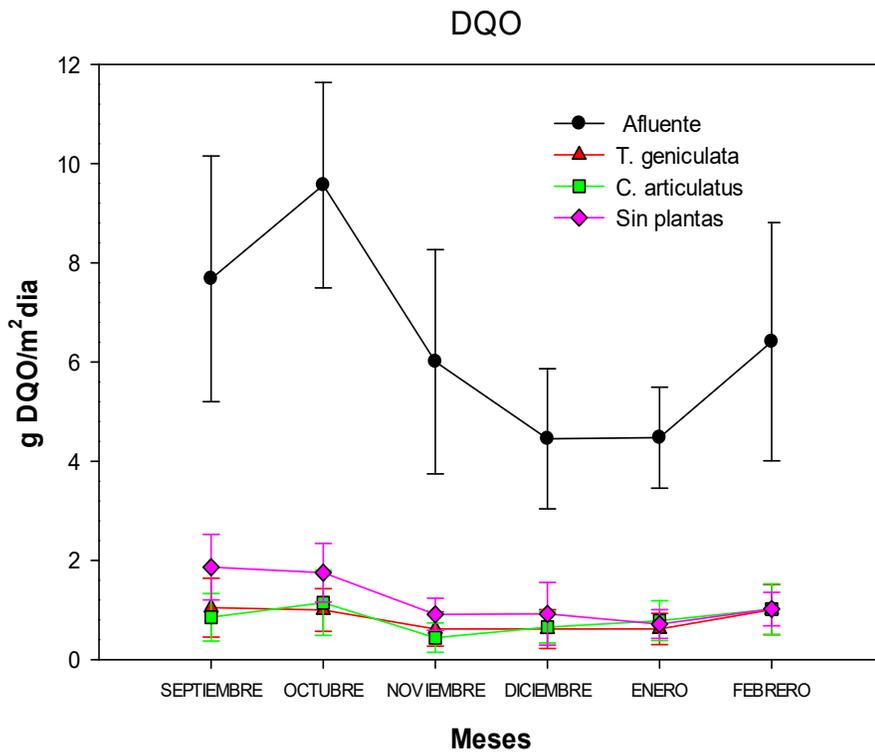
Tabla 10. Concentraciones típicas de aguas residuales domésticas. ARU (Agua Residual Urbana). Tomado de Metcalf y Eddy (2003).

Contaminante	ARU Débil	ARU Media	ARU Fuerte
DQO (mg O ₂ /L)	250	500	1000
NH ₄ ⁺ (mg/L)	12	25	50
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0	0	0
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0	0	0
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	4	8	15
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	20	30	50

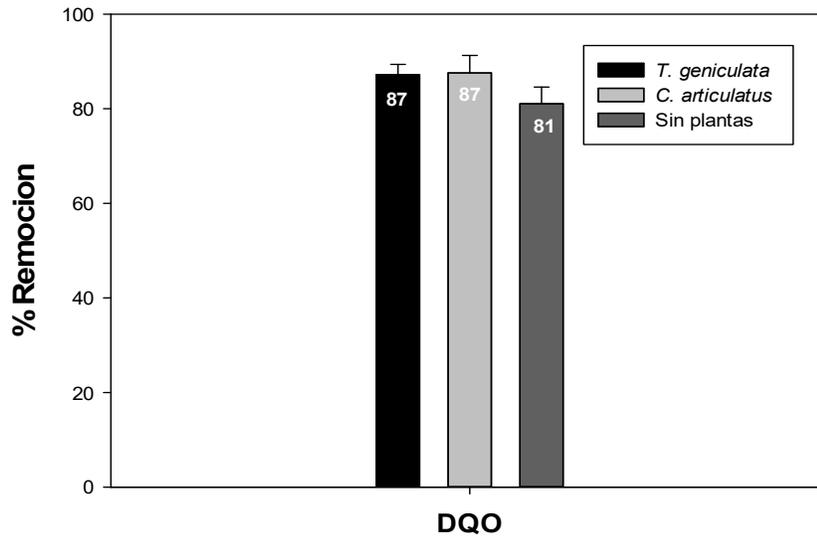
4.3.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La carga másica de DQO, en el afluente reportó en promedio 6.7 g/m²día DQO y en los tres sistemas de humedales un total de 0.85 g/m²día de DQO en el efluente de *Thalia geniculata* (87% de remoción), mientras que 0.83 g/m²día (87% de remoción) fue para *Cyperus articulatus* y 1.1 g/m²d (81 % de remoción) para el sistema sin plantación (Gráfica 2). La eliminación de la carga orgánica, alcanzó estabilidad con muy pocas variaciones a partir del mes de noviembre hasta culminar la investigación. Probablemente, los sistemas de tratamiento al recibir bajas tasas de carga orgánica eliminaron con mayor eficiencia.

El mayor rendimiento de la eliminación de DQO se registró en los humedales con macrófitas, indicando que la rizosfera de las plantas patrocina el desarrollo de una biopelícula o biofilm, además de proporcionar cantidades de oxígeno disuelto para las reacciones de oxidación. Es posible que los exudados de sus raíces sean fuente adicional de carbono y enzimas para mejorar la mineralización de la materia orgánica por parte de las bacterias [75],[74],[53]. Los fenómenos fotosintéticos de las macrófitas tienen un efecto importante en la eliminación de la materia orgánica, ya que la difusión de oxígeno molecular hacia las raíces puede ser usado por bacterias aeróbicas heterotróficas, para metabolizar compuestos contaminantes [56],[21],[44].



Gráfica 2. Valores de las cargas de DQO



Gráfica 3. Porcentajes de eliminación de DQO en los HC FSSH

Cyperus articulatus es una especie que ha sido reportada para eliminar materia orgánica superior a 85% (carga afluente de 20 g/m²día DQO y carga efluente 0.2 g/m²día DQO), muy cercano con la eficiencia registrada en este trabajo [25],[44].

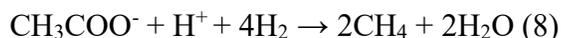
Se debe tener claro que la mineralización y eliminación de materia orgánica (y demás contaminantes) en HC FSSH, puede ocurrir en ambientes aeróbicos, facultativos y anaeróbicos [53],[76]. Es probable que la vía de eliminación de materia orgánica predominante en los sistemas construidos de esta investigación haya sido la vía facultativa, debido a los valores de potencial redox registrados en los sistemas de tratamiento, desde -134 mV hasta +129 mV (Tabla 3 y 6), en los cuales se exhiben procesos metabólicos de tipo anaeróbicos y facultativos [32], [77].

En estas condiciones de potencial redox, se presentan reacciones para la degradación de la materia orgánica (ecuaciones 3 y 8)



(Fermentación acética) (Bacterias facultativas acidogénicas)

Nota 1: *La fermentación acética reduce el pH, lo cual apoya los resultados sobre pH en los sistemas plantados.*



(Metanogénesis) (Bacterias anaeróbicas estrictas metanogénicas)

Nota 2: *El metano se libera a la atmósfera o se oxida a CO₂ tan pronto como entra en la zona de oxígeno de los humedales*

Probablemente, las condiciones de carácter filtrante del sustrato en todos los HC, facilitaron la retención del material particulado (DQO no soluble) y el crecimiento del biofilm, permitiendo la mineralización correspondiente de la materia orgánica. De otra parte, la retención de TSS (incluyendo materia orgánica particulada), en sistemas de humedales construidos, indica que los procesos de filtración física y sedimentación aportaron a la eliminación de DQO [51],[79],[76]. En estudios con HC sin plantas y en similares

condiciones atmosféricas, han sido registradas eliminaciones con eficiencias superiores al 85%, únicamente basados en grava, usada como medio filtrante [78].

Las comparaciones estadísticas en las tasas de eliminación entre los tratamientos se describen en la Tabla 11. Entre *T. geniculata* y *C. articulatus* no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$), mientras que al comparar los sistemas plantados con los no plantados, las diferencias fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Estos resultados permiten inferir que los sistemas de HC FSSH plantados presentan condiciones especialmente adecuadas para mejorar el rendimiento de eliminación de materia orgánica. [72], [31], [80], [81], [82].

Tabla 11. Resultados Prueba Anova DQO entre sistemas plantados y no plantados

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
DQO <i>T. geniculata</i> - DQO <i>C. articulatus</i>		0.06426	0.259759
DQO <i>T. geniculata</i> - DQO Sin plantas	*	0.04148	0.259759
DQO <i>C. articulatus</i> - DQO Sin plantas	*	0.04391	0.259759

* indica una diferencia significativa.

Con respecto a la relación de la eliminación de DQO en los sistemas plantados con las covariables medidas, se observó que los HC plantados presentaron relaciones significativas con pH, redox, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica ($p < 0.05$), pero no con la temperatura. En los sistemas sin plantas solo la conductividad eléctrica se relacionó de mejor manera con la eliminación de DQO.

Tabla 12. Resultados análisis de varianza para DQO

Variable	Factor				
	Cond Eléctrica	OD	pH	Redox	Temperatura
DQO <i>T.geniculata</i>	0.0023	0.0193	0.0086	0.0170	0.6248
DQO <i>C.articulatus</i>	0.0001	0.0069	0.0248	0.0009	0.6194
DQO Sin plantas	0.0000	0.9543	0.0627	0.0800	0.1568

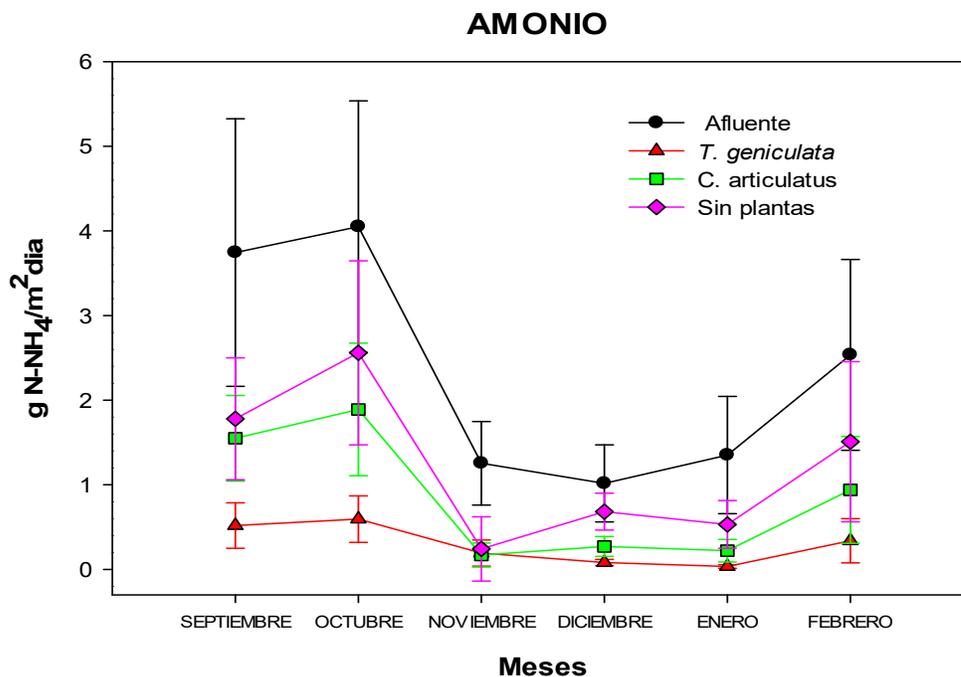
Con respecto al cumplimiento de la normativa ambiental colombiana para el vertimiento de aguas residuales (Resolución 0631 de 2015), los efluentes de los humedales construidos en

esta investigación cumplen con lo estipulado para el parámetro de DQO debido a que las concentraciones son más bajas que las exigidas [22].

4.3.2 Nitrógeno amoniacal o Amonio (N-NH₃ o NH₄⁺)

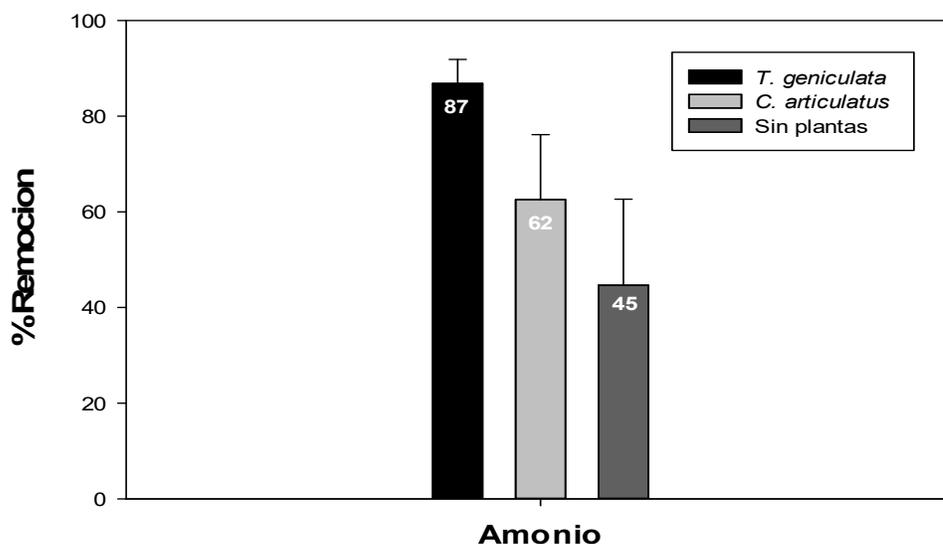
Las concentraciones de amonio en el agua afluyente (Tabla 9) indican que pueden ser clasificadas como ARU fuertes (Tabla 10) [44], [83].

Las cargas de amonio registradas durante el periodo de estudio, coinciden con las reportadas en otros sistemas de humedales [84], [85]. Las mayores cargas se registraron en septiembre y octubre mientras que las menores ocurrieron entre los meses de noviembre y febrero en los todos los sistemas estudiados (Gráfica 4). Los altos valores de nitrógeno mostrados en el agua afluyente se deben probablemente a la hidrolisis de la urea en la orina procedente de las descargas de los baños de la universidad del Atlántico y a la presencia de compuestos orgánicos nitrogenados.



Gráfica 4. Valores de las cargas de Amonio

Sobre una base de eliminación en masa, el tratamiento con *Thalia geniculata* eliminó el 87% de amonio, mientras que el tratamiento con *Cyperus articulatus* y el control sin plantas eliminaron el 62% y el 45%, respectivamente (Gráfica 5). Dentro del diseño experimental no se contempló realizar análisis de nitrógeno total, por otro lado se realizaron los análisis de amonio, nitritos y nitratos los cuales se contemplaron como fuente principal de nitrógeno para el sistema de humedal construido.



