

**EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL
HORIZONTAL PROTOTIPO PLANTADO CON SISTEMA VETIVER PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN UNA VIVIENDA RURAL EN EL
MUNICIPIO DE FLORIDABLANCA**

JAVIER RICARDO MORENO MOGOLLON

000229249

JENNIFER TATIANA RANGEL PLATA

000208143

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2018

**EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL
HORIZONTAL PROTOTIPO PLANTADO CON SISTEMA VETIVER PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN UNA VIVIENDA RURAL EN EL
MUNICIPIO DE FLORIDABLANCA**

JAVIER RICARDO MORENO MOGOLLÓN

000229249

JENNIFER TATIANA RANGEL PLATA

000208143

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO AMBIENTAL

DIRECTORA DEL PROYECTO

PhD. SANDRA NATALIA CORREA TORRES

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

BUCARAMANGA

2018

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, septiembre de 2018

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
CAPITULO 1. ANTECEDENTES	14
CAPITULO 2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo General	19
2.2. Objetivos Específicos	19
CAPITULO 3. MARCOTEÓRICO	20
3.1. Aguas residuales domesticas (ARD)	20
3.2. Humedal artificial	22
3.3. Fitorremediacion	27
3.4. Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)	29
3.5. Parámetros importantes en el tratamiento de aguas residuales	31
3.6. Mecanismos de remoción de contaminantes	32
CAPITULO 4. METODOLOGIA	34
4.1. Localización física del proyecto	35
4.2. FASE 1: Implementación de los humedales artificiales con pasto Vetiver teniendo en cuenta la relación geométrica.	36
4.3. FASE 2: Evaluación de la capacidad de remoción de la materia orgánica, teniendo en cuenta la geometría de los humedales.	39
4.4. FASE 3: Comparación del crecimiento de las plantas Vetiver junto con la remoción de materia orgánica.	41
4.5. FASE 4: Determinación del porcentaje de remoción de materia orgánica, en los humedales artificiales plantados con pasto Vetiver.	41
CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSION	43
5.1. Análisis inicial del agua residual doméstica.	43

5.2. FASE 1: Implementación de los humedales artificiales con pasto Vetiver teniendo en cuenta la relación geométrica.	44
5.3. FASE 2: Evaluación de la capacidad de remoción de la materia orgánica, teniendo en cuenta la geometría de los humedales.	47
5.4. FASE 3: Comparación del crecimiento de las plantas Vetiver junto con la remoción de materia orgánica.	58
5.5. FASE 4: Determinación del porcentaje de remoción de materia orgánica, en los humedales artificiales plantados con pasto Vetiver.	59
CAPITULO 6. CONCLUSIONES	66
CAPITULO 7. RECOMENDACIONES.....	68
CAPITULO 8. LISTA DE REFERENCIAS.....	69
CAPITULO 9. ANEXOS.....	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Reducciones en variables de importancia en la calidad del agua, en el uso del pasto Vetiver en condiciones hidropónicas (Troung et al, 2000).	14
Tabla 2. Reducciones en los niveles de contaminantes en el agua, en el meta (Gallo, E. 2015). ...	16
Tabla 3. Características fisicoquímicas de aguas residuales (Metcalf Eddy, et al., 1998)	21
Tabla 4. Variables en el agua residual según su fuente de origen e importancia ambiental. (Delgadillo, 2010.)	21
Tabla 5. Tipos de humedales artificiales según el flujo del agua (Andrade et al, 2010).....	23
Tabla 6. Tipos de humedales artificiales de flujo subsuperficial con características (Delgadillo et al, 2010)	24
Tabla 7. Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial (Andrade, 2010)	25
Tabla 8. Parámetros de diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial (Sabas, 2011)	27
Tabla 9. Factores ambientales de influencia en la descontaminación del agua residual (Arias, 2010)	29
Tabla 10. Características esenciales del pasto Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>) (Orihuela, 2007).	30
Tabla 11. Parámetros de importancia ambiental en el tratamiento de aguas residuales (Romero, 2004)	32
Tabla 12. Mecanismos de remoción de contaminantes y su importancia en la descontaminación de aguas residuales. (Tousinnant et. al., 1999)	33
Tabla 13. Parámetros en los humedales artificiales para aguas residuales domesticas (Autores)...	37
Tabla 14. Condiciones iniciales del agua residual doméstica (Autores).....	43
Tabla 15. Dimensionamiento y parámetros iniciales de los humedales artificiales (Autores).....	44
Tabla 16. Resultados del dimensionamiento de humedales artificiales 1, 2 y 3 (Autores)	45
Tabla 17. Valores de caudal y TRH para cada humedal artificial (Autores)	47
Tabla 18. Análisis microscópico, efluente de los humedales 1, 2 y 3. (Autores)	50
Tabla 19. Análisis microscópico, punto medio de los humedales artificiales 1, 2 y 3. (Autores)...	50
Tabla 20. Análisis microscópico, raspado en grava de humedales artificiales 1, 2 y 3.(Autores) ..	51
Tabla 21. Relación SV/ST y SS/SD, en el agua afluyente a los humedales artificiales 1, 2 y 3. (Autores)	62
Tabla 22. Relación DBO/DQO promedio, para los humedales artificiales 1, 2 y 3. (Autores)	63
Tabla 23. Valores de carga contaminante para DQO y porcentaje de remoción para los humedales 1, 2 y 3 (Autores).....	64

Tabla 24. Valores de carga contaminante para DBO y porcentaje de remoción para los humedales 1, 2 y 3 (Autores).....65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de la DQO en el efluente para la determinación del TRH óptimo en los humedales artificiales. Evaluación de vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>) y la elefanta (<i>Pennisetum purpureum</i>) en el diseño de humedales artificiales (Saldarriaga, 2016).....	18
Figura 2. Principios básicos de funcionamiento en humedales. (Kostinec 2001).....	22
Figura 3. Proceso de fitorremediación. (Arias, 2010).....	27
Figura 4. Principales fases metodológicas (Autores).....	34
Figura 5. Zona topográfica, vereda Casiano, Floridablanca (Google Maps, 2018).....	35
Figura 6. Diagrama de la posición del sistema (tanque séptico, tanque almacenamiento, humedales, campo infiltración) (Autores).....	38
Figura 7. Distribución de plantas en los humedales artificiales. (Autores).....	39
Figura 8. Dimensionamiento de los humedales artificiales 1, 2 y 3 en diferentes configuraciones con sistema Vetiver en aguas residuales domesticas (Autores).....	46
Figura 9. Valores de elongación de hoja en centímetros para cada esqueje de vetiver en el humedal artificial 1 (Autores).....	48
Figura 10. Muestras de agua residual, A. punto medio y B. efluente de los humedales artificiales 1, 2 y 3. (Autores).....	49
Figura 11. Muestreo de raspado de sustrato en grava de los humedales artificiales 1, 2 y 3. (Autores).....	51
Figura 12. Variación de la DQO para los humedales artificiales 1, 2 y 3 plantados con el sistema vetiver (Autores).....	53
Figura 13. Variación de la DBO ₅ para los humedales artificiales 1, 2 y 3 plantados con el sistema vetiver. (Autores).....	55
Figura 14. Precipitaciones en Bucaramanga (en los meses de junio, julio y agosto 2018) (IDEAM, 2018).....	56
Figura 15. Remoción promedio de sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos y sólidos volátiles en los humedales 1, 2 y 3 (Autores).....	57
Figura 16. Crecimiento en centímetros para esqueje de planta Vetiver en los humedales artificiales 1, 2 y 3 (Autores).....	58
Figura 17. Porcentajes de remoción semanal del parámetro DQO, en los humedales 1, 2 y 3 (Autores).....	60
Figura 18. Porcentajes de remoción semanal de la DBO ₅ para los humedales artificiales 1, 2, y 3. (autores).....	61

LISTAS DE ANEXOS

Anexo 1.A. Desarrollo de pasto Vetiver (chrysopogon zizanioides), para plantación en cada humedal artificial (Autores)	75
Anexo 1. B. Montaje inicial de los humedales con sistema Vetiver (Autores)	75
Anexo 1.C. Instalación de los humedales artificiales y plantación del pasto Vetiver (chrysopogon zizanioides) (Autores)	75
Anexo 1.D. Proceso de eutrofización en humedales artificiales con sistema Vetiver (Autores)	76
Anexo 1.E. Limpieza de humedales artificiales con sistema vetiver (Autores)	76
Anexo 1.F Crecimiento de plantas Vetiver a los 30 días (Autores)	76
Anexo 1.G. Crecimiento de plantas Vetiver a los 60 días (Autores)	77
Anexo 1.H. Coloración rojiza en plantas vetiver (Autores).....	77
Anexo 1.I. Prueba de sólidos sedimentables en el afluente y efluente de los humedales artificiales 1, 2 y 3 (Autores).....	77
Anexo 1.J. Crecimiento de hoja en centímetros para cada esqueje de vetiver en el humedal artificial 2 (Autores).	78
Anexo 1.K. Crecimiento de hoja en centímetros para cada esqueje de vetiver en el humedal artificial 3 (Autores).	78
Anexo 1.L. Valores de elongación de hojas en esquejes de planta Vetiver en el humedal artificial 1 (Autores).	79
Anexo 1.M. Valores de elongación de hojas en esquejes de plantas vetiver trasplantadas en el humedal artificial 2 (Autores).....	80
Anexo 1.N. Valores de elongación de hojas en esquejes de plantas vetiver trasplantadas en el humedal artificial 3 (Autores).....	81
Anexo 1.O. Reporte de resultados de toma de datos para el parámetro de DBO ₅ , en afluente y efluente del humedal artificial 1. (Autores).	85
Anexo 1.P. Reporte de resultados de toma de datos para el parámetro de DQO, en afluente y efluente del humedal artificial 2 (Autores).	83
Anexo 1.Q. Reporte de resultados de toma de datos para el parámetro de DQO, en afluente y efluente del humedal artificial 3. (Autores).	84
Anexo 1.R. Reporte de resultados de toma de datos para el parámetro de DBO ₅ , en afluente y efluente del humedal artificial 2 (Autores).	86
Anexo 1.S. Reporte de resultados de toma de datos para el parámetro de DBO ₅ , en afluente y efluente del humedal artificial 3 (Autores).....	87

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PROTOTIPO PLANTADO CON SISTEMA VETIVER PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN UNA VIVIENDA RURAL EN EL MUNICIPIO DE FLORIDABLANCA

AUTOR(ES): Javier Ricardo Moreno Mogollón
Jennifer Tatiana Rangel Plata

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Sandra Natalia Correa Torres

RESUMEN

El presente proyecto, es el resultado de la investigación aplicada en la búsqueda de soluciones a problemas ambientales a través de tecnologías sostenibles. El proyecto consistió en el dimensionamiento e implementación de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, para el tratamiento de las aguas residuales de una unidad residencial rural, por medio de la plantación del pasto Vetiver (*Chrysopogon Zizanioides*). El sistema de humedales cuenta con un pretratamiento de pozo séptico para la sedimentación de material. El estudio está basado en un ensayo piloto de fitorremediación por medio de humedales artificiales. El propósito fundamental del proyecto es evaluar la efectividad de los humedales artificiales, en la reducción de la carga contaminante, como sistemas económicos de tratamiento, para las viviendas rurales en Colombia. A cada uno de los tres humedales artificiales de estudio, se les analizó variables de calidad del agua como oxígeno disuelto, en la determinación del DQO, DBO₅, adicionalmente realizó el análisis de sólidos totales y sólidos volátiles y se determinó la relación DBO₅/DQO. Esto con el fin de examinar y evaluar la influencia de la planta vetiver en el proceso de reducción de carga contaminante. El proceso arrojó resultados positivos en cuanto a la descontaminación del agua residual tratada, por parte de los tres humedales plantados con vetiver, obteniendo reducciones para la DQO con valores menores a los 70 mg/L, donde inicialmente se presentaban valores de 460 mg/L, igualmente se obtiene un porcentaje de remoción de hasta el 85% para la DBO₅ y se presentan crecimientos de las plantas Vetiver mayores a 39 cm en comparación a la primera toma de muestras.

PALABRAS CLAVE:

Fitorremediación, flujo subsuperficial, *Chrysopogon Zizanioides*, remoción DQO, DBO₅.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EVALUATION OF AN ARTIFICIAL HUMEDAL FLOW SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PLANTED PROTOTYPE WITH VETIVER SYSTEM FOR THE TREATMENT OF WASTEWATER IN A RURAL HOUSING IN THE MUNICIPALITY OF FLORIDABLANCA

AUTHOR(S): Javier Ricardo Moreno Mogollón
Jennifer Tatiana Rangel Plata

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Sandra Natalia Correa Torres

ABSTRACT

The present project is the result of applied research in the search for solutions to environmental problems through sustainable technologies. The project consisted of the sizing and implementation of a system of artificial wetlands of horizontal subsurface flow, for the treatment of the residual waters of a rural residential unit, by means of the plantation of the Vetiver grass (*Chrysopogon Zizanioides*). The wetland system has a septic tank pretreatment for sedimentation of material. The study is based on a pilot test of phytoremediation using artificial wetlands. The fundamental purpose of the project is to evaluate the effectiveness of artificial wetlands, in the reduction of the pollutant load, as economic treatment systems, for rural dwellings in Colombia. To each of the three artificial study wetlands, variables of water quality such as dissolved oxygen were analyzed, in the determination of COD, BOD₅, additionally, the analysis of total solids and volatile solids was carried out and the BOD₅ / COD ratio was determined. This in order to examine and evaluate the influence of the vetiver plant in the process of reducing pollutant load. The process yielded positive results in terms of the decontamination of the treated wastewater, by the three wetlands planted with vetiver, obtaining reductions for the COD with values lower than 70 mg / L, where initially values of 460 mg / L were presented, also a percentage of removal of up to 85% is obtained for BOD₅ and there are growths of Vetiver plants greater than 39 cm compared to the first sampling.

KEYWORDS:

Phytoremediation, subsurface flow, *Chrysopogon Zizanioides*, COD removal, BOD₅.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua, tiene implicaciones en la salud de las personas. Las fuentes hídricas al ser los principales puntos de recepción y distribución de aguas para consumo humano, son más propensas a entrar en contacto con agentes contaminantes, ya sea por la descarga sin control de aguas residuales por parte de las industrias o por el sector urbano, colmatando este tipo de aguas con cargas contaminantes muy difíciles de degradar, consumiendo el oxígeno disponible, con esto, impidiendo el desarrollo de vida acuática y la fácil descontaminación de sus aguas.

Debido a esta problemática, se ha buscado darle soluciones que sean ambientalmente amigables y a la vez económicas, para las viviendas en las zonas rurales, ya que, estas se caracterizan por el vertido de sus aguas residuales a fuentes hídricas, sin tratamientos previos, únicamente sedimentación de material por parte de los pozos sépticos con los que cuentan, conduciendo sus aguas directamente a ríos y quebradas, llevándolos a la contaminación afectando su consumo.

Con relación a esto, ha sido necesario la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas (ARD), basándose en la fitorremediación, ya que son sistemas económicos y con gran potencial en su remoción de carga contaminante, siendo una opción viable y adecuada para este sector.

Hace décadas el pasto Vetiver (*Chrysopogon Zizanioides*), es una planta que está siendo ampliamente estudiada, principalmente por sus características morfológicas y fisiológicas, teniendo en cuenta las bondades que experimenta por el abundante sistema radicular que posee, el cual ha sido utilizado en la conservación de suelos, estabilización de taludes y recientemente en la depuración de aguas residuales urbanas e industriales. También cuenta con un poder de adaptación y resistencia en diferentes ambientes y alturas, posicionándola como la mejor opción para la aplicación de tratamientos basados en fitorremediación.

El proyecto de grado, se fundamenta en indagar a partir de un proceso de dimensionamiento de humedales artificiales y análisis de variables como la DQO, DBO₅ y sólidos totales en el agua residual; la capacidad que tiene el pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), plantado

en humedales para la remoción de contaminantes líquidos y sólidos de aguas residuales domesticas rurales.

Teniendo en cuenta lo anterior se planteó si los sistemas basados en fitorremediación con planta Vetiver, son eficaces para este tipo de ARD, explicando las características, componentes, las funciones que cumplen las plantas, ventajas y desventajas de humedales artificiales y los resultados finales que arroja cada uno de ellos a través de procesos químicos y biológicos en la remoción de los contaminantes del agua residual analizando las condiciones hidráulicas de los humedales artificiales.

CAPITULO 1.

ANTECEDENTES

Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*)

La planta Vetiver se ha considerado capaz de eliminar diversos contaminantes de las aguas residuales, entre ellos nutrientes como el nitrógeno, fósforo y algunos metales pesados (Yazmin et al, 2006). Estudios han demostrado que la planta Vetiver bajo condiciones hidropónicas, puede presentar efectividad en la reducción de variables de importancia ambiental, como los que se presentan en la tabla 1.

Variable	Valor inicial	Valor final	% Reducción
Tiempo de retención 4 días			
Nitrógeno total	100 mg/L	6 mg/L	96
Fosforo total	10 mg/L	1 mg/L	90
Coliformes fecales	≥1.600 org /100 ml	900 org /100 ml	44
E - coli	≥1.600 org /100 ml	140 org /100 ml	91
Oxígeno disuelto	< 1 mg/L	8 mg/L	>800
Conductividad eléctrica	928 μScm	468 μScm	87
pH	7.3	6.0	10

Tabla 1. Reducciones en variables de importancia en la calidad del agua, en el uso del pasto Vetiver en condiciones hidropónicas (Troung et al, 2000).

La planta Vetiver presenta características importantes que permite ser utilizada en el tratamiento de aguas residuales como es: alta tolerancia a la acidez, alcalinidad, tolerancia en condiciones de humedal, tolerancia a metales pesados, desarrollo y resistencia radicular, alta absorción de nitrógeno y fosforo y descomposición de herbicidas y pesticidas (Alegre, 2007).

Internacionalmente se han realizado diversos proyectos en los que se utiliza la planta Vetiver como método de tratamiento de aguas. Galindo, en el año 2014, en México diseñó un sistema de tratamiento de aguas residuales por humedal artificial de flujo subsuperficial, para los vertidos líquidos a cuerpos de agua, con el fin de evaluar los impactos ambientales derivados de esta práctica, siendo este, un método de ecosistema natural en el que participan plantas macrófitas, microorganismos, bacterias y animales.

