

**REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ESTABILIZACIÓN DE HUMEDALES
CONSTRUIDOS DE FLUJO VERTICAL, SEMBRADOS CON *HELICONIA* (sp),
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.**

LAURA PAREDES GILÓN

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
ESCUELA DE QUÍMICA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA QUÍMICA
PEREIRA
2014**

**REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ESTABILIZACIÓN DE HUMEDALES
CONSTRUIDOS DE FLUJO VERTICAL, SEMBRADOS CON *HELICONIA (SP)*,
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.**

LAURA PAREDES GILÓN

Trabajo de grado para optar al título de Tecnóloga en Química.

Director:

Dr. Ing. M.Sc. DIEGO PAREDES CUERVO

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
ESCUELA DE QUÍMICA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA QUÍMICA
PEREIRA
2014**

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por permitirme llevar a cabo mis metas, a mi madre y a Luis E. Arteaga que me han apoyado incondicionalmente en el desarrollo de mi carrera profesional.

Al Profesor Alonso Osorio Giraldo por su orientación y a los demás docentes de la Escuela de Química por sus enseñanzas, ya que fueron herramienta clave para llevar a cabo este trabajo.

También al personal del Laboratorio de Procesos Biológicos, Laboratorio de Química Ambiental y GIAS debido a que con su acompañamiento de una u otra forma aportaron con la realización de este proyecto. En especial a la Ingeniera Eliana Bohórquez, por la confianza, paciencia, valor humano, orientación y apoyo en las diferentes etapas de la investigación.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN.....	10
2. INTRODUCCIÓN.....	11
3. JUSTIFICACIÓN.....	13
4. OBJETIVOS.....	16
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
5. MARCO TEÓRICO.....	17
5.1 AGUA RESIDUAL.....	17
5.1.2 Aguas residuales domésticas.....	17
5.1.3 Política y normatividad para las aguas residuales en Colombia.....	17
5.1.4 Constituyentes del agua residual.....	20
5.1.5 Tratamiento de las aguas residuales.....	21
5.1.6 Parámetros de calidad en aguas residuales.....	22
5.1.6.1 Sólidos suspendidos totales (SST).....	22
5.1.6.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	22
5.1.6.3 Demanda química de oxígeno (DQO).....	24
5.1.6.4 Nitrógeno.....	24
5.1.6.5 Temperatura.....	28
5.1.6.6 Conductividad.....	28
5.1.6.7 pH.....	29
5.7 HUMEDALES.....	29
5.7.1 Humedales naturales.....	29
5.7.2 Humedales construidos.....	30
5.7.3 Clasificación de humedales construidos.....	32

5.7.3.1	Sistemas de flujo libre o superficial (FS)	32
5.7.3.2	Sistemas de flujo subsuperficial (FSS)	33
5.8	PROCESOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES	35
5.9	PLANTAS UTILIZADAS EN HUMEDALES CONSTRUIDOS	36
5.9.1	Heliconia (sp)	37
6.	METODOLOGÍA	39
6.1	DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL	39
6.2	SEGUIMIENTO DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES	43
6.3	PROGRAMA DE MUESTREO Y TRABAJO EN EL LABORATORIO	44
6.4	PARÁMETROS A ANALIZAR	46
6.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	47
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
7.1	ETAPA DE MONITOREO	48
7.2	GENERAL	52
7.2.1	Temperatura	53
7.2.2	pH.	54
7.2.3	Nitrógeno	55
7.2.4	Materia orgánica	59
8.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO ENTRE CONFIGURACIONES	63
9.	CONCLUSIONES	70
	BIBLIOGRAFÍA	74
	ANEXOS	82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de tratamientos para aguas residuales	21
Tabla 2. Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales construidos	36
Tabla 3. Unidades experimentales.....	39
Tabla 4. Métodos de análisis	46
Tabla 5. Características del agua residual del afluente	52
Tabla 6. Reducciones de carga para nitrógeno amoniacal	56
Tabla 7. Reducciones de carga para nitrógeno total.....	58
Tabla 8. Reducciones de carga para DBO ₅	60
Tabla 9. Resultados prueba de normalidad Kolmogorov- Smirnov ((P (K-S)).....	63
Tabla 10. Resultados Prueba t: Presencia de plantas en DQO	64
Tabla 11. Resultados Prueba t: Frecuencia de Alimentación DQO	65
Tabla 12. Prueba U de Mann-Whitney: Presencia de plantas en DBO.....	66
Tabla 13. Prueba U de Mann-Whitney: Frecuencia de Alimentación en DBO	66
Tabla 14. Prueba U de Mann-Whitney: Presencia de plantas en SST.....	67
Tabla 15. Resultados Prueba t: Presencia de plantas en SST	67
Tabla 16. Prueba U de Mann-Whitney: Frecuencia de Alimentación en SST	68
Tabla 17. Resultados Prueba t: Presencia de plantas en N- NH ₃	68
Tabla 18. Prueba U de Mann-Whitney: Presencia de plantas en N- NH ₃	69
Tabla 19. Resultados Prueba t: Frecuencia de Alimentación e N- NH ₃	69
Tabla 20. Prueba U de Mann-Whitney: Frecuencia de Alimentación en N- NH ₃	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del Nitrógeno.....	25
Figura 2. Sistemas de flujo libre o superficial (FS).....	32
Figura 3. Humedal horizontal de flujo subsuperficial (HSSF).....	33
Figura 4. Humedal vertical de flujo subsuperficial (HSFS).....	34
Figura 5. Heliconia psittacorum.....	38
Figura 6. Unidad no plantada.....	40
Figura 7. Unidad plantada.....	40
Figura 8. Sistema de drenaje.....	40
Figura 9. Efluente.....	40
Figura 10. Tanque de sedimentación y alimentación.....	42
Figura 11. <i>Timers</i> digitales.....	42
Figura 12. Sistema de riego.....	42
Figura 13. Esquema de sistema de tratamiento.....	43
Figura 14. Recipientes de muestreo.....	45
Figura 15. Recipientes Preservados.....	45
Figura 16. Hoja afectada.....	49
Figura 17. Gusano encontrado.....	49
Figura 18. Oruga de espalda arqueada.....	49
Figura 19. Plaga de hormigas.....	50
Figura 20. Sistemas semana 0.....	51
Figura 21. Sistemas semana 5.....	50
Figura 22. Sistemas semana 10.....	50
Figura 23. Sistemas semana 15.....	51
Figura 24. Sistemas Semana 17.....	51
Figura 25. Sistemas Semana 18.....	51
Figura 26. Sistemas Semana 20.....	51
Figura 27. Comportamiento medio de temperatura.....	53
Figura 28. Comportamiento de medio de pH.....	54

Figura 29. Carga media de Nitrógeno en los sistemas	56
Figura 30. Eficiencia de remoción de Nitrógeno Amoniacal para los sistemas	57
Figura 31. Composición porcentual de Nitrógeno total	58
Figura 32. Porcentaje de remoción de nitrógeno total	59
Figura 33. Cargas promedio de materia orgánica.....	61
Figura 34. Porcentaje de remoción de materia orgánica	62

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Prueba de normalidad: Eficiencia de remoción Nitrógeno Amoniacal....	82
Anexo 2. Prueba de normalidad: Eficiencia de remoción Demanda Química De Oxígeno.	84
Anexo 3. Prueba de normalidad: Eficiencia de remoción demanda bioquímica de oxígeno.	86
Anexo 4. Prueba de normalidad: Eficiencia de remoción Sólidos suspendidos totales.	88

1. RESUMEN

En esta investigación se evaluó la influencia que tenía la presencia de plantas *Heliconia psittacorum* y la aplicación de distintas frecuencias de alimentación (10 pulsos/d - 20 pulsos/d), en la eficiencia de remoción en humedales construidos de flujo vertical, basados en arena como medio filtrante para el tratamiento de aguas residuales domésticas, durante su fase de aclimatación (5 meses) en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Los resultados muestran que la principal forma de nitrógeno removida fue el nitrógeno amoniacal con porcentajes entre 75-81%, por mecanismos de nitrificación, en donde el sistema plantado con 20 pulsos/d mostró ser el más eficiente ($p < 0,05$).

Ahora bien, en la remoción de materia orgánica las plantas no ejercieron un efecto significativo, por su parte en la eliminación de DBO_5 , con un 98% la configuración más óptima para su degradación fue el sistema con 20 pulsos/d, así mismo, reducciones de carga de hasta 93% en DQO, hacen que el sistema con 10 pulsos/d resultara como el más eficiente para la eliminación de materia orgánica ($p < 0,05$). Sin embargo, la vegetación y las frecuencias de alimentación no presentaron efectos significativos en los descensos en las cargas de SST, atribuyendo remociones de hasta un 87% a las características de la arena como medio filtrante.

2. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y el expansionismo industrial, a nivel mundial ha aumentado causando un incremento en la demanda de recursos naturales, como el agua y también en el volumen de los residuos líquidos que se liberan al medio ambiente (Sánchez y Chóliz., 2005), los cuales son un elemento de alta contaminación a fuentes de agua receptoras de vertimientos como: lagos, ríos, quebradas, mares, entre otros; intensificando las problemáticas ambientales (Cakmak, 2010) . Estas descargas de efluentes residuales provenientes de las actividades humanas se clasifican de forma general de acuerdo con su origen, en domésticas e industriales (Ramalho *et al.*, 1996).

En general la contaminación del recurso hídrico se genera a partir del vertimiento de aguas residuales no tratadas o semi- tratadas, lo que implica una alta contaminación bacteriológica, siendo una causa inminente de enfermedades como diarrea, hepatitis A, tifoidea, cólera, y shigellosis debido a que están constituidas principalmente por desechos corporales humanos (heces y orina) y material inorgánico (Romero, 2004; Pérez *et al.*, 2009), así como un aumento de los costos de potabilización del recurso hídrico.

En Colombia el vertimiento de aguas residuales a cuerpos de agua ha generado condiciones anóxicas y eutrofización en las corrientes hídricas ubicadas en el perímetro urbano, lo cual disminuye la oferta hídrica en el país debido al contenido de sustancias tóxicas, patógenas y abrasivas. En busca de soluciones se han implementado políticas ambientales, tales como el Decreto 3930 de 2010 con los que se pretende asegurar un control en cuanto a usos del agua y descargas permitidas de contaminantes, definiendo así un plan a seguir, pero sin articular activamente las entidades involucradas para una optimización en el manejo del recurso (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004).

Como alternativa a los costosos tratamientos de aguas residuales, los humedales construidos se han convertido en una solución de gran trascendencia ya que al simular mecanismos físicos, químicos y biológicos propios de los humedales naturales, permiten que se lleve a cabo eficazmente la fitorremediación con bajos costos, requerimiento energético y fácil operación (Bernal *et al.*, 2003).

Para ampliar el conocimiento sobre estos sistemas tratamiento de aguas residuales, este proyecto busca evaluar la remoción de contaminantes en la estabilización de humedales construidos de flujo vertical, sembrados con *heliconia* (*sp*), construidos en la Universidad Tecnológica de Pereira.

3. JUSTIFICACIÓN

Las aguas residuales domésticas son un producto inevitable en la actividad humana; debido a que son líquidos provenientes de las viviendas, edificios comerciales e institucionales. Las cuales están constituidas con materia orgánica biodegradable, materia suspendida, sustancias corrosivas, microorganismos patógenos, sustancias que causan turbiedad, sustancias que transforman el equilibrio biológico y constituyentes minerales (Romero, 2004). Estos residuos a menudo se descargan en los ríos cercanos, con escaso o nulo procesamiento de la planta de tratamiento, prácticas que causan impactos estéticos y ambientales negativos (Arias y Brix, 2005).

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial (2009), afirma que en Colombia, se produjeron 6 millones de metros cúbicos diarios de aguas residuales domésticas, de los cuales el 20% fue trasladado a plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTARD) y sólo el 8% es tratado de manera efectiva. El restante 80%, es vertido al suelo y las corrientes hídricas sin tratamiento efectivo previo. Según el Ministerio de Protección Social (2008) en Colombia, anualmente se enferman cerca de 2 millones de habitantes por deficiencias en los servicios de acueducto y alcantarillado. Las enfermedades como el cólera, la tifoidea, la diarrea y la hepatitis están asociadas con la contaminación fecal del agua consumida y el contacto con aguas residuales de origen doméstico.

Por todo lo anterior, el tratamiento de las aguas residuales domésticas es una cuestión prioritaria debido a que es indispensable, contar con fuentes hídricas que tengan bajas concentraciones de contaminantes y sea segura para consumo humano.

La ineficacia en el tratamiento de vertidos domésticos ha motivado a la ingeniería a desarrollar alternativas eficientes. Entre estas soluciones las ecotecnologías

han causado alto impacto puesto que simulan y optimizan fenómenos que ocurren espontáneamente en la naturaleza (Arias y Brix, 2003), son técnicas basadas en la Fitoremediación, con una tecnología simple y un bajo costo operacional, que se han implementado en diversos sistemas de tratamientos y han demostrado ser efectivos en la obtención de efluentes con alta higiene y calidad (Vanek y Schwitzguebel, 2003).

Los humedales construidos son una de las ecotecnologías que presenta mayor ventaja en la remoción de materia orgánica, transformación de nutrientes y eliminación de sustancias tóxicas de aguas residuales. Estos sistemas pueden adoptar diferentes diseños entre ellos, flujo del agua, lecho filtrante frecuencia de alimentación y tipo de vegetación, con los que se obtienen resultados de calidad específicos.

En este sentido, los humedales verticales son ampliamente utilizados debido a la alta eficacia en la remoción de nitrógeno y materia orgánica del agua tratada (Arias y Brix, 2003; Vymazal, 2007), en donde la distribución del agua de forma intermitente o continua, puede variar la disponibilidad de oxígeno para los microorganismos degradadores. Las plantas comúnmente utilizadas en este tipo de investigaciones son *Phragmites sp*, *Scirpus sp* y *Thypa sp.*, las cuales han demostrado tener un efecto sobre la remoción y una fácil adaptación a las condiciones de operación, sin embargo, es necesario caracterizar el comportamiento de otro tipo de vegetación, que además de aportar al proceso de remoción de contaminantes y ser de fácil adaptación a condiciones tropicales, genere un valor agregado en la estética del tratamiento y permita aprovechar los recursos locales disponibles.

En general, los humedales construidos requieren de un período de aclimatación antes de presentar un óptimo funcionamiento (Paredes com. Pers., 2013). Durante este proceso, las plantas y los microorganismos se adaptan a las condiciones del

agua residual, se generan biopelículas sobre el medio filtrante y sobre las raíces de las plantas y las interacciones ecológicas y biológicas necesarias para optimizar los mecanismos de degradación y remoción de contaminantes.

Es por esto que, el seguimiento de esta primera fase de aclimatación asegura que durante el proceso de evaluación de los sistemas se obtengan datos confiables y comparables. Adicionalmente, la comparación de los procesos de estabilización entre diferentes configuraciones permite explicar los distintos mecanismos a través de los cuales son tratadas las aguas residuales así como, distinguir los procesos de adaptación de las plantas, los microorganismos y de su respuesta ante la actividad de aireación propiciada por la variación en la frecuencia de alimentación.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la remoción de contaminantes orgánicos en humedales construidos de flujo vertical basados en arena para tratamiento de agua residual doméstica, ante diferentes frecuencias de alimentación y la presencia de plantas tropicales.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la concentración de contaminantes orgánicos en el agua residual del afluente y efluente de cada configuración.
- Analizar el efecto de las configuraciones en los humedales construidos sobre la remoción de contaminantes orgánicos de las aguas residuales domésticas.
- Establecer las características del comportamiento de la remoción de contaminantes orgánicos de las aguas residuales domésticas de acuerdo con las configuraciones utilizadas.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 AGUA RESIDUAL

Se consideran aguas residuales a los líquidos que han sido utilizados en las actividades diarias de una ciudad (domésticas, comerciales, industriales y de servicios) (Lara, 1999).