Gráfica 5. Porcentaje de eliminación de Amonio en los HC FSSH

Existen varios factores importantes para la obtención de estos resultados, algunos de ellos pueden estar relacionados con el desarrollo de un área radicular (área oxigenada) y una mayor biomasa en *Thalia geniculata* con respecto a *Cyperus articulatus*; de este modo se favoreció el desarrollo de micro zonas aeróbicas y por tanto mayor crecimiento de biopelículas de microorganismos oxidantes de amonio (OA), favorecidos por los valores de pH superiores a 7.2 unidades, que permiten una mayor actividad en este rango de neutralidad [44],[11],[86],[4],[12]. Otros autores registraron en estos mismos sistemas de estudio, más de 121 aislados bacterianos, principalmente OA en las zonas radiculares de las macrófitas *Thalia geniculata* y *Cyperus articulatus*, por lo que confirma lo expuesto teóricamente sobre las micro zonas radiculares aeróbicas; de igual forma se reportó que en las muestras de grava de los HC no plantados, se encontró poca presencia de la comunidad bacteriana oxidante, así, en

Thalia geniculata 35 especies, en *Cyperus articulatus* 31 especies y en sistemas no plantados 11 especies [84], [85].

Otro factor importante, está relacionado con el metabolismo de las macrófitas, ya que necesitan nitrógeno para su desarrollo y formación de tejidos. Varios autores afirman que las plantas pueden absorber hasta un 15% de amonio [8],[87]. Es razonable que la mayor producción de biomasa y crecimiento registrados en el humedal plantado con *Thalia geniculata* aportara la mayor eliminación de amonio. Los análisis de comparación entre los sistemas indicaron diferencias significativas (Tabla 13).

Tabla 13. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Amonio

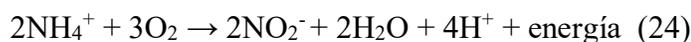
<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
AMONIO <i>T. geniculata</i> - AMONIO <i>C. articulatus</i>	*	0.04173	0.360955
AMONIO <i>T. geniculata</i> - AMONIO Sin plantas	*	0.01724	0.360955
AMONIO <i>C. articulatus</i> - AMONIO Sin plantas	*	0.04555	0.360955

* indica una diferencia significativa.

Está ampliamente documentado que los HC FSSH plantados presentan mayor eliminación de amonio que los sistemas no plantados [88],[81], como se pudo constatar en esta investigación. Es oportuno entonces, inferir que la presencia de macrófitas es esencial en los humedales construidos para mejorar la eliminación de nitrógeno amoniacal [89], [90], [91], [23].

En los HC plantados, hipotéticamente, se presentó la remoción de amonio o nitrógeno amoniacal por medio de nitrificación mediante las bacterias específicas nitrificantes; en las aguas residuales el proceso respiratorio de nitrificación se considera el proceso principal para la eliminación de amonio [92]. Las razones para considerar esta hipótesis se basan entre otros aspectos a los valores de pH y oxígeno disuelto observados, además de la presencia de bacterias OA. En la ecuación 24 se observa la reacción de nitrificación (oxidación de amonio a nitrito), la cual consume alcalinidad disminuyendo el pH, reforzando la hipótesis evidenciada en los valores de potencial de hidrógeno (Tabla 6). Varios autores [37],[81], [61],[3], afirman que las concentraciones de OD de 1 mg/L son suficientes para la

oxidación de amonio [90],[93],[94], por lo que los valores de oxígeno disuelto registrados en los humedales de esta investigación, estarían participando en los procesos de nitrificación.



Nota: Se liberan 4 moles de H⁺ por cada 2 moles de nitrógeno amoniacal, lo que repercute en el pH del sistema

La eliminación de amonio en *Cyperus articulatus* fue similar a la reportada para *Cyperus ligularis* [44], con remoción ligeramente superior al 60% en similares condiciones de tratamiento a las experimentadas en este estudio. Igualmente, se ha reportado eliminaciones similares de amonio para *Cyperus involucratus* [5]. De acuerdo con algunos autores, especies de macrófitas de la familia Cyperaceae han sido consideradas especies con alto potencial fitodepurador [59],[95].

Tabla 14. Comparación de concentraciones promedio, en mg/L de amonio, *Cyperus ligularis* vs *Cyperus articulatus* desviaciones estándar (DE) en paréntesis.

MACRÓFITA	AFLUENTE	EFLUENTE
<i>Cyperus ligularis</i> (Charris et al., 2016)	69.2 (±46)	26.3 (±13.9)
<i>Cyperus articulatus</i>	54 (±35)	24 (±21)

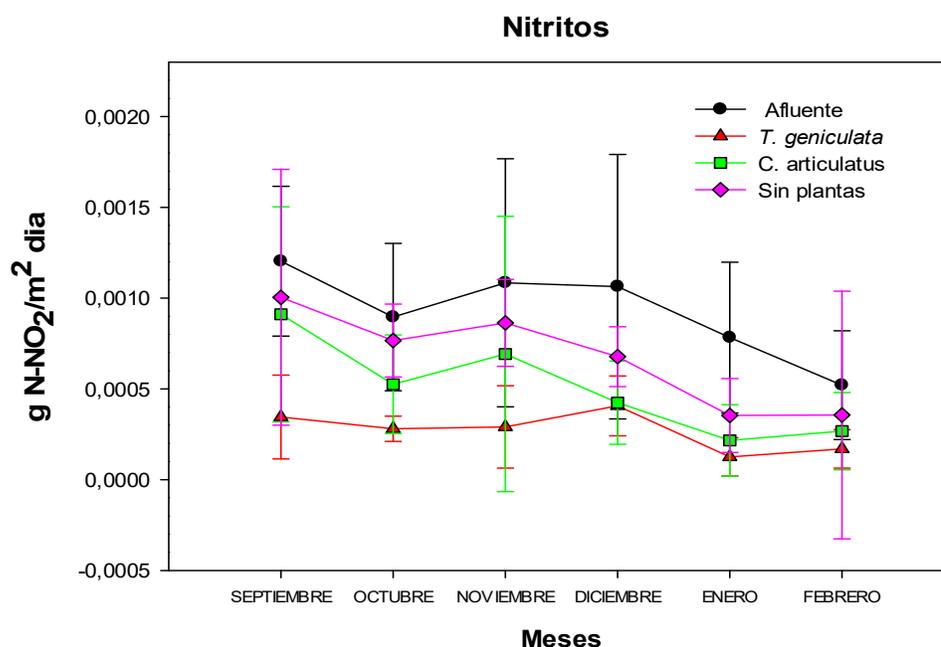
Se concluye que el mecanismo principal de eliminación de amonio en los humedales plantados, estuvo principalmente relacionado con la nitrificación en su etapa primaria de nitrificación o nitrificación parcial [96], [36].

La eliminación deficiente de amonio en los sistemas sin plantas estaría asociada a la nitrificación incompleta, asociado a la baja cantidad de especies bacterianas OA en la grava del sustrato [92], [97], [80].

La legislación colombiana no presenta un valor estipulado para nitrógeno amoniacal. [22]

4.3.3 Nitritos (N-NO₂)

Los valores de nitritos en el agua afluyente fueron típicos para agua residual doméstica (Tabla 10). En los HC con *Thalia geniculata*, hipotéticamente, se presentó remoción de nitrito a través de oxidación a nitrato (nitratación), debido a las condiciones favorables de pH, oxígeno disuelto y bacterias nitrificantes oxidativas cuantificadas de la investigación en paralelo [84],[85] (Gráficas 6 y 7).

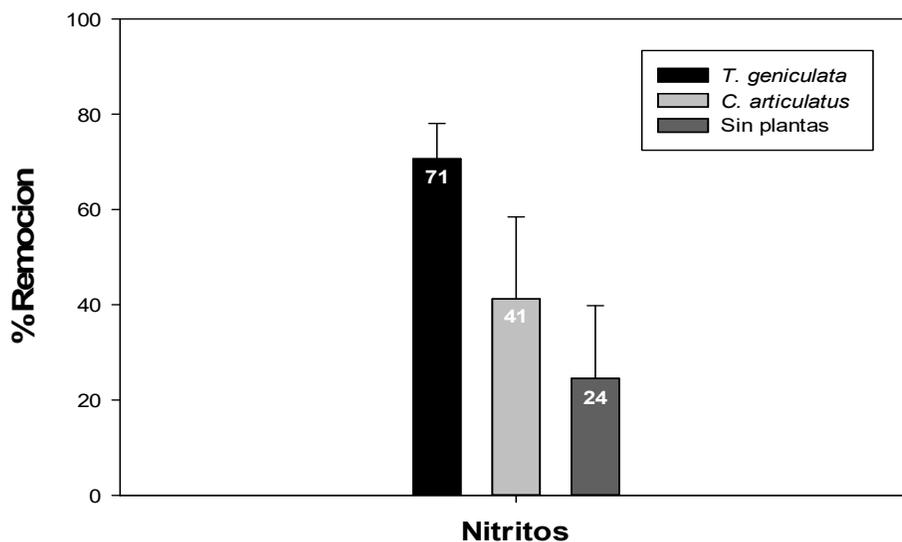


Gráfica 6. Valores de las cargas de Nitritos

El oxígeno disuelto en la rizosfera de las plantas beneficia el proceso de oxidación de especies amonio-nitrito y posteriormente especies nitrito-nitrato, incluso bajo condiciones redox moderadamente reducidas, además de estimular el crecimiento de bacterias nitrificantes [59],[33],[34],[90].

En los HC con *Cyperus articulatus* la remoción de nitritos fue moderada, debido posiblemente a una reducida nitratación, esto causado por una menor densidad de comunidad bacteriana nitrificante (31 especies), produciéndose una leve acumulación de especies nitrito. Es oportuno mencionar que las concentraciones de nitrito tanto afluyente

(0.02 mg N-NO₂/L) como de efluente (0.01 mg N-NO₂/L) registradas por [44] fueron similares a las halladas en esta investigación (0.025 mg N-NO₂ /L afluente y 0.013 mg N-NO₂ /L efluente), reconociéndose un comportamiento similar entre las especies del genero *Cyperus*.



Gráfica 7. Porcentaje de eliminación de Nitritos en los HC FSSH

En la Tabla 15 se describen las diferencias significativas entre las especies *Thalia geniculata* y *Cyperus articulatus* en la eliminación de nitritos por la mayor presencia de bacterias nitrificantes tanto aeróbicas como anaeróbicas, aunque con valores similares de pH, OD, temperatura y condiciones Redox [33],[4].

En los sistemas sin plantación el reducido contenido de OD, los valores de pH por encima de 8.0 unidades y la poca presencia de microorganismos nitrificantes [85], no permitió en gran medida, la oxidación de nitritos (nitratación), como tampoco a la remoción de amonio. [10],[12],[31]. Estos resultados se confirman en la tabla 15 donde se aprecia que los sistemas plantados con *Cyperus articulatus* y sin plantas no presentaron diferencia significativa en cuanto a la remoción de nitritos ($p > 0.05$).

Tabla 15. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Nitritos

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
NITRITOS <i>T. geniculata</i> - NITRITOS <i>C. articulatus</i>	*	0.02725	0.000203
NITRITOS <i>T. geniculata</i> - NITRITOS Sin plantas	*	0.04263	0.000203
NITRITOS <i>C. articulatus</i> - NITRITOS Sin plantas		0.06248	0.000203

* Indica una diferencia significativa.

Es bastante claro, entonces, el aporte significativo de las macrófitas plantadas en cuanto a la remoción de este contaminante. Muchas investigaciones han documentado las diferencias en la eficiencia de eliminación de nitritos entre los humedales plantados y los no plantados [42], y su razón radica en el hecho que en la rizosfera de las plantas, las reacciones de nitrificación (nitritación y nitratación) ocurren más eficientemente, además los productos iniciales (amonio) y finales (nitrato) pueden ser asimilados por las plantas o difundidos a la capa reductora para ser convertido en formas gaseosas como nitrógeno gas y óxidos de nitrógeno gaseosos vía desnitrificación [66]. El desarrollo de este proceso permite, entonces, que los HC plantados superen a los HC sin plantación en la eliminación de nitritos.

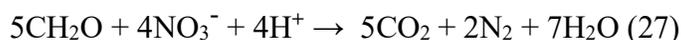
Los valores de pH y temperatura en los sistemas de esta investigación encajaron dentro de los bien llamados valores óptimos para la nitrificación, sin embargo dichos parámetros no definen necesariamente el desarrollo completo del proceso bioquímico en cuestión [12],[32]. Para la nitrificación se necesitan temperaturas entre 25-35°C, de igual forma valores de pH entre 7.0 a 8.0 unidades [31]. Los valores presentados en cada unidad de HC se dieron dentro de estos rangos. La legislación colombiana no presenta un valor estipulado para nitritos. [22]

4.3.4 Nitratos (N-NO₃)

La remoción de nitrato en los sistemas de HC, se dio teóricamente vía desnitrificación y adsorción (plantas y microorganismos). Los HC con la especie *Thalia geniculata* presentaron la mayor eliminación de nitratos. Los estudios de [85] reportaron un recuento de microorganismos desnitrificantes en los HC de este trabajo, de 20 aislados bacterianos

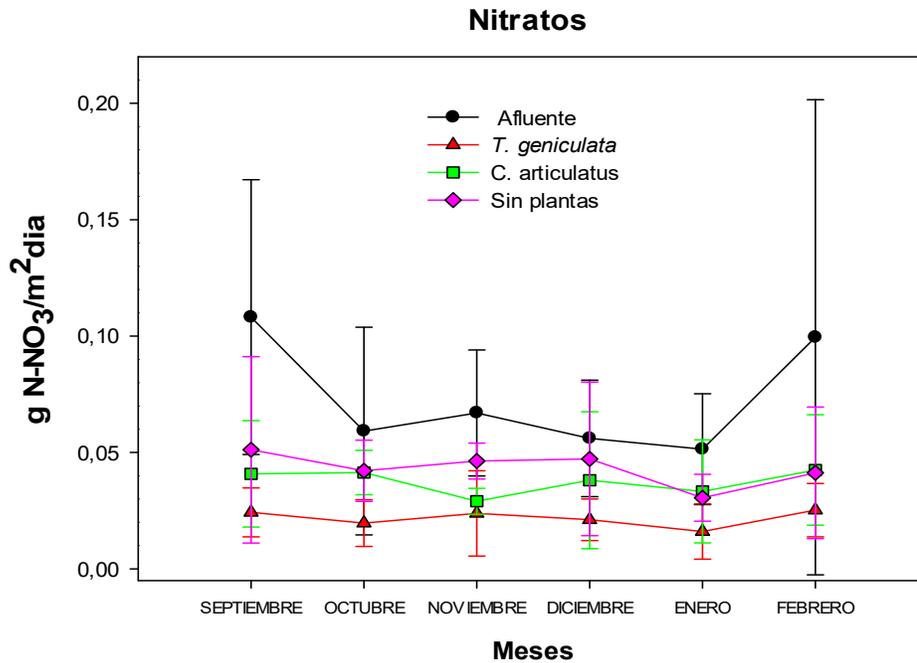
desnitrificantes para *Thalia geniculata*, 18 para *Cyperus articulatus* y 6 para los no plantados.