Del diseño se pudo concluir, en cuanto al análisis de los resultados del agua residual, el factor temperatura del ambiente y condiciones climáticas, afectan sobre la velocidad de los procesos bioquímicos en humedales, incluyendo la descomposición de DBO, la nitrificación y la desnitrificación, observándose que, en los meses más fríos las concentraciones de oxígeno disuelto son mayores. Tomando como conclusiones que, las bajas temperaturas en lo humedales con sistema Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), no favorecen la transformación de la materia orgánica, aunque favorece la presencia de oxígeno disuelto en el agua, adicionalmente se obtuvieron remociones del 59% para ST y los SST del 45.42 %, concluyéndose la efectividad de la implementación de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales (Galindo, 2014).

En Colombia, una investigación publicada en el 2015 realizada en Acacias, Meta, quiso demostrar la eficiencia de un sistema para fitorremediación de aguas superficiales utilizando pasto Vetiver, con esto se quería disminuir la carga de contaminantes de las aguas del sector, debido a la gran actividad antrópica que presenta el lugar. Para esto se realizaron análisis fisicoquímicos (turbidez, conductividad, color, cloruros, alcalinidad, dureza, calcio, fosfatos, sulfatos, hierro y Aluminio) y bacteriológicos (Coliformes totales y fecales, E-coli y Mesoarebios), periódicamente al agua, para determinar el grado de descontaminación que va teniendo gracias a la implementación del sistema.

Al final del periodo de prueba, se pudo evidenciar una reducción de los niveles de contaminantes en el agua, presentados en la tabla 2.

Variable	Resultado
Turbiedad	Remociones del 74%
Conductividad	Reducciones del 59%
Color	Aumento por época de lluvias y presencia algas
Cloruros	Niveles debajo de los permisibles – 15mg/L
Alcalinidad	Remociones del 55%
Dureza	Reducciones del 81%
Calcio	Reducciones del 47%
pH	Reducciones del 18%
Fosfatos	Aumentos del 0,071 mg/L PO ₄ (estancamiento del agua y cambios de temperatura)
Sulfatos	Remociones del 57%
Hierro	Aumentos del 2% (Poca oxigenación del agua)
Aluminio	No presento cambios
DBO - DQO	Aumento del 100%
Coliformes totales	Reducciones del 99%
Coliformes fecales, <i>E-coli</i>, mesoaerobios	No se encontraron

Tabla 2. Reducciones en los niveles de contaminantes en el agua, en el meta (Gallo, E. 2015).

Con relación a los resultados obtenidos en cuanto al DBO y DQO, el aumento se puede deber a que no se presenta suficiente presencia de oxígeno para lograr la biodegradación del material, lo que puede relacionarse a un bajo crecimiento de raíces de la planta Vetiver que permitiera procesos aeróbicos en el interior, no se presenta oxigenación del agua.

De acuerdo a los resultados obtenidos el pasto Vetiver realiza cambios en el agua, los cuales resultarían notorios y positivos si el tiempo de retención hubiese sido por más días, y se le

realizará una recirculación al agua, con el fin de brindar mayor oxigenación al agua. (Gallo, E. 2015).

Adicionalmente, Saldarriaga et al., en el año 2016 en la universidad de Medellín, evaluó la efectividad de dos plantas entre estas el pasto Vetiver en la remoción de materia orgánica, sólidos, nitrógeno y fósforo, en el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico, por medio de la construcción de humedales artificiales, cada uno con condiciones adecuadas para el crecimiento de las plantas y alimentadas con una muestra preparada de agua sintética (agua de grifo) (Saldarriaga, M., Garrido, F., Hoyos, A., y Correa, O., 2010). A cada humedal piloto se le analizaron los siguientes parámetros: pH, sólidos suspendidos totales, sólidos totales, sólidos disueltos totales, demanda bioquímica de oxígeno (DQO), demanda química de oxígeno (DBO), nitrógeno total de Kjeldahl (NTK) y fosforo total (PT), además se realizó un seguimiento al crecimiento de las plantas a partir de la porosidad de su raíz e incremento de biomasa, adicionalmente se construyen 3 módulos pilotos para el cálculo de retención hidráulico adecuado para la eliminación de materia orgánica.

El estudio arroja resultados en que el sistema es una opción acertada para la remoción de la carga orgánica y de nutrientes en aguas residuales de origen doméstico, de bajo costo tanto de mantenimiento como de operación, adicionalmente se observa un crecimiento favorecedor de las plantas, las cuales tienen una adecuada adaptación en los humedales artificiales pilotos.

La figura 1, muestra la variación que se presentó en la medición del DQO, para distintos tiempos de retención hidráulica medidos en días, en la determinación de TRH óptimo.

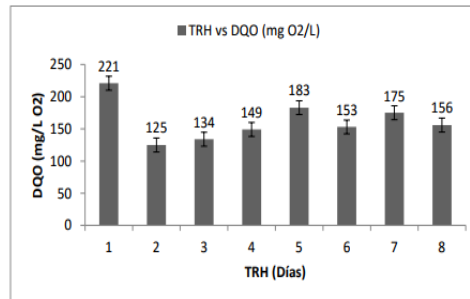


Figura 1. Distribución de la DQO en el efluente para la determinación del TRH óptimo en los humedales artificiales. Evaluación de vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) y la elefanta (*Pennisetum purpureum*) en el diseño de humedales artificiales (Saldarriaga, 2016).

Respecto a la remoción se presentan una alta tasa de esta en lo que corresponde a sólidos en primera instancia, seguido por la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NTK) y fósforo total (PT), estos últimos presentan una baja tasa de remoción, debido al tipo de contaminante, a los organismos que realizan la remoción y absorción y al tiempo de retención que se elige (el adecuado es de 2 días), el cual influye. (Saldarriaga, 2016).

En el departamento de Santander, no se encontraron estudios sobre la aplicación del pasto vetiver en la remediación de aguas residuales domésticas, por lo cual el presente trabajo se dedicará a su estudio y aplicación para el desarrollo de esta alternativa de biorremediación.

CAPITULO 2.

OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar la remoción de materia orgánica, en un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal prototipo plantado con sistema vetiver durante su etapa inicial para el tratamiento de agua residual en una vivienda rural en el municipio de Floridablanca.

2.2. Objetivos Específicos

- Implementar humedales artificiales plantados con sistema vetiver teniendo en cuenta las diferentes condiciones con relación a la geometría de ancho – largo en la remoción de materia orgánica para el tratamiento de las aguas residuales.
- Evaluar la capacidad de remoción de la materia orgánica, teniendo en cuenta diferentes relaciones geométricas en los humedales artificiales con sistema Vetiver.
- Analizar el crecimiento de las hojas en las plantas vetiver en conjunto con la remoción de la materia orgánica en los humedales artificiales.
- Determinar el porcentaje de remoción de materia orgánica total, en los humedales artificiales con sistema vetiver.

CAPITULO 3.

MARCO TEÓRICO

3.1. Aguas residuales domesticas (ARD)

Las ARD, en general son las aguas provenientes de viviendas, edificios comerciales e institucionales. Las ARD son denominadas aguas negras ya que son aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. Por su parte las aguas grises son las provenientes de tinajas, duchas, lavamanos y lavadoras, aportadoras de DBO, sólidos suspendidos, fósforo, grasas y coliformes fecales. (Romero, 2004).

El agua residual domestica está compuesta por constituyentes tanto físicos, químicos y biológicos. Las ARD son una mezcla de sustancias tanto orgánicas como inorgánica suspendidas o disueltas, como se muestra en la tabla 3. La mayor parte de la materia orgánica consiste en residuos alimenticios, materia vegetal, excretas, sales minerales entre otros.

Elemento	Factor de carga unitario (g/hab*día)	Valor Unidad	Valor Intervalo	Valor Típico
DBO ₅	81.5	mg/L	216-540	392
SS	100	mg/L	240-600	436
NH ₃ como N	3.2	mg/L	7-20	14
N orgánico como N	0.05	mg/L	24-60	43
NKT como N	12.25	mg/L	31-80	57
P orgánico como P	1.35	mg/L	4-10	7
P inorgánico como P	2.7	mg/L	6-17	12

Grasas	-	mg/L	45-100	70
Coliformes Totales	-	Num/100ml	10 ⁷ -10 ¹⁰	10 ⁸
Temperatura	-	°C	15-26	21
pH	-	Adimensional	5-8	7.2

Tabla 3. Características fisicoquímicas de aguas residuales (Metcalf Eddy, et al., 1998)

Las distintas sustancias que puede contener el agua pueden ser biodegradables y biorresistentes. Estas se pueden encontrar en el agua como disueltas o en suspensión. (Santafé, 2009).

En la tabla 4, se puede observar las variables de calidad del agua, según su origen, la importancia ambiental con sus causas y los efectos que pueden producir tanto en el ambiente como en las personas.

Variables	Fuente	Importancia ambiental
Sólidos suspendidos	Uso doméstico, desechos industriales e infiltraciones a la red	Causa depósitos de lodo condiciones anaerobias en ecosistemas acuáticos.
Compuestos orgánicos biodegradables	Desechos domésticos e industriales.	Degradación biológica, incremento DQO, DBO ₅ en los cuerpos receptores.
Microorganismos	Desechos domésticos	Causan enfermedades transmisibles.
Nutrientes	Desechos domésticos e industriales.	Pueden causar eutrofización.
Sólidos inorgánicos disueltos	Doméstico o industrial	Puede interferir con el reúso de efluentes.

Tabla 4. Variables en el agua residual según su fuente de origen e importancia ambiental.

(Delgadillo, 2010.)

3.2. Humedal artificial

Los humedales artificiales, son sistemas de fitorremediación de aguas residuales, diseñados para imitar las características y procesos (físicos químicos y biológicos) de un humedal natural conocidos también como humedales construidos (Osnaya, 2012).

El sistema consiste en un cultivo de plantas macrofitas acuáticas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado poco profundo (Delgadillo, 2010).

Los humedales artificiales se diferencian de los humedales naturales ya que son diseñados, construidos y operados para el uso humano facilitando el control sobre los parámetros como la vegetación, el sustrato y el régimen hidráulico del humedal, garantizando el tratamiento de las aguas residuales (Kostinec 2001).

El funcionamiento de los humedales se basa en tres principios, presentados en la figura 2:

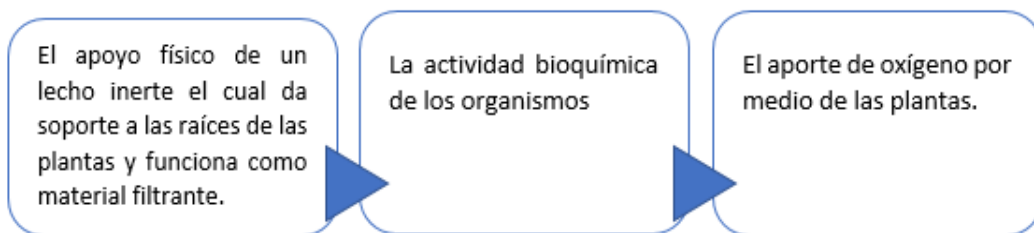


Figura 2. Principios básicos de funcionamiento en humedales. (Kostinec 2001).

Una de las principales características de los humedales artificiales es, la reducción de contaminantes en el agua como: metales, patógenos, nutrientes, sólidos en suspensión, DBO, DQO y otros productos químicos, la eliminación de estos procesos incluye la sedimentación, filtración, metabolismo microbiano (aeróbico y anaeróbico), absorción de la planta y respiración (Curt, 2010).

3.2.1. Tipos de humedales artificiales

Los humedales artificiales, cuando se usan como tratamiento secundario o terciario, están constituidos por una base de suelo impermeable, vegetación (emergente, flotante o sumergida) y niveles de agua hasta de 0,6 m de profundidad.

Se pueden clasificar, según el tipo de flujo en la corriente de sus aguas. En la tabla 5, se observan las características de estos tipos humedales artificiales.

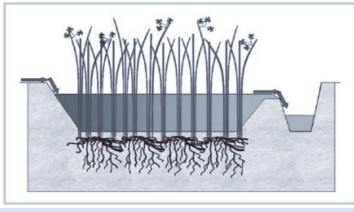
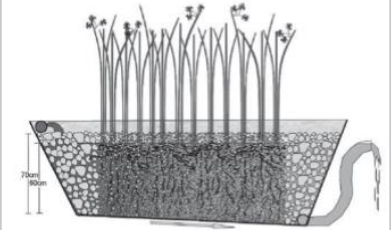
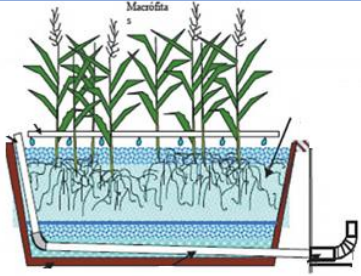
Tipo de flujo del humedal artificial	Descripción	Imagen
Flujo superficial	Las raíces de las plantas están ubicadas en el fondo del humedal. El agua circula a través de los tallos de las plantas y está expuesto a la atmosfera.	
Flujo subsuperficial	El agua circula a través del medio granular (en donde se planta la vegetación) entrando en contacto con los rizomas y raíces de las plantas.	

Tabla 5. Tipos de humedales artificiales según el flujo del agua (Andrade et al, 2010)

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial, también se clasifican en dos tipos, como se presentan en la tabla 6.

Tipo de flujo subsuperficial del humedal artificial	Característica	Imagen
Flujo subsuperficial vertical	El agua residual ingresa de forma intermitente, para estimular las condiciones aerobias; asegurando periodos de saturación e instauración, estimulando el suministro de oxígeno.	

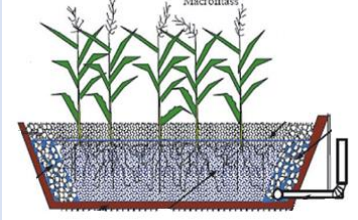
<p>Flujo subsuperficial horizontal</p>	<p>El agua residual ingresa de forma permanentes, se trata a medida que fluya lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón).</p>	
---	--	--

Tabla 6. Tipos de humedales artificiales de flujo *subsuperficial* (Delgadillo et al, 2010)

Los humedales de flujo subsuperficial son sistemas que se prefieren, debido a los elevados porcentajes de remoción de DBO₅ y sólidos totales y a que presentan muy baja casi nula presencia de vectores (Vymazal, 2005).

Adicionalmente la interacción que se presenta entre macrofitas y microorganismos, favorece los procesos químicos y físicos, facilitando la descontaminación del agua (Arenas, 2010)

En la tabla 7, se presentan algunas de las ventajas y desventajas, de vital importancia en la evaluación de la efectividad en la descontaminación de aguas residuales por parte de los humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Ventajas	Desventajas
<p>Tratamiento efectivo de forma pasiva, minimiza necesidad de equipos y monitoreo por parte de personal especializado.</p>	<p>No logran una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias coliformes.</p>
<p>Pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento.</p>	<p>Requieren un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.</p>
<p>No producen biosólidos ni lodos residuales que requieren tratamiento subsiguiente y disposición.</p>	<p>La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo subsuperficial es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.</p>

La remoción de DBO, SST, DQO, metales, nitrógeno, fosforo y compuestos orgánicos de las ARD puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención.	Costos del medio filtrante pueden ser altos dando como resultado costo de construcción más altos para sistemas con una captación mayor a 227 m ³ por día (60.000 galones por día).
Insectos y vectores no son un problema con los humedales de flujo subsuperficial, mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial de flujo se mantenga.	El fosforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial (Andrade, 2010)

3.2.2. Diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial

La dinámica hidrológica de los humedales con flujo subsuperficial, presenta una influencia directa con factores como: la relación geométrica largo y ancho, el tipo de medio filtrante y la configuración del sistema, factores que se ven reflejados en los tiempos de retención real y la eficiencia hidráulica (Sabas, 2011).

Para lograr las reducciones efectivas del DQO, DBO₅ y solidos totales, es necesario que los humedales actúen como flujo pistón y cuenten con un numero de Reynolds bajo.

En la tabla 8, se observan los parámetros importantes en el dimensionamiento de los humedales artificiales.

Parámetro de diseño	Unidad	Valor	Fórmula empleada	
Tiempo de retención	D	3-4	$T = \frac{n * L * A * h}{Q}$	T: Tiempo de retención n: Porosidad del medio, fracción decimal.

				<p>L: longitud del humedal, (m)</p> <p>A: Ancho del humedal, (m)</p> <p>h: profundidad del humedal, (m).</p> <p>Q: Caudal (m³/día).</p>
Velocidad de carga orgánica	Kg/ha*d	<110	-	-
Velocidad de carga de SST	Kg/m ² *d	0.04	-	-
Profundidad del agua	m	0.3-0.61	-	-
Profundidad del medio	m	0.46-0.76	-	-
Modelo de flujo a pistón	-	-	$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k_T * T}$	<p>C_e y C_o: Concentración en el efluente y el afluente [mg/L]</p> <p>K_T: Constante de reacción de primer orden [d⁻¹]</p> <p>T: Tiempo de retención hidráulico [d]</p>
Tipo de medio filtrante	n	0,1 – 0,7	-	n: Porosidad del medio filtrante (%)
Geometría del humedal	m ² – m ³	-	-	Definido en área y volumen, en las dimensiones
Número de Reynolds	adimensional	Re<2300, el flujo es laminar	$Re = \frac{D * v}{\mu}$	<p>D: diámetro equivalente, m.</p> <p>v: velocidad del fluido, m/h</p>

		2300 < Re < 4000, zona de transición Re > 4000, el flujo es turbulento		μ : viscosidad cinemática, cSt.
--	--	---	--	-------------------------------------

Tabla 8. Parámetros de diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial (Sabas, 2011)

3.3. Fitorremediación

La fitorremediación, es una técnica basada en plantas (macrofitas) (Bento et al., 2005). Se refiere al uso de estas para descontaminar suelos y fuentes hídricas. Las plantas absorben sustancias tóxicas o proporcionan la base para el desarrollo de un microbioma de la rizosfera (rizodegradación) (Gerhardt et al., 2008).

El término macrofitas abarca plantas acuáticas visibles a simple vista. Las macrofitas constituyen fotosistemas ya que captan la luz solar y la transforman en energía química para su metabolismo de funciones vitales. Al realizar la planta estas funciones ayudan en el tratamiento de las aguas residuales, ya que absorben los contaminantes ya sea del suelo o del agua por medio de sus raíces, realizan los procesos de transformación en su tejido y es eliminado por medio de sus hojas siendo volatilizado (Gerhardt et al., 2008).

El proceso de la fitorremediación realizado por las plantas se muestra en la figura 3.