5.1.2 Aguas residuales domésticas. Las aguas residuales domésticas son los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales, también son llamadas aguas servidas, aguas fecales o aguas negras, es decir, aquellas que transportan fósforo, grasas, excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales.

Su tratamiento nulo o indebido genera graves problemas de contaminación, ya que habiendo sido usada el agua, no sirve para el usuario directo, por lo tanto son residuos que contienen todos los organismos patógenos que afectan al hombre. (Romero, 2004; Acosta, 2008). Por estas razones el tratamiento para la reutilización de las aguas residuales domésticas es necesario para la protección de la salud pública y el medio ambiente (Metcalf y Eddy, 2004).

5.1.3 Política y normatividad para las aguas residuales en Colombia. El Gobierno Nacional ha implementado y modificado diferentes acciones legales para dar un cubrimiento de saneamiento básico en todo el país, en busca reducir los impactos sanitarios y ambientales, causados por los vertimientos de aguas residuales con altas cargas contaminantes en las fuentes hídricas nacionales.

A continuación se presenta la normatividad relacionada con la prestación del servicio de alcantarillado que incluye las actividades de (recolección, transporte,

tratamiento y disposición final de residuos líquidos), expedidas por los sectores de salud, agua potable y medio ambiente. Cabe mencionar que dichas normas han tenido fallas en su aplicación debido a problemas en definición precisa de metodologías, estrategias de seguimiento de procesos, falta de recursos financieros y técnicos para su ejecución (Superintendencia de Servicios Públicos, 2012).

Decreto 303 del 06 de Febrero de 2012: Por el cual se reglamenta parcialmente el artículo 64 del Decreto -Ley 2811 de 1974 en relación con el registro de usuarios del recurso hídrico para el componente de concesión de aguas y el componente de autorizaciones de vertimientos y se dictan otras disposiciones relacionadas con el ámbito de aplicación, formato de registro, plazo, reporte y consolidación de información, la operación del registro de usuarios del recurso hídrico deroga el en especial el Decreto 1324 de 2007 y el inciso segundo del artículo 74 del Decreto 3930 de 2010.

Sentencia 0567 del 13 de Octubre de 2011: A través del cual el Consejo de Estado suspende provisionalmente el parágrafo 1º del artículo 41 del Decreto 3930 de 2010 proferido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Resolución 075 del 25 de Enero de 2011: Por el cual se adopta el formato de reporte sobre el estado de cumplimiento de la norma de vertimiento puntual a la red de alcantarillado y aspectos relacionados con el ámbito de aplicación y reporte de información.

Decreto 4728 del 28 de Diciembre de 2010: Por el cual se modifican los artículos 28, 34, 35, 52, 54, 61, 77, 78 relacionados con la fijación de la norma de vertimientos, el protocolo para el monitoreo de los vertimientos en aguas superficiales y subterráneas, el plan de Contingencia para la Prevención y Control

de Derrames al momento de presentar la solicitud del permiso de vertimientos ante la autoridad ambiental competente

Resolución No. SSPD - 20101300048765 del 14 de Diciembre de 2010: Por la cual se expide la Resolución Compilatoria respecto de las solicitudes de información al Sistema Único de Información - SUI de los servicios públicos de Acueducto, Alcantarillado y Aseo y se derogan las resoluciones 20094000015085, 20104000001535, 20104000006345, y 20104010018035” se establece lo relacionado con la información general, servicios y actividades.

Decreto 3930 del 25 de Octubre de 2010: Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11I- Libro 11 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Deroga los artículos 193, 213 a 217 y 231 del Decreto 1541 de 1978 y el Decreto 1594 de 1984 salvo los artículos 20 y 21.

Decreto 3100 del 30 de Octubre de 2003. Reglamenta las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y deroga el Decreto 901 de 1997.

Decreto 3440 del 21 de Octubre de 2004. Por el cual se cobrará la tasa retributiva por los vertimientos puntuales realizados a los cuerpos de agua en el área de su jurisdicción.

Ley 373 del 6 de Junio de 1997. Establece el Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua.

Resolución 273 del 1 de Abril de 1997: Por la cual se fijan las tarifas mínimas de las tasas retributivas por vertimientos líquidos para los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Decreto 901 del 1 de Abril de 1997: Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas, por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se establecen las tarifas de estas.

Ley 142 de 1994: Ley de Servicios Públicos

Ley 99 de 1993. Crea el ministerio de Ambiente entre otras disposiciones.

Decreto 1594 del 22 de Diciembre de 1984. Reglamenta los usos del agua y el manejo de los residuos líquidos.

Ley 9 de 1979. Por el cual se expide el Código Sanitario Nacional.

5.1.4 Constituyentes del agua residual. Las aguas residuales se caracterizan por componentes físicos, químicos y biológicos, siendo una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos en el agua.

Sólidos suspendidos: Estos surgen de los depósitos de materiales de desechos en aguas residuales, pueden generar depósitos de lodo y condiciones anóxicas si son descargadas en fuentes hídricas.

Materia orgánica biodegradable: Compuesto principalmente de proteínas, carbohidratos y grasas, es medida comúnmente como DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y COD (demanda química de oxígeno).

Patógenos: Estos son principalmente coliformes fecales y enterobacterias, que generan enfermedades con su presencia en el agua, que son capaces de sobrevivir en aguas con alta contaminación orgánicos.

Materia inorgánica disuelta: compuestos como Calcio, Sodio, sulfatos, metales pesados.

Nutrientes: Su presencia excesiva en las aguas residuales lleva al crecimiento de vida acuática indeseable (eutrofización).

5.1.5 Tratamiento de las aguas residuales.

Los métodos de tratamiento de aguas residuales consisten en operaciones unitarias que promueven la eliminación química y biológica de contaminantes, teniendo así, los niveles de tratamiento mostrados en la Tabla 1 (Romero 2004; Metcalf y Eddy, 2004).

Tabla 1. Descripción de tratamientos para aguas residuales.

NIVEL DE TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN
PRETRATAMIENTO	En este proceso se eliminan componentes de las aguas residuales que pueden causar problemas de mantenimiento y funcionamiento operacional del sistema, tales como elementos flotantes, grasas o sólidos de gran tamaño.
PRIMARIO	Se remueve una porción de sólidos suspendidos y materia orgánica particulada mediante sedimentación o flotación. Por lo general el tratamiento primario en un sistema convencional, remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y hasta un 40% de la DBO5, fundamentalmente particulada.
SECUNDARIO	Se usa principalmente para remoción de materia orgánica (en solución y en suspensión) y sólidos suspendidos volátiles, se incluyen en estos los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunaje y los humedales artificiales, además de otras opciones anaeróbicas o mixtas.
TERCIARIO	Remoción de sólidos suspendidos que permanezcan en el agua, por medio de un medio filtrante y la eliminación de nutrientes para prevenir la eutrofización de fuentes receptoras ambientalmente más sensibles o para mejorar la calidad de un efluente secundario con el fin de adecuar el agua para su reuso.

5.1.6 Parámetros de calidad en aguas residuales

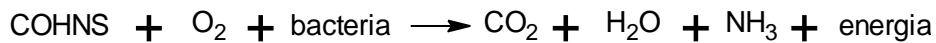
5.1.6.1 Sólidos suspendidos totales (SST). Las aguas residuales contienen una variedad de materiales sólidos incluyendo material coloidal. La mayoría de ellos son retenidos en el sustrato de los humedales, en este fenómeno físico la sedimentación se da debido a la baja velocidad de circulación del agua y el tamizado que se da entre los espacios intersticiales del medio de soporte (García *et al.*, 2003), Típicamente un 60% de los sólidos suspendidos son sedimentables. Los sólidos totales (ST) son obtenidos por evaporación de una muestra de agua residual hasta sequedad, se utiliza filtración para la separación de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos disueltos totales. Por lo cual los SST son aquellos remanentes retenidos en un filtro con un diámetro de poro específico, después de ser secado a 105 °C (Metcalf y Eddy, 2004).

5.1.6.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO). La prueba analítica de la DBO estima la cantidad de oxígeno que se requiere para degradar la materia orgánica de una muestra de agua, por medio de una población microbiana heterogénea. La materia orgánica normalmente está compuesta por una combinación de carbono, hidrogeno y oxígeno. En aguas residuales está constituida por 40-60% de Proteínas, 25-50% de carbohidratos y 8-12% de aceites y grasas (Romero, 2004; (Metcalf y Eddy, 2004). La información obtenida corresponde a la materia orgánica biodegradable.

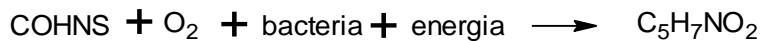
La materia orgánica puede ser degradada bajo condiciones aerobias o anaerobias. El Oxígeno requerido para la degradación aerobia puede ser tomado directamente de la atmósfera por las plantas y traslocado a la zona de raíces o puede ser difundido directamente desde la atmósfera. La degradación aerobia comienza cuando una porción de materia orgánica es oxidada por los microorganismos para obtener energía, simultáneamente algunos de los residuos orgánicos son convertidos en nuevos microorganismos usando parte de la energía conseguida

en la oxidación y cuando toda la materia orgánica es consumida, las bacterias comienzan a consumir su propio tejido celular para su supervivencia, este proceso es llamado respiración endógena o autooxidación progresiva de su masa celular. Se utiliza el término COHNS para representar los elementos de carbono, oxígeno, hidrogeno, nitrógeno y azufre. Adicionalmente se emplea el termino $C_5H_7NO_2$, para simbolizar los nuevos microorganismos formados (Metcalf y Eddy, 2004).

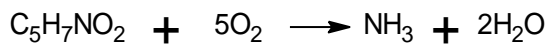
OXIDACIÓN:



SÍNTESIS:



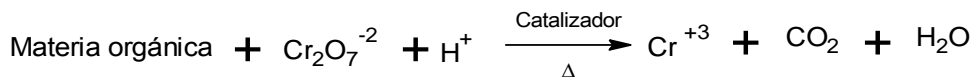
RESPIRACIÓN ENDÓGENA:



El método respirométrico proporciona una medida directa del oxígeno consumido por los microorganismos a partir del oxígeno disponible, utilizando un proceso de bioensayo en un recipiente cerrado bajo condiciones de temperatura y agitación constante, el principio en dicho recipiente consiste en la medición de la presión negativa de un sistema cerrado.

Los microorganismos en la muestra consumen el oxígeno formando dióxido de carbono, el cual es absorbido por el NaOH, creando un vacío que se puede leer directamente con un valor de mg/L, este valor es la relación del consumo de oxígeno con cambios de presión mientras se mantiene un volumen constante, por cinco días de incubación a 20°C (APHA, 2005).

5.1.6.3 Demanda química de oxígeno (DQO). La demanda química de oxígeno se usa para medir el oxígeno equivalente para oxidar la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente oxidante fuerte, por lo general dicromato de potasio, en un medio ácido y a alta temperatura (Romero, 2004). Se utiliza ion Dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$), como oxidante fuerte, después de disolver una sal de Dicromato de Potasio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$), en ácido sulfúrico.



En esta prueba, el dicromato oxida sustancias que no serían oxidadas por el O_2 en la determinación de la DBO, por tal razón el valor de la DQO de una muestra de agua es normalmente mayor que el valor de su DBO (Baird, 2001).

5.1.6.4 Nitrógeno. Nutriente esencial para el crecimiento plantas. Las formas de interés en aguas residuales son las de nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitritos y nitratos. Todas son formas interconvertibles bioquímicamente y componentes del ciclo del nitrógeno. Se denomina NTK nitrógeno total Kjeldhal, al nitrógeno orgánico más el nitrógeno amoniacal. Los resultados del nitrógeno son necesarios para evaluar la tratabilidad de las aguas residuales por tratamientos biológicos; un agua residual con contenido insuficiente de nitrógeno puede requerir la adición de este para una adecuada biodescomposición (Romero, 2004).

En el ciclo del nitrógeno (Figura 1), su forma predominante en aguas domésticas frescas es el nitrógeno orgánico, constituido por aminoácidos, amino azucres, urea, ácido úrico, purinas y pirimidinas (Kadlec y Knight, 1996); las bacterias rápidamente descomponen el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal y si el medio es aerobio, en nitritos y nitratos (Romero, 2004). Es evidente entonces que

la química del nitrógeno es compleja, debido a que los cambios en sus estados de oxidación se dan por organismos vivos, teniendo una variación entre cargas positivas y negativas dependiendo de las condiciones aeróbicas o anaeróbicas (Metcalf y Eddy, 2004).

A través de las investigaciones realizadas, se ha establecido que una parte significativa de la eliminación de nitrógeno en humedales construidos se debe a la vía de nitrificación-desnitrificación microbiana clásica (Hu *et al.*, 2012). Otras vías de eliminación de nitrógeno, tales como absorción de la planta, la adsorción de amoníaco, la oxidación del amoníaco anaeróbica (anammox), oxidación de amoníaco heterótrofa y desnitrificación aeróbica pueden jugar un papel en los sistemas de tratamiento de humedales, pero por lo general sólo en una medida limitada (Zhang *et al.*, 2010).

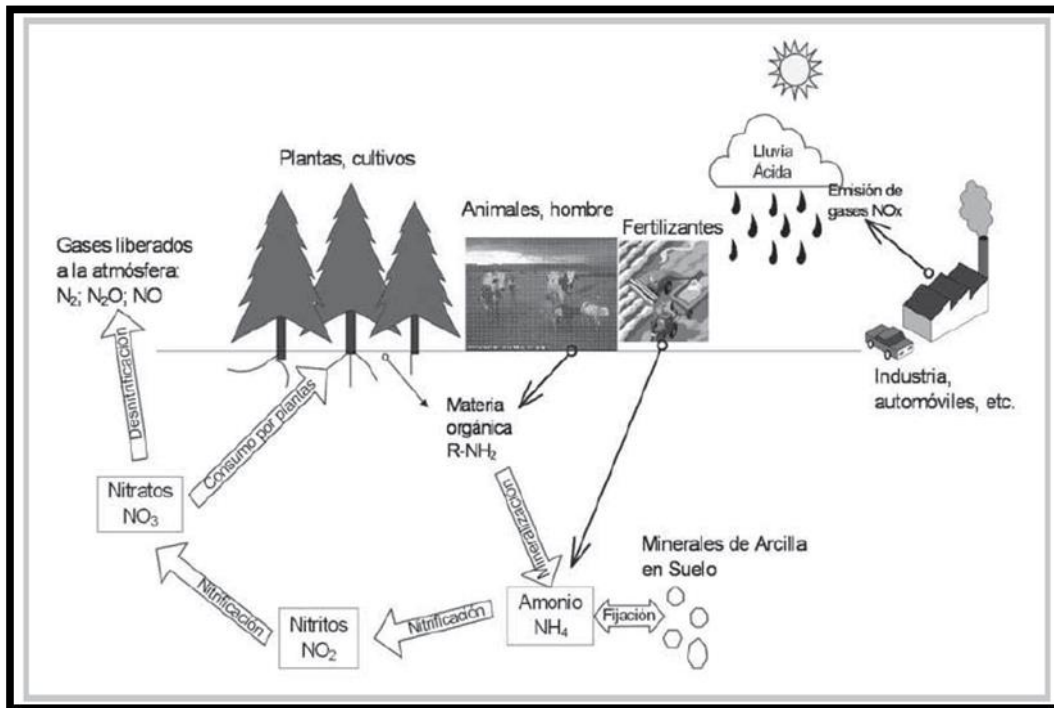
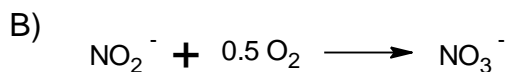
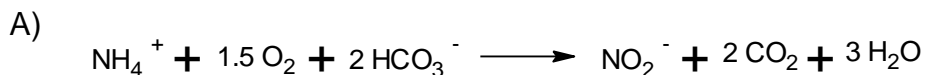


Figura 1. Ciclo del Nitrógeno.
(Tomado de: Delgadillo *et al.*, 2010)

NITRIFICACIÓN

Es la oxidación de amonio a nitrato en condiciones aerobias, donde el nitrito es un producto intermediario en la secuencia de reacción. Este proceso inicia con la oxidación biológica del amonio por acción de las bacterias nitrificantes (*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*) hasta NO_2^- , esta transformación genera un medio ácido, condición que puede ser parcialmente neutralizada por la presencia de bicarbonato en el agua residual (reacción A) La oxidación de amonio a nitrito requiere 2 moles de bicarbonato por cada mol de amonio. Esto es esencial para la nitrificación, debido a que el bajo contenido de alcalinidad puede causar una reducción en el pH y la parada completa de la reacción. En la siguiente etapa se produce la oxidación del nitrito (NO_2^-) hasta nitrato, también en condiciones aerobias por otro tipo de microorganismos como *Nitrobacter* o *Nitrococcus* (Paredes y Kuschik, 2001; Van Dongen *et al.*, 2001).