La eliminación de nitritos vía oxidación, resulto en la formación de nitratos, el cual posiblemente fue usado por los microorganismos desnitrificadores [18],[16],[98]. La explicación teórica a la mayor remoción de nitratos en estos sistemas, principalmente *Thalia geniculata* (Gráfica 8 y 9) se debe a que las bacterias facultativas desnitrificantes necesitan además de nitratos, una fuente de carbono lábil para realizar el proceso de desnitrificación, convirtiendo los nitratos en nitrógeno gas (N₂) [53],[7]. Este proceso químico les confiere energía para su crecimiento. Hipotéticamente las raíces de las macrófitas en los HC presentaron aporte de materia orgánica lábil o carbono orgánico disponible a través de sus exudados, por lo cual se aumentó el rendimiento de eliminación de nitratos (ecuación 27).

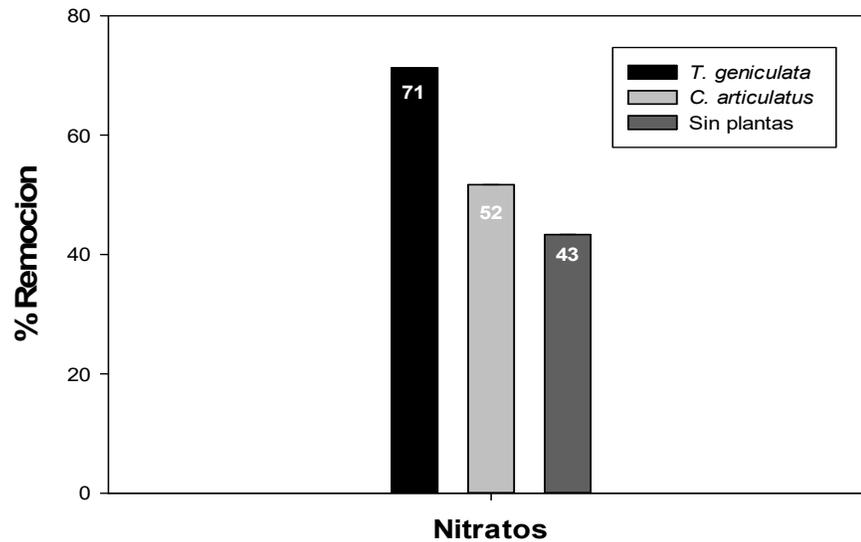


Algunos estudios han encontrado que hasta el 40% del carbono neto total fijado por fotosíntesis se libera como exudado en las raíces de las macrófitas; por otra parte se ha descubierto que el carbono orgánico lábil representa el 71 % del potencial de desnitrificación, [99], [98]. La asimilación por parte de las plantas pudo haber contribuido a la eliminación de nitratos de las aguas residuales afluentes, debido a que estos son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. [32], [12], [100], [33], [53], [51], [7].

Otro factor que influye en el proceso de desnitrificación es pH del medio; para este proceso se requieren valores entre 6.5 a 7.5 unidades de pH, valores que se ajustan a los presentados dentro de los sistemas con *Thalia geniculata* y *Cyperus articulatus*. La temperatura no afecto el proceso de desnitrificación en estas unidades, debido a que los valores óptimos se encuentran desde 20 a 25 °C, los cuales se observaron en los sistemas plantados.



Gráfica 8. Valores de las cargas de Nitratos



Gráfica 9. Porcentajes de eliminación de Nitratos en los HC FSSH

En los sistemas con *Cyperus articulatus* probablemente la menor eliminación de nitratos se debió a una menor disponibilidad de bacterias desnitrificantes como de carbono orgánico lábil, por el contrario, la asimilación por parte de las macrófitas, teóricamente, aportó en la remoción de nitratos [7], [31], [101].

En los sistemas sin plantación probablemente la eliminación de nitratos fue limitada por la deficiencia de carbono orgánico lábil, como consecuencia la disminuida comunidad de bacterias desnitrificantes (6 especies aisladas), no llevaron a cabo los procesos de remoción. Además de estas observaciones, el pH no favoreció las reacciones de desnitrificación debido a los valores de 8.1 unidades en estos sistemas por fuera de los rangos óptimos [31], [90], [88].

En general, los sistemas plantados presentaron tasas de remoción significativas en comparación con los sistemas sin plantas. Es bastante claro que las plantas fueron determinantes en la remoción de este contaminante, debido al aporte de materia orgánica lábil a través de sus exudados para los microorganismos desnitrificantes y en la absorción o asimilación directa de N-NO₃ [3],[54],[98],[66]; se sabe que los nitratos, pueden almacenarse en las vacuolas de las plantas sin efectos perjudiciales, participando en la osmoregulación de las macrófitas [12],[31]. Sin embargo, en la tabla 16 se muestra que no hubo diferencias significativas entre los HC sin vegetación y los plantados con *Cyperus articulatus*, mientras que la especie de *Thalia geniculata* presentó diferencia en comparación con los demás sistemas (p<0.05).

Tabla 16. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Nitratos

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
NITRATOS <i>T. geniculata</i> - NITRATOS <i>C. articulatus</i>	*	0.01520	0.0092413
NITRATOS <i>T. geniculata</i> - NITRATOS Sin plantas	*	0.02164	0.0092413
NITRATOS <i>C. articulatus</i> - NITRATOS Sin plantas		0.06803	0.0092413

* indica una diferencia significativa.

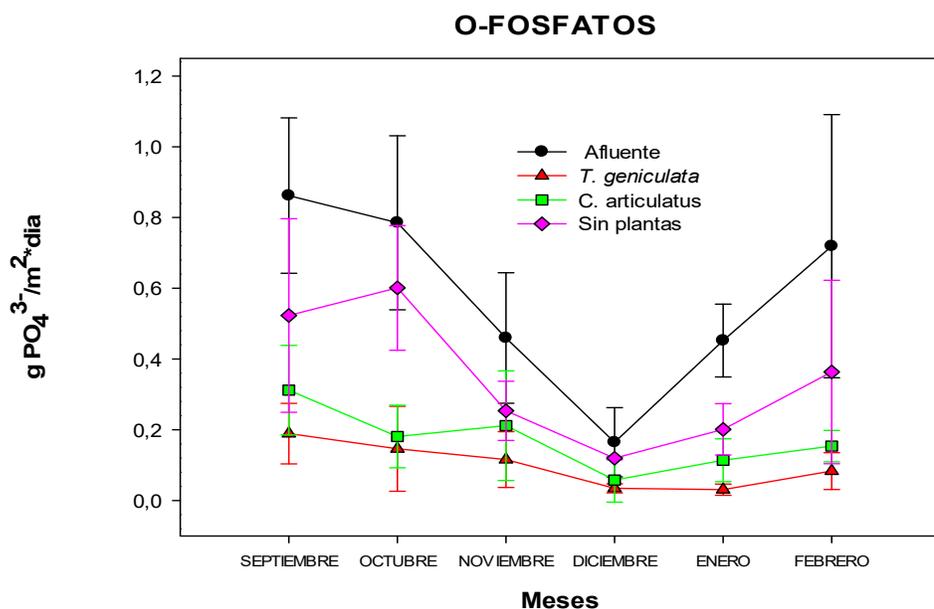
Es importante señalar que la principal razón para la eliminación de nitrógeno en sus formas estudiadas (amonio, nitrito y nitrato) es el proceso de nitrificación completa y su final desnitrificación; dicho proceso es subsecuente y cada etapa es dependiente una de la otra en ambos sentidos, lo que permite inferir que la poca eliminación de una de las especies, supondrá la disminución en el rendimiento de las demás etapas de eliminación. Esto se observa en la remoción de la especie amonio, dando como resultado la eliminación de

nitritos y nitratos (observado en *Thalia geniculata*) y todo lo contrario sucedió para aquellos sistemas que procuraron una poca remoción de amonio (acumulación) y su poca eliminación de nitritos y nitratos (sistemas sin plantas). La legislación colombiana no presenta un valor estipulado para nitratos amoniacal. [22]

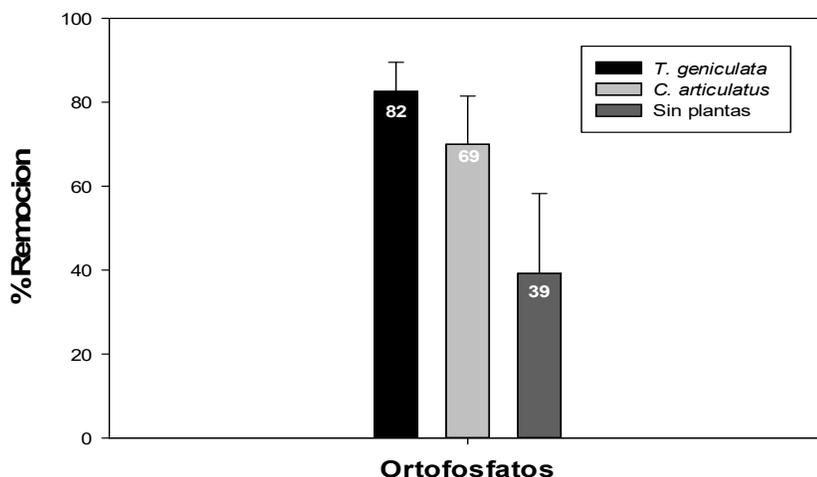
4.3.5 Ortofosfatos (PO_4^{3-})

Los valores encontrados en el afluente son típicos de aguas residuales domésticas media o moderada (Tabla 10) [12],[100],[79]. Estos macronutrientes tienden a acumularse en los sustratos y sedimentos de los HC. El principal mecanismo para su eliminación es precisamente la retención o acumulación a través de procesos filtrantes y asimilativos dentro de los sistemas de fitodepuración [14],[17].

La remoción de ortofosfato promedió 82% y 69%, en sistemas plantados y 37% en el sistema no plantado (Gráficas 10 y 11). Teóricamente, las eliminaciones de este contaminante en los HC se debió a procesos de adsorción (vía sustrato), absorción (vía microorganismos), complejización, asimilación de las macrófitas y reacciones de precipitación.



Gráfica 10. Valores de las cargas de Ortofosfatos



Gráfica 11. Porcentajes de eliminación de O-fosfatos en lo HC FSSH

Los valores de pH se encontraron dentro del rango para los cuales se argumentan óptimas remociones de ortofosfatos (6.6 a 7.4 unidades de pH) [58]. La eliminación de ortofosfatos de las aguas residuales está aparentemente relacionada con la eliminación de nitrógeno, principalmente en la remoción de nitratos; en investigaciones recientes se ha descubierto que las bacterias desnitrificantes asimilan ortofosfato como macronutriente para sus funciones biológicas utilizando nitrato como aceptor de electrones [8],[102]; se les conoce como organismos desnitrificantes acumuladores de fósforo (DNPAO) [103],[104]. Estos organismos pueden combinar la eliminación de ortofosfatos y la desnitrificación [105],[106]. Por los resultados encontrados y lo planteado anteriormente para la eliminación de nitratos, los HC con *Thalia geniculata* y *Cyperus articulatus* procuraron la mayor actividad y densidad bacteriana desnitrificante, por lo que se esperarían mayores procesos asimilativos del nutriente ortofosfato.

Por otro lado, es importante mencionar que la cosecha realizada a las macrófitas, teóricamente, ayudo en la eliminación de ortofosfato debido a la asimilación a través de las plantas; dicha poda se realizó al finalizar el tercer mes de investigación. Esto último expuesto junto con los porcentajes de eliminación confirman las diferencias significativas presentadas entre los sistemas plantados y los no plantados ($p < 0.05$) (Tabla 17).

Tabla 17. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Fosfatos

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
FOSFATOS <i>T. geniculata</i> - FOSFATOS <i>C. articulatus</i>		0.06718	0.0791806
FOSFATOS <i>T. geniculata</i> - FOSFATOS Sin plantas	*	0.02787	0.0791806
FOSFATOS <i>C. articulatus</i> - FOSFATOS Sin plantas	*	0.02107	0.0791806

* indica una diferencia significativa.

En los HC sin plantación, posiblemente no se presentó absorción de ortofosfato y esto se explica entre otros aspectos por la baja densidad de comunidad bacteriana, principalmente nitrificante y desnitrificante, sumado a esto, las algas encontradas en la tubería de entrada teóricamente pudieron asimilar ortofosfato, sin embargo, debido su funcionamiento, dicha absorción pudo ser a corto plazo ya que su mecanismo de crecimiento, muerte y descomposición devuelve la mayor parte del nutriente a la columna de agua, realizando la desorción de fosfato [102], [12]. Es importante anotar que las algas fueron retiradas de la tubería de entrada al humedal construido; esta densidad de algas no fue determinada cuantitativamente.

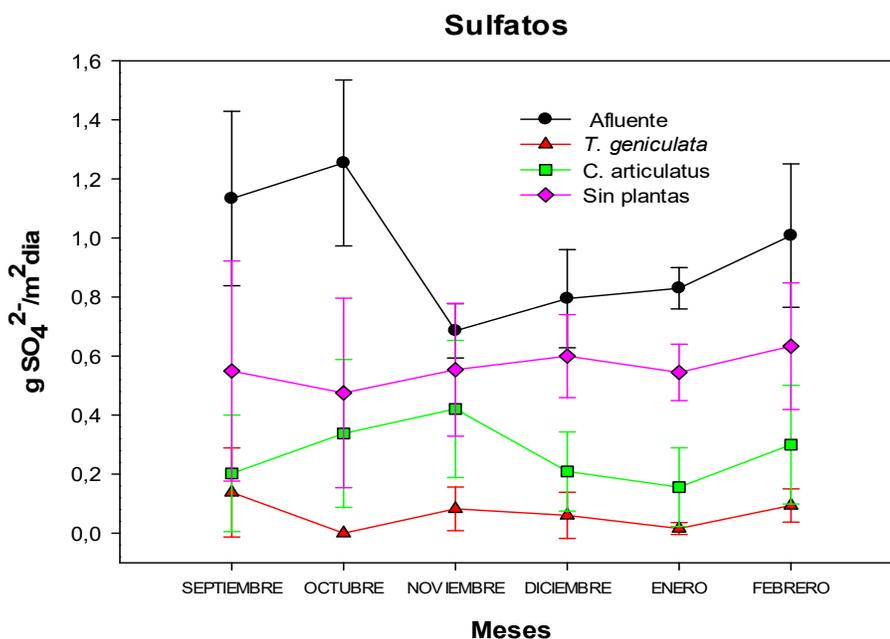
Igual que se ha constatado en esta investigación, otros estudios demuestran de manera similar, que los ortofosfatos son eliminados en mayor proporción por los sistemas plantados que en los no plantados [104],[25]. Se ha estimado que las plantas dependiendo la especie, pueden mejorar hasta en un 30% la eliminación de ortofosfatos. *Thalia geniculata* ha sido reportada como una planta tropical con alto potencial para la remoción de fósforo [107] [34],[79],[11].