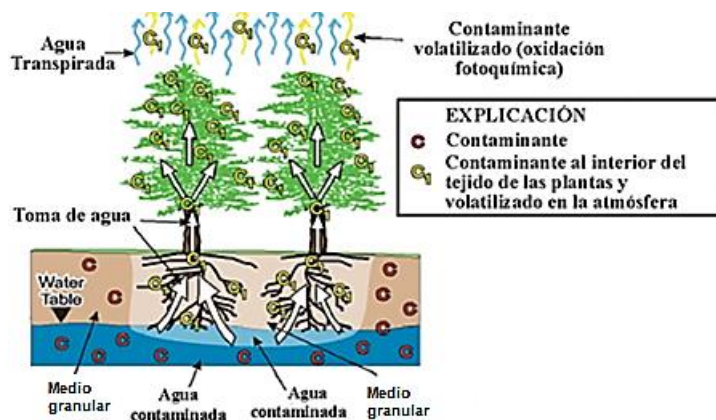


Figura 3. Proceso de fitorremediación. (Arias, 2010)

Las plantas en un sistema de tratamiento terciario de aguas residuales son indispensables ya que influyen en los efectos físicos y químicos para la reducción de contaminantes. Entre los efectos físicos, las plantas operan como filtros de retención de sólidos suspendidos, reducen la velocidad del viento favoreciendo la formación de sedimentos y proveen grandes áreas atenuadoras de luz. Algunas plantas con crecimiento radicular proporcionan el crecimiento microbiano (Arias 2010).

En humedales con sistema de flujo subsuperficial, se ha demostrado que las plantas incrementan la absorción de contaminantes hacia las raíces junto con el proceso de transpiración de la planta (Borrero, 1999).

En la tabla 9, se presentan los factores ambientales que actúan directamente en los humedales artificiales y ayudan en el proceso de remoción de contaminantes en el ARD.

Factor	Descripción
Radiación solar	Los rayos ultravioletas, llegan a la planta y le permite realizar procesos fotosintéticos en la transformación de la energía para la fijación del carbono y compuestos orgánicos, permitiendo la evaporación de compuestos volátiles y la oxidación de material, realizando un proceso adicional ayudando en la descontaminación del agua residual.
Precipitación	Al presentarse temporadas de lluvias altas y al estar en contacto con el agua a tratar, esta adición hídrica permite la dilución en la concentración de contaminantes, ayudando en el proceso de descontaminación del agua residual dentro de los humedales artificiales.

<p style="text-align: center;">Algas y microorganismos</p>	<p>Las aguas residuales, de tipo domésticas, en sus descargas presentan altos contenidos de materia orgánica, fosforo y nitrógeno; estos promueven el crecimiento de algas, lo cual, en cantidades controladas, favorecen a la reducción de varios tipos de contaminantes, ya que, las algas funcionan como un filtro. En su superficie tienen glucopolisacaridos, con esto son atrapadas las moléculas contaminantes.</p> <p>En caso contrario, que se presente un crecimiento desmesurado de las algas, causaría un proceso de eutrofización, aumentando la cantidad de microorganismos y con ellos consumiendo todo el oxígeno presente en el agua, conduciendo a la mortandad de organismos y con esto contaminando en mayor cantidad la fuente hídrica.</p>
---	--

Tabla 9. Factores ambientales de influencia en la descontaminación del agua residual (Arias, 2010)

3.4. Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*)

El pasto Vetiver conocido como (*Chrysopogon zizanioides*), se desarrolla en grandes macollas por medio de una masa radicular muy ramificada. El sistema radicular del pasto Vetiver es bastante resistente, se desarrolla verticalmente alcanzando profundidades de 3 m, y se extienden sólo unos 0,5 m alrededor de la planta.

El pasto Vetiver una vez plantado crece muy rápido, llega a la madures entre los 18 y 24 meses y se caracteriza por poseer una longevidad alta, de más de 50 años (Wildschut, 2013).


Planta	Taxonomía	Nombre	Morfología
	<p>Orden: <i>Poales</i></p> <p>Familia: <i>Poaceae.</i></p> <p>Género: <i>Chrysopogon</i></p> <p>Nombre científico: <i>Chrysopogon zizanioides</i></p>	<p>Vetiver</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es tanto hidrófita, como xerófitas. Una vez establecida puede resistir sequías, inundaciones, puede prosperar con éxito en condiciones extremas de salinidad y alcalinidad. • Crecimiento: hasta una altura de 2 m, con un sistema radical fuerte que crece verticalmente a profundidades de hasta 5 metros. • Propagación: Separación de brotes maduros de la macolla, obteniendo nuevos esquejes. para ser plantados de forma inmediata, desarrollando tallos erguidos y rectos de 0,5 a 1,5m

Tabla 10. Características esenciales del pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) (Orihuela, 2007).

El pasto Vetiver puede resistir sequías, inundaciones, prolongados periodos de anegamiento, además de tolerar una alta gama de metales tóxicos y tiene la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones ambientales (Truong, 2000).

En medio acuático, las raíces del pasto Vetiver se desarrollan menos, pero continúan presentando una masa densa de raíces finas con un diámetro promedio de 0,5 mm. La rizósfera ofrece una superficie específica (m^2/m^3) grande para el establecimiento de una masa microbiana activa (Wildschut, 2013).

El pasto Vetiver se utiliza en la estabilización de taludes, en el control de la erosión, y en la fitorremediación de contaminantes en las aguas subterráneas (Truong, 2002).

5.4.1. Eficiencia de la planta Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*)

La planta vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) posee características adecuadas para la protección del medio ambiente, ya que cuenta con una tolerancia a soportar niveles elevado e inclusive tóxicos, además de ser eficiente en absorber nutrientes tales como N y P y metales pesados en aguas contaminadas y de bajo costo (Truong, 2002)

El pasto Vetiver se ha utilizado en humedales artificiales para la depuración de aguas residuales urbanas y para aguas residuales industriales con una elevada carga orgánica. En la mayoría de los casos Vetiver presenta elevados rendimientos, por encima del 90% en DBO₅, DQO y solidos suspendidos totales (SST) (Anon, 1997; Zheng et al., 1997).

3.5. Parámetros importantes en el tratamiento de aguas residuales

En el análisis de la calidad del agua, al momento de realizar un proceso de descontaminación, existen factores de importancia ambiental que deben evaluarse para así determinar la efectividad del mecanismo empleado para la eliminación de la carga contaminante de un agua residual. Los parámetros se presentan en la tabla 11.

Parámetro	Importancia
Demanda química de oxígeno (DQO)	La demanda química de oxígeno, es la cantidad de oxígeno en mg/L consumido en la oxidación de las sustancias reductoras que están en el agua y determina la concentración orgánica en aguas residuales tóxicas a la vida biológica. La relación DBO ₅ /DQO indica la biodegradabilidad de las aguas residuales urbanas: DBO ₅ /DQO ≥ 0,4 Aguas residuales muy biodegradables. DBO ₅ /DQO ≤ 0,2 Aguas residuales poco biodegradables.

<p>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)</p>	<p>La demanda bioquímica de oxígeno, es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias.</p> <p>La DBO₅ permite diseñar unidades de tratamiento biológico, evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento y fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras.</p>
<p>Oxígeno disuelto (OD)</p>	<p>El oxígeno disuelto es un gas, requerido para la vida acuática aerobia. La baja disponibilidad de OD limita la capacidad auto purificadora de los cuerpos de agua y hace necesario el tratamiento de las aguas residuales para su disposición en ríos y embalses.</p> <p>La determinación de OD es fundamental para el cálculo de la DBO₅ y de la valoración de las condiciones aeróbicas en el agua. Todo proceso aerobio requiere una concentración de OD mayor de 0,5 mg/L. La cantidad de oxígeno que se transfiere al agua residual, debe ser suficiente para satisfacer la demanda microbiana existente en un sistema de tratamiento.</p>
<p>Sólidos totales (ST)</p>	<p>Los ST, pueden estar en forma suspendida o en disolución.</p> <p>La determinación de los ST, permite estimar los contenidos de materias disueltas y suspendidas presentes en un agua, pero el resultado está condicionado por la temperatura y la duración de la desecación.</p>

Tabla 11. Parámetros de importancia ambiental en el tratamiento de aguas residuales (Romero, 2004)

3.6. Mecanismos de remoción de contaminantes

En los humedales artificiales se presentan distintos procesos tanto químicos como biológicos de remoción de los contaminantes del agua residual.

En la tabla 12, se presentan los principales procesos y mecanismos que ocurren en la remoción de los contaminantes y su importancia.

Contaminante	Mecanismo de remoción	Importancia
Sólidos suspendidos	Sedimentación / filtración	Desarrollan depósitos de lodo y condiciones anaerobias
Materia orgánica biodegradable	-Degradación microbiana (aeróbica / anaeróbica) -Sedimentación	Su estabilización biológica puede llevar al consumo de las fuentes de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas.
Nutrientes	Amonificación, nitrificación, denitrificación, precipitación fosfatos	Pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable, en cantidades excesivas, pueden contaminar también el agua subterránea.
Patógenos	Sedimentación / filtración Declinación, radiación ultravioleta	Pueden transmitir enfermedades

Tabla 12. Mecanismos de remoción de contaminantes y su importancia en la descontaminación de aguas residuales. (Tousinnant et. al., 1999)

CAPITULO 4.

METODOLOGIA

Con el fin de alcanzar los objetivos planteados del presente proyecto, se desarrolló la metodología en cuatro fases principales, en donde se aplicaron técnicas de fitorremediación. Estas fases se presentan en la figura 4.

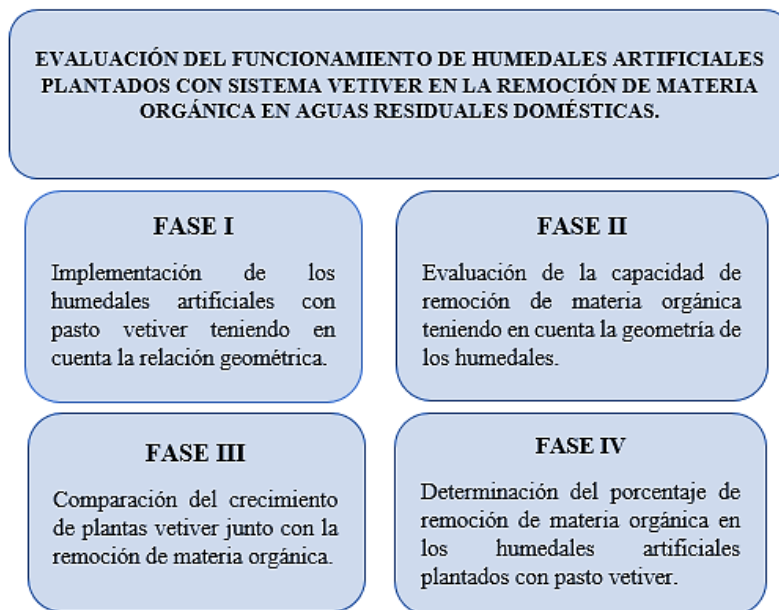


Figura 4. Principales fases metodológicas (Autores).

4.1. Localización física del proyecto

La investigación se llevó a cabo en el área de la vereda Casiano, del municipio de Floridablanca en el departamento de Santander, Colombia, como se muestra en la Figura 5. En las coordenadas 7°03'11.1"Norte y 73°03'52.9" Este.



Figura 5. Zona topográfica, vereda Casiano, Floridablanca (Google Maps, 2018).

En una vivienda rural, la cual está habitada por 5 personas, que realizan su consumo diario de agua común entre duchas, descargas de sanitarios, en la cocina, limpiezas en general y lavado de ropa.

La vivienda cuenta con un pretratamiento de sus aguas residuales, las cuales pasan por un tanque séptico de 2 m², de doble cámara, que permite sedimentación y eliminación de sólidos flotantes como tratamiento preliminar de sus aguas residuales.

Seguido a este sistema inicial, el agua residual es conducida a un tanque de almacenamiento el cual se encarga de recoger el agua y distribuirla en igual cantidad a cada uno de los 3 humedales artificiales construidos plantados con el pasto Vetiver (*chrysopogon zizanioides*), encargados del proceso de descontaminación del agua residual.

4.2. FASE 1: Implementación de los humedales artificiales con pasto Vetiver teniendo en cuenta la relación geométrica.

4.2.1. Dimensiones, variables y configuración geométrica en relación largo: ancho.

La ejecución del proyecto, se realizó en tres tanques construidos (humedales artificiales), para el tratamiento de las aguas residuales de la vivienda rural, por medio de flujo subsuperficial. En el diseño de los humedales, fueron evaluadas variables como:

- La configuración geométrica 2:1, 3:1 y 4:1 (largo: ancho) (García *et al.*, 2004).
- El crecimiento de la planta Vetiver.
- El consumo de agua.
- Porosidad del medio filtrante.
- Las concentraciones en el agua residual para la DQO, DBO₅ y sólidos totales.

Las anteriores variables, fueron primordiales en el dimensionamiento y construcción de los humedales, ya que estos que actúan directamente en su funcionamiento (Persson *et al.*, 1999).

En el análisis del funcionamiento de los humedales fue necesario evaluar la configuración geométrica 2:1, 3:1 y 4:1 con relación al largo: ancho, de cada humedal en donde se observó la influencia de esta variación en la remoción de contaminantes, junto con el crecimiento y desarrollo de las plantas Vetiver.

En la tabla 13 se muestran los parámetros usados en el dimensionamiento de los humedales artificiales.

La relación geométrica, el gasto diario de agua y la porosidad del medio, se contemplaron en la determinación del tiempo de retención hidráulico, por medio de la ecuación (1) (Epa, 1993) el cual permitió evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica.

PARAMETROS	
Variables	Relación Geométrica (Largo: Ancho) Crecimiento de la planta Vetiver DQO, DBO ₅ y solidos totales Caudal (Q). Carga orgánica Volumétrica
Constantes	Vegetación Condiciones ambientales Régimen de flujo Medio filtrante (Piedra y porosidad)
Respuesta	Porcentaje de remoción de materia orgánica y solidos totales

Tabla 13. Parámetros en los humedales artificiales para aguas residuales domesticas (Autores)

$$T = \frac{n * L * A * h}{Q} \quad (1)$$

Dónde:

T: tiempo de retención hidráulico, días.

n: porosidad del medio filtrante, adimensional.

L: largo del humedal, m.

A: ancho del humedal, m.

h: profundidad del humedal, m.

La configuración de los humedales artificiales fue en forma rectangular, construidos en fibra de vidrio. Dentro de cada humedal artificial construido, se ubicaron dos laminas. Una lámina perforada a 10 cm de la entrada del humedal, para garantizar la distribución de agua a cada uno de los humedales y una lámina a 10 cm de la salida de este, que actuaba como vertedero, para evacuar el exceso de agua y controlar el flujo del agua. Las dimensiones resultantes para cada humedal se presentan en la figura 8.

En el montaje del sistema Vetiver, se ubicó el tanque de almacenamiento a 40 metros más abajo del pozo séptico, para contar con la ayuda de la gravedad e inclinación para su llenado y distribución del agua residual respectivamente y 15 metros más abajo se ubicaron los humedales artificiales. La distribución del sistema se muestra en la figura 6.

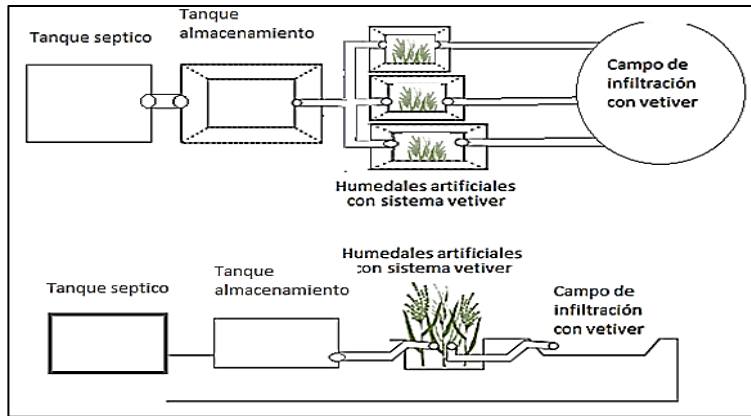


Figura 6. Diagrama de la posición del sistema (tanque séptico, tanque almacenamiento, humedales, campo infiltración) (Autores)

En cada humedal artificial se ubicaron 30 plantas de *chrysopogon zizanioides*, como se muestra en la figura 7, distribuidas equitativamente en los humedales según sus dimensiones, ubicándose de a 3 plantas a lo ancho y 10 plantas a lo largo de cada humedal artificial. Estas plantas con características iniciales homogéneas con relación a la longitud de hojas y raíces de 10 cm y cantidad de macollas (3) presentes por esqueje de plantas. El caudal a tratar corresponde a agua residual domestica de una vivienda rural proveniente del tanque de almacenamiento que se surte del pozo séptico. El sustrato utilizado para el crecimiento de las plantas, fue canto rodado de 10 cm de diámetro, con porosidad de 0.6.

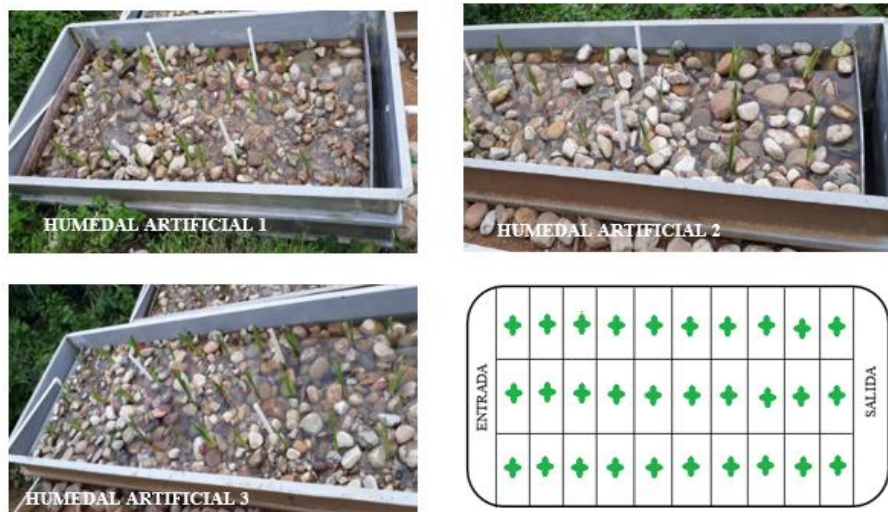


Figura 7. Distribución de plantas en los humedales artificiales. (Autores)

4.3. FASE 2: Evaluación de la capacidad de remoción de la materia orgánica, teniendo en cuenta la geometría de los humedales.