REACCIONES EN EL PROCESO DE NITRIFICACIÓN



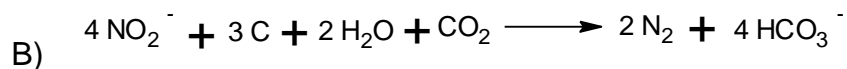
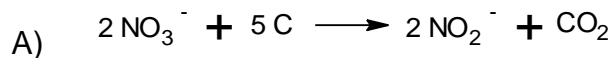
La nitrificación es influenciada por la temperatura, pH, alcalinidad del agua, fuente de carbón inorgánico población microbiana y concentraciones de Oxígeno disuelto y nitrógeno amoniacal. La temperatura ideal para su desarrollo está entre los 30 y 40 °C, bajas temperaturas disminuyen la velocidad de reacción siendo el valor mínimo para que la nitrificación ocurra 4°C. El rango de pH óptimo para la nitrificación está entre 7,5 y 8,6 unidades y aproximadamente se requieren 4,3 mg

de oxígeno para oxidar hasta nitratos 1 mg de nitrógeno amoniacal (Paredes y Kusch, 2001).

DESNITRIFICACIÓN

Se ha denominado proceso anaerobio, pero como las vías principales de conversión bioquímica no son anaerobias sino una modificación de las vías aerobias, se ha considerado más apropiado denominarlo proceso anóxico. La única diferencia entre la respiración aerobia y anóxica radica en la enzima que cataliza la transferencia final de electrones. Para promover la desnitrificación se deben evitar zonas aireadas; de lo contrario si existen simultáneamente oxígeno y nitrato, los microorganismos prefieren el oxígeno como aceptor de electrones. En la desnitrificación el nitrato es reducido por los microorganismos para obtener energía en las siguientes etapas: (Metcalf y Eddy, 2004)

REACCIONES EN EL PROCESO DE DESNITRIFICACIÓN



MICROORGANISMOS

Proporcionan las características de las aguas residuales, las cuales son de gran importancia en el control de enfermedades causadas por organismos patógenos de orígenes humanos y debido al extenso rol desempeñado por las bacterias y otros microorganismos en la descomposición y/o estabilización de la materia orgánica.

Los microorganismos encontrados en las aguas residuales incluyen bacterias, hongos algas, protozoos y virus, que por sus características son perjudiciales para la salud humana, teniendo comúnmente como precursor de enfermedades intestinales a las bacterias Gram-negativas, tales como la enterobacteria *Escherichia coli*, que incluye Coliformes Totales, y las Coliformes Fecales (Metcalf y Eddy, 2004).

En el tratamiento de aguas residuales es indispensable eliminar o reducir la concentración de microorganismos fecales, para asegurar la sanidad de la población. La remoción de microorganismos en humedales construidos es un proceso complejo ya que depende de factores como la filtración, la adsorción y la depredación (Kadlec y Knight, 2000. Paredes y Kuschik (2001) describen que el mecanismo de eliminación de patógenos a nivel primario son la muerte natural y a nivel secundario el metabolismo vegetal. Se ha observado que tanto en sistemas verticales como horizontales la eliminación es dependiente del tiempo de permanencia y del medio granular y que cuanto menor es el diámetro del medio granular, mayor es el nivel de eliminación obtenido (García *et al.*, 2003).

5.1.6.5 Temperatura. La temperatura en el agua es importante debido a que esta influye en la cinética química de las reacciones de la vida acuática y en la cantidad de oxígeno presente. La temperatura óptima para la actividad biológica está entre 20-35 °C (Delgadillo *et al.*, 2010).

5.1.6.6 Conductividad. La conductividad eléctrica (CE) en el agua es la medida de la habilidad de una solución para conducir una corriente eléctrica. La corriente eléctrica es transportada por los iones en solución. Por lo tanto, la medida de (CE) indica la concentración de Sólidos Totales Disueltos (Delgadillo *et al.*, 2010).

5.1.6.7 pH. Es la concentración de Ion Hidrogeno, indica la naturaleza acida o alcalina de una solución. El pH de las aguas residuales domésticas está en un intervalo de 6,5-8,5. Valores mayores a 9,2 inhiben el crecimiento de E. coli y valores entre 5-9, la vida de las especies acuáticas es favorecida.

Es un parámetro importante debido a que fluctúa debido a factores abióticos, bióticos, bioquímicos y procesos de remoción de contaminantes (Delgadillo *et al.*, 2010).

5.7 HUMEDALES

5.7.1 Humedales naturales. Los humedales naturales constituyen quizás los ecosistemas más eficientes del planeta, con respecto a la depuración de contaminantes (Ramsar, 2004), su óptima funcionalidad se atribuye a la interacción de componentes bióticos y abióticos, físicos, químicos y biológicos tales como suelo, agua, fauna, flora y nutrientes, que permiten que el humedal desempeñe ciertas funciones.

Los humedales son decisivos para el cumplimiento de los ciclos de vida de las plantas y animales; sirviendo en especial de refugio temporal a especies migratorias (Hauenstein *et al.*, 2002). Siendo descritos como los “riñones del mundo natural” y “supermercados biológicos”, por contener redes de nutrientes y diversidad biológica. Los humedales en la naturaleza se dé la recarga y descarga de acuíferos, el control de inundaciones, el control de la erosión, la retención de sedimentos y sustancias tóxicas, la retención de nutrientes, la exportación de biomasa, la estabilización de microclimas (Mitsch y Gosselink, 2001).

Sin embargo, la intervención humana en el aprovechamiento que presentan los humedales ha llevado a un deterioro de estos, por lo cual a través de las últimas décadas se ha hecho imprescindible la conservación de estos ecosistemas.

5.7.2 Humedales contruidos. Los humedales contruidos son sistemas contruidos por el hombre para la depuración de aguas residuales, se denomina humedal contruido debido a que imita los fenómenos físicos, biológicos y químicos que ocurren espontáneamente en un humedal natural. Están diseñados para que microorganismos degradadores fijados en el medio de soporte y plantas interactúe con un volumen de agua residual y con un mínimo requerimiento de energía, mecanismos complejos que involucran oxidación bacteriana filtración, sedimentación y precipitación de materia orgánica e inorgánica (DBO-DQO-SST), mejoren la calidad del agua tratada (Cooper *et al.*, 1996; EPA, 2000; García y Corzo, 2008).

Los humedales contruidos se basan en 3 componentes:

AGUA:

Este es quizá el factor más importante debido a que es la fase donde se encuentran los contaminantes y donde se aplicarán todas las funciones del humedal (Cheremisinoff, 2002).

MEDIO FILTRANTE:

Está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico (Lara, 1999). En el medio de soporte ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos. Una característica muy importante del medio granular es su conductividad hidráulica, ya que de esta propiedad depende la cantidad de flujo de agua que puede circular a través de el (Garcia y Corzo, 2008).

VEGETACIÓN:

En los humedales, las plantas proporcionan gran parte de la estructura de un humedal, otorgan raíces y rizomas que incrementan procesos de sedimentación capturando nutrientes como carbono y nitrógeno para incorporarlos a sus tejidos, también permiten el intercambio de gases entre la atmósfera y el sustrato, creando ambientes oxigenados y proveen sitios para la formación de *biofilm* y el alojamiento bacteriano (Paredes y Kushck 2001); Además, las plantas mejoran la permeabilidad del medio filtrante y aportan mucho al valor estético del humedal (Cheremisinoff, 2002; Garcia y Corzo, 2008; Kadlec y Wallace, 2008).

BIOFILM O BIOPELÍCULA:

El *biofilm* o *biopelícula*, se desarrolla en el medio de soporte, adherida en mayor proporción en las raíces de las plantas, es una matriz que contiene gran cantidad de microorganismos que facilitan los procesos de remoción de contaminantes en aguas residuales, su ubicación en la primera capa del medio granular le permite disponibilidad de oxígeno como fuente de energía (Saeed y Sun, 2012) y sus características varían según la configuración del humedal construido (Faulwetter *et al.*, 2009).

5.7.3 Clasificación de humedales construidos. Los humedales construidos pueden tener distintas configuraciones teniendo en cuenta la altura laminar del agua, el área específica de tratamiento, la relación largo-ancho, la pendiente, la profundidad, teniendo así los humedales de flujo superficial, los cuales tienen áreas abiertas con agua y su apariencia es similar a los pantanos; Los humedales de flujo subsuperficial, están diseñados típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado y sistemas híbridos que incorporan los humedales de superficie y de flujo subsuperficial (Kadlec y Wallace, 2008).

5.7.3.1 Sistemas de flujo libre o superficial (FS). En los cuales el agua está sobre la superficie del medio de soporte en un área abierta y puede tener plantas emergentes el agua residual fluye a través del humedal y ocurren procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, adsorción y precipitación. Es efectivo en la remoción de sólidos suspendidos y nitrógeno total.

Estos sistemas atraen una diversidad de vida silvestre (insectos, peces, aves y mamíferos). Debido a la exposición a los agentes patógenos, se utilizan mayormente para el tratamiento secundario o terciario (lagunas o lodos activados, etc.) (EPA, 2000).

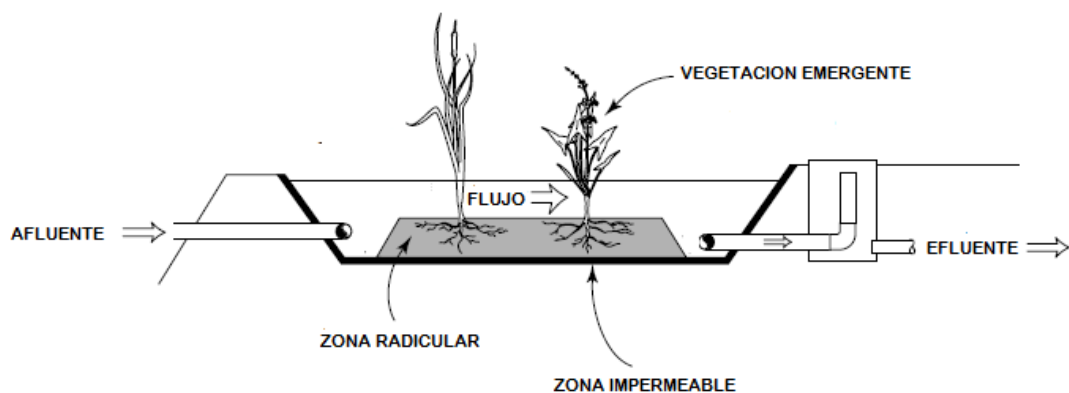


Figura 2. Sistemas de flujo libre o superficial.
(Editado de: Kadlec y Wallace, 2008)

5.7.3.2 Sistemas de flujo subsuperficial (FSS). Estos están contruidos típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio de soporte. La grava es el medio más utilizado en Estados Unidos y Europa, aunque también se ha utilizado roca triturada, grava, arena y otro tipo de materiales del suelo. El medio se planta normalmente con los mismos tipos de vegetación emergentes presentes en las praderas inundadas, por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio.

La ventaja de la configuración es que el nivel del agua se regula de tal manera que la lámina de agua no esté en la superficie, impidiendo así el incremento de insectos y el riesgo biológico para las personas.

Así mismo, sistemas de humedales contruidos sistemas de flujo subsuperficial también pueden clasificarse según el sentido del flujo, teniendo así:

HUMEDALES DE FLUJO HORIZONTAL

En los cuales el agua se distribuye en un extremo del medio filtrante, recorre y se infiltra de forma horizontal a través de un medio de soporte y entre las raíces de las plantas. Provee condiciones para la desnitrificación, pero limita la nitrificación.

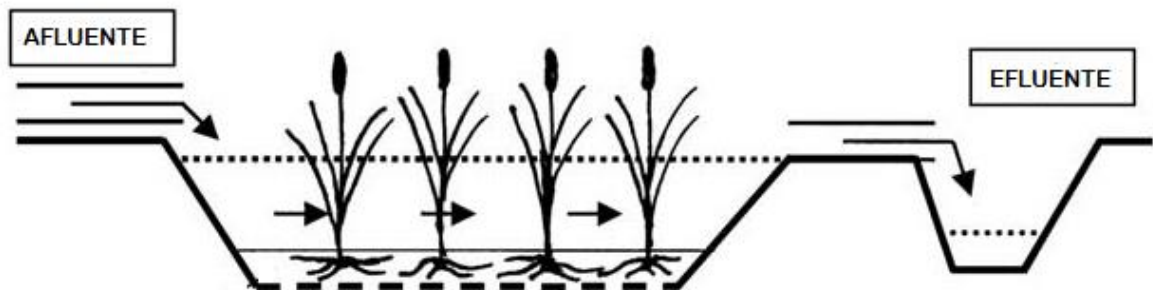


Figura 3. Humedal horizontal de flujo subsuperficial (FSS).
(Editado de: Vymazal, 2007)

HUMEDALES DE FLUJO VERTICAL

En los cuales el agua fluye en toda la superficie del medio filtrante de manera descendente y percola en el humedal, para finalmente evacuarse por el fondo. Los humedales de flujo vertical tienen una mayor ventaja sobre los humedales de flujo horizontal ya que tienen mayor capacidad para eliminar la DBO5 y para nitrificar totalmente el agua tratada (Arias y Brix, 2003; Kadlec y Wallace, 2008). El agua puede ser dosificada de forma continua o intermitente, dependiendo del modo de operación previsto en el diseño.