Para estimar eliminaciones de nutrientes, existen relaciones de asimilación por parte de los microorganismos de DQO:N:P. Cabe resaltar que según la literatura, para calcular estas relaciones se debió tener resultados de NTK y Fosforo total, sin embargo estos no se consideraron en la investigación; se estipuló entonces que nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y ortofosfatos son especies mayoritarias de nitrógeno y fosforo en las aguas residuales. Para estimular la eliminación en simultaneo de materia orgánica, nitrógeno y fosforo en condiciones limitadas de carbón, como son las aguas residuales domésticas, se deben certificar relaciones de DQO:N por encima de 10.0/1.0 [118]. Por tal motivo se

encontró para esta investigación relaciones de 10.2/3.8 las cuales permiten estipular que fue suficiente para soportar la eliminación de fosforo. Es decir, las DNPAO puede combinar la eliminación de fosforo y la desnitrificación en un solo proceso utilizando la misma cantidad de sustrato orgánico.

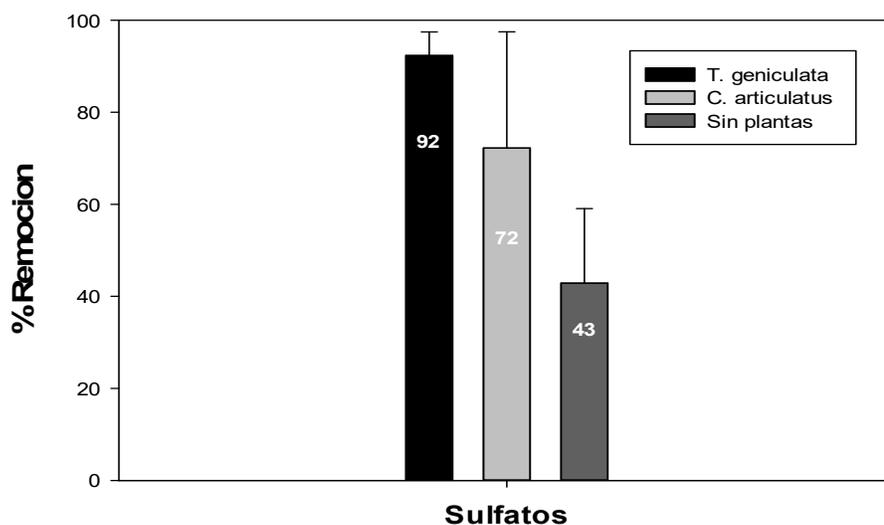
4.3.6 Sulfatos (SO_4^{2-})

El agua afluyente presentó concentraciones típicas de sulfatos para aguas residuales urbanas débiles (Tablas 6 y 7). En las gráficas 12 y 13 se observan las cargas promedio de sulfatos y los porcentajes de eliminación registrados en el afluyente y efluentes para los HC FSSH en esta investigación.



Gráfica 12. Valores de las cargas de Sulfatos

En los sistemas de humedales plantados posiblemente se presentaron exudados radiculares de las macrófitas, estos son sustancias orgánicas de bajo peso molecular que aportan mayor contenido de carga orgánica lábil promoviendo reacciones de sulfatoreducción, causando remociones de materia orgánica (medibles en forma de DQO) y especies químicas de sulfatos [108].



Gráfica 13. Porcentaje de eliminación de Sulfatos en los HC FSSH

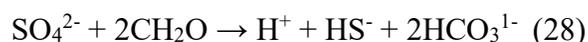
Es posible que los humedales plantados con *Thalia geniculata* presentaron mayor remoción de sulfatos (92%), debido probablemente a la mayor disponibilidad de materia orgánica lábil, suministrada por los exudados de dicha macrófita, en comparación con los aportes de la macrófita *Cyperus articulatus*, donde la remoción se observó al 68%. En estos sistemas se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) con respecto a los humedales sin plantación (Tabla 18). Teóricamente, la presencia de mayores concentraciones adicionales de materia orgánica lábil en los sistemas plantados, permitieron a las bacterias sulfatoreductoras crecer exponencialmente, debido a la afinidad por este tipo de sustancias [10],[17],[77],[78]. Caso contrario, se observó con los sistemas sin plantación, donde la remoción de DQO (81%) no estuvo acompañada de la remoción de sulfatos (42%), posiblemente por inexistencia bacterias sulfatoreductoras o su baja actividad microbiana de reducción. Se ha estimado en investigaciones anteriores, que el 60% de la materia orgánica es eliminada a través de vías importantes como la sulfatoreducción y la metanogénesis [69],[82],[78],[79],[80],[81],[110],[108],[111],[77]. Puede concluirse entonces que el aporte de materia orgánica lábil y soluble afecta la eliminación de sulfatos.

Tabla 18. Diferencias significativas entre los sistemas para eliminación de Sulfatos

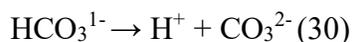
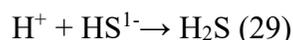
<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
SULFATOS <i>T. geniculata</i> - SULFATOS <i>C. articulatus</i>	*	0.02358	0.108107
SULFATOS <i>T. geniculata</i> - SULFATOS Sin plantas	*	0.03865	0.108107
SULFATOS <i>C. articulatus</i> - SULFATOS Sin plantas	*	0.02503	0.108107

* indica una diferencia significativa.

Las bacterias sulfatoreductoras (SBR) realizan reducción de sulfato desasimilativo tomando como agente oxidante y aceptor final de electrones al sulfato, reduciéndolo a compuestos de sulfuro [112],[113]. La reacción mediada por las SBR es como sigue:



(CH₂O representa un compuesto orgánico simple)



Nota: El CO₃²⁻ se precipita y disminuye el pH del sistema, otro factor que confirma los valores de pH en los humedales plantados de esta investigación. [70]

En la reacciones 28 y 29 se observa la formación de sulfuros de hidrógeno, una porción pequeña es asimilada por los microorganismos dentro del sistema y otra gran porción es eliminada del humedal hacia el ambiente externo en forma de gas debido a su característica volátil [4]. Estequiométricamente, las SRB requieren solo 133 mg/L de DQO para consumir todo el sulfato de 200 mg/L suministrado en el afluente; por lo tanto, la DQO suministrada por día desde el afluente, superó con creces la cantidad requerida por las SRB para eliminar el sulfato disponible (143 mg/L DQO), sin incluir la materia orgánica lábil y estable suministrada por los exudados de las macrófitas, es por ello, que es contundente las remociones encontradas > 90 % en los sistemas plantados principalmente con *Thalia geniculata* (Gráfica 13) [108].

El efecto neto de las macrófitas en la remoción de los sulfatos, fue aumentar la actividad de las SRB, reduciendo así este contaminante en gran medida.

Las macrófitas en los HC tuvieron la capacidad de:

- * Proporcionar oxígeno disuelto en la rizosfera, este, es fuente de energía para microorganismos aeróbicos que degradan las moléculas orgánicas, siendo estas luego fuente de carbono lábil o soluble para las SRB entre otras.

- * Proporcionar carbono orgánico lábil (a través de exudados), aumentando la actividad de las SRB

En los sistemas no plantados, hipotéticamente no se presentó aporte materia orgánica lábil y soluble. Es oportuno mencionar que las algas en estos humedales, solo se encontraron en la tubería de entrada y el primer tramo, por ello su degradación no ocurrió. La presencia de algas en los humedales construidos sería viable desde el punto de vista del suministro adicional de materia orgánica lábil, solamente cuando esta pueda ser degradada. Hasta el 70 % del contenido de las algas es de proteínas, polisacáridos y lípidos, macromoléculas degradables por bacterias que se encuentran en los sistemas de HC, sin embargo dichos microorganismos utilizan preferiblemente moléculas simples para sus actividades biológicas [114]. Cuando los roles de las SRB se han demostrado en buen número de estudios, el énfasis en el papel de las algas aún debe documentarse adecuadamente y necesita mayor atención para los humedales construidos [115].

5. CONCLUSIONES

La evaluación de la eficiencia de humedales construidos plantados con macrófitas tropicales *Thalia geniculata* y *Cyperus articulatus* permitió considerarlos como alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en las áreas rurales y aisladas de la región del Caribe colombiano. La utilización de macrófitas en estos sistemas de tratamiento es mayoritariamente importante para mejorar los procesos de eliminación de contaminantes en comparación con aquellos sistemas que no cuentan con ningún tipo de componente vegetal plantado. Los resultados de los análisis estadísticos señalaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los HC plantados y los no plantados, en términos de remoción de contaminantes.

La macrófita *Thalia geniculata* permitió altas eficiencias de eliminación de Sulfatos, DQO, Ortofosfatos, Nitrógeno amoniacal, Nitritos y Nitratos. Esta especie incidió específicamente en la remoción de ortofosfatos, sulfatos y especies nitrogenadas.

Los parámetros como oxígeno disuelto y potencial redox influyeron en los mecanismos de remoción de los contaminantes, al permitir condiciones tanto oxidativas y reductoras en los sistemas de tratamiento.

Se concluye que la evapotranspiración influyo directamente en el volumen de agua tratada y los valores de la conductividad eléctrica para los sistemas plantados. *Thalia geniculata* presento mayor evapotranspiración y por consiguiente mayores unidades de conductividad eléctrica.

Las remociones de materia orgánica en forma de DQO se presentaron por encima del 80% para todos los sistemas utilizados, indicando así la viabilidad para ser incluidos como elementos participativos en la depuración de aguas residuales domésticas. Se concluye que los sistemas de humedales construidos con plantas y sin plantación funcionan como excelentes lechos filtrantes, permitiendo la reducción del material coloidal y aportando en la eficiencia de eliminación de materia orgánica particulada. En resumen, los sistemas

plantados independientes del tipo de macrofita utilizada, no presentan diferencias significativas en cuanto a la eliminación de DQO y Sólidos Suspendidos Totales.

La mayor biomasa presentada por la especie *Thalia geniculata* con respecto a *Cyperus articulatus*, permite concluir que dicha macrofita necesita mayores requerimientos como lo son el volumen hídrico, una mayor tasa de transpiración para contribuir a una mayor evapotranspiración y de igual forma, permite una mayor asimilación de nutrientes presentes del agua residual. En síntesis se permitieron mayores zonas radicales como también crecimiento de biofilm, dando lugar a la aparición de bacterias oxidantes de amonio causantes de la nitrificación completa y aportando en la eficiencia remoción de nitrógeno amoniacal cercana a un 87%. Por otro lado se puede concluir que los sistemas de humedales sin plantación son poco factibles para la remoción de nitrógeno en sus formas de amonio, nitrito y nitratos, solo consiguiendo remociones máximas del 50%.

Los sistemas plantados mostraron buenas eficiencias de remoción de los nutrientes ortofosfatos (82% y 69% para *Thalia geniculata* y *Cyperus articulatus* respectivamente), puede concluirse que esto es debido a las mayores biomásas encontradas (asimilación de las macrófitas) y mayores densidades microbianas (*Thalia geniculata* específicamente), ayudado además de las acumulaciones y sedimentación en los sustratos de los sistemas. En síntesis la presencia de las plantas mejora la eliminación de los ortofosfatos.

Las altas remociones encontradas en los sistemas plantados con *Thalia geniculata* (92%) y *Cyperus articulatus* (72%) para contaminantes sulfatos, puede concluirse que se presentaron por el efecto neto de las macrófitas en el aumento de la actividad de las bacterias sulfatoreductoras, debido a la inyección de oxígeno disuelto a la rizosfera promoviendo reacciones para la mineralización de la materia orgánica, que luego pasan a ser fuente de carbono lábil para dichas bacterias.

6. RECOMENDACIONES

Las macrófitas *Thalia geniculata* y *Cyperus articulatus* se recomiendan para sistemas de tratamiento con humedales construidos en las zonas rurales del Caribe colombiano, dadas sus propiedades de rápido crecimiento y el aporte en la eliminación de materias orgánicas y contaminantes del agua residual.

En pro de generar mayor conocimiento en cuanto a los procesos de eliminación de sulfatos y nitrógeno, se recomienda realizar evaluaciones analíticas y cuantitativas de bacterias sulfatoreductoras, nitrificantes y desnitrificantes. De igual manera, es viable realizar análisis de Nitrógeno total (NTK) y fósforo total para entender con mayor claridad el ciclo de estos contaminantes dentro de los humedales construidos.

Se recomienda realizar las mediciones de pH, Oxígeno disuelto y potencial redox a diferentes profundidades para de esta forma obtener valores más claros que ayudan a entender el comportamiento de dichos parámetros dentro humedal construido.

Es recomendable en futuras investigaciones, incluir en la evaluación de la eliminación de contaminantes, el parámetro de alcalinidad, debido su relación con los valores de pH, oxígeno disuelto y potencial Redox.

En la utilización de los tubos aireadores insertados, se recomienda su evaluación a través de los cálculos de sus tasas de transferencias para permitir mayor información en cuanto al aporte del oxígeno disuelto al sistema de humedales construidos.

Se recomienda la poda o cosecha de macrófitas cada trimestre o cuando sea pertinente, con la intención de evitar la dispersión de hojas, crecimiento excesivo, la estabilidad y/o disminución de remoción (asimilación, aporte de oxígeno disuelto, etc.), cuyas características inciden directamente en la eficiencia del sistema. La biomasa resultante de la poda, podría ser aprovechada para producción de bioetanol, fines industriales o como alimento para ganado.

Se recomienda realizar la limpieza periódica de las tuberías, mediante remoción física de sólidos retenidos, biomasa de algas, etc., a fin de evitar obstrucciones en las conexiones y tramos de los sistemas de humedales. De esta forma se garantiza la adecuada circulación de agua y se impide la interacción física-química con las algas.

Finalmente, se recomienda impulsar la aplicación de la tecnología de humedales construidos en la región del caribe colombiano, en ayuda con los gobiernos departamentales y municipales.