4.3.1. Adaptación del sistema Vetiver (*chrysopogon zizanioides*) en aguas residuales domésticas.

La selección de la planta vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) para el estudio, se fundamenta en su capacidad en la asimilación de nutrientes, resistencia y adaptabilidad al medio (Truong, 2000). El crecimiento de las plantas Vetiver se dio inicialmente, en el vivero de la universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga, allí estuvieron las plantas durante 6 meses en su periodo de crecimiento, fueron plantados 40 esquejes de Vetiver en suelo y en condiciones naturales de lluvia y sol. Pasado su etapa de crecimiento, las plantas fueron separadas por macollas, donde se obtuvo 100 plantas nuevas, las cuales fueron seleccionadas y trasplantadas las 90 mejores a los humedales artificiales y su proceso de adaptación duró 20 días. Para evaluar el proceso de adaptación de las plantas, se midieron parámetros como la elongación de las plantas y numero de hojas con macollas nuevas presentes.

4.3.2. Análisis de microorganismos en los humedales artificiales (Algas, bacterias y protozoos)

En la determinación de la efectividad del proceso de descontaminación de las aguas residuales domésticas por parte del sistema Vetiver en cada humedal artificial, fue de vital importancia realizar un análisis de microorganismos presentes en el agua residual, dicho análisis fue realizado en el Laboratorio de microbiología de la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, por parte de la microbióloga Claudia Santoyo.

El análisis de microorganismos del agua residual de los humedales artificiales se realizó en tres puntos: en el efluente, el punto medio de los humedales y un raspado de sustrato de cada humedal.

4.3.3. Análisis de variables de importancia en la calidad del agua (DQO, DBO₅ y sólidos)

Los análisis químicos se realizaron en el Laboratorio de Aguas Residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga.

Para esto se tomaron muestras puntuales de 500 ml de agua residual en la entrada, en un punto medio y en la salida de cada humedal artificial, cada una debidamente etiquetada en su punto de muestro correspondiente (3 muestras por humedal con un total de 9 muestras), siendo 2 veces por semana (miércoles y viernes), durante 2 meses. Esto con el fin de observar la eficiencia y cómo van actuando las plantas a lo largo de cada humedal en su proceso de remoción.

Cada muestra fue refrigerada y llevada inmediatamente al laboratorio para su análisis.

Para evaluación de la demanda química de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno, los sólidos totales, volátiles, sedimentable y disueltos, se realizaron mediante a los métodos de acuerdo al Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1992).

Para el análisis y procesamiento de las muestras con sus resultados, se realizó por triplicado de cada muestra en cada punto de muestreo, estos se realizaron paralelamente con el periodo de muestreo. Esto para asegurar que los resultados obtenidos fueran lo más reales posibles garantizando que las condiciones naturales de las muestras de agua residual no variaran.

4.4. FASE 3: Comparación del crecimiento de las plantas Vetiver junto con la remoción de materia orgánica.

4.4.1. Plantas seleccionadas y adaptadas de *chrysopogon zizanioides*, crecimiento y desarrollo de las plantas Vetiver.

Las plantas seleccionadas y trasplantadas en cada humedal, se encontraron expuestas al flujo continuo de agua residual domestica con contenido de materia orgánica y microorganismos. Cada esqueje de planta contaba con características homogéneas de color, tamaño, longitud de hojas y numero de macollas iniciales, con la cual se comparó la medición inicial con las obtenidas a los 20, 40 y 60 días.

Al final de la ejecución del proyecto se compara su desarrollo con la remoción de la materia orgánica, con el fin de analizar influencia en el tratamiento del agua residual.

4.5. FASE 4: Determinación del porcentaje de remoción de materia orgánica, en los humedales artificiales plantados con pasto Vetiver.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las fases I, II y III, se determinaron las mejores condiciones de diseño para el sistema Vetiver con flujo su superficial en el tratamiento del agua residual.

La configuración geométrica y tiempos de retención hidráulicos óptimos en los humedales artificiales plantados con sistema Vetiver permitió establecer las mejores condiciones hidráulicas.

Las comparaciones de los tres humedales artificiales analizados con sus configuraciones geométricas se determinaron por medio de sus porcentajes de remoción de la materia orgánica en los análisis de DQO, DBO₅ y sólidos.

4.5.1. Verificación de porcentajes de remoción con relación a la geometría de los humedales.

Se realizó la verificación de los porcentajes de remoción mediante la ecuación 2.

$$\%remoción = \frac{Concentración\ Afluyente - Concentración\ Efluyente}{Concentración\ Afluyente} * 100 \quad (2)$$

Las muestras de agua residual analizada, fueron tomadas del afluente, efluente y un punto medio de cada uno de los humedales artificiales, durante 60 días.

La ecuación 2, se aplicó para el caso de la verificación de los porcentajes de remoción para las variables DQO y DBO₅, con esto se determinó la efectividad de cada uno de los humedales artificiales de estudio para su análisis en la determinación de las mejores condiciones de diseño. Los porcentajes de remoción de carga se presentan en la sección de resultados en el inciso 7.5.1. (e).

CAPITULO 5.

RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Análisis inicial del agua residual doméstica.

En la tabla 14, se presentan las características principales y condiciones iniciales de una muestra de agua residual proveniente del tanque de almacenamiento (después del tratamiento del pozo séptico).

Parámetro	Valor de medición inicial	Valores límites permisibles
pH	8,31	6,00 – 9,00
Oxígeno disuelto (mg/L)	0,93	-
Nitrógeno (mg/L)	190	Análisis y reporte
Fósforo (mg/L)	12	Análisis y reporte
DQO (mg/L)	464	200
DBO ₅ (mg/L)	176	90
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	-	100
Sólidos sedimentables (ml/L)	-	5

Tabla 14. Condiciones iniciales del agua residual doméstica en el afluente de los humedales artificiales (Autores)

Los valores mostrados en la tabla 14, en comparación con los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua, establecidos en la Resolución 631 del 2015, indican que el agua residual de la vivienda supera los valores permisibles en los parámetros de DQO Y DBO₅. Lo que indica la necesidad de la aplicación de un sistema de tratamiento adicional, para evitar la continua contaminación de los cuerpos de agua donde se vierten estas aguas.

5.2. FASE 1: Implementación de los humedales artificiales con pasto Vetiver teniendo en cuenta la relación geométrica.

Para la evaluación de las condiciones hidráulicas se calcularon las dimensiones de los humedales artificiales con las variables de configuración geométrica. Con los humedales artificiales construidos se logró establecer el mejor tiempo de retención basados en los porcentajes de remoción para DQO y DBO₅ y desarrollo de la planta Vetiver.

5.2.1. Dimensiones, variables y configuración geométrica en relación largo: ancho

Las dimensiones del diseño de los tres humedales artificiales, se basaron en la revisión bibliográfica (Persson, 1999). En las ecuaciones 3 y 4, se evidencia el procedimiento en los cálculos de dimensiones generales de los humedales artificiales.

$$\bullet \text{ Volumen} = \frac{\text{caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right)}{\% \text{ material filtrante}} \quad \text{Volumen de cada humedal artificial.} \quad (3)$$

$$\bullet \text{ Área} = \frac{\text{volumen}}{\text{altura humedal}} \quad \text{Área cada humedal artificial.} \quad (4)$$

Para el dimensionamiento de los tres humedales artificiales, se aforó el caudal y se determinó el volumen y el área para cada humedal artificial, obteniéndose resultados como se muestran en la tabla 15.

Variable	Resultado
Volumen (m ³)	1,5
Área (m ²)	2,5

Tabla 15. Dimensionamiento y parámetros iniciales de los humedales artificiales (Autores)

Determinado el volumen y el área, se realizó el dimensionamiento para cada uno de los humedales. Para esto se aplican las relaciones de largo: ancho de 2:1, 3:1 y 4:1, por medio del despeje de la ecuación 5:

$$\text{Área} = X(\text{Ancho} * \text{Largo}) \quad (5)$$

Donde X, es el factor de la relación, ya sea (2:1), (3:1) y (4:1).

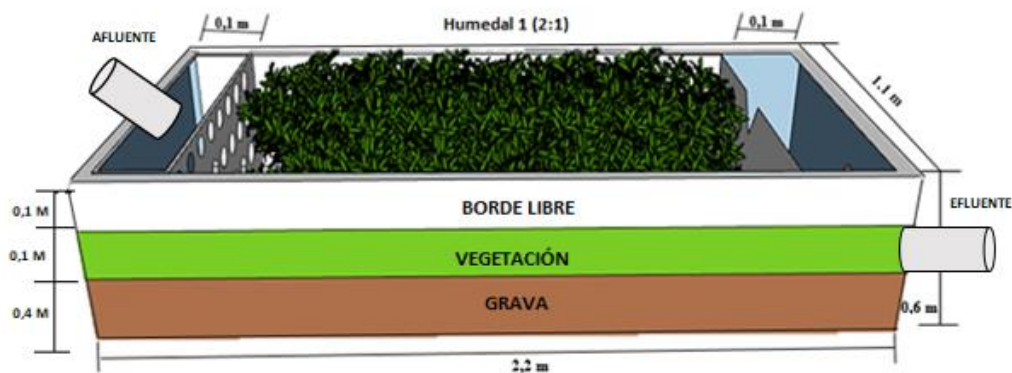
Para la profundidad de los tres humedales artificiales se definió un valor estándar de 0.6 m basado en la literatura de Kolb. Donde se define como la ideal para permitir que el flujo de agua entre en contacto en su totalidad con las raíces de las plantas la profundidad establecida (Kolb, 1998).

En la tabla 16 se muestran las dimensiones de los humedales artificiales en las configuraciones geométricas de largo: ancho (4:1, 3:1 y 2:1).

Humedal	Relación	Ancho (m)	Largo (m)	Profundidad (m)
1	2:1	1,1	2,2	0,6
2	3:1	0,91	2,73	0,6
3	4:1	0,80	3,2	0,6

Tabla 16. Resultados del dimensionamiento de humedales artificiales 1, 2 y 3 (Autores)

Los humedales artificiales construidos con configuraciones geométricas de relación largo – ancho 4:1, 3:1, 2:1, para el tratamiento de aguas residuales domesticas se muestran en la figura 8.



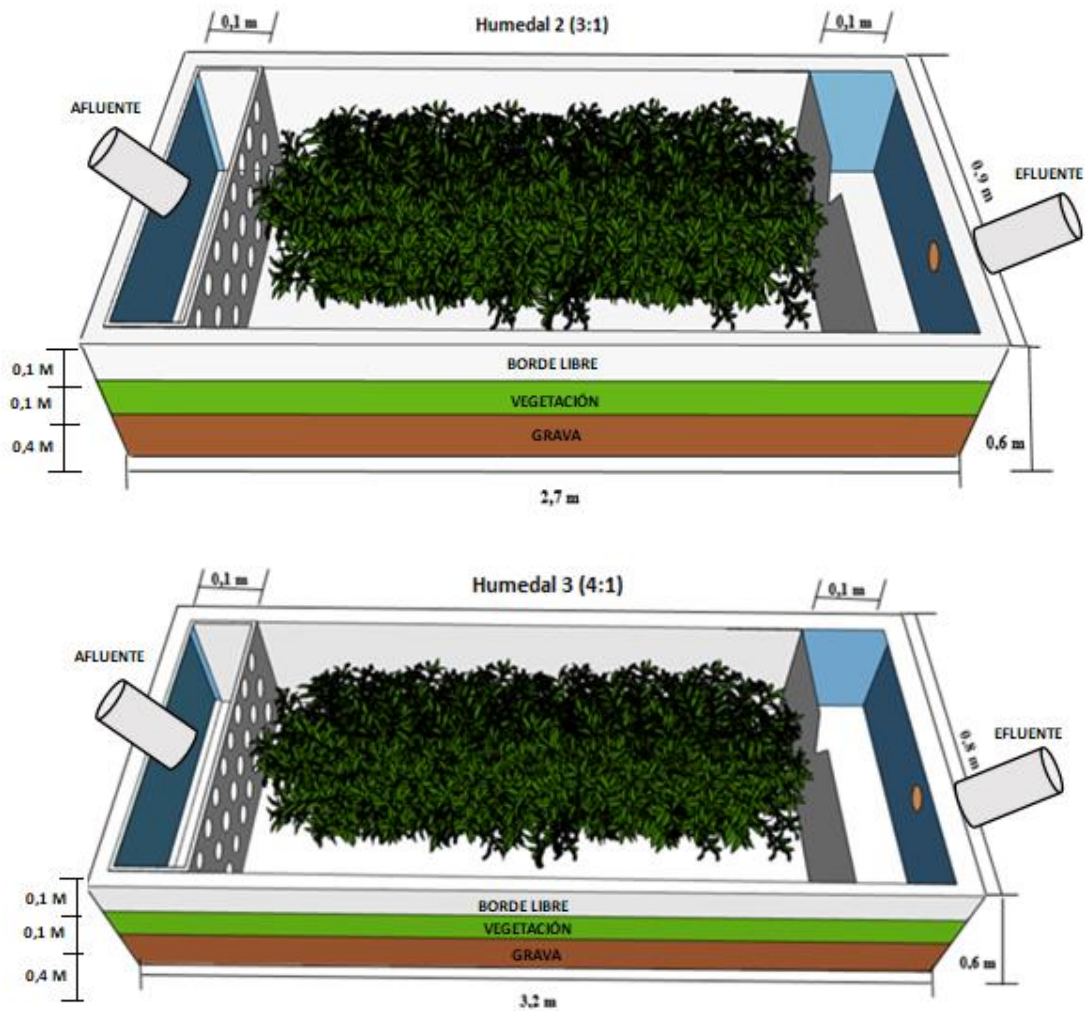


Figura 8. Dimensionamiento de los humedales artificiales 1, 2 y 3 en diferentes configuraciones con sistema Vetiver en aguas residuales domesticas (Autores).

Observando el funcionamiento desigual de los humedales artificiales, se determinó el tiempo de retención hidráulico, para cada humedal, por medio de la ecuación 1.

$$T = \frac{n * L * A * h}{Q} \quad (1)$$

El agua residual de la vivienda se fue tratando a medida que fluía lateralmente a través de un medio poroso, donde se presentó un flujo discontinuo.

Los tiempos de retención variaron junto con sus diferentes caudales en los afluentes de cada uno de los humedales artificiales y su configuración geométrica, como se muestran en la tabla 17.

Humedal	Caudal (m ³ /día)	Caudal salida (m ³ /día)	TRH (Días)
1	0,36	0,111	3
2	0,29	0,085	4
3	0,24	0,039	5

Tabla 17. Valores de caudal y TRH para cada humedal artificial (Autores)

5.3. FASE 2: Evaluación de la capacidad de remoción de la materia orgánica, teniendo en cuenta la geometría de los humedales.

5.3.1. Adaptación del sistema Vetiver (*chrysopogon zizanioides*) en aguas residuales domésticas.

Las plantas ubicadas en cada uno de los humedales artificiales, en contacto con el agua residual domestica con concentraciones de material orgánico e inorgánico, presentaron adaptación a las condiciones en las que se encontraban.

Las plantas presentaron óptimos resultados en cuanto a su proceso de elongación y desarrollo de macollas nuevas

a. Análisis de elongación de las hojas de las plantas vetiver

Se realizó un seguimiento del crecimiento de las hojas de cada uno de los esquejes de vetiver trasplantados en los tres humedales artificiales, durante los 60 días de ejecución del proyecto, esto para evaluar la influencia de crecimiento con el proceso de remoción de contaminantes.

En la primera semana de ejecución del proyecto, los esquejes de vetiver para el caso de los tres humedales artificiales, no mostraron crecimiento notable. (Kong et al., 2003), especifica que el vetiver puede germinar nuevos brotes y raíces a los 7 días después de estar en aguas

residuales con DQO < 400mg/L. Por lo tanto, el agua residual procedente de la vivienda rural supera esa cantidad de DQO como se evidencia en la tabla 14.

Con esto, desde la segunda medición (del día 20 al día 60) se observó la fácil adaptación de las plantas a su nuevo hábitat (al ser trasplantadas de suelo a agua residual), visualizándose un mayor tamaño con respecto al crecimiento vertical, presentándose elongaciones de plantas de hasta 70 cm, con relación a la medición inicial de 10 cm de longitud y nuevos brotes de hojas en el caso del humedal artificial 1, en comparación a los humedales 2 y 3, como se observa en la figura 9, en el crecimiento de cada una de las 30 plantas Vetiver, para los 60 días de medición.

En el anexo 1.J y 1.K se muestra el crecimiento de las 30 plantas Vetiver para los humedales artificiales 2 y 3.

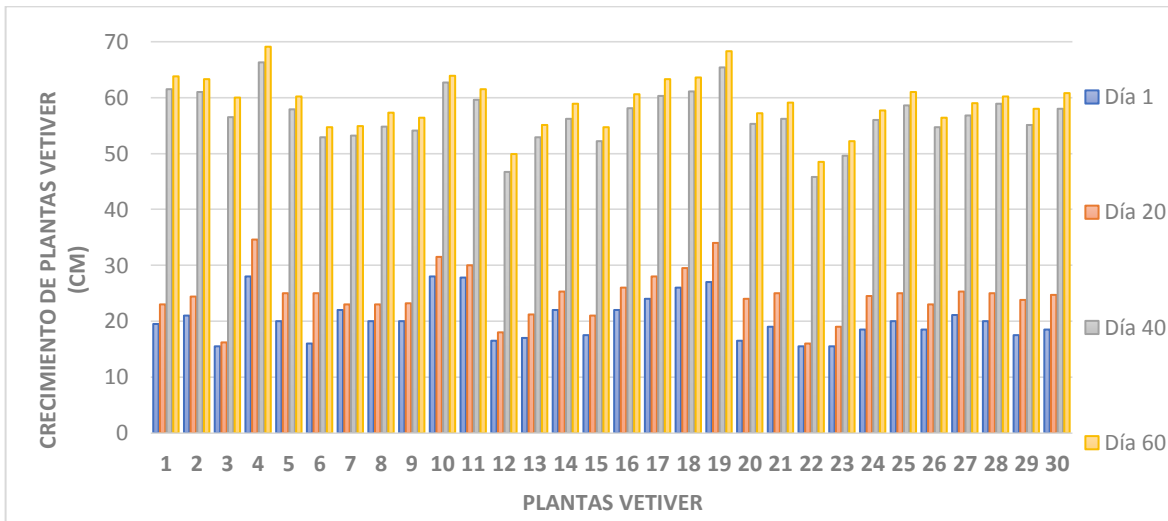


Figura 9. Valores de elongación de hoja en centímetros para cada esqueje de vetiver en el humedal artificial 1 (Autores)

Esta diferencia en el desarrollo de las plantas de un humedal a otro, se debe a que, el humedal artificial 1, presenta un mejor funcionamiento al recibir un mayor caudal en el afluente, con esto un mejor tiempo de retención, favoreciendo la absorción necesaria de los nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas en comparación a los humedales 2 y 3.