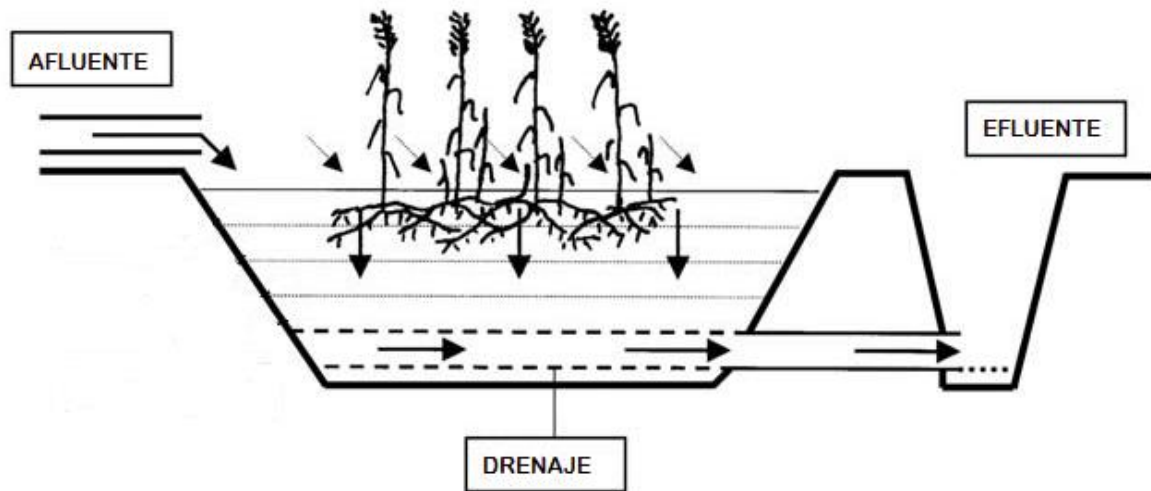


Figura 4. Humedal vertical de flujo subsuperficial (HSSV).
(Editado de Vymazal, 2007)

FLUJO DESCENDENTE INTERMITENTE: Esta opción implica la aplicación de agua en la parte superior de la cama durante breves períodos de tiempo. Se selecciona este modo de funcionamiento para mejorar el transporte de oxígeno en la cama.

FLUJO DESCENDENTE CONTINUO: Esta variante de distribución involucra agua a través de la parte superior del medio granular. Después, el agua se escurre a través de los medios de comunicación con un flujo permanente. Las tuberías de

distribución pueden estar situadas por encima del sistema, o, en climas fríos, enterrado dentro del medio filtrante.

5.8 PROCESOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES

Remoción física: Los humedales son eficientes en la remoción física de material particulado debido a las características del medio de soporte. La sedimentación de los sólidos en suspensión es proporcionada por la velocidad del flujo de agua en el humedal y la resistencia proporcionada por las raíces de la vegetación (Llagas y Guadalupe 2006).

Remoción biológica: Es el proceso más importante en los humedales, debido a que los contaminantes característicos de las aguas residuales como amonio, nitritos y nitratos son nutrientes tomados por las plantas (Llagas y Guadalupe, 2006).

Los microorganismos que se encuentran en el *biofilm* del suelo de igual forma aportan, capturan y almacenan a nutrientes en su proceso metabólico, utilizando el carbono de la materia orgánica como fuente de energía, transformándola a gases como dióxido de carbono o metano (Llagas y Guadalupe, 2006).

Remoción química: Los procesos químicos más importantes de la remoción contaminante en el humedal son la absorción, que es un término ampliamente definido para la transferencia de los iones a partir de la fase de la solución (agua) a la fase sólida (suelo). La absorción describe realmente un grupo de procesos y la adsorción que se refiere a la unión de iones a las partículas del suelo, por intercambio catiónico o absorción química. El intercambio catiónico implica la unión física de los cationes (iones positivamente cargados) a las superficies de las partículas del sustrato y de la materia orgánica en este. La capacidad de los suelos para la retención de cationes, expresada como capacidad de intercambio

catiónico (CEC), aumenta generalmente con el aumento de contenido de la arcilla y de la materia orgánica (Llagas y Guadalupe, 2006).

Los mecanismos anteriores permiten que se lleven a cabo eliminaciones de carga de los contaminantes principales en aguas residuales domésticas (Tabla 2).

Tabla 2. Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales construidos.

Fuente: (Arias y Brix, 2003; Mena et al; 2008)

CONTAMINANTE	MECANISMO
MATERIA ORGÁNICA	Reducción por conversión biológica por medio de bacterias facultativas aerobias y anaeróbicas adheridas a las superficies de las plantas y detritos.
MATERIAL EN SUSPENSIÓN	Sedimentación-Filtración
NITRÓGENO	Nitrificación/Desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización del amoniaco.
PATÓGENOS	Muerte natural, depredación, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.

5.9 PLANTAS UTILIZADAS EN HUMEDALES CONSTRUIDOS

Las plantas cumplen un papel muy importante en los humedales construidos debido a que transfiere oxígeno al medio, otorgando así ambientes aerobios que permiten la degradación de materia orgánica y la nitrificación (Brix, 1997), también provee un medio apto para el crecimiento del *biofilm*. Es primordial seleccionar

plantas con un bajo potencial de invasión radicular, que sobrevivan al clima local donde se ubicaran las unidades experimentales, que sean tolerantes a las características del agua utilizada, a altos niveles de nutrientes. Las especies vegetales más utilizadas en los humedales construidos son *Thypha sp*, *phragmites australis*, *phalaris arundinacea* (Kadlec y Wallace, 2008).

5.9.1 Heliconia (sp). El género Heliconia, está dentro de la familia Heliconiaceae del orden Zingiberales, este género agrupa más de 225 a 250 especies en el mundo; de las cuales 97 se encuentran distribuidas en Colombia y 48 de estas han sido descritas como endémicas (propias de una región), ubicando esta área del planeta como la cuna de diversidad más grande de este género en el mundo (Abalo y Morales, 1982).

Su porte es erecto, de 0.45 m a 10 m de altura, hojas de varias formas y tamaños. Cada hoja está formada por dos mitades separadas por una vena principal que se prolonga. Las flores pueden aparecer todo el año como sucede o por temporada como sucede en la mayoría de las especies, su floración depende de la temperatura. La temperatura adecuada para su crecimiento es de 28°C con un rango entre 25 y 32°C.

Crecen naturalmente en zonas con más de 2 000 mm de precipitación anual. El riego puede ayudar a solventar el déficit hídrico en zonas con precipitaciones medias o bajas al requerimiento (FHIA, 1995).

Las Heliconias son útiles como protectoras de cuerpos de agua, reforestación de suelos (Vargas, 2002) debido a que su crecimiento rizomatoso contrarresta los movimientos de tierra en las laderas erosionadas de suelos, alberga un gran número de organismos, insectos (escarabajos, orugas, hormigas, etc.) (Santos *et al*, 2009; Seifert, 1982).

Lo anteriormente descrito, exaltan el valor ecológico de la Heliconia y su importancia en el hábitat tropical y en la sociedad ya que la comercialización de sus flores es de gran aceptación y rentabilidad.



Figura 5. *Heliconia psittacorum*.

6. METODOLOGÍA

6.1 DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

El montaje de las unidades experimentales necesarias para la realización de este proyecto se realizó en las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Universidad Tecnológica de Pereira.

UNIDADES EXPERIMENTALES

Las unidades experimentales corresponden a humedales construidos de flujo vertical basados en arena. Se diseñaron a partir de la combinación de dos factores: en primer lugar la aplicación de 2 frecuencias de alimentación en los humedales, en segundo lugar, la ausencia y presencia de plantas, como se describe en la Tabla 3.

Tabla 3. Unidades experimentales.

Denominación De Tratamientos	Presencia de Plantas	Frecuencia de Alimentación
H1 (P-20p)	Plantado.	20 pulsos d^{-1}
H2 (NP-20p)	No plantado.	
H3 (P-10p)	Plantado.	10 pulsos d^{-1}
H4 (NP - 10p)	No plantado.	

El montaje estuvo constituido por 4 unidades experimentales de humedales construidos de flujo vertical, para los cuales se utilizaron tanques rectangulares de polipropileno de 0,95m de ancho, 1,15 m de largo y 0,75 m de profundidad útil, teniendo así un área superficial de $1,1\text{m}^2$.

Para favorecer los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación se instalaron tuberías de 1" para la aireación en forma de **U** atravesando cada humedal.

En el fondo de cada humedal el efluente está conectado a una red de tuberías perforadas de $\frac{1}{2}$ ", lo cual permite recolectar de manera uniforme el agua tratada con cada sistema.



Figura 6. Unidad no plantada.



Figura 7. Unidad plantada.



Figura 8. Sistema de drenaje.



Figura 9. Efluente.

Como medio de soporte fue utilizado arena con un coeficiente de uniformidad de 2,65.

Las plantas sembradas en los sistemas plantados fue *Heliconia psittacorum* (Humedal 1 y Humedal 3), Por su facilidad de crecimiento, disponibilidad y adaptación a un clima tropical, después de hacer una selección de individuos, verificando el buen estado de las raíces y rizomas debido a que estas tienen una gran capacidad colonizadora además proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula (García y Corzo, 2008).

Los humedales fueron alimentados con agua residual obtenida del afluente de la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales (PTAR) de la Universidad Tecnológica de Pereira. El agua residual antes de ser usada como suministro para los sistemas, fue pre-tratada en un tanque de sedimentación donde se remueve un porcentaje de sólidos orgánicos para evitar fallas en el sistema de bombeo o en el sistema distribución de caudales (Figura 10). El caudal de diseño fue de 140 L/d^{-1} .

Para el abastecimiento de agua residual a los humedales se utilizaron 2 electrobombas de 1/2 HP, caudal máximo 35L/min y 3560 RPM, el circuito de aspiración de la bomba estaba depositado en el fondo de un tanque de almacenamiento del agua previamente sedimentada, posteriormente se adaptó un *timer* digital para cada electrobomba programando frecuencias de alimentación de 20 pulsos d^{-1} para la bomba 1 y 10 pulsos d^{-1} para la bomba 2, de 1 y 2 minutos respectivamente, para asegurar el ingreso del mismo caudal diario a cada humedal (Figura 11). Por otra parte se adecuó una red de tubería de impulsión de $\frac{1}{2}$ " en la parte superior de cada humedal que dosificaba el ARD en forma de goteo, utilizando una adecuación de tuberías de $\frac{1}{2}$ " en forma de H, perforadas en la parte inferior linealmente con agujeros, lo cual permitía un sistema de riego

uniforme (Figura 12). Teniendo finalmente el esquema de tratamiento que se muestra en la (Figura 13).



Figura 10. Tanque de sedimentación y Alimentación.



Figura 11. *Timers digitales.*



Figura 12. *Sistema de riego.*

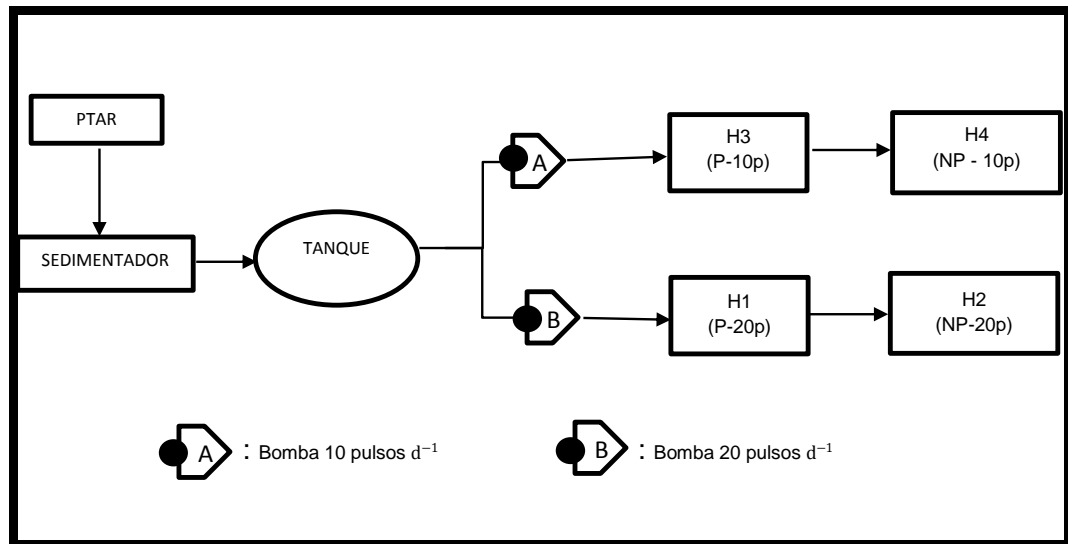


Figura 13. Esquema de sistema de tratamiento.

6.2 SEGUIMIENTO DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES

En el desarrollo de la investigación se desarrolló un plan de mantenimiento y operación de los sistemas, para de esta forma asegurar la eficiencia en el funcionamiento de cada una de las unidades experimentales. Este se llevó a cabo según las indicaciones de EPA, (2000).

Las áreas de control son:

CONTROL HIDRÁULICO: Donde se inspecciona la distribución del agua en el humedal, mayormente si es de configuración subsuperficial y tiene un soporte de arena debido a que en un momento dado la acumulación de detritos en los poros del sustrato puede causar una colmatación de este y formar una lámina de agua en la superficie del humedal.

LIMPIEZA DE LAS ESTRUCTURAS: Aquí para que no se presenten daños por el taponamiento de las tuberías de entrada y salida de agua se hace una revisión

rutinaria, con una remoción física y lavado de alta presión de agua a los sedimentos en los agujeros de distribución de la red tubería.

CONTROL DE PLAGAS: Aunque la configuración (HSSF) de los sistemas, permite que haya una insignificante población de mosquitos, se realiza una inspección continua de cada humedal, en búsqueda de insectos u otras plagas que pudieran intervenir en el desarrollo de la vegetación. La erradicación de plagas se realizará a través del control manual, pero si la situación es muy grave se utilizará algún insecticida.

CONTROL DE VEGETACIÓN: En estos sistemas, el objetivo de la inspección de la vegetación es que la planta se desarrolle normalmente.

6.3 PROGRAMA DE MUESTREO Y TRABAJO EN EL LABORATORIO

El seguimiento de la investigación se realizó durante 20 semanas y las muestras se tomaron en el afluente y el efluente de cada humedal, teniendo así 5 puntos de muestreo. Se colectaba un volumen de 2 litros, en un recipiente de plástico sin preservantes y simultáneamente en un recipiente de plástico de 1 litro, utilizando 1 ml de ácido sulfúrico como preservante para el análisis de nitrógeno amoniacal, tal y como se muestra en la Figura 14 y Figura 15.

Estas muestras fueron analizadas en el laboratorio de procesos biológicos de la facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira siguiendo los procedimientos del Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA, 2000).



Figura 14. Recipientes de muestreo.



Figura 15. Recipientes Preservados.

6.4 PARÁMETROS A ANALIZAR

Los métodos utilizados para el análisis de los parámetros de los humedales se realizaron semanalmente, según el *Standard Methods for the Examination of water and wastewater* (Tabla 4) (APHA, 2000).

Tabla 4. Métodos de análisis.

Parámetro	Método
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO_5)	Respirométrico
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Micro-reflujo cerrado/titulométrico
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Gravimétrico
Nitrógeno amoniacal (NH_3)	Volumétrico
Nitritos (NO_2^-)	Espectrofotometría uv
Nitratos (NO_3^-)	Colorimétrico

Adicionalmente, en el cada muestreo se realizaban mediciones de caudal, pH, temperatura y conductividad para interpretar mejor el proceso de remoción y controlar el buen funcionamiento de las unidades experimentales.

6.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Al tener la totalidad de los datos provenientes de esta investigación se inicia contrastando su distribución mediante la prueba **Kolmogorov-Smirnov** (SPSS (*Statistical Package for Social Science*, versión 17.0), la cual compara la curva de frecuencias acumuladas de los datos que se desean contrastar con la curva de frecuencias acumuladas de la distribución propuesta de probabilidad normal. Posteriormente, se evalúan diferencias significativas entre las configuraciones utilizadas, aplicando el **Contraste t para datos emparejados** a poblaciones con distribución normal y la **Prueba U de Mann-Whitney** a poblaciones con distribución no normal (Microsoft Excel 2013); cabe agregar que esta prueba es independiente de las distribuciones poblacionales, por tal razón es denominada prueba no paramétrica o de distribución libre (Miller y Miller, 2002).