7. REFERENCIAS

- [1] Unesco. Las aguas residuales: el recurso desaprovechado. Perugia. 2017.
- [2] Orozco, Monica; Paredes, Diego. Efectividad en la remoción de organismos patógenos de aguas residuales domésticas utilizando humedales construidos con diferentes tipos de flujos. Pereira, 2010, 89p. Univerisdad Tecnologica de Periera. Facultad de Tecnologias.
- [3] García, Jenny; Paredes, Diego. Efecto del uso de plantas y configuración de los sistemas en la remoción de organismos patógenos mediante el uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones tropicales. Pereira, 2010, 76p. Univerisdad Tecnologica de Periera. Facultad de Tecnologias.
- [4] Kadlec, R; Wallace, S. Treatment Wetlands. Segunda Edición. Boca Raton: CRC Press, 2009. 893p.
- [5] Kantawanichkul, S; Kladprasert, S; Brix, H. Treatment of high-strength wastewater in tropical vertical flow constructed wetlands planted with *Typha angustifolia* and *Cyperus involucratus*. En: Ecological engineering. Vol.; 5. No 35 (May-Jun. 2008); p. 238–247
- [6] Tanner, C. Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. En: Water Science and Technology. Vol.; 44. No 11-12 (2001); p. 9–17.
- [7] Zhai, X; Piwpuan, N; Arias, C; Headley, T; Brix, H. Can root exudates from emergent wetland plants fuel denitrification in subsurface flow constructed wetland systems ? En: Ecological Engineering. Vol.; 61. No 3 (Feb-Abr. 2013); p. 555–563.
- [8] Akrotos, C; Tsihrintzis, V. Effect of temperature , HRT , vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. En: Ecological Engineering. Vol.; 29. (Feb-Jun. 2006); p.173–191.
- [9] Zhang, Chong; Liu, Wen Li; Pan, Xiao Cui; Guan, Ming; Liu, Shu Yuan; Ge, Ying; Chang, J. Comparison of effects of plant and biofilm bacterial community parameters on removal performances of pollutants in floating island systems. En: Ecological Engineering. Vol.; 73. (May-Sep. 2014); p. 58–63.

- [10] Piñeyro, Marcelo; Chalar, Guillermo; Quintans, Federico. Experiencia piloto humedales construidos: Efectos de la estacionalidad de un ciclo anual en el tratamiento de efluentes de un frigorífico de pescado. Montevideo, 2016, 65p. Universidad de la Republica. Facultad de Ciencias
- [11] Londoño, Luz; Vanegas, Carolina; Salas, Diana. Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética. Pereira, 2009, 212p. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología.
- [12] Martínez, Pedro. Evaluación y Diseño de un Humedal Construido para la Depuración de Aguas Residuales Domésticas. Murcia, 2007, 495p. Universidad de Murcia. Facultad de Química.
- [13] Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Congreso Nacional Del Medio Ambiente: Cumbre Del Desarrollo Sostenible. Madrid. 2010.
- [14] Llagas, W; Guadalupe, E. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. En: Revista del instituto de investigación FIGMMG. Vol.; 15. No 17 (2014); p. 85–96.
- [15] EPA (U.S. Environmental Protection Agency) Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. A technology assessment. Washington, DC. 1993.
- [16] Garcia, Joan; Corzo, Angelica. Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña, 2008. 108p
- [17] Silva, Ángela; Zamora, Hernan. Humedales Artificiales. Manizales, 2005, 100p. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- [18] Delgadillo, Oscar; Camacho, Alan; Perez, Luis; Andrade, Mauricio. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba: 2010. 115p.

[19] Caballero, Jhonatan; Osorio, Reynaldo. Tratamiento de aguas residuales usando rhizophora mangle (mangle rojo) para la remoción de nutrientes y materia orgánica en un humedal artificial de flujo vertical. Cartagena, 2016, 86p. Universidad de Cartagena. Facultad de Ingeniería.

[20] Caselles-Osorio, Aracelly; Garcia, Joan; Comas, Jordi. Influence of the Characteristics of Organic Matter on the Efficiency of Horizontal Subsurface-Flow Constructed Wetlands. Barcelona, 2006, 147p. Universidad Politecnica de Cataluña. Facultad de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología.

[21] Caselles-Osorio, Aracellys; García, Joan. Impact of different feeding strategies and plant presence on the performance of shallow horizontal subsurface-flow constructed wetlands. En: Science of the Total Environment. Vol.; 378. (Feb - Abr. 2007); p. 253–262.

[22] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Resolucion 0631. Bogota DC. 2015.

[23] Otálora, Alejandra; Sanabria, Otoniel. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl. Bogota DC, 2011, 163p. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería.

[24] Galal, Tarek; Gharib, Fatma; Ghazi, Safia; Mansour, Khalid. Metal uptake capability of *Cyperus articulatus* L. and its role in mitigating heavy metals from contaminated wetlands. En: Environmental Science and Pollution Research. Vol.; 8. (Jun - Jul. 2017); p. 1–13.

[25] Caselles-Osorio, Aracellys; Vega, Hamer; Lancheros, Juan; Casierra-Martínez, Henry; Mosquera, Jose. Horizontal subsurface-flow constructed wetland removal efficiency using *Cyperus articulatus* L. En: Ecological Engineering. Vol.; 99. (Feb - Nov. 2016); p. 479-485.

[26] Gordon-Gray, K; Ward, C; Edwards, T. Studies in Cyperaceae in southern Africa 39: *Cyperus articulatus* L. and *Cyperus corymbosus* Rottb. En: South African Journal of Botany. Vol.; 99. No 1 (Jun - Jul. 2006); p.147–149.

- [27] Abubakar, M; Abdurahman, E; Haruna, A. The repellent and antifeedant properties of *Cyperus articulatus* against *Tribolium castaneum* Hbst. En: *Phytotherapy Research*. Vol.; 14. No 4 (May-Jun. 2000); p. 281–283.
- [28] *Cyperus articulatus* L. {En línea}. { 01 Marzo de 2020} Disponible en: (<https://www.gbif.org/species/2713638>)
- [29] *Thalia geniculata* L. {En línea}. { 01 Marzo de 2020} Disponible en: <http://descubrircorrientes.com.ar/2012/index.php/geografia/fitogeografia/1556-vegetacion-y-flora/peguaho-thalia-geniculata/1127-peguaho-thalia-geniculata>.
- [30] Charris, Jhan; Caselles-Osorio, Aracellys. Eficiencia de Eliminación de Contaminantes Del Agua Residual Doméstica Con Humedales Construidos Experimentales Plantados Con *Cyperus Ligularis* (Cyperaceae) Y *Echinochloa Colonum* (Poaceae). Barranquilla, 2016, 78p. Universidad Del Atlantico. Facultad de ciencias basicas.
- [31] Vymazal, Jan; Kröpfelová, Lenka. Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: *Environmental pollution*. Vol 14. Dordrecht: Springer, 2008. 578p.
- [32] Marín, Jhoan; Correa, Juan; Paredes, Diego. Evaluación de La Remoción de Contaminantes En Aguas Residuales En Humedales Artificiales Utilizando La *Guadua Angustifolia* Kunth. Pereira, 2010, 100p. Universidad tecnologica de Pereira. Facultad de tecnologia.
- [33] Trinidad, Ericka; Sanabria, Irma. Cuantificación de Bacterias Nitrificantes, Denitrificantes, Fijadoras de Nitrógeno Y Heterotrofas de Humedales Artificiales Sub-Superficiales Para El Tratamiento de Agua Residual. Pamplona, 2006, 42p. Universidad de Pamplona. Facultad de ciencias basicas.
- [34] Katsenovich, Yelena; Hummel-Batista, Adelaide; Ravinet, Alfredo; Miller, Jerry. Performance evaluation of constructed wetlands in a tropical region. En: *Ecological Engineering*. Vol.; 35. No 10 (Jun -Jul. 2009); p. 1529–1537.

- [35] Caselles-Osorio, Aracellys; Eslava, P; Palmiery, F. Assessment of a pilot-scale constructed wetland system for treatment of sanitary wastewater in Colombia , South America. En: WEFTEC. Vol.; 8. (May - Jun. 2008); p. 7239–7248.
- [36] Bernal, F; Mosquera, D; Maury, H; Gonzalez, D; Guerra, R; Pomare, A; Silva, M. Humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en la corporación universitaria de la costa. En: Seminario internacional sobre metodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Vol.; 1. (2002); p.149–155.
- [37] Fleet, Kerry. The Use of Constructed Wetlands to Improve the Water Quality of the Bourne Stream , Dorset . Bournemouth: 2002. 54p
- [38] Pérez, Marcos; Sanchez-Carrillo, Salvador; Rojo, Carmen. Función depuradora de los humedales II: Una revisión bibliográfica sobre el papel del sedimento. En: Humedales mediterraneos. Vol.; 1. (2000); p. 123–130.
- [39] Allen, Richard; Pereira, Luis; Raes, Dirk; Smith, Martin. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: 2006. 323p.
- [40] Vymazal, Jan. Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands. Třeboň: Springer, 2008.
- [41] EPA (U.S. Environmental Protection Agency). Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Cincinnati. EPA. 2000.
- [42] Gutiérrez Mosquera, Harry; Ricardo Varón, Miguel; Aponte, Alexander. Estimación del balance de Nitrógeno en un humedal construido subsuperficial plantado con *Heliconia psittacorum* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. En: Revista de la facultad de ingeniería de la universidad de Antioquia. Vol., 56. (Nov - Dic. 2010); p. 87–98.
- [43] Lara, Jaime; Vera, Ismael. Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia. En: Revista de ingeniería de la

universidad Javeriana. Vol.; 9 No 1 (Enero - Jun. 2005); p. 47–63.

[44] Charris, Jhan; Caselles-Osorio, Aracellys. Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus Ligularis* (Cyperaceae) Y *Echinochloa Colonum* (Poaceae). En: Tecnología Y Ciencias Del Agua. Vol.; 7 No 6 (Nov-Dic. 2016); p. 93-103.

[45] Google Maps. Universidad del Atlantico . {En línea}. {08 de Marzo de 2020} disponible en:www.google.com.co/maps/place/Universidad+Del+Atlántico/@11.0199172,-74.8738197,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8ef42c76792046e5:0x815b52c179f466ee!8m2!3d11.0199172!4d-74.871631

[46] Dirección General Marítima. Climatología de los principales puertos del caribe colombiano. Barranquilla. DIMAR, 2011.

[47] Worldmeteo. Clima puerto colombia. {En línea}. {08 de Marzo de 2020} disponible en: www.worldmeteo.info/es/america-del-sur/colombia/puerto-colombia/tiempo-189394/

[48] American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edicion 23. Washington, DC. APHA, 2012.

[49] Beebe, Donald; Castle, James; Molz, Fedrick; Rodgers, John. Effects of evapotranspiration on treatment performance in constructed wetlands: Experimental studies and modeling. En: Ecological Engineering. Vol.; 71 (Feb - Jul. 2014); p. 394–400.

[50] Casierra, Henry; Casalins, Jafeth; Vargas, Ximena ; Caselles, A. Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. En: Tecnología y ciencias del Agua. Vol.; 7 No 4 (Jul - Ago. 2016); p. 97 – 111.

[51] Bohórquez, Eliana; Paredes, Diego; Arias, Carlos. Vertical flow-constructed wetlands for domestic wastewater treatment under tropical conditions: effect of different design and operational parameters. En: Environmental Technology. Vol.; 333 (Feb-Ago. 2016).

[52] Álvarez, Juan; Bécares, Eloy. El papel de la vegetación en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. 2002

- [53] Caselles-Osorio, Aracellys; Villafaña, Patricia; Caballero, Vanessa; Manzano, Yelena. Efficiency of mesocosm-scale constructed wetland systems for treatment of sanitary wastewater under tropical conditions. En: *Water, Air, and Soil Pollution*. Vol.; 220 No 4-5 (Ene - Feb. 2011); p. 161–171.
- [54] Lin, Ying; Jing, Shuh; Wang, Tze; Lee, Der. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands. En: *Environmental Pollution*. Vol.; 119 (Jun - Oct. 2002); p. 413–420.
- [55] Bejanero, Julia. Effect of operational variables on nitrogen transformations in duckweed stabilization ponds. Delft, 2005, 180p. Universidad de Wageningen.
- [56] Guido-zárate, Alejandro; Buitrón, German; Mijaylova, Petia; Durán, Carmen. Behavior of redox potentials in artificial wetlands models: A tool for controlling its efficiency. En: *Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology*. Vol.; 1 (Jun. 2007); p.594–601.
- [57] Zhai, Jun; Zou, Jinsong; He, Qiang; Ning, Kejia; Xiao, Haiwen. Variation of dissolved oxygen and redox potential and their correlation with microbial population along a novel horizontal subsurface flow wetland. En: *Environmental Technology*. Vol.; 33 No. 17 (Ene - Feb. 2012); p.1999–2006.
- [58] Szögi, Ariel; Hunt, Patrick; Sadler, Edwards; Evans, Dean. Characterization of oxidation-reduction processes in constructed wetlands for swine wastewater treatment. En: *American Society of Agricultural Engineer*. Vol.; 20 No.2 (Oct - Nov.2004); p.189–200.
- [59] Wießner, A; Kappelmeyer, U; Kusch, P; Kästner, M. Influence of the redox condition dynamics on the removal efficiency of a laboratory-scale constructed wetland. En: *Water Research*. Vol.; 39 No. 1 (Abr - Ago. 2005); p. 248–256.
- [60] Tao, Wendong; Hall, Ken; Duff, Sheldon. Treatment of woodwaste leachate in surface flow mesocosm wetlands. En: *Water Quality Research Journal of Canada*. Vol.; 41 No. 3 (2006); p.325–332.

- [61] Faulwetter, Jennifer; Gagnon, Vincent; Sundberg, Carina; Chazarenc, Florent; Burr, Mark; Brisson, Jacques; Camper, Anne; Stein, Otto. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. En: *Ecological Engineering*. Vol.; 35 No. 6 (Dic. 2009); p. 987–1004.
- [62] Bodegom, Peter; Goudriaan, Jan. A mechanistic model on methane oxidation in a rice rhizosphere. En: *Biogeochemistry*. Vol.; 55 (Ene. 2001); p. 36-43.
- [63] Liu, Shuyuan; Yan, Baixing; Wang, Lixia. The layer effect in nutrient removal by two indigenous plant species in horizontal flow constructed wetlands. En: *Ecological Engineering*. Vol.; 37 No. 12 (Jun - Ago. 2011); p. 2101–2104.
- [64] Lai, Wen; Zhang, Yang; Chen, Zhang. Radial oxygen loss, photosynthesis, and nutrient removal of 35 wetland plants. En: *Ecological Engineering*. Vol.; 39 (Nov - Dic. 2012); p. 24–30.
- [65] Bezbaruah, Achintya; Zhang, Tian. PH, redox, and oxygen microprofiles in rhizosphere of bulrush (*Scirpus validus*) in a constructed wetland treating municipal wastewater. En: *Biotechnology and Bioengineering*. Vol.; 88 No. 1 (Ene - Jun. 2004); p. 60–70.
- [66] Saeed, Tanveer; Sun, Guangzhi. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. En: *Journal of Environmental Management*. Vol.; 112 (Ago - Sep. 2012); p. 429–448.
- [67] Hench, Keith; Bissonnette, Gary; Sexstone, Alan; Coleman, Jerry; Garbutt, Keith; Skousen, Jeffrey. Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands. En: *Water Research*. Vol.; 37 No. 4 (Jun. 2003); p. 921–927.
- [68] Ecured. Algas bentónicas. {En línea}. {15 Marzo de 2020} disponible en : (https://www.ecured.cu/Algas_bentónicas).