5.3.2. Análisis de microorganismos en los humedales artificiales (Algas, bacterias y protozoos)

En cada uno de los sistemas se tomó una muestra de agua para realizar una observación microscópica, en tres puntos diferentes:

- Efluente de los humedales artificiales
- Parte media del humedal artificiales
- Raspado de grava de cada humedal artificial.

a. Análisis de microorganismos en la salida de los humedales artificiales.

La figura 10, muestra el aspecto macroscópico de cada una de las muestras de agua tomadas de los puntos medios y en el efluente de los humedales artificiales. La muestra 1 se observó con menor turbidez que las otras dos muestras y con menor sedimento. Las muestras 2 y 3 se observaron poco traslúcidas y con mayor sedimento que la muestra 1.



Figura 10. Muestras de agua residual, A. punto medio y B. efluente de los humedales artificiales 1, 2 y 3. (Autores)

En la tabla 18, se muestra una descripción de las observaciones microscópicas tomadas en los humedales artificiales 1, 2 y 3.

Se tomó una cantidad de 0.5 ml de las muestras, para su análisis en el microscopio.

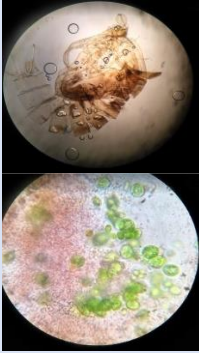
HUMEDAL	OBJETIVO	OBSERVACIONES	IMAGEN
1	40X	- Se evidenciaron larvas de díptero, en los tres humedales artificiales.	
2		- Se observó la presencia de micro algas del genero <i>Chlorella sp</i> y del grupo de las <i>Euglenophytas</i> , características de aguas con contenido de materia orgánica	
3		- Se evidenciaron bacterias sulfato reductoras de color rojo, del genero <i>Chromatium sp</i> , características de ambientes anoxigénicos	

Tabla 18. Análisis microscópico, efluente de los humedales 1, 2 y 3. (Autores)

b. Análisis de microorganismos de la Parte media de los humedales artificiales.

En la tabla 19, se hace una descripción de las observaciones microscópicas de cada uno de los humedales artificiales, en sus puntos medios.

Se tomaron muestras de 0.5 ml, para su análisis en el microscopio.

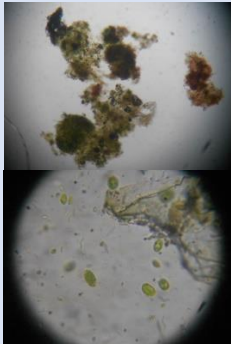
HUMEDAL	OBJETIVO	OBSERVACIONES	IMAGEN
1	40X	- Se evidenció material celular aglutinado de color verde y rojo y restos de material particulado y larvas	
2		- Se observó predominio de algas del genero <i>Chlorella sp</i> y del grupo de las <i>Euglenophytas</i> y bacterias de color rojo, del azufre de genero <i>Chromatium sp</i> .	
3			

Tabla 19. Análisis microscópico, punto medio de los humedales artificiales 1, 2 y 3. (Autores)

c. Raspado de grava (sustrato).

La figura 11 muestra el aspecto macroscópico de cada una de las muestras tomadas del raspado de una piedra (sustrato), tomadas de cada uno de los humedales artificiales.



Figura 11. Muestreo de raspado de sustrato en grava de los humedales artificiales 1, 2 y 3. (Autores).

En la tabla 20 se muestran observaciones microscópicas, una vez realizado el raspado a la grava, escogida aleatoriamente presente en cada uno de los humedales artificiales.

HUMEDAL	OBJETIVO	OBSERVACIONES	IMAGEN
1	40X	- Se observó fragmentos de micro algas filamentosas del genero <i>ulothrix</i>	
2		- Se observó predominio de algas del genero <i>Chlorella sp</i> y del grupo de las <i>Euglenophytas</i> y bacterias rojas, del azufre de genero <i>Chromatium sp</i> .	
3		- Se observó en menor proporción algas del genero navícula.	

Tabla 20. Análisis microscópico, raspado en grava de los humedales artificiales 1, 2 y 3. (Autores)

En todas las observaciones microscópicas realizadas se observó la presencia de 2 tipos de microorganismos, microlagas y bacterias sulfatoreductoras del genero *chromatium sp*.

El tipo de algas observadas en las muestras, se identificaron del genero *chlorella sp*, del grupo *Eulenophytas* y del genero *ulothrix*. Estas algas son características de sistemas con contenido de materia organica y de corrientes de agua limpias.

Con relación al raspado del sustrato, se determinó representantes de diatomeas y algas filamentosas, adheridas a la biopelícula que se forma en la grava del medio filtrante. Estos microorganismos observados en las muestras presentan fotosíntesis oxigénica, aportando oxígeno al medio, el cual es utilizado por bacterias heterotróficas degradando el material orgánico presente.

Esta presencia de algas en gran cantidad se debe a, que en la fase inicial del proyecto los humedales artificiales no contaban con sistema de vertedero, lo que ocasiono que el agua no fluyera libremente en el efluente de los mismos, aumentando con esto el desarrollo y crecimiento en abundancia de microorganismos.

Con relación a las bacterias sulfatoreductoras, encontradas en las muestras del sustrato y las cuales aportaban una coloración rojiza en el efluente de los humedales artificiales, este tipo de bacteria se caracteriza por realizar fotosíntesis anoxigenica, donde utilizan el ácido sulfhídrico (H_2S), en su transformación a azufre elemental (Santoyo, 2007), el cual se almacena en el interior como se observa en las imágenes del microscopio de la tabla 19.

A partir de estas observaciones se determinó que los humedales artificiales están trabajando en su interior de forma anoxigénica, donde se libera ácido sulfhídrico en el proceso de descomposición. En general se observó la misma variedad de especies en los tres humedales artificiales.

5.3.3. Análisis de variables de importancia en la calidad del agua (DQO, DBO_5 y sólidos).

a. Análisis del parámetro DQO en el agua residual.

Pasado un periodo de adaptación de 20 días de las plantas vetiver dentro de los humedales artificiales, se inició la toma de muestras para las variables DQO, DBO_5 y sólidos. Desde el primer análisis realizado al agua residual, se pudo determinar una remoción de contaminantes al observarse una disminución en los valores de DQO.

En la figura 12 se presentan los resultados de DQO para cada uno de los humedales después de 20 días de adaptación de las plantas.

Los resultados demuestran que los humedales presentan una disminución significativa para la variable de DQO del agua residual, durante las 8 semanas de muestreo. Esta disminución de DQO aparece después del periodo de adaptación de las plantas para el caso de los tres humedales artificiales, siendo el de mejor funcionamiento el humedal artificiales número 1, presentado una menor carga orgánica en su efluente que con respecto a los humedales artificiales 2 y 3.

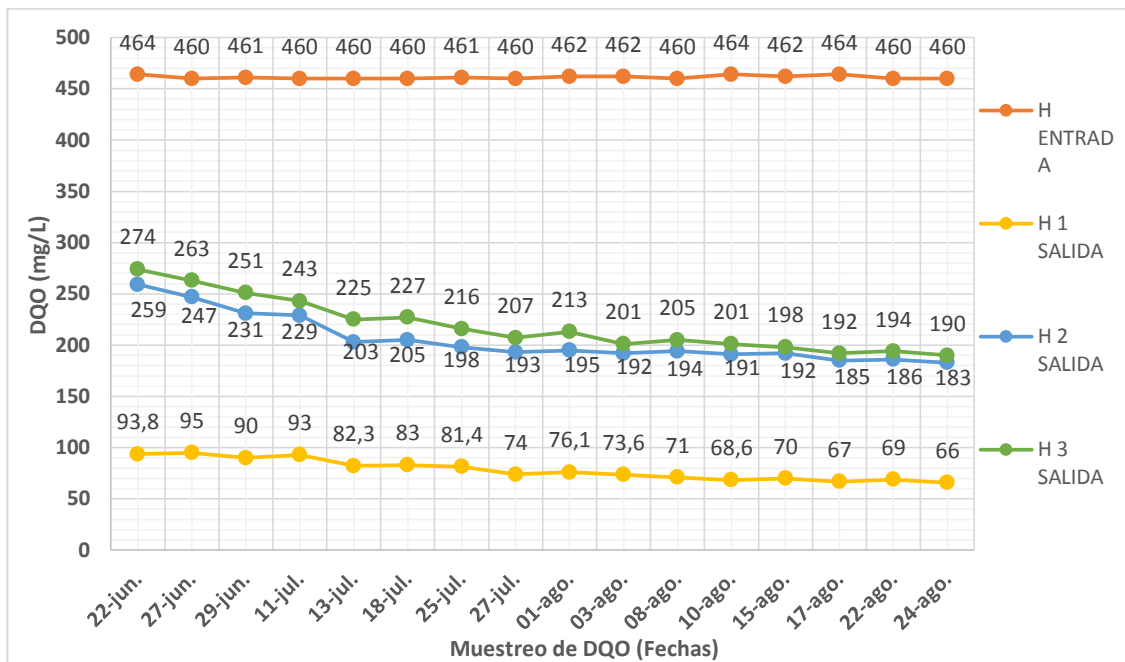


Figura 12. Variación de la DQO para los humedales artificiales 1, 2 y 3 plantados con el sistema vetiver (Autores).

En los anexos 1.O, 1.P y 1.Q, se muestran los valores promedios para las 16 muestras realizadas, tanto en el afluente, punto medio y efluente de los humedales artificiales durante las 8 semanas de ejecución del proyecto junto con su desviación estándar.

Estas disminuciones en los valores de la DQO, se presentaron debido a que se produjo una degradación tanto de la materia orgánica como inorgánica por efecto en mayor proporción de las bacterias anaerobias que se encontraron en el fondo del humedal contribuyendo con la descontaminación del agua.

Estas bacterias, realizaron sus procesos de degradación de forma hidrolítica, consumiendo también el material celuloso presente en los humedales, el cual no biodegradan las bacterias y organismos aerobios presentes.

Adicionalmente el medio filtrante junto con el efecto de las plantas realizó el correcto funcionamiento en la filtración del material presente en el agua residual.

Además, el tiempo de retención de 3 días en el humedal 1, favorece en la degradación de manera efectiva, sin exceder los procesos de oxidación de las sustancias, incurriendo nuevamente en la contaminación.

Con esto se puede determinar después de 20 días de adaptación de las plantas y 8 semanas de muestreo, las aguas en el efluente de los tres humedales artificiales presentan valores aceptables en el parámetro de DQO dentro de los parámetros límites permisibles, cumpliendo con la normativa nacional colombiana de 200 mg/L estipulados por la Resolución 631 del 2015, la cual indica valores límites máximos permisibles para vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales.

b. Análisis del parámetro de DBO₅ en el agua residual

En la figura 13, se observó una gran disminución en el parámetro de la DBO₅ y una continua remoción de carga orgánica en el efluente del humedal artificial 1, desde el primer muestreo con disminuciones desde 30 mg/L hasta 15 mg/L para el último día de análisis, siendo el de mejor funcionamiento.

Igualmente se observaron remociones continuas en los humedales 2 y 3, aunque no tan significativas en comparación con el humedal 1.

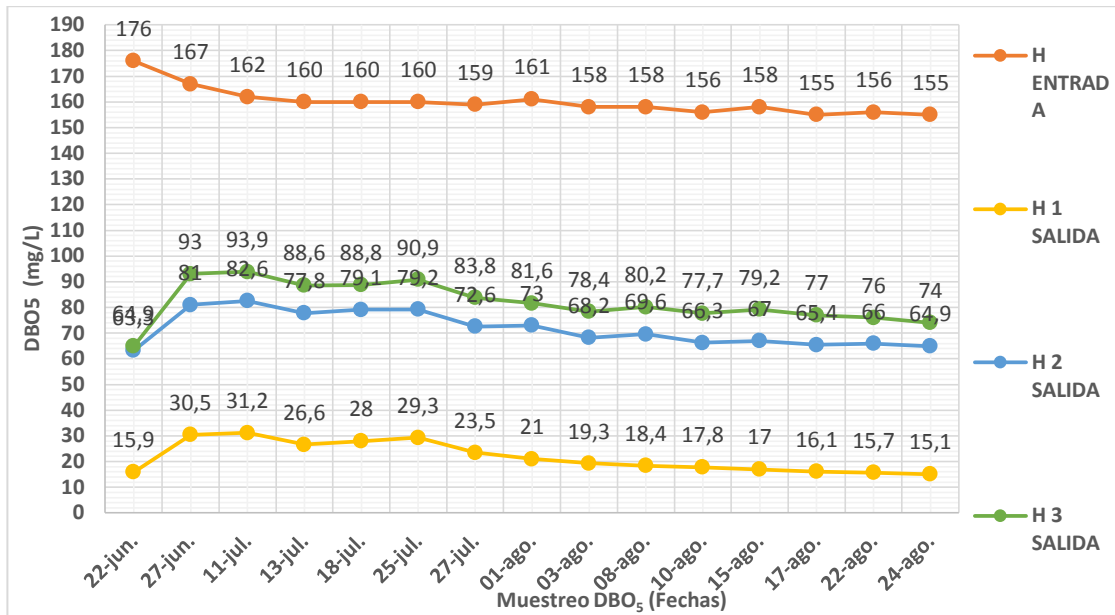


Figura 13. Variación de la DBO₅ para los humedales artificiales 1, 2 y 3 plantados con el sistema vetiver. (Autores).

En los anexos 1.R, 1.S y 1.T, se muestran los valores promedios para las 16 muestras realizadas, tanto en el afluente, punto medio y efluente de los humedales artificiales durante las 8 semanas de ejecución del proyecto junto con su desviación estándar.

Las reducciones que se presentaron en cuanto a la DBO₅, se deben en mayor proporción al efecto de las plantas en sus procesos de absorción, acumulación, metabolización, volatilización y estabilización de contaminantes y nutrientes.

El pasto Vetiver utiliza los nutrientes para sus ciclos vitales de crecimiento, que se presentaron especialmente y en mayor medida en las primeras semanas, el cual es el periodo inicial de adaptación y desarrollo de las plantas.

Igualmente, con ayuda de los microorganismos presentes en la biopelícula que se forma en las raíces de las plantas, estos aportaron a la degradación aerobia.

Adicionalmente, el crecimiento excesivo de algas que se produjo en la superficie de los humedales artificiales en el inicio del proyecto, como se muestra en el anexo 1D, contribuyeron a la par con los organismos aerobios en el consumo de la materia orgánica presente en los humedales artificiales.

Como ya se mencionó, el tiempo de retención presente en este humedal (1), fue el adecuado para la degradación sin exceder el consumo de consumo de oxígeno, ocasionando eutrofización y nuevamente contaminación del agua.

Adicionalmente se observó en la figura 13, los días 11 y 27 de julio y los días 1, 3, 8 y 24 de agosto, se presenciaron disminuciones significativas en los valores de la DBO₅ en los tres humedales artificiales.

Esto presenta una relación directa con la figura 14, de las precipitaciones para los meses de junio hasta agosto en Bucaramanga, en la que se evidencia que los días 21, los días 35 al 45 y el día 65, se presentaron fuertes precipitaciones, entre los 43 a 97 mm de lluvia, ayudando en el proceso de clarificación del agua al aumentar el volumen de agua en los humedales, diluyéndola y por consiguiente disminuyendo la carga orgánica por volumen de agua muestreada.

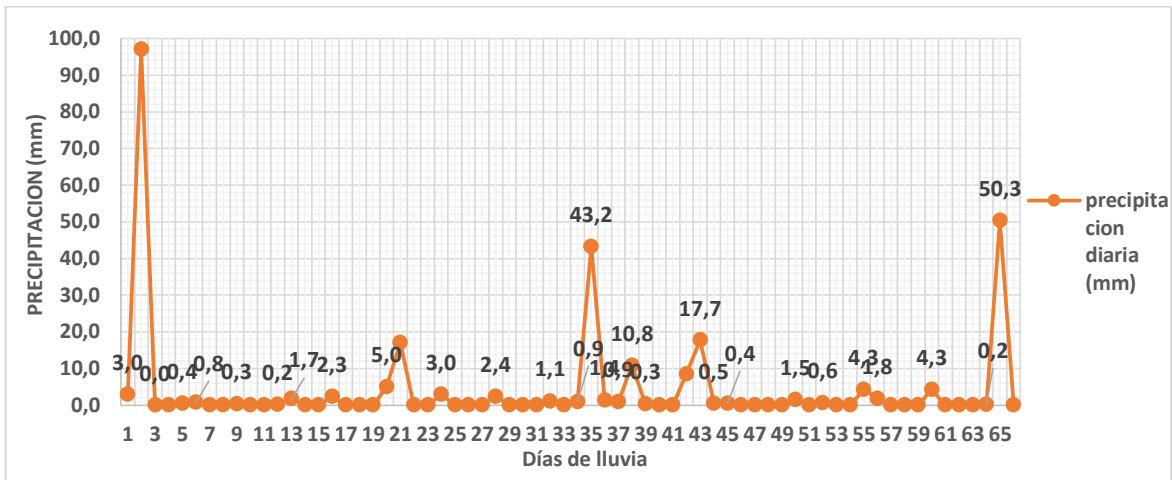


Figura 14. Precipitaciones en Bucaramanga (en los meses de junio, julio y agosto 2018) (IDEAM, 2018)

c. Análisis de remoción de sólidos sedimentables.

De la prueba de análisis de sólidos sedimentables, se pudo determinar que en el afluente de cada humedal no se están presentado este tipo de sólidos, lo que comprueba la eficiencia del pozo séptico en sedimentación. De acuerdo a las muestras en los efluentes, en el caso del humedal artificial 1, no se observaron ml/l de sólidos y se resalta la claridad del agua.

Con relación al humedal artificial 2 y 3, se presentaron resultados de 0,5 y 15 m/l de sólidos sedimentables respectivamente, para lo cual se determinó que es pérdida de biomasa que sale en el afluente de estos humedales, siendo material particulado inerte, como se observa en el anexo 1.I

Las mediciones para los sólidos sedimentables se realizaron 2 veces por semana por triplicado, en las 5 semanas finales de ejecución del proyecto, tomándose muestras puntuales del afluente y efluente de los humedales artificiales.

d. Análisis de remoción de sólidos totales, volátiles, suspendidos, disueltos.

Las muestras analizadas con relación a los sólidos totales, volátiles, suspendidos y disueltos, se tomaron del afluente y efluente de cada humedal, durante las 5 semanas antes de finalizar el proyecto, con muestras puntuales 2 veces por semana por triplicado cada una.