Las hipótesis planteadas en la investigación son:

H_0 : No hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos confrontados.

H_a : Existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos confrontados.

En el análisis, la hipótesis estadística nula (H_0) se rechazó para un nivel de significancia de ($\alpha < 0.05$).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 ETAPA DE MONITOREO

En la operación y mantenimiento de las unidades experimentales sugerida por (EPA, 2000), se observa que:

CONTROL HIDRÁULICO: En el transcurso de la investigación no se observa una colmatación de los sistemas, solo un incremento en el tiempo de infiltración del agua tratada.

De igual forma, se hizo un monitoreo constante del caudal de entrada y salida de agua a los humedales, lo cual permite una aplicación de cargas contaminantes congruente para un posterior análisis.

LIMPIEZA DE LAS ESTRUCTURAS: No se presentaron daños por el taponamiento de las tuberías de entrada y salida de agua debido que se realizó una revisión rutinaria, con un lavado de alta presión de agua a los sedimentos en los agujeros de distribución de la red tubería.

CONTROL DE PLAGAS: En esta actividad se observó en primer lugar, que desde la semana N° 5 las hojas presentaron gran cantidad de hoyos (Figura 16), por lo cual se hace una búsqueda detallada del insecto causante, posteriormente se evidencia la presencia de una población de gusanos (Figura 17), que según el departamento de Entomología de la Facultad de Agricultura, alimentos y Ambiente, que pertenece a la Universidad de Kentucky EE.UU, se denomina Oruga de silla de montar (*Saddleback Caterpillar*) u Oruga de espalda arqueada (Figura 18), esta oruga es de color marrón oscuro anterior y posterior de los extremos con un patrón de color verde brillante en el medio, con una mancha oscura en el centro, la cual le da la apariencia de una silla de montar, también

tiene cuernos con aguijones prominentes en ambos extremos de su cuerpo, los cuales pueden causar irritación severa al contacto. Según la Universidad Florida, puede estar presente en una gran variedad de plantas ornamentales. Para el control de esta especie, se evita el uso de plaguicidas con el fin de que estos no intervengan en la acidificación del suelo, de esta manera se realiza una erradicación manual de la oruga periódicamente, logrando exitosamente la desaparición de este.



Figura 16. Hoja afectada.



Figura 17. Gusano encontrado.



Figura 18. Oruga de espalda arqueada.

Tomada de: (Bergillos y Rivas, 2013)

En segundo lugar en la semana N° 16, se encuentra que los humedales plantados estaban invadidos por Hormigas Arrieras (*Atta cephalotes*), las cuales habían afectado gran cantidad de hojas de los sistemas (Figura 19). En este caso por la magnitud de los insectos, se utilizó en baja proporción un insecticida Lorsban, para eliminar esta plaga, lo cual permitió el progreso de las plantas.



Figura 19. Plaga de hormigas.

CONTROL DE VEGETACIÓN: Los sistemas plantados, fueron sembrados con los rizomas provenientes de Heliconias utilizadas en humedales que funcionan en la INDUSTRIAS ELECTROMECAÑICAS MAGNETRON SAS (Vía cerritos-Cartago), la cual proporcionó el total de las plantas utilizadas, el proceso de propagación y adaptación de los rizomas de estas plantas en el medio de arena fue satisfactorio.



Figura 20. Sistemas semana 0.



Figura 21. Sistemas semana 5.



Figura 22. Sistemas semana 10.



Figura 23. Sistemas semana 15.



Figura 24. Sistemas Semana 17.



Figura 25. Sistemas Semana 18.



Figura 26. Sistemas Semana 20.

7.2 GENERAL

En la tabla 5, se muestran las características del agua residual que se trató durante la fase experimental de este proyecto.

Tabla 5. Características del agua residual del afluente.

	n	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Promedio	Desviación estándar
pH	20	7,06	8,31	7,75	0,36
Temperatura (°C)	20	19,1	25,9	22,4	1,76
DQO (mgO_2/l)	20	179,39	465	299,92	75,86
DBO (mgO_2/l)	17	100,00	330	217,22	74,54
Relación DBO/DQO	17	0,42	0,92	0,74	0,15
SST (mg/l)	20	20,00	121,18	62,82	29,45
Nitrógeno amoniacal ($mg N-NH_3/l$)	20	26,6	87	61,02	17,55
Nitratos ($mg N-NO_3^-/l$)	20	0,12	2,71	1,93	0,74
Nitritos ($mg N-NO_2^-/l$)	20	0,01	0,08	0,04	0,02

El agua residual es denominada de concentración media de acuerdo con su contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable. Además la relación DBO/DQO es de 0,74; lo cual es propio de las aguas residuales domésticas sin ningún tratamiento, se considera fácilmente tratable por medios biológicos (Metcalf y Eddy, 2004). Con respecto a los datos de Nitrógeno amoniacal, se mostró de alto flujo de entrada, lo cual se genera por la desaminación de compuestos que contienen nitrógeno y por la hidrólisis de la urea en la orina proveniente de las descargas de los baños de la Universidad Tecnológica de Pereira, las anteriores características presentan alejamiento

considerablemente de la relación DBO/DQO y concentración de Nitrógeno Amoniacal reportado por (Cubillos, 2010) de 0,42 y 75 mg N-NH₃ /l. Lo anterior, probablemente por un aumento de la comunidad universitaria en el campus. (Queralt, 2003).

7.2.1 Temperatura. Durante el tiempo de tratamiento, la temperatura promedio del afluente fue 22,4 °C, lo cual asegura un adecuado medio para el desarrollo de las reacciones implícitas en la remoción de contaminantes debido a que cuando la temperatura es menor a 5 °C la actividad microbiana se inhibe (Crites y Tchobanoglous, 2000) y si excede los 35°C se dificulta la disponibilidad de la transferencia de oxígeno total disuelto. Por otro lado, no se observan variaciones importantes en la temperatura de los efluentes de los sistemas de evaluación (Figura 27).

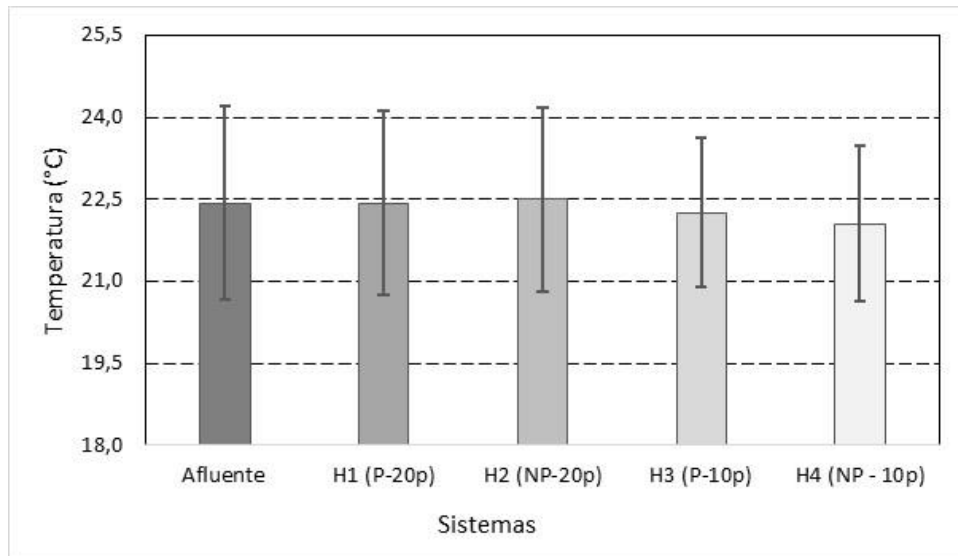
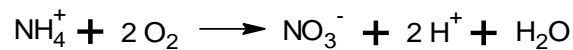


Figura 27. Comportamiento medio de temperatura.

7.2.2 pH. El pH en el afluente fue de 7.75 unidades, el cual es óptimo para el proceso de nitrificación al igual que para el crecimiento biológico y es similar al reportado por García y Malla, (2014). Ahora bien, en la Figura 28, se observa el descenso de pH en los efluentes de cada sistema, lo cual puede ser debido, en primer lugar a que los humedales de flujo vertical proporcionan a través de los pulsos transferencias de oxígeno altas al medio, en el cual por cada mol nitrificado de Amonio, se liberan dos moles de iones hidronio (H^+) (ecuación A), reduciendo la alcalinidad del agua (Cooper *et al.*, 1996; Metcalf y Eddy, 2004; Kadlec y Wallace, 2008), lo cual se lleva a cabo cerca de la superficie del humedal donde los niveles de oxígeno disuelto son mayores (Vymazal, 2007).

(Ecuación A)



En segundo lugar, puede ser el resultado de reacciones de degradación de materia orgánica por bacterias heterotróficas, en las cuales sus productos finales primarios son ácido acético, ácido butírico y ácido láctico (Paredes y Kusch, 2001).

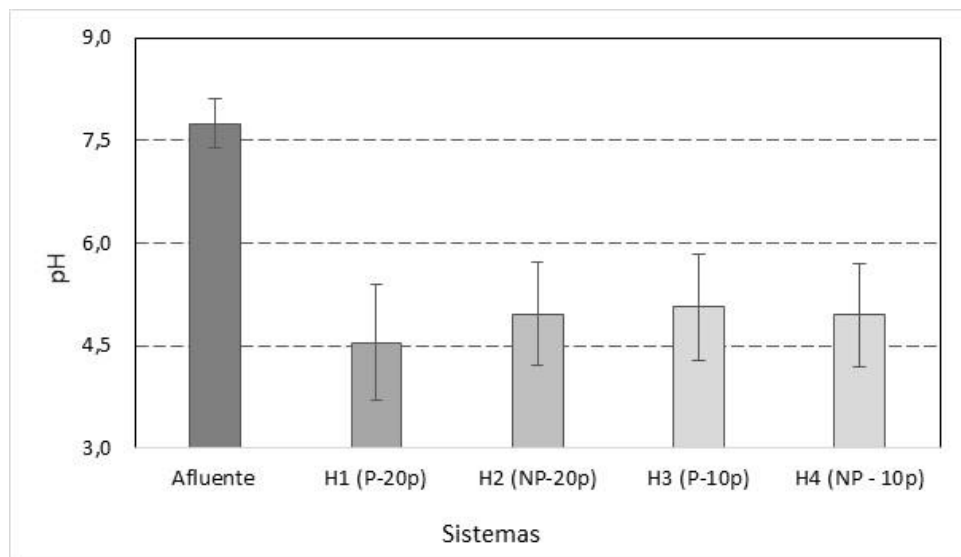


Figura 28. Comportamiento medio de pH.

7.2.3 Nitrógeno. Con Respecto al comportamiento de nitrógeno en los distintos tratamientos, en primer lugar se tiene una carga media de nitrógeno amoniacal de $9,1 \text{ g/m}^2\text{d}$ ($61,02 \text{ mg N-NH}_3/\text{l}$) en el afluente y que desciende considerablemente para todos los efluentes de los sistemas evaluados como se observa en la Figura 29 , teniendo de esta forma reducciones de cargas altas (Tabla 6), que ya se han presentado en investigaciones con humedales verticales como las Abou-Elela y Hellal,(2012) y Bialowiec *et al.*, (2011), los cuales obtuvieron hasta un 96% en la reducción de carga orgánica de nitrógeno amoniacal, esto promovido por los grandes niveles de oxígeno proporcionados a gran parte del medio por los HSSV, que promueve la nitrificación (Kadlec y Wallace, 2008).

Así mismo, obtuvo una alta acumulación de nitratos en los efluentes de cada sistema evaluado, debido a la falta de condiciones anóxicas que permitieran su eliminación por mecanismos de desnitrificación. Adicionalmente los nitritos se mantuvieron en un rango demasiado bajo, a causa de su inestabilidad química como intermediario en ese proceso. (Laber et al., 1997; Vymazal, 2007; García, J y Corzo, A. 2008).

En este sentido, todos los sistemas evaluados se lograron remociones superiores al 70% de nitrógeno amoniacal. Sin embargo, las mayores eficiencias de remoción se presentaron en los sistemas plantados H1 (P-20p) y H3 (P-10p) con un 80% y 79% respectivamente (Figura 30). Siendo resultados superiores al 64% de asimilación de nitrógeno amoniacal en humedales construidos plantados con *heliconia psittacorum*, reportado por Gutiérrez *et al.*, (2010). Por otra parte investigaciones como los de Nameni *et al.*, 2008 y Edwards *et al.*, 2006 demuestran que la vegetación en humedales construidos influyen en los mecanismos de degradación de nitrógeno, esto es atribuido a que las plantas asimilan en mayor proporción el nitrógeno amoniacal para el mantenimiento de sus células y tejidos (Kadlec y Knight, 1996).

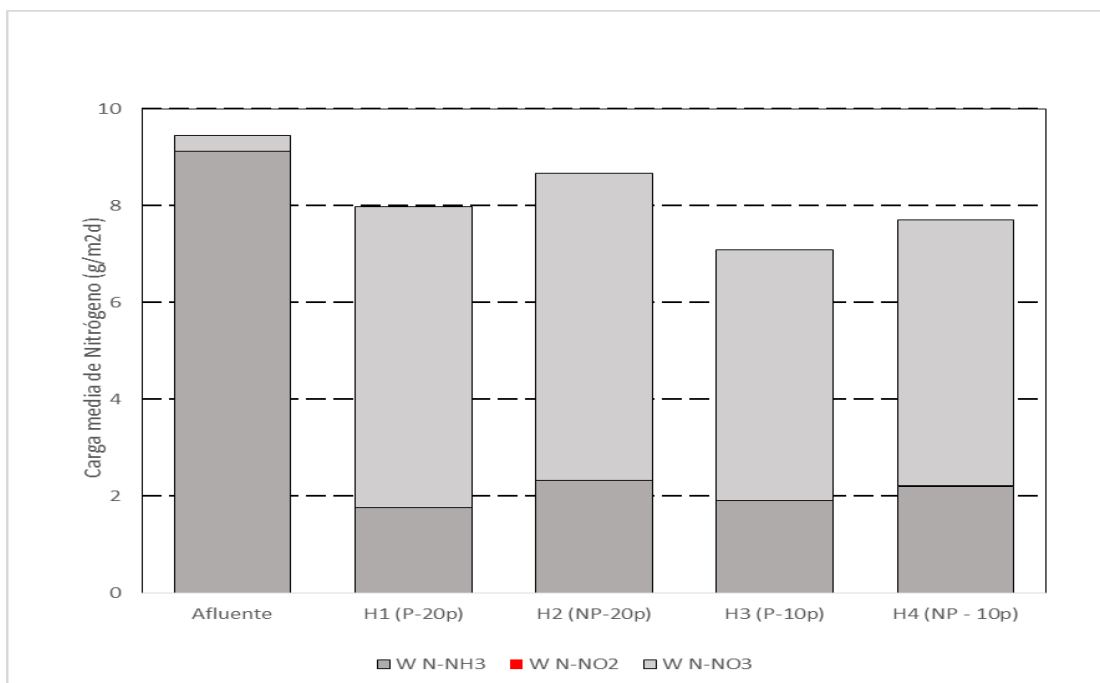


Figura 29. Carga media de Nitrógeno en los sistemas.