[69] Penton, Ryan; Deenik, Jonathan; Popp, Brian; Bruland, Gregory; Engstrom, Pia; Louis, Derek; Tiedje, James. Importance of sub-surface rhizosphere-mediated coupled nitrification-denitrification in a flooded agroecosystem in Hawaii. En: *Soil Biology and Biochemistry*. Vol.; 57 (Oct - Nov. 2013); p.362–373.

[70] Caselles-Osorio, Aracellys; Garcia, Joan. Effect of physico-chemical pretreatment on the removal efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetlands. En: *Environmental Pollution*. Vol.; 46 No 1 (Ene - Jun. 2007); p. 55–63.

[71] Fink, Daniel; Mitsch, William. Seasonal and storm event nutrient removal by a created wetland in an agricultural watershed. En: *Ecological Engineering*. Vol.; 23 No. 4 (Oct - Nov. 2004); p. 313–325.

[72] Caselles-Osorio, Aracellys; Porta, Alessandro; Porras, Monserrat; García, Joan. Effect of high organic loading rates of particulate and dissolved organic matter on the efficiency of shallow experimental horizontal subsurface-flow constructed wetlands. En: *Water, Air, and Soil Pollution*. Vol.; 183 No. 1 (Mar. 2007); p. 367–375.

[73] Konnerup, Dennis; Koottatep, Thammarat; Brix, Hans. Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*. En: *Ecological engineering*. Vol.; 5 (Feb - Abr. 2008); p. 248–257.

[74] Kaseva, M. Performance of a sub-surface flow constructed wetland in polishing pre-treated wastewater - A tropical case study. En: *Water Research*. Vol.; 38 No. 3 (Jul - Oct. 2003); p. 681–687.

[75] Manzano, Yelena; Caselles-Osorio, Aracellys. Eliminación de coliformes, materia orgánica y amonio en humedales construidos experimentales de flujo subsuperficial horizontal en presencia y ausencia de vegetación. Barranquilla, 2010, 77p. Universidad del Atlántico, Facultad de Ciencias básicas.

[76] Vega, Hamer; Caselles, Aracellys. Eliminación de materia orgánica y nitrógeno del agua residual doméstica en humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus*

articulatus. Barranquilla, 2013, 81p. Universidad del Atlantico, Facultad de Ciencias basicas.

[77] García, Joan; Aguirre, Paula; Mujeriego, Rafael; Huang, Yuming; Ortiz, Laura; Bayona, Josep. Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. En: Water Research. Vol.; 38 No. 7 (Ene. 2004); p.1669–1678.

[78] Caselles-Osorio, Aracellys; García, Joan. Performance of experimental horizontal subsurface flow constructed wetlands fed with dissolved or particulate organic matter. En: Water Research. Vol.; 40 No. 19 (May - Jul. 2006); p. 3603–3611.

[79] Yovo, Franck; Dimon, Biaou; Azandegbe, Coffi; Suanon, Fidele; Sagbo, Etiene; Mama, Daouda; Aina, Martin. Phytoremediation: Investigation and Valorization of purifying power of *Thalia geniculata* for Domestic Wastewater treatment. En: Research Journal of Chemical Sciences. Vol.; 5 No. 12 (Nov - Dic. 2015); p. 44–53.

[80] Bakhshoodeh, Reza; Alavi, Nadali; Majlesi, Monireh; Paydary, Pooya. Compost leachate treatment by a pilot-scale subsurface horizontal flow constructed wetland. En: Ecological Engineering. Vol.; 105 (Abr. 2017); p. 7–14.

[81] Abou-Elela, Sohair; Hellal, Mohamed. Municipal wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with *Canna*, *Phragmites* and *Cyprus*. En: Ecological Engineering. Vol.; 47 (May - Jul. 2017); p. 209–213.

[82] Baptista, Joana; Davenport, Russell. Microbial mechanisms of carbon removal in subsurface flow wetlands. En: Water Science & Technology. Vol.; 48 No. 5 (Feb. 2003); p. 127 - 134

[83] Paredes, Laura; Paredes, Diego. Remoción de contaminantes en la estabilización de humedales construidos de flujo vertical, sembrados con *heliconia* (sp), para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Pereira, 2014, 89p. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología.

- [84] Barraza, Eyvis. Comunidad bacteriana nitrificante y desnitrificante asociada a la rizósfera de *Thalia geniculata* L. y *Cyperus articulatus* L. en humedales construidos experimentales de flujo sub superficial horizontal. Barranquilla, 2019, 98p. Universidad Del Atlantico, Facultad de Ciencias Basicas.
- [85] Llanos-lizcano, Alejandro; Barraza, Eyvis; Narvaez, Arturo; Varela, Lourdes. Efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands and microbial community composition operating under tropical conditions. En: International Journal of Phytoremediation. (Ene - Feb. 2019); p. 1 - 9.
- [86] Paranychianakis, Nikolaos; Tsiknia, Myrto; Kalogerakis, Nicolas. Pathways regulating the removal of nitrogen in planted and unplanted subsurface flow constructed wetlands. En: Water Research. Vol.; 102 (Mar - Jun. 2016); p.321–329.
- [87] Edwards, Keith; Cizková, Hana; Zemanová, Katerina; Santrucková, Hana. Plant growth and microbial processes in a constructed wetland planted with *Phalaris arundinacea*. En: Ecological engineering. Vol.; 27 (Feb. 2006); p.153–165.
- [88] Wiessner, A; Rahman, K; Kusch, P; Kastner, M; Jechorek, M. Dynamics of sulphur compounds in horizontal sub-surface flow laboratory-scale constructed wetlands treating artificial sewage. En: Water Research. Vol.; 44 (Jul. 2010); p. 6175 - 6185
- [89] Norton, Stephen. Removal Mechanisms in Constructed Wastewater Wetlands. En: Environmental Science. (Ago. 2003); p. 48- 60
- [90] Albuquerque, A; Oliveira, J; Semitela, S; Amaral, L. Influence of bed media characteristics on ammonia and nitrate removal in shallow horizontal subsurface flow constructed wetlands. En: Bioresource Technology. Vol.; 100 (Mar - Ago. 2009); p. 6269–6277.
- [91] Kadlec, Robert; Tanner, Chris; Vera, Hally,; Gibbs, Max. Nitrogen spiraling in subsurface-flow constructed wetlands: Implications for treatment response. En. Ecological Engineering. Vol.; 35 (Ene - Jul. 2005); p. 365–381.

- [92] Jia, Wenlin; Zhang, Jian; Wu, Juan; Xie, Huijun; Zhang, Bo. Effect of intermittent operation on contaminant removal and plant growth in vertical flow constructed wetlands : A microcosm experiment. En: *Desalination*. Vol.; 262 (Ene - Jul. 2010); p. 202–208.
- [93] Paredes, Diego; Kuschik, Peter. New Aspects of Microbial Nitrogen Transformations in the Context of Wastewater Treatment – A Review. En: *Engineering in Life Sciences*. Vol.; 7 No. 1 (Sep - Nov. 2007); p.13–25.
- [94] Schmidt, Ingo; Sliemers, Olav; Schmid, Markus; Bock, Eberhard; Fuerst, John; Kuenen, J. Gijss; Jetten, Mike M; Strous, Marc. New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater. En: *FEMS Microbiology Reviews*. Vol.; 27 (Feb - Abr. 2003); p. 481 - 492.
- [95] Yadav, Sangeeta; Chandra, Ram. Heavy metals accumulation and ecophysiological effect on *Typha angustifolia* L. and *Cyperus esculentus* L. growing in distillery and tannery effluent polluted natural wetland site, Unnao, India. En: *Environ Earth Sci*. Vol.; 62 (Jun - Jul. 2011); p.1235–1243.
- [96] Herouvim, Elissavet; Akratos, Christos; Tekerlekopoulou, Athanasia; Vayenas, Dimitrios. Treatment of olive mill wastewater in pilot-scale vertical flow constructed wetlands. En: *Ecological Engineering*. Vol.; 37 No 6 (Ene - Feb. 2011); p. 931–939.
- [97] Tchobanoglous, George; Rivas, Armando; Hadad, Hernan; Maine, Maria. *Memorias de la III conferencia panamericana de sistemas de humedales para el tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua*. Santa Fe: 2016. 164p.
- [98] Maltais-Landry, Gabriel; Maranger, Roxane; Brisson, Jacques; Chazarenc, Florent. Nitrogen transformations and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands. En: *Water Research*. Vol.; 43 No 2 (Jul - Oct. 2009); p. 535–545.
- [99] Li, Hanyan; Tao, Wendong. Efficient ammonia removal in recirculating vertical flow constructed wetlands: Complementary roles of anammox and denitrification in simultaneous nitrification, anammox and denitrification process. En: *Chemical Engineering Journal*. Vol.; 317 (Ene - Feb. 2017); p. 972–979.

- [100] Romero-Aguilar, Mariana; Colín-Cruz, Arturo; Sánchez-Salinas, Enrique; Ortiz, Laura. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. En: Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Vol.; 25 No 3 (Ene. 2009); p. 157–167.
- [101] Lolmede, Ph; Jácome, A; Vidart, T; Tejero, I. Tratamiento de agua residual con elevado contenido de nitratos utilizando reactores biomembrana aireados. En: Ingeniería del Agua. Vol.; 7 No. 3 (Ene - Feb. 2000); p. 243–254.
- [102] De-Bashan, Luz; Bashan, Yoav. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003). En: Water Research. Vol.; 38 (Jul. 2004); p. 4222–4246.
- [103] Ahn, Johwan; Daidou, Tomotaka; Tsuneda, Satoshi; Hirata, Akira. Selection and dominance mechanisms of denitrifying phosphate-accumulating organisms in biological phosphate removal process. Vol.; 23 (Ago - Sep. 2001); p. 2005–2008.
- [104] Yuan, Qiuyan; Oleszkiewicz, Jan. Interaction between denitrification and phosphorus removal in a nutrient removing SBR system. En: WEFTEC. (Jun. 2008); p. 43–54.
- [105] Ahn, Johwan; Daidou, Tomotaka; Tsuneda, Satoshi; Hirata, Akira. Characterization of denitrifying phosphate-accumulating organisms cultivated under different electron acceptor conditions using polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis assay. En: Water Research. Vol.; 36 (Ene - Abr. 2001); p. 403–412.
- [106] Tsuneda, Satoshi; Ohno, Takashi; Soejima, Koichi; Hirata, Akira. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor. En: Biochemical Engineering Journal. Vol.; 27 (Mar - Jul. 2006); p. 191–196.
- [107] Soto, F; Garcia, M; Luis, E; Becares, E. Role of *Scirpus lacustris* in bacterial and nutrient removal from wastewater. En: Water Science and Technology. Vol.; 40 No. 3 (Sep. 1999); p. 241–247.

- [108] Stein, Otto; Borden-stewart, Deborah; Hook, Paul; Jones, Warren. Seasonal influence on sulfate reduction and zinc sequestration in subsurface treatment wetlands. En: *Water Research*. Vol.; 41 (Abr - May. 2007); p. 3440–3448.
- [109] Aguirre, Paula; Ojeda, Esther; García, Joan; Barragán, Jesus; Mujeriego, Rafael. Effect of Water Depth on the Removal of Organic Matter in Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands. En: *Journal of Environmental Science and Health*. Vol.; 40 (Nov. 2013); p. 37–41.
- [110] Rivas, Armando; Paredes, Diego. Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua: Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales. Morelia, Michoacán: 2014. 189p.
- [111] Wiessner, A; Kappelmeyer, U; Kuschik, P; Kästner, M. Sulphate reduction and the removal of carbon and ammonia in a laboratory-scale constructed wetland. En: *Water Research*. Vol.; 39 (Ago - Oct. 2005); p. 4643–4650.
- [112] Hammes, Frederik; Verstraete, Willy. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. En: *Environmental Science & Bio/Technology*. Vol.; 1 (Mar. 2002); p. 3–7.
- [113] Ramos, Y; Uribe, I. Planta piloto para tratamiento de aguas residuales industriales de Aceso por medio de humedales construidos – láminas filtrantes. En: *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Vol.; 2 (Sep. 2009); p. 1–15.
- [114] Kanti, Bidus; Roy, Arup; Koschorreck, Matthias; Mandal, Santi; Wendt-potthoff, Katrin; Bhattacharya, Jayanta. Occurrence and role of algae and fungi in acid mine drainage environment with special reference to metals and sulfate immobilization. En: *Water Research*. Vol.; 43 No 4 (Nov - Sep. 2009); p. 883–894.
- [115] Boshoff, G; Duncan, J; Rose, P. The use of micro-algal biomass as a carbon source for biological sulphate reducing systems. En: *Water Research*. Vol.; 38 (Mar. **2004**); p. 2659–2666.

[116] Corporacion Autonoma Regional Del Centro De Antioquia. Identificación, caracterizacion del Habitat, conservacion y uso de plantas de la familia Marantaceae en la jurisdiccion de Corantioquia. Medellin. CORANTIOQUIA, 2007.

[117] *Thalia geniculata* L Multiflora. {En línea}. { 16 Enero de 2021} Disponible en: https://es.linkfang.org/wiki/Thalia_multiflora

[118] Saldarriaga, Julio; Garrido, Juan; Hoyos, Dora; Correa, Mauricio. Simultaneous Carbon, Nitrogen And Phosphorus Removal From Wastewater With A Modified Hybrid Uct System. Medellin, 2010, 39-48p. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingenieria Sanitaria y Ambiental.