La figura 15, muestra un promedio de cada uno de los valores resultantes para cada punto de muestreo del análisis por triplicado en cada uno de los humedales artificiales.

Se pudo determinar que en los humedales artificiales está realizando una pequeña retención de sólidos suspendidos, disueltos y totales, al observarse una filtración y disminución en el efluente de los humedales con relación al afluente de cada uno, aunque no muy significativa.

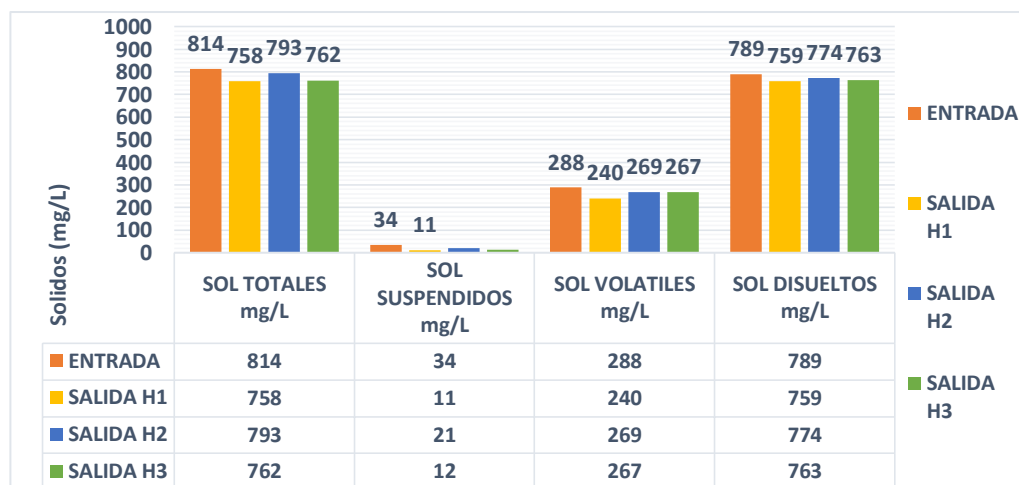


Figura 15. Remoción promedio de sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos y sólidos volátiles en los humedales 1, 2 y 3 (Autores)

Igualmente se observó que el humedal artificial 1, presento rendimientos mejores de remoción, con relación a los humedales 2 y 3, como se ha observado con los anteriores parámetros de DQO, DBO₅ y en el crecimiento de las plantas.

Con relación a los sólidos volátiles, se presentan disminuciones, lo que demuestra el efecto de las plantas en la metabolización de nutrientes o por cambios climáticos. Igualmente, poco significativos.

5.4. FASE 3: Comparación del crecimiento de las plantas Vetiver junto con la remoción de materia orgánica.

5.4.1. Plantas seleccionadas y adaptadas de *chrysopogon zizanioides*, crecimiento y desarrollo de las plantas Vetiver.

De la figura 16, se pudo determinar que cada esqueje de planta Vetiver en el humedal artificial 1, presento un crecimiento en promedio de 39 cm en comparación de las plantas en los humedales 2 y 3, con crecimientos de 20 cm y 8 cm en promedio respectivamente.

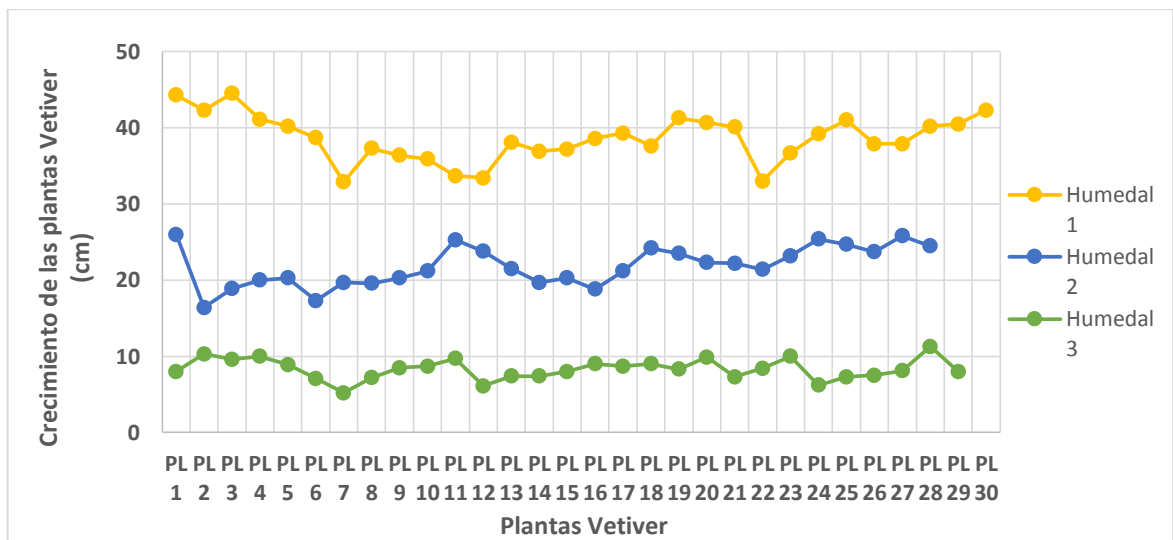


Figura 16. Crecimiento en centímetros para esqueje de planta Vetiver en los humedales artificiales 1, 2 y 3 (Autores)

Este crecimiento en mayor proporción de las plantas vetiver en el humedal 1, se debe a que, el tiempo de retención en este humedal es de 3 días, siendo menor con respecto a los otros humedales artificiales. Con esto el agua residual permanece el tiempo necesario, sin presentarse consumo excesivo, para que el pasto vetiver tome los nutrientes indispensables, para sus procesos vitales.

Lo contrario se presentó en los humedales 2 y 3, ya que sus tiempos de retención son mayores, lo que ocasiona consumo desmesurado de nutrientes, limitándolos para la absorción de las plantas Vetiver.

Al observarse este crecimiento y desarrollo, se infiere que las plantas vetiver están realizando su proceso de remoción y descontaminación del agua residual, ya que, las planta toman los nutrientes presentes en el agua residual por medio de sus raíces y los incorporan a sus tejidos, para poder realizar sus procesos vitales.

Por otra parte, 6 semanas después del trasplante de los esquejes de vetiver a los humedales artificiales, estos comenzaron presentar una coloración rojiza-morada en sus hojas como se muestra en el anexo 1.H.

Esta coloración probablemente se debe a estrés fisiológico y una deficiencia de fosforo como se muestra en a tabla 14 en las condiciones iniciales del agua residual, lo que induce a que la planta sintetice antocianinas, responsables de la particular coloración. (Torres et al., (2007). Esta coloración no ha afectó en el crecimiento de las plantas ni en su desarrollo durante los meses de análisis.

5.5. FASE 4: Determinación del porcentaje de remoción de materia orgánica, en los humedales artificiales plantados con pasto Vetiver.

5.5.1. Verificación de porcentajes de remoción con relación a la geometría de los humedales.

a. Análisis del porcentaje de remoción del parámetro DQO en el agua residual.

La figura 17, muestra los porcentajes de remoción semanales durante los 60 días de ejecución del proyecto, donde se pudo observar remociones de hasta el 82% en el humedal

artificial 1, presentando mejor eficiencia en sus procesos. Igualmente, los humedales 2 y 3 presentaron remociones del 55% y 52% respectivamente, notándose su funcionamiento, aunque en menor rendimiento.

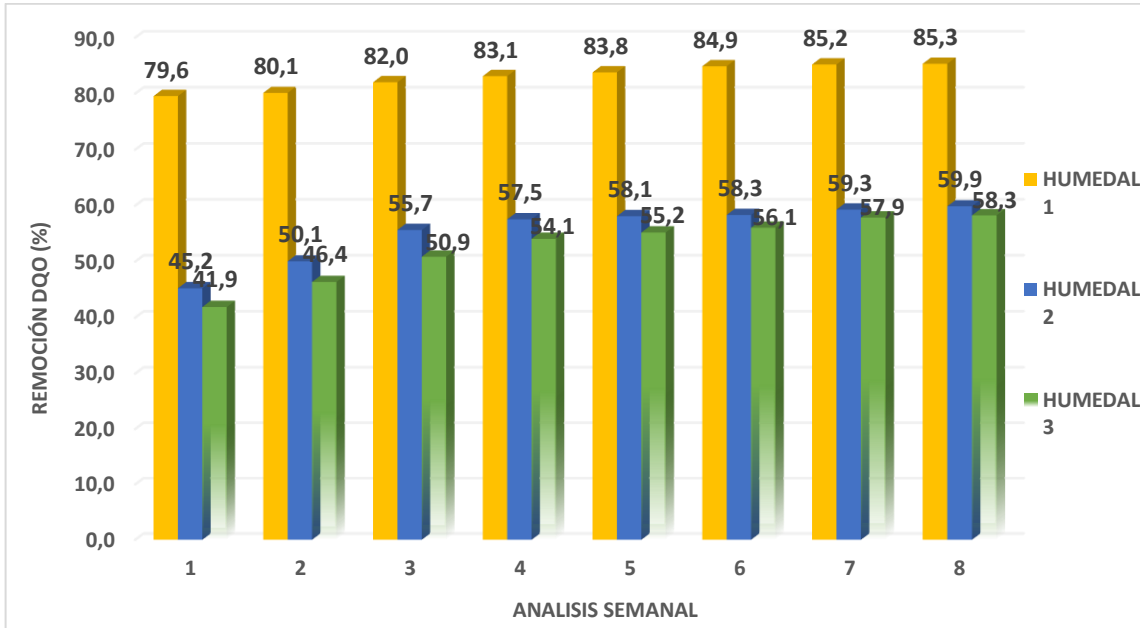


Figura 17. Porcentajes de remoción semanal del parámetro DQO, en los humedales 1, 2 y 3 (Autores)

Esta disminución del parámetro de la DQO, se relaciona con la presencia de los microorganismos en los 3 humedales artificiales de características anoxigenicas, lo que comprueba que, en la parte más profunda de los humedales donde aún no hay presencia de raíces ni biopelícula, se encontraron este tipo de bacterias, donde se está realizando el funcionamiento anoxigénico por medio de hidrólisis tal como se determinó en el análisis de microorganismos, donde se identificaron bacterias sulfatoreductoras.

Adicionalmente esas diferencias en los rendimientos de remoción, se pudo determinar que es debido a la cantidad de agua y tiempos de retención hidráulico por parte de los humedales, siendo los humedales 2 y 3 los que cuentan con los tiempos de retención mayor, lo que conlleva a un consumo excesivo de nutrientes presente en el agua residual al punto de afectar calidad de la misma.

b. Análisis del porcentaje de remoción del parámetro DBO₅ en el agua residual

En la figura 18, se observan los porcentajes de remoción en promedio semanal de cada uno de los humedales artificiales. Se puede observar que a medida que aumentan las semanas, es decir, va aumentando la madures de la planta vetiver, los porcentajes de remoción de la variable del DBO₅, va aumentando proporcionalmente a este crecimiento, esto se debe a que, en las semanas iniciales, la planta se encuentra en un periodo de adaptación, acondicionándose a su nuevo hábitat, favoreciendo su crecimiento y desarrollo y por consiguiente mejorando los procesos de descontaminación del agua residual al tomar los nutrientes presentes para sus funciones.

Además de acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de microorganismos, se infiere que existe un proceso adicional de remoción por parte de las algas existentes en la superficie de los humedales, ayudando a los procesos aerobios de remoción de material orgánico.

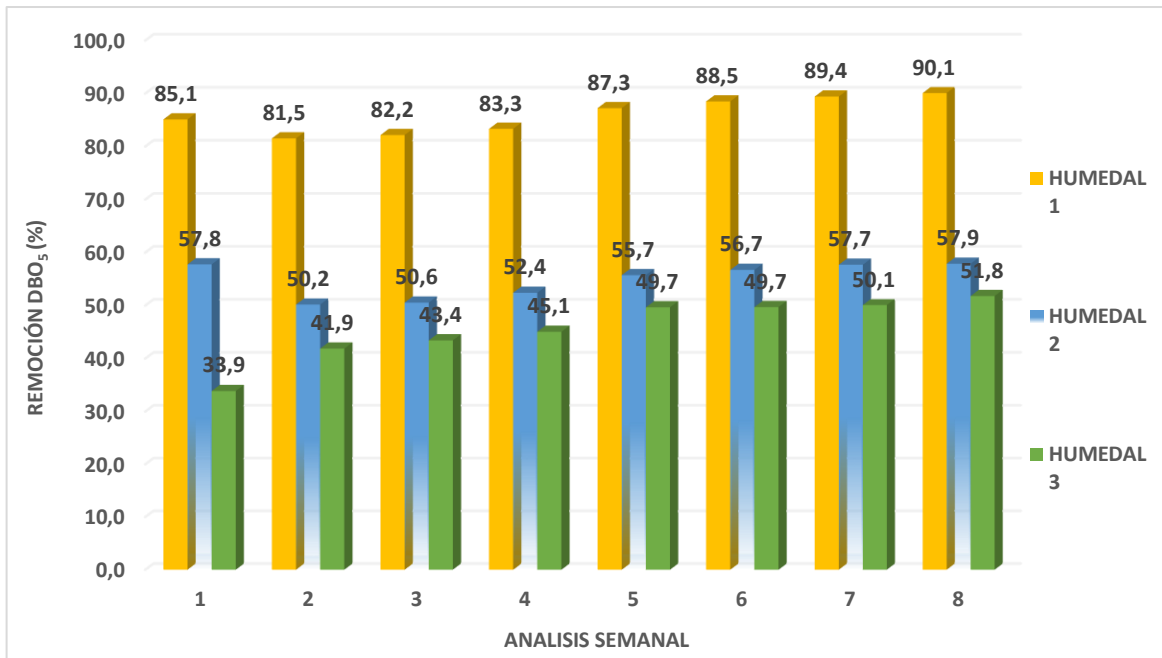


Figura 18. Porcentajes de remoción semanal de la DBO₅ para los humedales artificiales 1, 2, y 3. (autores).

Durante las 8 semanas de ejecución del proyecto, se observó un promedio de remoción de la DBO₅ del 85% en el caso del humedal artificial 1, siendo el de mejor remoción y

funcionamiento con respecto a los humedales artificiales 2 y 3 presentando unas remociones del 54% y 47% respectivamente.

Esto se debe a que en el humedal artificial número 1, presenta un mejor flujo del agua, con relación a las conexiones en las tuberías desde el tanque de almacenamiento hacia los humedales, por esto su tiempo de retención es menor, favoreciendo los procesos naturales de remoción, tanto de la planta vetiver como de los microorganismos presentes en el sustrato del humedal (algas y bacterias). Observándose lo contrario en los humedales artificiales 2 y 3.

c. Relación SV/ST y relación SS/SD

La relación sólidos volátiles y sólidos totales, determina la fracción de material orgánico que entra a los humedales sobre el material total. Si el resultado de dicha fracción es mayor a 0,5 indicando que la naturaleza y características del agua es mayormente de tipo orgánica.

Adicionalmente la relación sólidos suspendidos y sólidos disueltos complementa la relación anterior, determinando cuanto material orgánico está retenido en el humedal y en cuanta cantidad se presenta perdida de lodos en el efluente de los humedales.

A partir de esto se obtiene que, si la cantidad de sólidos suspendidos y la de sólidos disueltos es baja, se infiere que existe material orgánico que se va saliendo del medio.

La tabla 21 muestra los resultados de la relación SV/ST y SS/SD, para el caso de estudio en el agua residual de entrada a los tres humedales artificiales

Relación	Resultado
1. SV/ST	< 0,5 , siendo = 0,35
2. SS/SD	Solidos suspendidos bajos y solidos disueltos altos

Tabla 21. Relación SV/ST y SS/SD, en el agua afluente a los humedales artificiales 1, 2 y 3.

(Autores)

Los resultados arrojados por de la relación 1, determinan que mayormente el material que conforma el agua residual de cada uno de los humedales, este compuesto por material inorgánico, minerales, sales, metales, entre otros elementos.

La relación 2, muestra una mayor cantidad de solidos disueltos los cuales están compuestos por moléculas inorgánicas y orgánicas como también por iones en disolución en el agua se caracterizan por tener un tamaño menor a 0,00001 mm y se relacionan con el grado de mineralización del agua ya que son iones de sales minerales que el agua ha disuelto a su paso. En cuanto a los sólidos suspendidos se encuentran en baja cantidad, demuestra la retención efectiva de estos por parte de los humedales artificiales.

d. Relación DBO₅ / DQO

La relación DBO₅/DQO en el afluente de los humedales nos indica además de qué tipo de agua estamos manejando si es biodegradable para aplicar un tratamiento de forma aerobia o por el contrario es poco biodegradable, también indica la fracción de material orgánico oxidable sobre todo el material existente en el agua.

La tabla 22 muestra el promedio de la relación DBO₅/DQO para los 60 días de ejecución del proyecto, donde se pudo determinar que, la relación DBO₅/DQO analizada en la entrada de los humedales se encuentra entre 0.3 y 0.5, indicando que son aguas residuales poco biodegradables, lo cual es apta para ser tratada de forma anaerobia.

	RELACION DBO ₅ /DQO ENTRADA HUMEDALES	RELACION DBO ₅ /DQO SALIDA HUMEDAL 1	RELACION DBO ₅ /DQO SALIDA HUMEDAL 2	RELACION DBO ₅ /DQO SALIDA HUMEDAL 3
PROMEDIO	0,35	0,27	0,32	0,34

Tabla 22. Relación DBO₅/DQO promedio, para los humedales artificiales 1, 2 y 3. (Autores)

En el efluente de los humedales artificiales se observaron valores de la relación DBO₅/DQO entre los 0.25 y 0.35, indicando que se está produciendo la degradación de la materia de forma anaerobia en la parte profunda de los humedales donde las raíces aún no han llegado

y con esto no existe la biopelícula bacteriana que se une a ellas permitiendo la degradación aerobia y la transferencia de oxígeno hacia el interior.

Vinculando la relación DBO_5/DQO con la relación SV/ST , se pudo determinar que mayormente el agua que entra a los humedales artificiales es de carácter inorgánico, produciéndose la degradación por medio de las bacterias presentes en el fondo del humedal de forma anaerobia por hidrólisis.

e. Análisis de reducción de carga contaminante

En la tabla 23, se observan los valores para la carga contaminante, carga orgánica volumétrica y el volumen necesario de cada humedal para realizar la remoción de contaminantes, con sus porcentajes de reducción.