Tabla 6. Reducciones de carga para nitrógeno amoniacal

Sistema	Reducción de carga N-NH ₃ (g/m ² d)
H1(P-20p)	7,45
H2(NP-20p)	6,91
H3(P-10p)	7,24
H4(NP-10p)	6,59

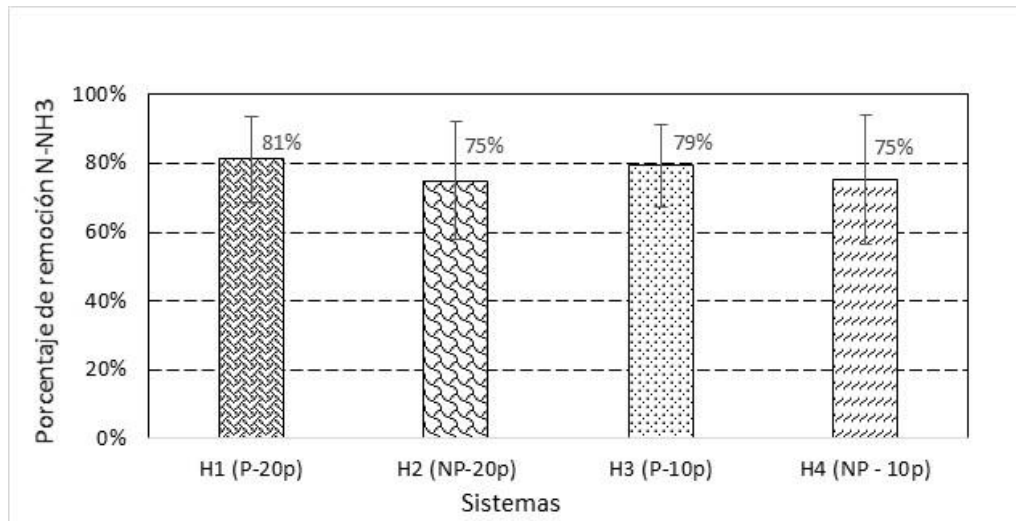


Figura 30. Porcentaje de remoción de Nitrógeno Amoniaco para los sistemas.

NITRÓGENO TOTAL

Teniendo en cuenta que puede medirse el Nitrógeno que entra a los humedales como Nitrógeno orgánico y amoniacal (La combinación de estos dos se representa como Nitrógeno Total Kendal (NTK)), nitritos y nitratos.

En relación con el nitrógeno total (NT), se trabajó con una carga promedio de entrada de $9,45 \text{ g/m}^2\text{d}$, de la cual en un 96% es atribuido al nitrógeno amoniacal debido a que esta es la forma inicial de nitrógeno en aguas residuales domésticas. No obstante, los efluentes de cada sistema están compuestos en mayor proporción por Nitratos (Figura 31).

Así mismo, se observaron reducciones de carga bajas para NT en cada sistema evaluado (Tabla 7) teniendo así, sistemas en los que se lleva a cabo óptimamente la nitrificación, pero sin una reducción importante de Nitrógeno Total.

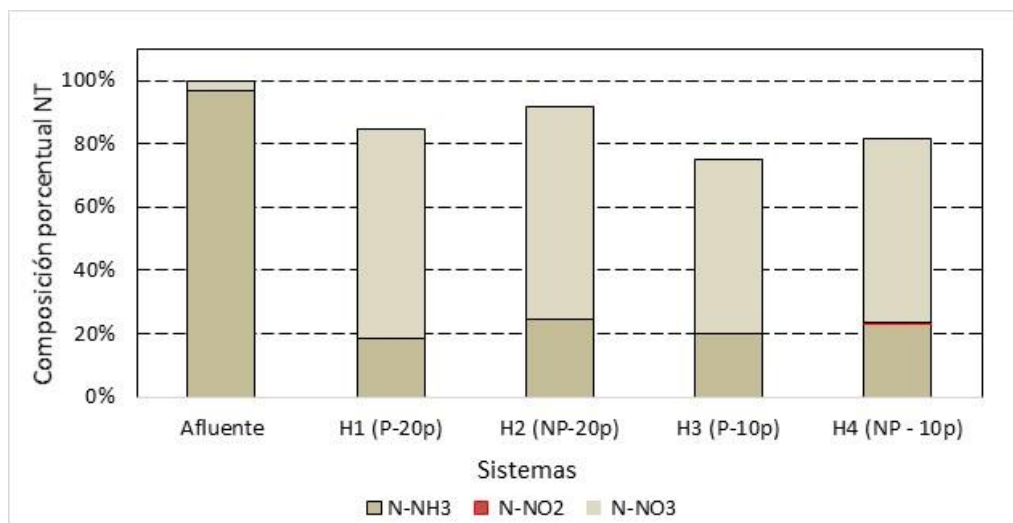


Figura 31. Composición porcentual de Nitrógeno total.

Tabla 7. Reducciones de carga para nitrógeno total.

Sistema	Reducción de carga NT ($\text{g/m}^2\text{d}$)
H1(P-20p)	1,33
H2(NP-20p)	0,77
H3(P-10p)	2,36
H4(NP-10p)	1,74

Con respecto a eficiencias de remoción, los mayores se presentaron en los sistemas H3 (P-10p) y H4 (NP-10p), con un 25% y 18%, respectivamente (Figura 32). Siendo los anteriores resultados inferiores a los reportados por Alexandros *et al.*, 2012, que encontró una remoción de 69,7% de NT en sistemas de flujo vertical basados en arena utilizando *Phragmites australis* en conjunto con *typha latifolia*.

En este estudio, las unidades plantadas no tuvieron ventaja frente a la reducción de carga de las unidades no plantadas, autores como Saeed y Sun, (2012), han obtenido una remoción de carga de nitrógeno por parte de la vegetación de 0,27-0,68 $\text{g/m}^2\text{d}$, en contraste aquí se obtuvieron reducciones de 0,39-0,47 $\text{g/m}^2\text{d}$, lo cual permanece dentro del intervalo dado.

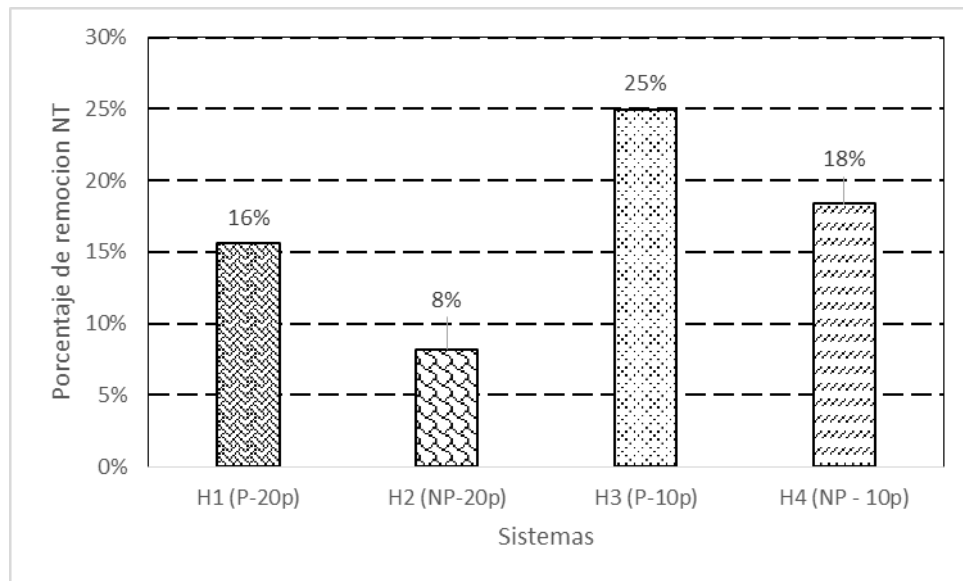


Figura 32. Porcentaje de remoción de nitrógeno total.

7.2.4 Materia orgánica. La degradación materia orgánica contenida en aguas residuales es producida por la acción de microorganismos aerobios, siendo dependiente del oxígeno disponible (Saeed y Sun, 2012) y del tipo de medio filtrante debido a que cada lecho usado proporciona un tiempo de retención hidráulico, con el cual se filtrara y sedimentara la mayoría de la materia orgánica disuelta.

Ahora bien, en cuestión de DBO_5 , el afluente cuenta con una carga promedio de $34,82 \text{ g/m}^2\text{d}$ (217 mg/l), igualmente se evidencian disminución de carga logrados por los efluentes de los sistemas evaluados (Figura 33), las cuales se presentan en la Tabla 8 y están distribuidas entre $33,81 - 34,13 \text{ gDBO}_5/\text{m}^2\text{d}$.

En lo que refiere a los porcentajes de remoción, se obtuvieron eficiencias superiores a 96% en todas las unidades evaluadas (Figura 34), situación similar en los investigaciones de García, (2010) donde las plantas no aportaron en la remoción de este parámetro, pero contrario Jia *et al.*, (2010), reporta el aumento de la remoción de materia orgánica con flujo intermitente, esto puede ser debido

a que en este estudio la carga era dosificada durante un día y se drenaba durante 2 días, creando así ambientes oxigenados para los microorganismos degradadores la oxidación aeróbica de materia orgánica.

Tabla 8. Reducciones de carga para DBO₅.

Sistema	Reducción de carga DBO ₅ (g/m ² d)
H1(P-20p)	34,13
H2(NP-20p)	34,05
H3(P-10p)	33,81
H4(NP-10p)	33,92

Por su parte la carga de DQO en el afluente fue de 45,12 g/m²d y se obtuvieron descensos en el contenido de DQO para los efluentes de los sistemas evaluados (Figura 33), con reducciones de carga entre 40,25-42,2 g/m²d, logrando así eficiencias de remoción superiores al 88% en los efluentes, no obstante los mayores porcentajes pertenecen a H2 (NP-20p) con 91% y H4 (NP-10p) con 93% (Figura 34).

Finalmente, se manejó un afluente con 9,35 g/m²d (62,82 mg/l) de sólidos suspendidos totales, y efluentes con reducciones de cargas notables (Figura 33), por las cuales en la Figura 34 se observan eficiencias de remoción entre 82-87 %, con concentraciones mínimas en los efluentes de 0-1 mg/l, tales valores son similares a los reportados por García y Corzo, (2008) y Lara, (1999), para humedales de flujo vertical, más se le atribuye principalmente a las características del sustrato.

En general, para determinaciones como DQO, DBO₅ y SST, se mostraron menores reducciones de carga en las unidades experimentales plantadas, lo cual

es causado probablemente por la descomposición de bacterias fijadas en las raíces de las plantas, que generan material sedimentable que se acumula en el medio de soporte. Este aporte es casi imposible de cuantificar, pero está comprobado que contribuye al aumento de los niveles de SST (Kadlec y Wallace, 2008; Delgadillo *et al.*, 2010).

Para las altas remociones de materia orgánica obtenidas, influyen ampliamente las características de la arena como medio filtrante ya que por su tamaño de partícula, disminuye los espacios intersticiales por los que pasara el agua a tratar y aumenta su tiempo de retención, ayudando así a retener por filtración el material particulado cerca del tope del humedal y en las raíces de la planta, áreas que por la configuración vertical, le permite tener áreas insaturadas que proporcionan oxígeno disponible para posteriormente ser degradadas por microorganismos (Torrensa *et al.*, 2009).

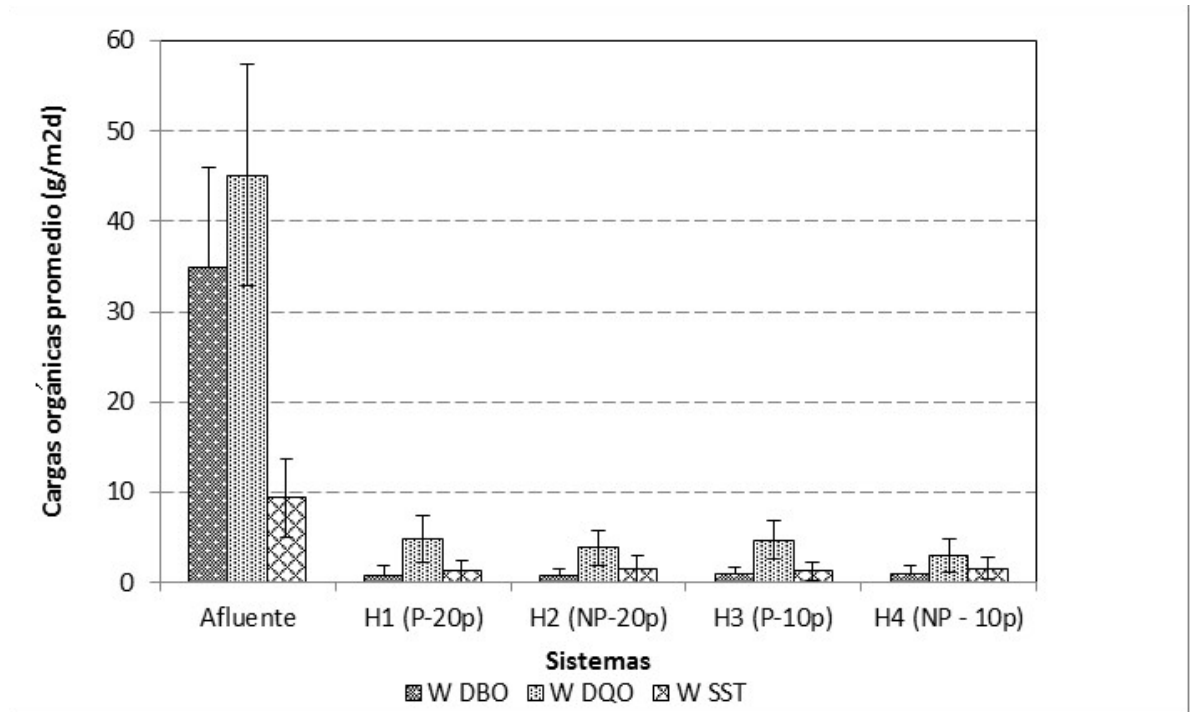


Figura 33. Cargas promedio de materia orgánica.

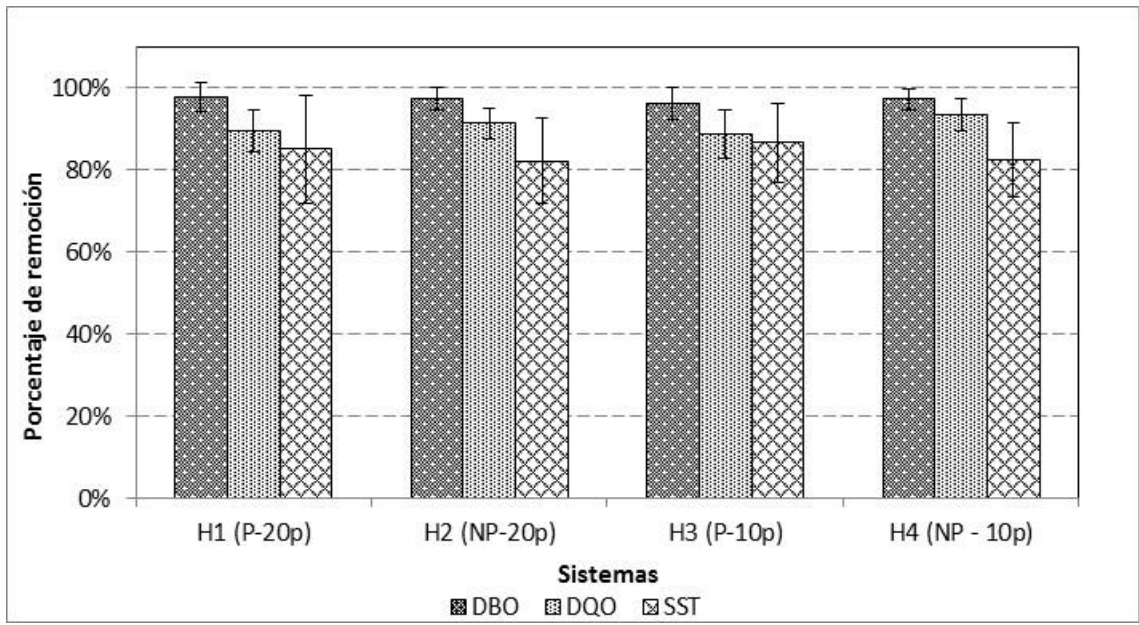


Figura 34. Porcentaje de remoción de materia orgánica.