ANEXOS

POTENCIAL DE HIDROGENO (UNIDADES DE pH)											
CELIDAS											
FECHA	AFLUENTE	Thalia Geniculata		PROMEDIO	Cyperus Articulatus			PROMEDIO	Blancos		PROMEDIO
		C1	C2	Thalia	C3	C4	Cyperus	C5	C6	BLANCOS	
07/09/2016	8	7,48	7,54	7,51	7,75	7,86	7,805	8,06	8,89	8,475	
09/09/2016	7,88	7,23	7,41	7,32	7,83	8,06	7,945	8,16	8,14	8,15	
14/09/2016	8,22	7,56	7,42	7,49	7,53	7,7	7,615	8,16	9,1	8,63	
16/09/2016	8,46	7,13	7,17	7,15	7,37	7,74	7,555	8,14	8,85	8,495	
21/09/2016	8,69	7,87	7,83	7,85	7,96	8,09	8,025	8,01	8,77	8,39	
23/09/2016	8,68	7,29	7,46	7,375	7,77	7,8	7,785	8,21	8,5	8,355	
28/09/2016	7,67	6,98	7,11	7,045	7,48	7,58	7,53	8,14	8,73	8,435	
30/09/2016	7,83	7,15	7,24	7,195	7,29	7,54	7,415	8,03	8,5	8,265	
03/10/2016	7,8	7,09	7,18	7,135	7,28	7,6	7,44	8,2	8,8	8,5	
07/10/2016	8,595	7,031	7,083	7,057	7,544	7,47	7,507	8,171	8,43	8,3005	
12/10/2016	8,553	7,023	6,85	6,9365	6,739	7,083	6,911	8,272	8,494	8,383	
14/10/2016	7,77	7,18	7,04	7,11	7,42	7,6	7,51	8,22	8,53	8,375	
19/10/2016	8,36	7,05	7,24	7,145	7,32	7,48	7,4	8,18	8,16	8,17	
21/10/2016	8,53	7,24	7,35	7,295	7,34	7,53	7,435	8,23	8,4	8,315	
02/11/2016	8,57	7,37	7,53	7,45	7,18	7,23	7,205	7,69	7,79	7,74	
04/11/2016	7,99	7	7,05	7,025	7,32	7,21	7,265	7,31	7,55	7,43	
09/11/2016	7,95	7,45	7,2	7,325	7,36	7,51	7,435	8	8,53	8,265	
11/11/2016	7,52	7,14	7,03	7,085	7,24	7,64	7,44	8,1	8,3	8,2	
23/11/2016	7,85	7,02	7,11	7,065	7,32	7,24	7,28	7,31	7,25	7,28	
25/11/2016	8,33	7,17	7,4	7,285	7,36	7,58	7,47	8,09	8,52	8,305	
02/12/2016	7,87	7,08	7,04	7,06	7,31	7,27	7,29	8,06	8,6	8,33	
07/12/2016	8,51	7,58	7,23	7,405	7,18	7,31	7,245	7,61	7,71	7,66	
14/12/2016	8,02	7,27	7,38	7,325	7,52	7,51	7,515	8,15	8,55	8,35	
16/12/2016	7,82	7,25	7,08	7,165	7,21	7,39	7,3	8,12	8,51	8,315	
23/01/2017	7,89	7,19	7,2	7,195	7,18	7,41	7,295	7,95	8,3	8,125	
25/01/2017	7,91	7,24	6,89	7,065	7,32	7,05	7,185	8,02	8,23	8,125	
27/01/2017	8,01	7,51	7,21	7,36	7,31	7,37	7,34	8	7,28	7,64	
31/01/2017	8	7,34	7,36	7,35	7,29	7,35	7,32	8,15	8,32	8,235	
02/02/2017	8,08	7,16	7,1	7,13	7,12	7,31	7,215	8,06	8,31	8,185	
07/02/2017	8,53	7,31	7,42	7,365	7,69	7,41	7,55	7,31	7,5	7,405	
10/02/2017	8,47	7,17	7,31	7,24	7,3	7,2	7,25	7,4	7,5	7,45	
14/02/2017	8,3	7,31	7,31	7,31	7,21	7,41	7,31	7,31	7,18	7,245	
16/02/2017	8,56	7,27	7,21	7,24	8,18	7,78	7,98	7,84	7,31	7,575	
21/02/2017	8,31	7,39	7,48	7,435	7,48	7,53	7,505	8,37	8,5	8,435	
23/02/2017	8,51	7,31	7,21	7,26	7,33	7,31	7,32	7,21	7,18	7,195	
PROMEDIO	8,17251429	7,2524	7,2478	7,2501	7,40094286	7,49008571	7,44551429	7,9498	8,20611429	8,07795714	
SD	0,33253451	0,19203158	0,19957452	0,17980225	0,26440421	0,24489786	0,23803057	0,33053538	0,55056996	0,42098478	

TEMPERATURA (°C)											
CELIDAS											
FECHA	AFLUENTE	Thalia Geniculata		PROMEDIO	Cyperus Articulatus			PROMEDIO	Blancos		PROMEDIO
		C1	C2	Thalia	C3	C4	Cyperus	C5	C6	BLANCOS	
07/09/2016	28,9	28,4	28,9	28,65	29,3	29,1	29,2	28,4	29,1	28,75	
09/09/2016	27,4	27,3	26,7	27	24,5	26,1	25,3	25,3	26,2	25,75	
14/09/2016	26,4	24,3	24,5	24,4	26,7	25,7	26,2	26,3	26,4	26,35	
16/09/2016	28,4	28,3	28,5	28,4	27,7	28	27,85	28,2	28,6	28,4	
21/09/2016	27,2	25,3	24,4	24,85	24,6	23,2	23,9	26,3	26,1	26,2	
23/09/2016	28	26,3	26,6	26,45	27,3	25,7	26,5	27,1	27,5	27,3	
28/09/2016	26,7	26,6	26	26,3	25,4	25	25,2	26,4	25,1	25,75	
30/09/1026	28	25,8	25,4	25,6	24,7	26,2	25,45	26,3	26,9	26,6	
03/10/2016	26,6	23,7	23,6	23,65	24,2	23,6	23,9	27,7	28,3	28	
07/10/2016	28	23,2	25,2	24,2	26,6	25,3	25,95	26,6	28,1	27,35	
12/10/2016	28,2	25,3	25,3	25,3	24,5	24,7	24,6	25,4	25,3	25,35	
14/10/2016	28,9	23	23,4	23,2	27,3	26,3	26,8	26,3	27,1	26,7	
19/10/2016	25,6	23,7	25,7	24,7	26	25,5	25,75	25,6	25,3	25,45	
21/10/2016	28,4	24,5	25,2	24,85	27,2	27,5	27,35	27,5	26,4	26,95	
02/11/2016	27	24,5	24,7	24,6	24,3	24,6	24,45	25,1	25,7	25,4	
04/11/2016	29,4	24,9	24,7	24,8	24,7	24,5	24,6	27,4	27,1	27,25	
09/11/2016	26,5	23,1	22,6	22,85	25,1	26,1	25,6	25,1	27,5	26,3	
11/11/2016	29,7	29,6	29,8	29,7	29,9	29,8	29,85	29	29,2	29,1	
23/11/2016	28,2	26,3	27,1	26,7	24,5	24,5	24,5	27,3	27,4	27,35	
25/11/2016	27,1	25,6	26,4	26	24	23,8	23,9	25,2	25,7	25,45	
02/12/2016	27,8	23,6	23,4	23,5	23,7	23,4	23,55	27,4	27,2	27,3	
07/12/2016	27,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	26,2	24,8	25,5	
14/12/2016	27,1	24,1	25,6	24,85	24,8	25,5	25,15	25,3	27,3	26,3	
16/12/2016	28,9	23,5	24,5	24	24,7	24,2	24,45	25,1	26,3	25,7	
23/01/2017	28,1	24,8	25,2	25	26,5	25,9	26,2	26,5	27,2	26,85	
25/01/2017	27,2	24,7	23,4	24,05	26,3	27,1	26,7	24,5	26,3	25,4	
27/01/2017	29,3	24,3	24,3	24,3	24,5	24,6	24,55	25,7	26,4	26,05	
31/01/2017	27,2	25,7	24,3	25	25,4	25,3	25,35	26,3	26,8	26,55	
02/02/2017	28,7	23,1	23,2	23,15	28,1	27,1	27,6	26,8	27,3	27,05	
07/02/2017	28,5	24,7	24,7	24,7	24,7	24,5	24,6	26,3	27,4	26,85	
10/02/2017	28,3	24,5	24,5	24,5	26,3	25,3	25,8	25,3	26	25,65	
14/02/2017	28,9	24,5	25,5	25	25,3	25,2	25,25	26,5	26,3	26,4	
16/02/2017	28,5	26,7	26,3	26,5	27,3	28,4	27,85	28,3	28,3	28,3	
21/02/2017	26,4	24,6	26,1	25,35	25,1	26,1	25,6	25,4	26,2	25,8	
23/02/2017	28,5	25,2	24,3	24,75	24,3	24,3	24,3	25,4	24,7	25,05	
PROMEDIO	27,86571429	25,08571429	25,2657143	25,17571429	25,70857	25,61143	25,66	26,38571	26,78571	26,5857143	
SD	0,986658907	1,580235064	1,60145942	1,537729965	1,547364	1,569333	1,50800804	1,111476	1,143818	1,04583006	

OXIDO REDUCCION (mV)										
CELIDAS										
FECHA	AFLUENTE	Thalia Geniculata		PROMEDIO	Cyperus Articulatus		PROMEDIO	Blancos		PROMEDIO
		C1	C2	Thalia	C3	C4	Cyperus	C5	C6	BLANCOS
07/09/2016	-83,5	46	30,4	38,2	28,6	12,1	20,35	8,5	6,6	7,55
09/09/2016	-102,6	69,2	103,4	86,3	96,4	137,1	116,75	71,7	47,9	59,8
14/09/2016	-101,2	136,1	115,9	126	137,1	148	142,55	62,7	57,7	60,2
16/09/2016	-9,2	133,6	161,6	147,6	170,4	176,7	173,55	81,2	63,4	72,3
21/09/2016	-105,3	34,4	58,6	46,5	71,1	77,2	74,15	43,2	20,1	31,65
23/09/2016	-386,7	37,7	28,1	32,9	29,3	77,1	53,2	10,9	6,8	8,85
28/09/2016	-350,5	11,2	32,4	21,8	51,8	87,5	69,65	51,9	13,7	32,8
30/09/2016	-295,1	59,2	33,8	46,5	63,5	66,8	65,15	61,7	57,1	59,4
03/10/2016	0,6	19,1	38,3	28,7	7,8	73,8	40,8	37,5	30,3	33,9
07/10/2016	-263,4	26,6	23,3	24,95	42,8	20,1	31,45	44	48,8	46,4
12/10/2016	-201	33,3	4,1	18,7	22,1	12,3	17,2	66,6	33	49,8
14/10/2016	21,8	197,8	84,9	141,35	176,8	194,3	185,55	57,1	64,7	60,9
19/10/2016	10,3	79	96	87,5	116,4	132,7	124,55	65,2	50,9	58,05
21/10/2016	-339,9	34,3	12	23,15	59,5	52,7	56,1	2,6	19,2	10,9
02/11/2016	-6,3	63,4	84,3	73,85	65,2	99,6	82,4	98,9	57,5	78,2
04/11/2016	24,5	103,1	110,1	106,6	107,6	118,2	112,9	101	44,4	72,7
09/11/2016	16,2	126,9	51,5	89,2	134,9	162,5	148,7	115,8	103,3	109,55
11/11/2016	-226,1	103,9	72,6	88,25	130,3	137	133,65	93,9	71,1	82,5
23/11/2016	30,8	68,7	63,4	66,05	99,5	72,3	85,9	102	132,6	117,3
25/11/2016	-94,9	89,9	131,7	110,8	122,5	140,2	131,35	64,3	54,4	59,35
02/12/2016	-175,4	82,7	21,5	52,1	55,7	22,9	39,3	17,2	48,4	32,8
07/12/2016	15,7	113,9	80,3	97,1	75,3	91	83,15	55,6	52,3	53,95
14/12/2016	-200,3	87,8	85,3	86,55	107,8	158,3	133,05	55,3	69,8	62,55
16/12/2016	-120,5	112,6	138,1	125,35	137,6	152,6	145,1	161,1	166,9	164
23/01/2017	19,7	98,1	126,2	112,15	57,8	113,7	85,75	83,9	13,7	48,8
25/01/2017	-103,6	100,9	51,2	76,05	85,8	13	49,4	40,9	75,3	58,1
27/01/2017	14,7	160,3	142,5	151,4	139,5	89,7	114,6	106,2	152,5	129,35
31/01/2017	27,8	182	171,3	176,65	41,2	155,9	98,55	72,4	77,9	75,15
02/02/2017	15,7	112,7	95,4	104,05	42,1	134,6	88,35	131	167,1	149,05
07/02/2017	30,5	140,3	135,3	137,8	135,3	153,3	144,3	102,3	110,5	106,4
10/02/2017	-48,7	129,3	133,1	131,2	13,5	50,3	31,9	37,3	40,3	38,8
14/02/2017	-290	48,5	38,5	43,5	50,3	60,3	55,3	43,3	42,1	42,7
16/02/2017	-359	49	53,9	51,45	24,7	46,8	35,75	54,4	66,3	60,35
21/02/2017	-408,7	121,2	155,5	138,35	29,8	75,5	52,65	32	22,1	27,05
23/02/2017	-234,5	88,8	86,3	87,55	94,9	71,5	83,2	44,5	40,3	42,4
PROMEDIO	-122,231429	88,6142857	81,4514286	85,0328571	80,7114286	96,7885714	88,75	65,0885714	60,8285714	62,9585714
SD	143,450739	46,3377063	46,9924297	43,6422689	46,55586	51,3602889	45,3544764	35,3451534	42,073581	36,7318192