DQO

Humedal	caudal (m ³ /día)	Carga contaminante ante entrada (Kg/m ³)	Carga contaminante ante salida (kg/m ³)	Carga contaminante reducida (kg/m ³)	Porcentaje de remoción (%)	Carga orgánica volumétrica a entrada (kg/m ³ día)	Carga orgánica volumétrica a salida (kg/m ³ día)	Volumen necesario de remoción (m ³)
1	0,36	0,17	0,03	0,14	83	0,11	0,02	0,97
2	0,29	0,13	0,06	0,07	55	0,09	0,04	1,03
3	0,24	0,11	0,05	0,06	52	0,74	0,35	1

Tabla 23. Valores de carga contaminante para DQO y porcentaje de remoción para los humedales 1, 2 y 3 (Autores)

De la tabla 23, se puede determinar que el volumen necesario en el caso del humedal artificial 1, para la degradación del material inorgánico es de 0,97 m³, dándose una remoción del 86% donde se redujo la carga contaminante hasta 0,02 kg/m³día, siendo el humedal de menor volumen necesario para su funcionamiento.

Para el caso del humedal artificial 2, necesita un volumen de 1,03 m³, para efectuarse una degradación del 55%, reduciendo su carga hasta 0,04 kg/m³día y el humedal con menor eficiencia en la reducción de carga es el 3, mostrando un porcentaje de efectividad del 52%, utilizando un volumen de 1 m³.

DBO

Humedal	caudal (m ³ /día)	Carga contaminante entrada (Kg/m ³)	Carga contaminante salida (kg/m ³)	Carga contaminante reducida (kg/m ³)	Porcentaje de remoción (%)	Carga orgánica volumétrica entrada (kg/m ³ día)	Carga orgánica volumétrica salida (kg/m ³ día)	Volumen necesario de remoción (m ³)
1	0,36	0,05	0,007	0,04	86	0,03	0,005	0,96
2	0,29	0,04	0,02	0,02	55	0,03	0,05	0,93
3	0,24	0,03	0,01	0,01	48	0,02	0,01	0,96

Tabla 24. Valores de carga contaminante para DBO y porcentaje de remoción para los humedales 1, 2 y 3 (Autores)

En la tabla 24, se puede observar que, para el humedal artificial 1, se presenta una remoción del 86% de la carga orgánica, la cual necesito un volumen de 0,96 m³ para la efectividad de su descontaminación reduciéndose su carga a 0,005 kg/m³día en su efluente, siendo el de mejor funcionamiento.

Igualmente se presentaron remociones ara los humedales 2 y 3 del 55% y 48%, necesitando volúmenes de 0,93 m³ y 0,96 m³, Respectivamente para su funcionamiento donde se presentan menores caudales de entrada del agua residual.

Adicionalmente, se observa que la carga contaminante con relación al material orgánico que entra a los humedales es de 0,04 Kg/L en cada descarga

Se pudo determinar unas remociones del 86% en el humedal artificial 1, al obtener en la salida carga contaminante orgánica en promedio del 0,022 Kg/L, presentándose como el sistema de mejor funcionamiento.

Igualmente se presentaron reducciones de carga orgánica del 55% y 48% para el humedal 2 y el humedal 3, siendo el tercer sistema el menos eficiente.

CAPITULO 6.

CONCLUSIONES

- En este proyecto se tuvo en cuenta para el dimensionamiento de los humedales artificiales variables como relación geométrica (largo : ancho), crecimiento de la planta, parámetros como DQO, DBO₅, sólidos, caudal, tiempo de retención hidráulico, carga orgánica volumétrica, para determinar la eficiencia en la remoción de contaminantes relacionados a estos factores, el humedal que presento mejores resultados en los parámetros DQO, DBO₅ y sólidos totales fue el humedal artificial 1 correspondiendo a las dimensiones de 2.2 m y 1.1 m en su largo : ancho respectivamente, cumpliendo la relación 2:1.
- La eficiencia de remoción de materia orgánica fue comparada en los tres humedales artificiales, teniendo en cuentas las dimensiones de largo : ancho en cada uno de ellos, determinándose que el humedal artificial 1, es el de mejor funcionamiento hidráulico con tiempos de retención favorables de 3 días, con un volumen necesario para remoción de contaminantes de 0,93 m³, dimensiones de 2.2 m y 1.1 m de largo : ancho respectivamente y eficiencia significativa en la reducción de parámetros de importancia ambiental como DQO, DBO₅ y sólidos totales.
- Se evaluaron las plantas vetiver en los tres humedales artificiales, encontrando que en el humedal artificial 1, presentaron un crecimiento en promedio de 39 cm en 60 días. De acuerdo al proyecto se pudo demostrar que, a medida en que la planta Vetiver absorbe los contaminantes presentes en el agua residual como nutrientes para sus funciones vitales, va presentando un desarrollo y crecimiento vertical de sus hojas y un aumento en el número de macollas nuevas, en promedio de 4 macollas, por esqueje de planta.
- En el cálculo del porcentaje de remoción de materia orgánica, el humedal artificial 1, presento mejores resultados de porcentajes de remoción tanto para la variable DBO₅ como DQO, con valores en reducciones de 86 % y 82%, respectivamente, con tiempo de retención

de 3 días, además, con crecimientos y desarrollo de planta superiores en comparación con los humedales 2 y 3, estableciéndose como el más indicado en cuanto a dimensiones y funcionamiento para la aplicación de procesos de fitorremediación.

CAPITULO 7.

RECOMENDACIONES

- Se debe realizar un monitoreo y estudio microbiológico a profundidad, en la identificación de microorganismos patógenos como E. Coli, salmonella, entre otros, ya que son organismos característicos de este tipo de agua y así poder certificar la eficiencia en el tratamiento de la descontaminación del agua residual en todos sus aspectos, físicos, químicos y microbiológicos.
- Se debe realizar al inicio de la ejecución del proyecto la verificación de las conexiones en cuanto a tuberías y condiciones de los humedales para garantizar el correcto funcionamiento, evitando fugas o taponamientos en el flujo del agua, lo cual conlleva a errores en las mediciones y resultados.

CAPITULO 8.

LISTA DE REFERENCIAS

- ALEGRE O., J. (2007). Manual sobre el uso y manejo de pasto vetiver (*Chrosopogon zizaioides*). Organización Panamericana de la Salud. OMS. Lima, Peru.
- APHA, (1992). AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th Edition. Washington.
- ARIAS C. Arias I., Hans Brix. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Universidad Militar Nueva Granada. Colombia. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.
- ARIAS M., S. M. (2010). Función de las plantas, flujo y tipo de vegetación en humedales técnicos construidos como alternativa para el tratamiento de las aguas residuales en países tropicales en desarrollo. Tesis Universidad Industrial de Santander.
- BORRERO L. Jaime A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Trabajo final (Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental). Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- CURT M.,(s/f). (2010) Fitodepuración en Humedales Conceptos Generales. . En Manual de Fitodepuración Filtros de Macrofitas en Flotación. (s/f). (61-77). Madrid. Universidad Politécnica de Madrid
- DELGADILLO Oscar, CAMACHO Alan, PEREZ Luis F., ANDRADE Mauricio. (2010) Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.
- DÍAZ, J., Valencia, C., Lara, C. (1996). Estudio de factibilidad para el tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de Tunja por medio de un reactor anaerobio de

flujo ascendente y manto de lodos UASB operando en el rango psicrófilico de temperatura. Proyecto UNIBOYACÁ/COL- CIENCIAS.

DÍAZ, C. (2014). Tratamiento de agua residual a través de humedales. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil. Universidad Santo Tomas, Tunja.

EMAMVERDIAN, Y. Ding, F. Mokhberdoran, Y. Xie. (2015). Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response Sci. World J. p. 18

EPA, (2000). Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters, Estados Unidos.

GALINDO, R. (2014). Humedal artificial de flujo horizontal sub superficial para tratamiento de aguas mieles. Agropecuaria Atitlan S.A. Ciudad de Guatemala.

GALLO, E., Vargas, S. (2015). Evaluación de la eficiencia del pasto vetiver para la fitorremediación de las aguas superficiales del caño cola de pato ubicado en el sector rural del municipio de acacias departamento del meta. Universidad abierta y a distancia UNAD. Ingeniería Ambiental. Pp. 72.

GARCÍA, J., CHIVA, J., AGUIRRE, P., ÁLVAREZ, E., SIERRA, J. P., & MUJERIEGO, R. (2004). Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size. *Ecological Engineering*, 23(3), 177–187.

GONZALÍAS, A., KUSCHK, P., WIESSNER, A., JANK, M., KÄSTNER, M., & KÖSER, H. (2007). Treatment of an artificial sulphide containing wastewater in subsurface horizontal flow laboratory-scale constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 31(4). 2007. 259–268.

GRAJERA, G. (2009). Study of *Chrysopogon Zizanioides* ability to decontaminate irrigation water in Southwest Spain, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-14064-1, España.

GREENFUELTECH. (2007). Vetiver Technology, India. Recuperado de <http://www.greenfueltech.net/vetiver.htm>

HERRERA, J. (2015). Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con pasto vetiver (*chrysopogon zizanioides*) en la vía neiva-vegalarga departamento del Huila. Trabajo de grado. Magíster en Ingeniería Civil. Bogotá, CO. p 2

JORDÃO E, PESSOA C (1975) Tratamento de esgotos domésticos. Concepções clássicas de tratamento de esgotos, 1, BNH/ABES/CETESB, 544 p.

KOSTINEC, R. (2001). Constructed wetland use for treatment of dairy milkhouse wastewaters in maine. Tesis (Master de ciencias en Ingeniería Civil). Universidad de Maine.

LARA, J. (1999). “Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales”. Recuperado de <https://sites.google.com/site/humedalesartificiales/2-componentesdel-humedal>

MAFFEI (Ed.), (2002). *Vetiveria: the Genus Vetiveria*, 6, Taylor and Francis Publication, London, p. 114

MEI, X.-Q., Yang, Y., Fung-ye Tam, N., Wang, Y. w., & Li, L. (2014). Roles of root porosity, radial oxygen loss, Fe plaque formation on nutrient removal and tolerance of wetland plants to domestic wastewater. *Water Research*, 147-159.

MELATO et al., (2016.). F.A. Melato, N.S. Mokgalaka, R.I. McCrindle. Adaptation and detoxification mechanisms of Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) growing on gold mine tailings *Int J Phytorem*, 18. pp. 509-520

METCALF, G. E. A. (1998). Distributional analysis of an environmental tax shift.

- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (2015). Resolucion 631 del 2015. Bogota.
- OSNAYA. (2012). Maricarmen. Propuesta de Diseño de un Humedal Artificial para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. Universidad del Sierra Juárez. México
- ORIHUELA, J. (2007). Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) (En línea). PE. Formato PDF. Disponible en www.vetiver.com
- PEÑA, C. Lara J. (2012) Tratamientos de Agua de Escorrentía Mediante Humedales Artificiales: Estado del Arte En Revista Ciencia y Tecnología Neogranadina. 3961.Universidad Militar Nueva Granada. Vol 22 No 2.
- PERSSON, J., SOMES, N., & WONG, T. H. F. (1999). Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water, Science and Technology*, 40(3). 1999. 291–300.
- RAMÍREZ, J. C. (2014). Diseño de humedales flotantes con Vetiveria Zizanioides (linn.) nash. Para el tratamiento de agua residual y su reúso en actividades de pesca deportiva, 1–84.
- RAMÍREZ, J. (2016). Evaluación del vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) y la elefanta (*Pennisetum purpureum*) en el diseño de humedales artificiales . Medellin.
- ROMERO, J. (2004). Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Bogotá. Editorial Escuela Colombiana de ingeniería. Cuarta Edición. 1248p.
- SABAS, C., (2011). Universidad T. de P. Evaluación hidrodinámica de humedales construidos a escala de laboratorio. 2011. p. 17-25.
- SALDARRIAGA, J. C., Garrido, J. M., Hoyos, D. A., & Correa, M. A. (2010). Remoción simultánea de carbono, nitrógeno y fósforo de aguas residuales en un sistema híbrido UCT modificado. *Universidad Nacional de Colombia. DYNA*. 77(162), 39-48.

SANTAFÉ, M. (2009). Situación actual del estado de la depuración biológica. explicación de los metodos y sus fundamentos. universidad politécnica de Catalunya. Barcelona. Cap 1. P 15.

SANTOYO, Claudia. ROJAS, Cesar. CASTILLO, Luis Eduardo. Evaluación del funcionamiento y operación de un humedal de flujo subsuperficial (FSS) horizontal como postratamiento de las aguas residuales domésticas provenientes de reactores anaerobios tipo UASB en la PTAR de Río Frío. Universidad Pontificia Bolivariana. 2007.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. (1998) American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 20ed., New York.

TORRES, L., Foresti, E., & Vazoller, R. (1996). Composición Y Uso De Agua Residual Doméstica En Reactores A Escala De Laboratorio, Universidad del Valle.

TOUSINNANT E., Fankhauser O., Hurd S., (1999) ; Guidance manual for the design, construction and operations of constructed wetlands for rural applications in ontario, By Stantec Consulting Ltd, R&TT, Alfred College (University of Guelph) South Nation Conservation.

TRUONG, (1999). Vetiver Grass Technology for Mine Rehabilitation. Tech. Bull. No. 1999/2, PRVN/ORDPB, Bangkok, Thailand (1999)

TRUONG, P.N. (2000). The Global Impact of Vetiver Grass Technology on the Environment. Proc. Second Intern. Vetiver Conf. Tailandia.

TRUONG (2004). Vetiver Grass Technology for mine tailings rehabilitation Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilisation. Science Publishers Inc. NH, USA

- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). (1988). Design Manual, Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. Septiembre.
- VETIVERCOL., (2006). tratamiento de aguas residuales mediante filtros e hidrosistemas naturales con pasto vetiver bioingenieria. vetivercol servicios y consultorias s.a.s.
- VETIVER ORG., (2017). Vetiver – the plant. The Vetiver Network Internacional. Recuperado de http://www.vetiver.org/TVN_VS_GAL_PUB/VS_Vetiver_the_Plant_o.pdf
- VYMAZAL, J., & KRÖPFELOVÁ, L. (2005). Growth of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic. *Ecological Engineering*, 25(5), 606–621.
- WILDSCHUT, L. (2013). Mercados potenciales de tecnologías de biorremediación con vetiver. 1 ed. Madrid. ES. (En línea). Consultado, 15 de jul. 2015. Formato PDF. Disponible en <http://www.eoi.es>
- XIA, H.P. (2004) Ecological rehabilitation and phytoremediation with four grasses in oil shale mined land *Chemosphere*, 54. pp. 345-353
- YOCUM, D. (2010). Manual de Diseño: Humedal Construido para el Tratamiento de Aguas Grises por Biofiltración. School of Environmental Science and Management. University of California. Santa Barbara. Pp

CAPITULO 9.

ANEXOS

Anexo 1.A. Desarrollo de pasto Vetiver (*chrysopogon zizanioides*), para plantación en cada humedal artificial (Autores)



Anexo 1. B. Montaje inicial de los humedales con sistema Vetiver (Autores)



Anexo 1.C. Instalación de los humedales artificiales y plantación del pasto Vetiver (*chrysopogon zizanioides*) (Autores)



Anexo 1.D. Proceso de eutrofización en humedales artificiales con sistema Vetiver (Autores)



Anexo 1.E. Limpieza de humedales artificiales con sistema vetiver (Autores)



Anexo 1.F Crecimiento de plantas Vetiver a los 30 días (Autores)



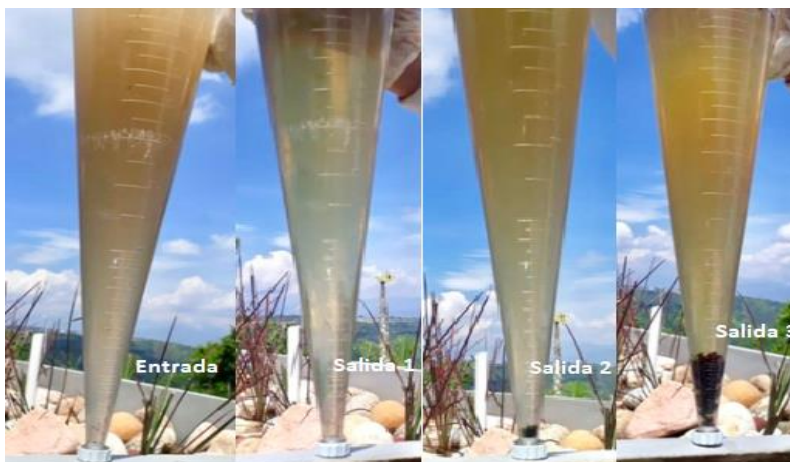
Anexo 1.G. Crecimiento de plantas Vetiver a los 60 días (Autores)



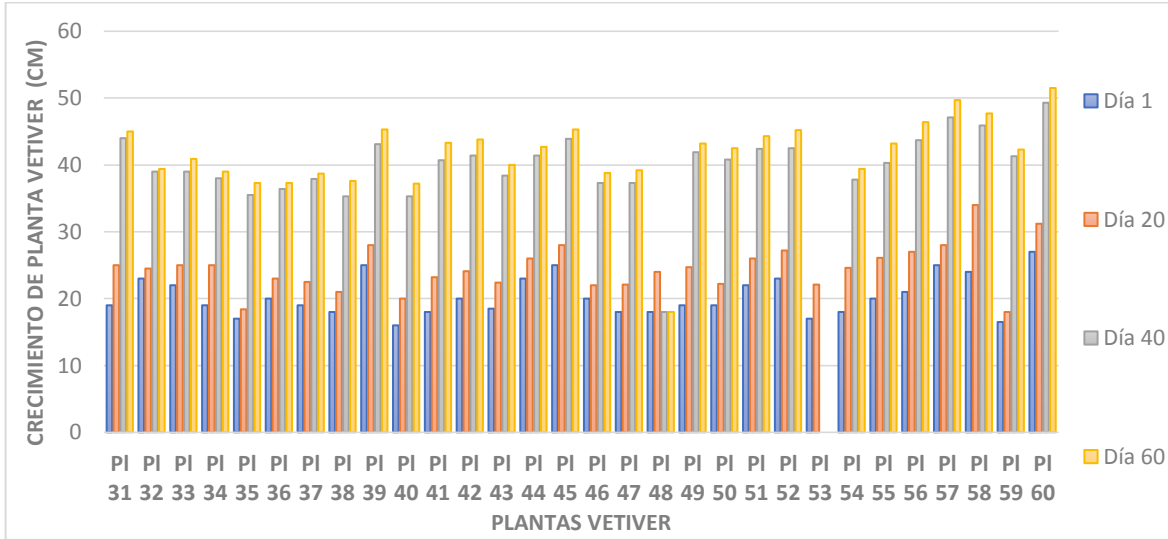
Anexo 1.H. Coloración rojiza en plantas vetiver (Autores)



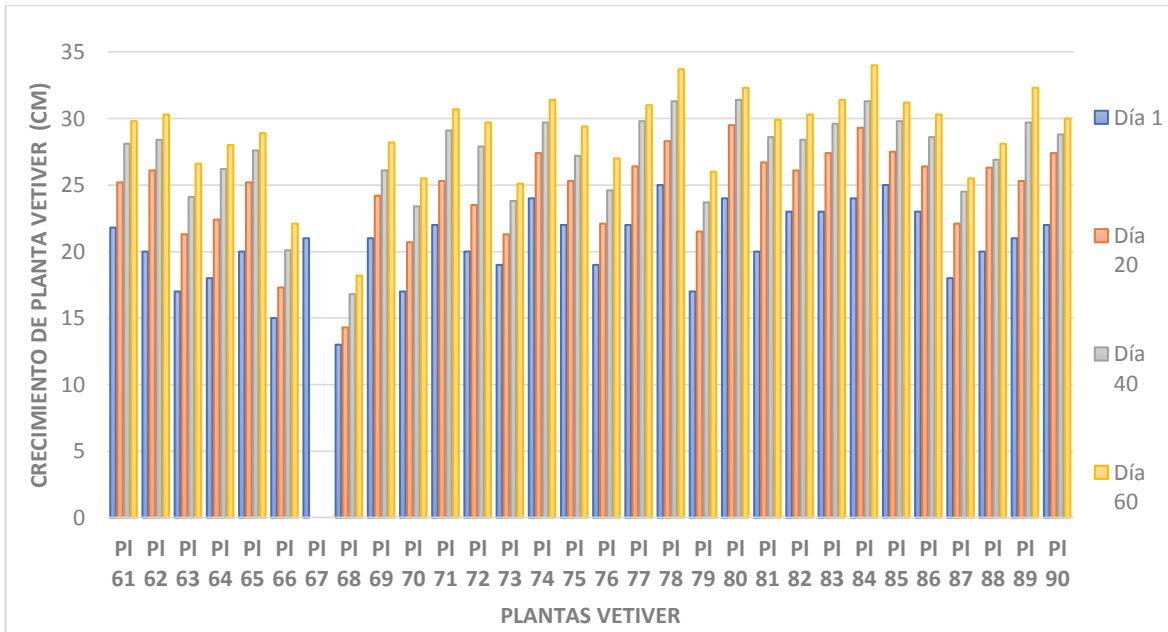
Anexo 1.I. Prueba de sólidos sedimentables en el afluente y efluente de los humedales artificiales 1, 2 y 3 (Autores)



Anexo 1.J. Crecimiento de hoja en centímetros para cada esqueje de vetiver en el humedal artificial 2 (Autores).