8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO ENTRE CONFIGURACIONES

Establecer el efecto que tienen las configuraciones en la remoción de contaminantes es un objetivo de esta investigación, Para proporcionar información con altas bases de confiabilidad se emplearon pruebas estadísticas, que facilitan concluir al respecto.

Los resultados correspondientes a la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov aplicado al conjunto de datos obtenidos se muestran en Anexo 1 y a continuación se observa en la Tabla 9 un resumen de este para los parámetros evaluados.

Igualmente se presenta una recopilación de la prueba de contraste t y Prueba U de Mann-Whitney, necesarias para las interpretaciones necesarias.

Tabla 9. Resultados prueba de normalidad Kolmogorov- Smirnov ((P (K-S)).

Parámetro	P (K-S)			
	DQO	DBO	SST	N-NH3
H1 (P-20p)	NORMAL	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL
H2 (NP-20p)	NORMAL	NO NORMAL	NO NORMAL	NORMAL
H3 (P-10p)	NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NORMAL
H4 (NP-10p)	NORMAL	NO NORMAL	NORMAL	NO NORMAL

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Se observa en primer lugar, en la Tabla 10 que ambas comparaciones que el estadístico $|t|$ es mayor a su valor crítico, por tal razón se descarta la H_0 y se comprueba que hay diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las configuraciones, otorgando mayores remociones de DQO a los sistemas No plantados.

Igualmente, en la comparación de la Tabla 12, **H2 (NP-10p) Vs H4 (NP - 20p)** el estadístico $|t|$ es mayor su valor crítico, por tal razón la configuración que presenta mayor remoción de DQO es **H4 (NP - 10p)** ($p < 0,05$).

Tabla 10. Resultados Prueba t: Presencia de plantas en DQO.

Factor	Sistemas	Valor crítico de t	Estadístico $ t $
Presencia de plantas	H1 (P-20p) Vs H2 (NP-20p)	1,7291	1,8179
	H3 (P-10p) Vs H4 (NP - 10p)	1,7291	4,2581

Tabla 11. Resultados Prueba t: Frecuencia de Alimentación DQO.

Factor	Sistemas	Valor crítico de t	Estadístico t
Frecuencia de Alimentación	H1 (P-20p) Vs H3 (P-10p)	1,7291	0,4135
	H2 (NP-20p) Vs H4 (NP - 10p)	1,7291	3,5432

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO)

Analizando el factor de las plantas (Tabla 12), debido a que el valor z obtenido está dentro del intervalo dado en ambas comparaciones, se acepta la H_0 . Por lo cual la presencia de plantas no presentó un efecto en la remoción DBO ($p < 0,05$).

Por su parte la Tabla 13, muestra que el valor z encontrado para la comparación entre los sistemas **H1 (P-20p) Vs H3 (P-10p)**, supera el intervalo de aceptación de la hipótesis nula e indica una mayor remoción con la frecuencia de alimentación de 20 p/d ($p < 0,05$). Contrario al comportamiento observado en **H2 (NP-20p) Vs H4 (NP - 10p)**, donde no hubieron diferencias significativas entre sí.

Tabla 12. Prueba U de Mann-Whitney: Presencia de plantas en DBO.

Factor	Sistemas	Valor z	Intervalo de Aceptación H_0
Presencia de plantas	H1 (P-10p) Vs H2 (NP-10p)	-1,6188	(-1,96 ≤ z ≤ 1,96)
	H3 (P-20p) Vs H4 (NP - 20p)	0,9816	

Tabla 13. Prueba U de Mann-Whitney: Frecuencia de Alimentación en DBO

Factor	Sistemas	Valor z	Intervalo de Aceptación H_0
Frecuencia de Alimentación	H1 (P-20p) Vs H3 (P-10p)	-2,3422	(-1,96 ≤ z ≤ 1,96)
	H2 (NP-20p) Vs H4 (NP - 10p)	-0,1722	

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Como se aprecia en la evaluación de los factores entre los resultados de SST de los efluentes de los sistemas (Tabla 14; Tabla 15; Tabla 16), se observa en primera instancia en los resultados de la Prueba t , que los estadísticos $|t|$ no superan el valor crítico y que los valores z encontrados, en la Prueba U de Mann-Whitney se encuentran entre el rango de aceptación de la H_0 , por esta razón para las configuraciones utilizadas las plantas y la frecuencia de alimentación no fueron factores esenciales para la remoción de SST ($p < 0,05$).

Tabla 14. Prueba U de Mann-Whitney: Presencia de plantas en SST.

Factor	Sistemas	Valor z	Intervalo de Aceptación H_0
Presencia de plantas	H1 (P-20p) Vs H2 (NP-20p)	-0,4599	$(-1,96 \leq z \leq 1,96)$

Tabla 15. Resultados Prueba t : Presencia de plantas en SST.

Factor	Sistemas	Valor crítico de t (una cola)	Estadístico $ t $
Presencia de plantas	H3 (P-10p) Vs H4 (NP - 10p)	1,7291	1,5883

Tabla 16. Prueba U de Mann-Whitney: Frecuencia de Alimentación en SST.

Factor	Sistemas	Valor z	Intervalo de Aceptación H_0
Frecuencia de Alimentación	H1 (P-20p) Vs H3 (P-10p)	-0,1894	(-1,96 ≤ z ≤ 1,96)
	H2 (NP-20p) Vs H4 (NP - 10p)	-0,6898	

NITRÓGENO AMONIAICAL (N- NH₃)

En relación con este parámetro, se observa en primer lugar en la Tabla 17 que el estadístico $|t|$ encontrado supera su valor crítico y en la

Tabla 18 el valor z hallado se encuentra dentro del intervalo de aceptación de H_0 , en consecuencia la presencia de plantas influye en la remoción de Nitrógeno amoniacal ($p < 0,05$), solo en la configuración de 20 p/d. Adicionalmente, en los resultados de la Tabla 19 y Tabla 20, no se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0,05$), con estas variaciones en la frecuencia de alimentación.

Tabla 17. Resultados Prueba t: Presencia de plantas en N- NH₃.

Factor	Sistemas	Valor crítico de t (una cola)	Estadístico $ t $
Presencia de plantas	H1 (P-20p) Vs H2 (NP-20p)	1,7291	2,8257

Tabla 18. Prueba U de Mann-Whitney: Presencia de plantas en N- NH₃

Factor	Sistemas	Valor z	Intervalo de Aceptación H_0
Presencia de plantas	H3 (P-10p) Vs H4 (NP - 10p)	-0,3652	$(-1,96 \leq z \leq 1,96)$

Tabla 19. Resultados Prueba t: Frecuencia de Alimentación e N- NH₃.

Factor	Sistemas	Valor crítico de t (una cola)	Estadístico t
Frecuencia de Alimentación	H1 (P-20p) Vs H3 (P-10p)	1,7291	0,9015

Tabla 20. Prueba U de Mann-Whitney: Frecuencia de Alimentación en N- NH₃.

Factor	Sistemas	Valor z	Intervalo de Aceptación H_0
Frecuencia de Alimentación	H2 (NP-20p) Vs H4 (NP - 10p)	0,0947	$(-1,96 \leq z \leq 1,96)$

9. CONCLUSIONES

Las configuraciones no mostraron una reducción importante de nitrógeno total, pero se evidencia la habilidad en la eliminación de nitrógeno amoniacal, siendo las remociones mas altas en los sistemas plantados con un intervalo de (79%-80%). Ahora bien, según el análisis estadístico el sistema plantado con 20 p/d fue mas eficiente.

Los descensos de pH (max. 3 unidades), al igual que las altas reducciones carga de nitrógeno amoniacal y acumulación de nitratos en los efluentes, demuestran que el principal mecanismo de remoción de nitrógeno es la nitrificación.

Los humedales presentaron remociones hasta de un 98% en DBO, sin ser dependiente de la presencia de plantas. Por lo cual, la configuración mas eficaz fue la de frecuencia de alimentación de 20 p/d.

Según el analisis estadístico hubo diferencias significativas entre las eficiencias de remoción de DQO en los sistemas, teniendo asi las mayores reducciones de carga (91-93%) en los humedales no plantados. En síntesis la configuracion mas conveniente fue la no plantada con 10 p/d.

Se lograron eficiencias de remoción de SST entre (84-87%), atribuidas principalmente a las excelentes características de la arena como medio filtrante y la configuración de flujo vertical, dado que las plantas y el flujo de alimentación no proporcionaron efectos significativos sobre su desempeño.

Se consiguió un aumento en la densidad poblacional de los rizomas de *Heliconia* (*sp*) sembrados en los humedales, durante las 20 semanas del proyecto hasta lograr la floración de la planta. Por consiguiente se demuestra su fácil adaptación a las condiciones fisicoquímicas del afluente y al clima de esta zona del eje

cafetero. Además este tipo de vegetación presento beneficios en la remoción de nitrógeno amoniacal.

Se destaca la arena como medio de soporte, debido a que se obtuvieron disminuciones significativas en el contenido de contaminantes en el afluente tratado, esto por su pequeño tamaño de partícula que facilita el crecimiento y albergue de la biopelícula.

Los Humedales presentan una considerable remoción de contaminantes durante la etapa de estabilización. Por tanto, se puede decir que se ha logrado la adaptación de las plantas y los microorganismos a las condiciones del agua residual. Condiciones necesarias para un óptimo funcionamiento de los sistemas en los posteriores meses de análisis.

Se evidencia que los humedales verticales de flujo subsuperficial con alimentación intermitente, logran un alto porcentaje de depuración de aguas residuales, por su efectivo traspaso de oxígeno al medio de soporte el cual, ayuda a la subsistencia y reproducción de microorganismos degradadores.

10.RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio en el cual se aumente la cantidad de pulsos día en la alimentación de los sistemas, para evaluar su efecto en la eficiencia de remoción.

A la hora de la siembra es importante tener en cuenta la cantidad de vegetación, para así hacer un control más exhaustivo del aumento de la población.

Debido a que en los sistemas predominó la nitrificación como mecanismo de remoción de nitrógeno, se obtuvieron efluentes con un alto contenido de nitratos, esto hace necesario acoplar un humedal horizontal de flujo subsuperficial a la salida de los humedales, para que se complete la eliminación de este contaminante.

Si se utiliza un sedimentador como pretratamiento del agua residual, es importante limpiarlo periódicamente para así no tener una sobresaturación de este.

Es importante hacer un seguimiento de los tiempos de retención en los sistemas, para medir su influencia sobre la remoción de contaminantes.

Es necesario dentro del mantenimiento de las unidades experimentales el control de plagas, ajuste de caudales y limpieza del sistema de riego.

En posteriores análisis se debe evaluar como es el comportamiento en la remoción de patógenos en las configuraciones utilizadas.

Con respecto a los análisis de laboratorio es importante conocer el tiempo de vida útil de la muestra para cada parámetro a evaluar, debido a que con esta información se toman decisiones para su preservación. Así mismo, se requiere

conocer el límite de detección o cuantificación de la prueba, para que se realicen de una manera adecuada.

En investigaciones futuras, sería interesante utilizar en la vegetación la *Heliconia* (*sp*) en conjunto con otra planta, para analizar si así se potencializa la remoción de contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

- Abalo, J. y Morales, L., 1982. Veinticinco Heliconias nuevas de Colombia. *Phytología*, 1982, vol. 51, no. 1, p. p. 1-61.
- Abou-Elela, S. Hellal, M. Municipal wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with *Canna*, *Phragmites* and *Cyperus*. *Ecological Engineering*. Vol. 47. Pag. 209– 213.
- Alexandros I. Stefanakis, Vassilios A. Tsihrintzis., 2012. Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal* vol.181- 182.Pag. 416- 430.
- APHA., 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st Edition.
- Baird, Colin., 2001. *Química Ambiental*. Editorial Reverté. Barcelona, España. 437-438 pp
- Bergillos, Fernando. RIVAS, Ángeles., 2013. *Toxicología clínica. Lesiones por picaduras y mordeduras de animales*. Tomo I. España. Pg. 217
- Białowieca, A. Janczukowiczb, W. Randersonc, P., 2012. Nitrogen removal from wastewater in vertical flow constructed wetlands containing LWA/gravel layers and reed vegetation. *Ecological Engineering* Vol. 37. Pag 897-902.
- Bernal, D.P., Cardona, D.A., Galvis, A., Peña, M.R., 2003. *Guía de selección de Tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por*

métodos naturales. En: Seminario internacional sobre Métodos Naturales para el tratamiento de aguas residuales. Cali: Universidad del Valle. Octubre. P: 19-27.

- Brix H y Arias C A., 2005. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering*. Vol. 25. Pag. 491–500.
- Brix, Hans, & Arias, Carlos., 2003. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13, 17–24.
- Cakmak, B.; Apaydin, H. Revisión. Avances en la gestión de aguas residuales en Turquía, mediante tratamientos naturales o humedales artificiales. En: *Revista de Investigación Agraria*. Marzo, 2010. P: 188-201. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 181– 182. Pag. 416– 430
- Cheremisinoff, N., 2002. *Handbook of water and wastewater treatment technologies*. Butterworth-Heinemann. USA. 636 pp.
- Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B., Shutes, R.B.E., 1996. *Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. WRc Publications, UK.
- Crites, R. y Tchobanoglous, g. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Derechos reservados. Copyright © 2000, por Mc Graw- Hill Interamericana. S. A. Santa fe de Bogotá. Pág. 776. Colombia.
- Cubillos J., 2011. *Evaluación de la Fitorremediación como Alternativa de Tratamiento de Aguas Contaminadas con Hidrocarburos*. Tesis de Maestría en Ecotecnología. Universidad Tecnológica de Pereira.

- Delgadillo, O.; Camacho, A.; Pérez, L.F.; Andrade, M., 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la gestión y uso del agua. Universidad Mayor de San Simón. Facultad de Agronomía. Cochabamba, Bolivia.
- Edwards, K. R.; Cizkova, H.; Zemanova, K.; Santruckova, H., 2006. Plant growth and microbial processes in a constructed wetland planted with *Phalaris arundinacea*. *Ecol. Eng.*, 27 (2), 153-165.
- El-Fadel, M.; Zeinati, M. and Jamali, D., 2000. "Water resources in Lebanon: Characterization, water balance, and constraints". *International Journal of Water Resources Development*, vol. 16, No. 4, pp. 615-638.
- Faulwetter J., Gagnonb V, Sundbergc C., Chazarencd F, Burra M., Brissonb J., Campera A., Stein O. 2009. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. *Ecological Engineering* 35 (2009) 987–1004.
- Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA). Introducción a ornamentales tropicales. Honduras. 1995, p. 131.
- García J. Giraldo M., 2014. Evaluación del efecto del aumento de la carga hidráulica sobre la eficiencia de remoción de contaminantes en humedales construidos sembrados con *guadua angustifolia* kunth utilizando grava y arena como medio filtrante. Tesis Pregrado, Tecnología Química. Universidad Tecnológica de Pereira.
- García, J, Vivar J., Aromir M. y Mujeriego R., 2003. Role of hydraulic retention time and granular médium in microbial renoval of indicador in tertiary treatment reed beds. *Wat. Res.*, 37,2645-2653.