OXIGENO DISUELTTO (mg/O2)										
CELIDAS										
FECHA	AFLUENTE	Thalia Geniculata		PROMEDIO	Cyperus Articulatus		PROMEDIO	Blancos		PROMEDIO
		C1	C2	Thalia	C3	C4	Cyperus	C5	C6	BLANCOS
07/09/2016	0,43	3,01	3,77	3,39	3,99	1,37	2,68	1,93	1,63	1,78
09/09/2016	0,05	4,66	3,5	4,08	4,41	4,06	4,235	2,8	2,5	2,65
14/09/2016	0,45	4,03	3,91	3,97	4,48	4,22	4,35	2,12	2,31	2,215
16/09/2016	0,21	4,8	4,12	4,46	4,36	4,57	4,465	1,56	1,52	1,54
21/09/2016	0,73	2,92	3,11	3,015	4	4,2	4,1	1,72	1,81	1,765
23/09/2016	0,05	0,52	0,21	0,365	2,09	2,85	2,47	1,3	1,94	1,62
28/09/2016	0,05	1,85	1,74	1,795	4,52	4,15	4,335	2,46	1,85	2,155
30/09/2016	0,2	2,1	2,4	2,25	3,91	4,1	4,005	2,67	2,87	2,77
03/10/2016	0,7	2,81	3,56	3,185	4,03	3,98	4,005	2,03	2,15	2,09
07/10/2016	0,09	1	0,92	0,96	1,29	2,54	1,915	2,62	0,79	1,705
12/10/2016	0,14	3,11	2,6	2,855	2,83	2,69	2,76	1,17	1,39	1,28
14/10/2016	0,01	2,57	2,51	2,54	3,16	3,13	3,145	2,23	2,5	2,365
19/10/2016	0,28	2,27	3,85	3,06	2,3	2,2	2,25	2,53	2,27	2,4
21/10/2016	0,05	4,19	3,22	3,705	3,67	2,74	3,205	1,56	2,03	1,795
02/11/2016	0,71	2,85	2,89	2,87	2,79	2,45	2,62	1,62	2,01	1,815
04/11/2016	0,53	2,64	2,35	2,495	3,47	2,97	3,22	1,43	2,9	2,165
09/11/2016	0,52	4,53	4,11	4,32	3,1	3,05	3,075	2,03	1,72	1,875
11/11/2016	0,04	2,88	2,99	2,935	2,8	2,5	2,65	1,7	1,62	1,66
23/11/2016	0,98	2,31	3,36	2,835	3,53	3,87	3,7	1,51	1,62	1,565
25/11/2016	0,05	2,89	5,45	4,17	2,52	2,33	2,425	2,3	2,24	2,27
02/12/2016	0,05	2,79	2,3	2,545	3,2	2,67	2,935	2,01	2,12	2,065
07/12/2016	0,55	3,44	3,12	3,28	3,16	3,11	3,135	1,23	1,54	1,385
14/12/2016	0,23	3,01	3,06	3,035	2,84	3,68	3,26	2,66	2,41	2,535
16/12/2016	0,82	3,22	3,46	3,34	3,05	3,67	3,36	1,34	1,32	1,33
23/01/2017	0,45	2,87	3,69	3,28	2,6	2,3	2,45	1,83	1,66	1,745
25/01/2017	0,05	2,39	2,81	2,6	3,26	2,5	2,88	2,33	2,1	2,215
27/01/2017	0,64	1,4	1,91	1,655	2,48	1,67	2,075	2,45	2,55	2,5
31/01/2017	0,54	3,19	2,02	2,605	2,04	3,46	2,75	2,35	2,03	2,19
02/02/2017	0,65	2,3	3,38	2,84	1,57	1,29	1,43	2,48	2,38	2,43
07/02/2017	0,53	1,92	1,98	1,95	3,61	2,31	2,96	1,41	2,34	1,875
10/02/2017	0,57	2,19	2,83	2,51	3,14	3,17	3,155	1,21	2,13	1,67
14/02/2017	0,61	1,63	2,11	1,87	3,01	2,31	2,66	1,38	2,01	1,695
16/02/2017	0,05	4,28	3,44	3,86	3,35	3,24	3,295	2,89	2,11	2,5
21/02/2017	0,5	1,05	1,17	1,11	0,64	1,24	0,94	2,19	2,33	2,26
23/02/2017	0,4	3,39	3,92	3,655	3,61	4,41	4,01	2,04	2,07	2,055
PROMEDIO	0,36885714	2,77171429	2,90771429	2,83971429	3,10885714	3	3,05442857	1,974	2,022	1,998
SD	0,27748632	1,02545968	1,02549869	0,95154746	0,89736468	0,9120823	0,82603391	0,51145237	0,44130022	0,39057687

CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{s}/\text{cm}$)										
CELDA										
FECHA	AFLUENTE	Thalia Geniculata		PROMEDIO Thalia	Cyperus Articulatus		PROMEDIO Cyperus	Blancos		PROMEDIO BLANCOS
		C1	C2		C3	C4		C5	C6	
07/09/2016	462	637	577	607	598	649	623,5	687	532	609,5
09/09/2016	416	698	640	669	629	645	637	531	506	518,5
14/09/2016	457	709	657	683	663	648	655,5	604	524	564
16/09/2016	572	767	673	720	668	663	665,5	623	559	591
21/09/2016	1275	927	867	897	844	855	849,5	905	836	870,5
23/09/2016	729	838	916	877	991	754	872,5	846	774	810
28/09/2016	1306	1357	1257	1307	1263	1097	1180	1130	1030	1080
30/09/2016	496	1311	1229	1270	1111	1081	1096	1121	1042	1081,5
03/10/2016	491	632	667	649,5	643	656	649,5	491	496	493,5
07/10/2016	865	1090	1102	1096	1247	1040	1143,5	1113	1087	1100
12/10/2016	718	1269	1162	1215,5	1072	1321	1196,5	1231	1312	1271,5
14/10/2016	842	1165	1028	1096,5	1149	1090	1119,5	1131	1104	1117,5
19/10/2016	602	790	638	714	776	791	783,5	689	750	719,5
21/10/2016	626	898	787	842,5	959	942	950,5	430	799	614,5
02/11/2016	577	546	645	595,5	564	505	534,5	368	402	385
04/11/2016	503	697	635	666	672	635	653,5	549	559	554
09/11/2016	569	668	679	673,5	654	616	635	487	480	483,5
11/11/2016	348	312	654	483	601	345	473	468	428	448
23/11/2016	437	764	707	735,5	645	438	541,5	540	573	556,5
25/11/2016	570	729	692	710,5	591	597	594	583	556	569,5
02/12/2016	862	122,3	664	393,15	645	615	630	593	545	569
07/12/2016	536	757	735	746	755	736	745,5	597	584	590,5
14/12/2016	417	679	682	680,5	606	608	607	530	519	524,5
16/12/2016	310	607	662	634,5	550	547	548,5	480	481	480,5
23/01/2017	409	599	635	617	585	527	556	391	391	391
25/01/2017	444	606	645	625,5	529	615	572	369	453	411
27/01/2017	373	373	342	357,5	485	525	505	460	525	492,5
31/01/2017	462	594	611	602,5	591	516	553,5	421	430	425,5
02/02/2017	497	631	656	643,5	619	512	565,5	450	434	442
07/02/2017	302	703	704	703,5	584	583	583,5	573	602	587,5
10/02/2017	472	692	593	642,5	672	594	633	511	551	531
14/02/2017	596	756	702	729	639	521	580	616	702	659
16/02/2017	493	956	1024	990	819	894	856,5	907	806	856,5
21/02/2017	737	1154	1270	1212	1216	1184	1200	1015	961	988
23/02/2017	867	1313	1218	1265,5	1376	1214	1295	1007	1004	1005,5
PROMEDIO	589,657143	781,322857	781,571429	781,447143	771,742857	730,257143	751	669,914286	666,771429	668,342857
SD	233,142968	282,61021	231,195014	249,661469	247,948921	245,818003	241,84639	257,91852	241,919054	246,332265

TURBIEDAD (NTU)										
CELDA										
FECHA	AFLUENTE	Thalia Geniculata		PROMEDIO Thalia	Cyperus Articulatus		PROMEDIO Cyperus	Blancos		PROMEDIO BLANCOS
		C1	C2		C3	C4		C5	C6	
07/09/2016	11,8	1,94	6,53	4,235	4,04	4,59	4,315	6,45	4,85	5,65
09/09/2016	30,1	2,48	9,57	6,025	4,2	1,99	3,095	3,03	2,22	2,625
14/09/2016	13,81	2,92	2,91	2,915	2,8	1,82	2,31	1,21	2,11	1,66
16/09/2016	58,2	3,16	9,8	6,48	1,79	1,63	1,71	1,83	1,91	1,87
21/09/2016	38,9	9,05	11,5	10,275	12,8	8,51	10,655	20,5	15,6	18,05
23/09/2016	83,5	13,3	31,1	22,2	37,4	4,77	21,085	13	6,59	9,795
28/09/2016	78,9	8,86	14,5	11,68	10,7	9,39	10,045	6,02	12,8	9,41
30/09/2016	33,1	10,6	12,7	11,65	4,61	4,06	4,335	7,18	9,54	8,36
03/10/2016	10,7	5,81	10	7,905	4,98	5,25	5,115	8,49	2,59	5,54
07/10/2016	42,4	12,6	9,36	10,98	44,8	4,05	24,425	20,6	13,9	17,25
12/10/2016	70,2	14,5	15,8	15,15	32,1	29,4	30,75	29,4	53,2	41,3
14/10/2016	24,9	13,4	11,9	12,65	21,1	6,31	13,705	26,5	19,9	23,2
19/10/2016	112	9,95	6,71	8,33	5,13	3,16	4,145	3,54	5,6	4,57
21/10/2016	38,8	10,9	8,2	9,55	34,8	29	31,9	36,8	8,17	22,485
02/11/2016	37,3	3,52	5,54	4,53	4,96	2,4	3,68	4,08	3,18	3,63
04/11/2016	22,2	6,26	4,35	5,305	7,05	7,05	7,05	12,5	8,68	10,59
09/11/2016	54,3	3,12	2,02	2,57	3,71	1,98	2,845	3,92	2,53	3,225
11/11/2016	10,4	3,27	2,6	2,935	2,51	1,65	2,08	2,32	2,73	2,525
23/11/2016	10,3	3,21	2,33	2,77	2,19	2,21	2,2	4,31	4,72	4,515
25/11/2016	14,7	3,02	5,06	4,04	6,93	5,53	6,23	5,19	3,51	4,35
02/12/2016	21,7	6,64	6,67	6,655	3,82	6,48	5,15	6,08	3,96	5,02
07/12/2016	16,9	3,74	4,09	3,915	8,98	5,44	7,21	6,28	3,09	4,685
14/12/2016	230	14,7	6,28	10,49	13,5	13,8	13,65	8,35	2,43	5,39
16/12/2016	25,8	4,98	4,02	4,5	11,2	10,8	11	1,4	1,6	1,5
23/01/2017	44,5	4,8	1,45	3,125	9,97	9,58	9,775	2,56	0,91	1,735
25/01/2017	13,3	2,35	1,82	2,085	10,2	12,1	11,15	3,87	2,13	3
27/01/2017	18,4	1,76	1,61	1,685	1,91	1,73	1,82	3,75	4,75	4,25
31/01/2017	61,8	4,04	5,21	4,625	20,6	8,91	14,755	1,91	1,39	1,65
02/02/2017	46,3	5,2	7,8	6,5	29,3	12,2	20,75	4,5	5,9	5,2
07/02/2017	20,5	10,3	9,1	9,7	10,5	8,3	9,4	3,3	6,2	4,75
10/02/2017	16,3	3,02	4,32	3,67	6,31	3,29	4,8	9,33	10,3	9,815
14/02/2017	30,3	12,3	6,3	9,3	14,3	12,3	13,3	3,2	3,3	3,25
16/02/2017	31,3	16,4	8,2	12,3	3,2	4,5	3,85	8	7	7,5
21/02/2017	30,2	18,3	14,3	16,3	6,3	8,3	7,3	14,5	15,3	14,9
23/02/2017	29,3	8,23	6,13	7,18	7,39	8,15	7,77	3,15	3,28	3,215
PROMEDIO	40,946	7,38942857	7,708	7,54871429	11,6022857	7,44657143	9,52442857	8,48714286	7,31057143	7,89885714
SD	40,4595237	4,76071914	5,62598112	4,64954035	11,2143005	6,46565903	7,90299318	8,54132225	9,25687596	8,18521875

SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg/L)										
CELDA										
FECHA	AFLUENTE	Thalia Geniculata		PROMEDIO	Cyperus Articulatus		PROMEDIO	Blancos		PROMEDIO
		C1	C2	Thalia	C3	C4	Cyperus	C5	C6	BLANCOS
07/09/2016	4,2	1,3	1,4	1,35	1,3	0,8	1,05	1,6	1,2	1,4
09/09/2016	4,82	1,2	1,5	1,35	1,3	0,9	1,1	2,6	3,6	3,1
14/09/2016	4	1	1,6	1,3	1,2	0,8	1	2,5	2,3	2,4
16/09/2016	3,9	1,4	1,4	1,4	1,5	0,8	1,15	1,9	2	1,95
21/09/2016	4,6	1,2	0,6	0,9	0,2	0,2	0,2	1,8	1,6	1,7
23/09/2016	6,2	1,8	0,8	1,3	1,6	0,6	1,1	1,4	1,7	1,55
28/09/2016	8,8	1,4	1,6	1,5	1,2	0,8	1	1,2	1,8	1,5
30/09/2016	4,4	1,8	2,2	2	0,4	0,2	0,3	3	1,6	2,3
03/10/2016	4,4	0,2	1,6	0,9	1,4	0,8	1,1	2,6	2,2	2,4
07/10/2016	6	1,2	1	1,1	1	0,8	0,9	2	1,6	1,8
12/10/2016	7	1,4	0,8	1,1	1,8	1	1,4	1,6	2,9	2,25
14/10/2016	2,8	1,6	2,2	1,9	2	1,8	1,9	1,4	3	2,2
19/10/2016	7,4	0,6	1	0,8	0,2	0,2	0,2	1,4	1,2	1,3
21/10/2016	2,3	1,8	1,3	1,55	0,8	1,2	1	1,4	4	2,7
02/11/2016	4	2,2	1	1,6	0,4	0,4	0,4	1,6	1,8	1,7
04/11/2016	3,2	0,2	0,4	0,3	0,4	0,8	0,6	1,2	1,4	1,3
09/11/2016	8,6	2,4	0,68	1,54	0	0	0	1,6	1,9	1,75
11/11/2016	6,7	3	0,91	1,955	0,13	0,32	0,225	1,2	3,2	2,2
23/11/2016	7,2	3,6	0,14	1,87	0,2	0,4	0,3	1,6	1,8	1,7
25/11/2016	0,84	0,22	0,2	0,21	0,18	0,25	0,215	1,5	1,2	1,35
02/12/2016	1,38	0,21	0,33	0,27	0,4	0,57	0,485	1,2	3	2,1
07/12/2016	2,6	0,2	0,4	0,3	0,8	0,2	0,5	1,4	1,3	1,35
14/12/2016	2,8	0,19	0,34	0,265	0,48	0,37	0,425	3,3	1,9	2,6
16/12/2016	2	0,2	0	0,1	0,4	0,2	0,3	1,2	1,6	1,4
23/01/2017	5	3,4	2	2,7	0,8	0,6	0,7	4	1,9	2,95
25/01/2017	0,46	0,2	0,24	0,22	0,14	0,44	0,29	1,8	1,2	1,5
27/01/2017	0,86	0,22	0,27	0,245	0,29	0,28	0,285	1,7	1,2	1,45
31/01/2017	6,6	2	2,09	2,045	1	1,2	1,1	1,8	2,9	2,35
02/02/2017	7	2,4	2,22	2,31	1,2	2,48	1,84	2,4	1,2	1,8
07/02/2017	5,2	2,47	2	2,235	1,59	2	1,795	0,99	1	0,995
10/02/2017	1	0,5	0,56	0,53	0,8	0,84	0,82	0,66	1,5	1,08
14/02/2017	4,6	2,2	2,22	2,21	4	1,8	2,9	1,9	3,2	2,55
16/02/2017	3,2	1,4	2	1,7	4	3,8	3,9	1,2	2,5	1,85
21/02/2017	1	0,52	0,1	0,31	0,6	1,2	0,9	2	1,5	1,75
23/02/2017	4	1,2	3,2	2,2	0,4	2,8	1,6	1,4	2,2	1,8
PROMEDIO	4,25885714	1,338	1,15142857	1,24471429	0,97457143	0,91	0,94228571	1,77285714	2,00285714	1,88785714
SD	2,29448414	0,96998726	0,80933939	0,75209799	0,92956139	0,82926615	0,8067084	0,68834658	0,77743383	0,52737598