Anexo 1.K. Crecimiento de hoja en centímetros para cada esqueje de vetiver en el humedal artificial 3 (Autores).



Anexo 1.L. Valores de elongación de hojas en esquejes de planta Vetiver en el humedal artificial 1 (Autores).

# PLANTA	MEDIDA INICIAL (cm) (09/06/18)	MEDIDA 2 (cm) (29/06/18)	MEDIDA 3 (cm) (18/07/18)	MEDIDA 4 (cm) (10/08/18)	DIFERENCIA (cm)
PLANTA 1	19,5	23	61,5	63,8	44,3
PLANTA 2	21	24,4	61	63,3	42,3
PLANTA 3	15,5	16,2	56,5	60	44,5
PLANTA 4	28	34,6	66,3	69,1	41,1
PLANTA 5	20	25	57,9	60,2	40,2
PLANTA 6	16	25	52,9	54,7	38,7
PLANTA 7	22	23	53,2	54,9	32,9
PLANTA 8	20	23	54,8	57,3	37,3
PLANTA 9	20	23,2	54,1	56,4	36,4
PLANTA 10	28	31,5	62,7	63,9	35,9
PLANTA 11	27,8	30	59,6	61,5	33,7
PLANTA 12	16,5	18	46,7	49,9	33,4
PLANTA 13	17	21,2	52,9	55,1	38,1
PLANTA 14	22	25,3	56,2	58,9	36,9
PLANTA 15	17,5	21	52,2	54,7	37,2
PLANTA 16	22	26	58,1	60,6	38,6
PLANTA 17	24	28	60,3	63,3	39,3
PLANTA 18	26	29,5	61,1	63,6	37,6
PLANTA 19	27	34	65,4	68,3	41,3
PLANTA 20	16,5	24	55,3	57,2	40,7
PLANTA 21	19	25	56,2	59,1	40,1
PLANTA 22	15,5	16	45,8	48,5	33
PLANTA 23	15,5	19	49,6	52,2	36,7
PLANTA 24	18,5	24,5	56	57,7	39,2
PLANTA 25	20	25	58,6	61	41
PLANTA 26	18,5	23	54,7	56,4	37,9
PLANTA 27	21,1	25,3	56,8	59	37,9
PLANTA 28	20	25	58,9	60,2	40,2
PLANTA 29	17,5	23,8	55,1	58	40,5
PLANTA 30	18,5	24,7	58	60,8	42,3

Anexo 1.M. Valores de elongación de hojas en esquejes de plantas vetiver trasplantadas en el humedal artificial 2 (Autores).

# PLANTA	MEDIDA INICIAL (cm) (09/06/18)	MEDIDA 2 (cm) (29/06/18)	MEDIDA 3 (cm) (18/07/18)	MEDIDA 4 (cm) (10/08/18)	DIFERENCIA (cm)
PLANTA 31	19	25	44	45	26
PLANTA 32	23	24,5	39	39,4	16,4
PLANTA 33	22	25	39	40,9	18,9
PLANTA 34	19	25	38	39	20
PLANTA 35	17	18,4	35,5	37,3	20,3
PLANTA 36	20	23	36,4	37,3	17,3
PLANTA 37	19	22,5	37,9	38,7	19,7
PLANTA 38	18	21	35,3	37,6	19,6
PLANTA 39	25	28	43,1	45,3	20,3
PLANTA 40	16	20	35,3	37,2	21,2
PLANTA 41	18	23,2	40,7	43,3	25,3
PLANTA 42	20	24,1	41,4	43,8	23,8
PLANTA 43	18,5	22,4	38,4	40	21,5
PLANTA 44	23	26	41,4	42,7	19,7
PLANTA 45	25	28	43,9	45,3	20,3
PLANTA 46	20	22	37,3	38,8	18,8
PLANTA 47	18	22,1	37,3	39,2	21,2
PLANTA 48	18	24	0	0	0
PLANTA 49	19	24,7	41,9	43,2	24,2
PLANTA 50	19	22,2	40,8	42,5	23,5
PLANTA 51	22	26	42,4	44,3	22,3
PLANTA 52	23	27,2	42,5	45,2	22,2
PLANTA 53	17	22,1	0	0	0
PLANTA 54	18	24,6	37,8	39,4	21,4
PLANTA 55	20	26,1	40,3	43,2	23,2
PLANTA 56	21	27	43,7	46,4	25,4
PLANTA 57	25	28	47,1	49,7	24,7
PLANTA 58	24	34	45,9	47,7	23,7
PLANTA 59	16,5	18	41,3	42,3	25,8
PLANTA 60	27	31,2	49,3	51,5	24,5

Anexo 1.N. Valores de elongación de hojas en esquejes de plantas vetiver trasplantadas en el humedal artificial 3 (Autores).

# PLANTA	MEDIDA INICIAL (cm) (09/06/18)	MEDIDA 2 (cm) (29/06/18)	MEDIDA 3 (cm) (18/07/18)	MEDIDA 4 (cm) (10/08/18)	DIFERENCIA (cm)
PLANTA 61	21,8	25,2	28,1	29,8	8
PLANTA 62	20	26,1	28,4	30,3	10,3
PLANTA 63	17	21,3	24,1	26,6	9,6
PLANTA 64	18	22,4	26,2	28	10
PLANTA 65	20	25,2	27,6	28,9	8,9
PLANTA 66	15	17,3	20,1	22,1	7,1
PLANTA 67	21	0	0	0	0
PLANTA 68	13	14,3	16,8	18,2	5,2
PLANTA 69	21	24,2	26,1	28,2	7,2
PLANTA 70	17	20,7	23,4	25,5	8,5
PLANTA 71	22	25,3	29,1	30,7	8,7
PLANTA 72	20	23,5	27,9	29,7	9,7
PLANTA 73	19	21,3	23,8	25,1	6,1
PLANTA 74	24	27,4	29,7	31,4	7,4
PLANTA 75	22	25,3	27,2	29,4	7,4
PLANTA 76	19	22,1	24,6	27	8
PLANTA 77	22	26,4	29,8	31	9
PLANTA 78	25	28,3	31,3	33,7	8,7
PLANTA 79	17	21,5	23,7	26	9
PLANTA 80	24	29,5	31,4	32,3	8,3
PLANTA 81	20	26,7	28,6	29,9	9,9
PLANTA 82	23	26,1	28,4	30,3	7,3
PLANTA 83	23	27,4	29,6	31,4	8,4
PLANTA 84	24	29,3	31,3	34	10
PLANTA 85	25	27,5	29,8	31,2	6,2
PLANTA 86	23	26,4	28,6	30,3	7,3
PLANTA 87	18	22,1	24,5	25,5	7,5
PLANTA 88	20	26,3	26,9	28,1	8,1
PLANTA 89	21	25,3	29,7	32,3	11,3
PLANTA 90	22	27,4	28,8	30	8

Anexo 1.O. Reporte de resultados de toma de datos para el parámetro de DQO, en afluente y efluente del humedal artificial 1 (Autores).

HUMEDAL ARTIFICIAL 1

Semanas	Fecha	Afluente (mg/L)	Punto medio (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	Viernes 22/06	464 ± 5*	0	93,8 ± 2*
	Miércoles 27/06	460 ± 3*	0	95 ± 4*
2	Viernes 29/06	461 ± 4*	0	90 ± 3*
	Miércoles 11/07	460 ± 3*	0	93 ± 3*
3	Viernes 13/07	460 ± 3*	0	82,3 ± 6,3*
	Miércoles 18/07	460 ± 4*	191 ± 2*	83 ± 4*
4	Miércoles 25/07	461 ± 4*	192 ± 4*	81,4 ± 5,6*
	Viernes 27/07	460 ± 5*	183 ± 3*	74 ± 5*
5	Miércoles 01/08	462 ± 4*	189 ± 3*	76,1 ± 4*
	Viernes 03/08	462 ± 3*	173 ± 4*	73,6 ± 5,2*
6	Miércoles 08/08	460 ± 2*	175 ± 4*	71 ± 2*
	Viernes 10/08	464 ± 2*	171 ± 2*	68,6 ± 3*
7	Miércoles 15/08	462 ± 5*	165 ± 4*	70 ± 4*
	Viernes 17/08	464 ± 5*	160 ± 2*	67 ± 4*
8	Miércoles 22/08	464 ± 3*	166 ± 4*	69 ± 4*
	Viernes 24/08	460 ± 3*	159 ± 3*	66 ± 2*

- (*) Desviación estándar número total de muestras
- n = 3 muestras por punto de muestreo.

Anexo 1.O. Reporte de resultados de toma de datos para el parámetro de DQO, en afluente y efluente del humedal artificial 2 (Autores).

HUMEDAL ARTIFICIAL 2

Semanas	Fecha	Afluente (mg/L)	Punto medio (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	Viernes 22/06	464 ± 5*	0	259 ± 2*
	Miércoles 27/06	460 ± 3*	0	247 ± 5*
2	Viernes 29/06	461 ± 4*	0	231 ± 4*
	Miércoles 11/07	460 ± 3*	0	229 ± 4*
3	Viernes 13/07	460 ± 3*	0	203 ± 4*
	Miércoles 18/07	460 ± 4*	276 ±	205 ± 6*
4	Miércoles 25/07	461 ± 4*	270 ± 3*	198 ± 3*
	Viernes 27/07	460 ± 5*	271 ± 3*	193 ± 3*
5	Miércoles 01/08	462 ± 4*	275 ± 4*	195 ± 5*
	Viernes 03/08	462 ± 3*	165 ± 4*	192 ± 4*
6	Miércoles 08/08	460 ± 2*	267 ± 2*	194 ± 4*
	Viernes 10/08	464 ± 2*	253 ± 3*	191 ± 2*
7	Miércoles 15/08	462 ± 5*	255 ± 4*	192 ± 4*
	Viernes 17/08	464 ± 5*	247 ± 5*	185 ± 3*
8	Miércoles 22/08	464 ± 3*	249 ± 4*	186 ± 7*
	Viernes 24/08	460 ± 3*	230 ± 2*	183 ± 4*

- (*) Desviación estándar número total de muestras
- n = 3 muestras por punto de muestreo

Anexo 1.P. Reporte de resultados de toma de datos para el parámetro de DQO, en afluente y efluente del humedal artificial 3. (Autores).

HUMEDAL ARTIFICIAL 3

Semanas	Fecha	Afluente (mg/L)	Punto medio (mg/L)	Efluente (mg/L)
1	Viernes 22/06	464 ± 5*	0	274 ± 8*
	Miércoles 27/06	460 ± 3*	0	263 ± 8
2	Viernes 29/06	461 ± 4*	0	251 ± 6*
	Miércoles 11/07	460 ± 3*	0	243 ± 7*
3	Viernes 13/07	460 ± 3*	0	225 ± 7*
	Miércoles 18/07	460 ± 4*	281 ± 7*	227 ± 5*
4	Miércoles 25/07	461 ± 4*	272 ± 7 *	216 ± 5*
	Viernes 27/07	460 ± 5*	266 ± 5*	207 ± 5*
5	Miércoles 01/08	462 ± 4*	268 ± 7*	213 ± 6*
	Viernes 03/08	462 ± 3*	260 ± 5*	201 ± 4*
6	Miércoles 08/08	460 ± 2*	251 ± 5*	205 ± 4*
	Viernes 10/08	464 ± 2*	246 ± 3*	201 ± 5*
7	Miércoles 15/08	462 ± 5*	240 ± 5*	198 ± 4*
	Viernes 17/08	464 ± 5*	233 ± 4*	192 ± 4*
8	Miércoles 22/08	464 ± 3*	238 ± 4*	193 ± 6*
	Viernes 24/08	460 ± 3*	231 ± 4*	190 ± 3*

- (*) Desviación estándar número total de muestras
- n = 3 muestras por punto de muestreo

Anexo 1.R. Reporte de resultados de toma de datos para el parámetro de DBO₅, en afluente y efluente del humedal artificial 1. (Autores).

HUMEDAL ARTIFICIAL 1

Semanas	Fecha	Afluente (Mg/L)	Punto medio (Mg/L)	Efluente (Mg/L)
1	Viernes 22/06	176±2*	0	15,9±8,3*
	Miércoles 27/06	167±5*	0	30,5±4,5*
2	Miércoles 11/07	162±2*	0	31,2±5,4*
	Viernes 13/07	160±2*	0	26,6±6,2*
3	Miércoles 18/07	160±3*	71±5*	28±2*
4	Miércoles 25/07	160±6*	69±5*	29,3±3,6*
	Viernes 27/07	159±7*	64±2*	23,5±7,5*
5	Miércoles 01/08	161±4*	62±2*	21±2*
	Viernes 03/08	158±2*	55±7*	19,3±7,6*
6	Miércoles 08/08	158±5*	57±3*	18,4±5,2*
	Viernes 10/08	156±2*	51±6*	17,8±8,2*
7	Miércoles 15/08	158±5*	55±3*	17±2*
	Viernes 17/08	158±4* 155±2*	52±2*	16,1±4,8*
8	Miércoles 22/08	156±3*	50±4*	15,7±6,3*
	Viernes 24/08	155±6*	47±7*	15,1±8,5*

- (*) Desviación estándar número total de muestras
- n = 3 muestras por punto de muestreo

Anexo 1.S. Reporte de resultados de toma de datos para el parámetro de DBO₅, en afluente y efluente del humedal artificial 2 (Autores).

HUMEDAL ARTIFICIAL 2

Semanas	Fecha	Afluente (Mg/L)	Punto medio (Mg/L)	Efluente (Mg/L)
1	Viernes 22/06	176±2*	0	63,9±7,3*
	Miércoles 27/06	167±5*	0	81±2*
2	Miércoles 11/07	162±2*	0	82,6±5,3*
	Viernes 13/07	160±2*	0	77,8±6,2*
3	Miércoles 18/07	160±3*	145±3*	79,1±8,7*
4	Miércoles 25/07	160±6*	141±4*	79,2±3,9*
	Viernes 27/07	159±7*	135±2*	72,6±8,3*
5	Miércoles 01/08	161±4*	130±2*	73±4*
	Viernes 03/08	158±2*	126±6*	68,2±7,4*
6	Miércoles 08/08	158±5*	128±5*	69,6±6,2*
	Viernes 10/08	156±2*	124±5*	66,3±3,3*
7	Miércoles 15/08	158±4*	125±5*	67±2*
	Viernes 17/08	155±2*	120±7*	65,4±5,2*
8	Miércoles 22/08	156±3*	122±4*	66±4*
	Viernes 24/08	155±6*	120±8*	64,9±7,6*

- (*) Desviación estándar número total de muestras
- n = 3 muestras por punto de muestreo

Anexo 1.T. Reporte de resultados de toma de datos para el parámetro de DBO₅, en afluente y efluente del humedal artificial 3 (Autores)

HUMEDAL ARTIFICIAL 3

Semanas	Fecha	Afluente (Mg/L)	Punto medio (Mg/L)	Efluente (Mg/L)
1	Viernes 22/06	176±2*	0	64,9±5,1*
	Miércoles 27/06	167±5*	0	93±2*
2	Miércoles 11/07	162±2*	0	93,9±3,3*
	Viernes 13/07	160±2*	0	88,6±4,6*
3	Miércoles 18/07	160±3*	134±5*	88,8±7,4*
4	Miércoles 25/07	160±6*	128±2*	90,9±8,3*
	Viernes 27/07	159±7*	125±3*	83,8±7,2*
5	Miércoles 01/08	161±4*	123±5*	81,6±3,6*
	Viernes 03/08	158±2*	119±2*	78,4±5,2*
6	Miércoles 08/08	158±5*	123±4*	80,2±6,4*
	Viernes 10/08	156±2*	115±7*	77,7±7,1*
7	Miércoles 15/08	158±6*	120±3*	79,2±4,4*
	Viernes 17/08	158±4*	113±4*	77±2*
8	Miércoles 22/08	155±2*	110±2*	76±6*
	Viernes 24/08	156±3*	105±2*	74±5*

- (*) Desviación estándar número total de muestras
- n = 3 muestras por punto de muestreo