- García, J. Corzo, A., 2008. Depuración con humedales construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Tesis
- García, J., 2010. Efecto del uso de plantas y configuración de los sistemas en la remoción de organismos patógenos mediante el uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones tropicales. Tesis pregrado, Admón. Ambiental. Universidad Tecnológica de Pereira
- Gutiérrez, M. Peña.M. Aponte Reyes., 2010. Estimación del balance de Nitrógeno en un humedal construido subsuperficial plantado con *Heliconia psittacorum* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 56.
- Hauenstein, E; Gonzales, M.; Peña-Cortés, F.; Muñoz-Pedrerros, A. 2002. Clasificación y caracterización de la flora y vegetación de los humedales de la costa de Tolten (IX Región, Chile). *Gayana Bot* 59(2):87-100.
- Hu, Y., Zhao, Y., Zhao, X., Kumar, J.L.G., 2012. High rate nitrogen removal in an alumsludge-based intermittent aeration constructed wetland. *Environ. Sci. Technol.* 46 (8), 4583–4590.
- Jía, W. n Zhang, J. Wu , J. Xie , H. Zhang, B., 2010. Effect of intermittent operation on contaminant removal and plant growth in vertical flow constructed wetlands: A microcosm experiment. *Desalination* (262) 202–208
- Kadlec R, Wallace S., 2008. Treatment wetlands. Second editions. 1001 pp.

- Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. y Haberl, R., 2000. *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing, 155 pp.
- Kantawanichkul S, Kladprasert S, Brix H., 2009. Treatment of high-strength wastewater in tropical verticalflow constructed wetlands planted with *Typhaangustifolia* and *Cyperusinvolutus*. *Ecological Engineering* 35, 238–247.
- L. G. J. M. van Dongen, M. S. M. Jetten, M. C. M. van Loosdrecht., 2001. The SHARON-Anammox process for the treatment of ammonium rich wastewater, *Water Sci. Technol.* 44 (1), 153–160.
- Laber, J., Perfler, R., Haberl, R., 1997. Two strategies for advanced nitrogen elimination in vertical flow constructed wetlands. *Water Science & Technology* 35 (5), 71e77.
- Lara, J. A., 1999. *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Trabajo final de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Llagas, W., Guadalupe E., 2006. *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMM.
- Metcalf & Eddy, INC., 2004. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento y reutilización*. Cuarta Edición. McGRAW-HILL. Singapur.

- Miller J. Miller J. Estadística y quimiometría para química analítica. Cuarta edición. Prentice Hall. Madrid.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT)., 2008. Gestión para el manejo y disposición final de las aguas residuales municipales. Bogotá D.C. 64 pp.
- Ministerio de Desarrollo Economico, Direccion de Agua Potable y Saneamiento Básico., 2000. Reglamento Tecnico Del sector de Agua Potable Y Saneamiento Basico. Bogota D.C.
- Ministerio de medio ambiente. Informe de estado del medio ambiente., 2013 Gobierno de Navarra.
- Mitsch, G y G. Gosselink, J.G., 2000. Wetlands. 3ra ed. Jhon Wiley & Sons. Nueva york, USA. 920p
- Nameni, M.; Alavi, Moghadam M. R.; Arami, M., (2008). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solutions by wheat bran. Int. J. Environ. Sci. Tech., 5 (2), 161-168.
- Paredes D. Kusch P., 2001. Tipo de humedales y mecanismos de remoción. Seminario humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Armenia, Manizales, Pereira, Septiembre de 2001.
- Prochaska, C.A., Zouboulis, A.I., 2006. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. Ecological Engineering 26, 293-303.

- R. H. Kadlec, R. L. Knight. 1996. Treatment Wetlands. Lewis Publishers, Boca Ratón, La Florida, 373–440.
- Ramalho, R. S., Jiménez Beltrán, D., & Lora, F., 1996. Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Reverté.
- Romero, J. 2004. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Editorial escuela colombiana de ingeniería. Tercera edición. Bogotá, Colombia.
- Saeeda T., Sun, G., 2012. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. Environmental Management. 112, 429 – 448 (L).
- Sánchez Julio & Chóliz, Rosa Duarte., 2005. Water pollution in the Spanish economy: analysis of sensitivity to production and environmental constraints.
- Secretaria de la Convención de Ramsar., 2004. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales: Inventario de humedales. Secretaria de la convención Ramsar, Gland (Suiza). 95 Pp.
- Seifert, R. P. Neotropical Heliconia insect communities. The Quarterly Review of Biology, 1982, no. 57, p. 1-28.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Grupo Sectorial Dirección técnica De Gestión De acueducto y Alcantarillado. 2012. Informe Técnico Sobre Sistemas De Tratamiento De Aguas Residuales En Colombia. Bogotá D.C. 9-12 pp

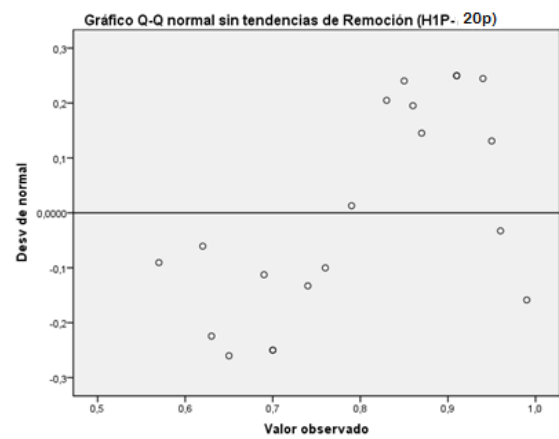
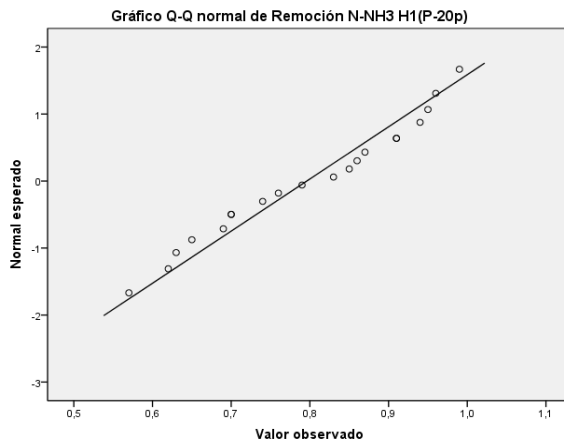
- Torrensa, Antonina. Molleb, P. Boutinb, C. Salgota, M., 2009. Impact of design and operation variables on the performance of vertical-flow constructed wetlands and intermittent sand filters treating pond effluent. *Water research* (43) 1851 – 1858.
- Universidad de Kentucky. Facultad de agricultura, alimentos y ambiente. Departamento de Entomología. (En-Línea). Disponible en: <http://www2.ca.uky.edu/entomology/entfacts/ef003esp.asp>
- Vanek T, Schwitzguebel JP (2003): Phytoremediation inventory. Report of COST Action 837. UOCHB AVCR, Prague.
- Vargas, W., 2002. Guía ilustrada de las plantas de las montañas del Quindío y los Andes Centrales. Manizales: Universidad de Caldas, Centro editorial.
- Santos, A. B.; Lombera, R. y Benitez, M. J., 2009 New records of *Heliconia* (Heliconiaceae) for the region of Chajul, Southern México, and their potential use in biodiversity-friendly cropping systems. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. no. 80, p. p. 857-860.
- Vymazal., 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Sci.Total Environ.* 380, 48–65.
- Vymazal,J., 2008. Constructed wetlands for wastewater treatment: a review. *The 12th World Lake Conference*: 965-980.
- Zhang, L.-Y., Zhang, L., Liu, Y.-D., Shen, Y.-W., Liu, H., Xiong, Y., 2010. Effect of limited artificial aeration on constructed wetland treatment of domestic wastewater. *Desalination* 250 (3), 915–920.

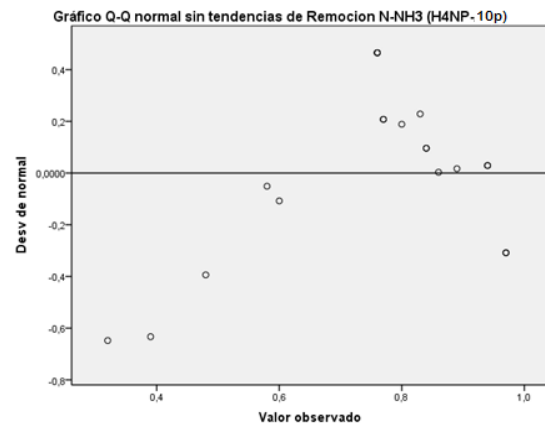
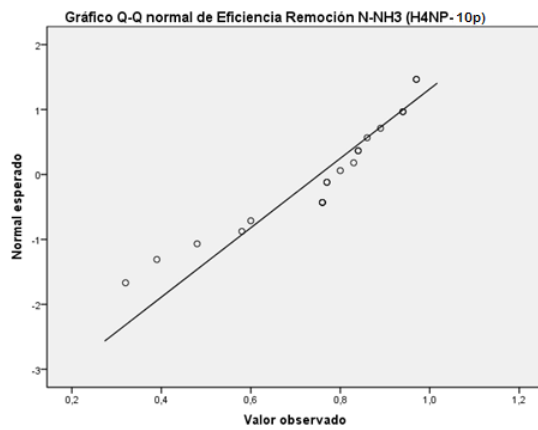
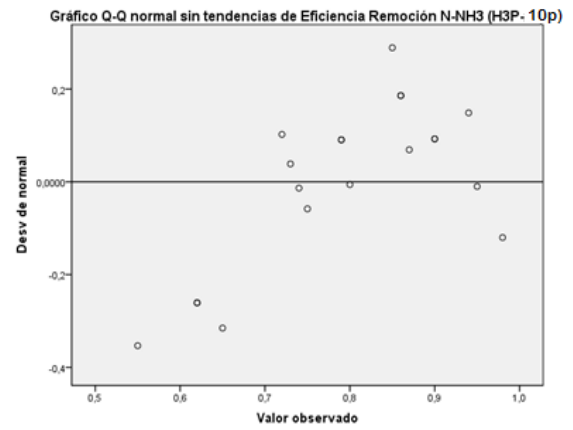
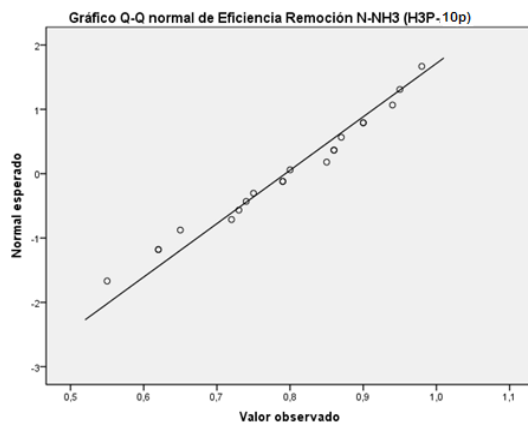
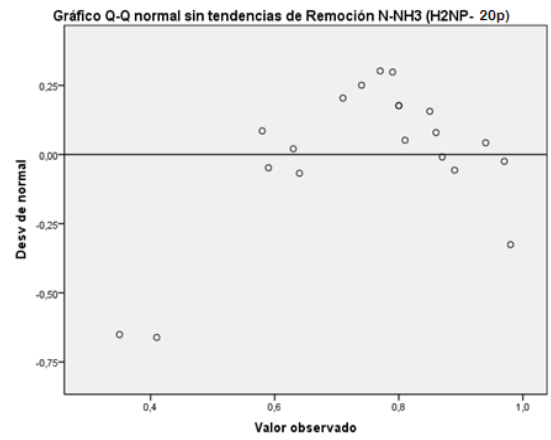
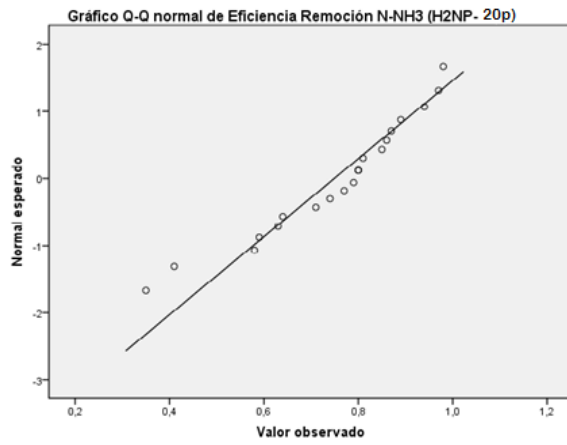
ANEXOS

Anexo 1. Prueba de normalidad: Eficiencia de remoción Nitrógeno Amoniacal

N-NH3	kolmogorov-smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadistico	Grados Libertad	Significancia	Estadistico	Grados Libertad	Significancia
Eficiencia Remoción H1 (P-20p)	,123	20	,200	,95	20	,360
Eficiencia Remoción H2 (NP-20p)	,180	20	,087	,939	20	,231
Eficiencia Remoción H3 (P-10p)	,130	20	,200	,964	20	,617
Eficiencia Remoción H4 (NP-10p)	,264	20	,001	,882	20	,019

Significancia > 0,05 ----- población normal

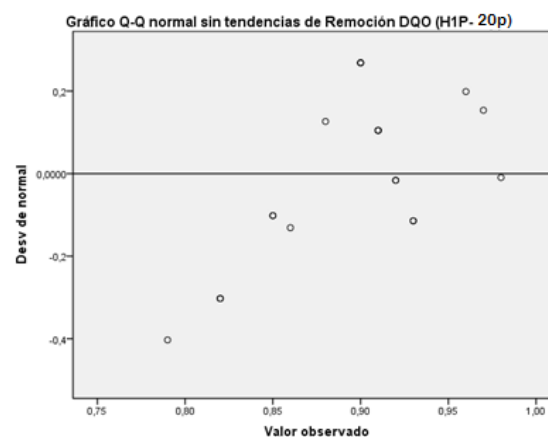
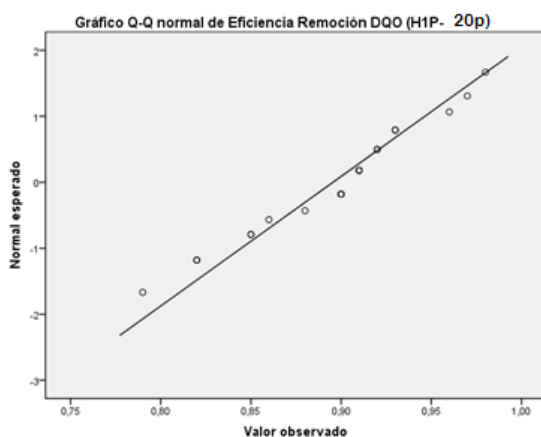


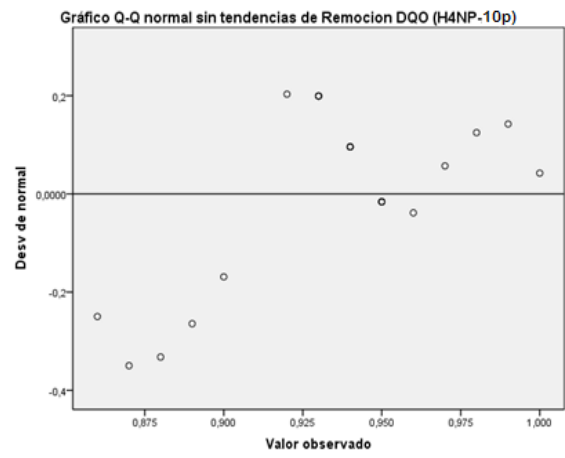
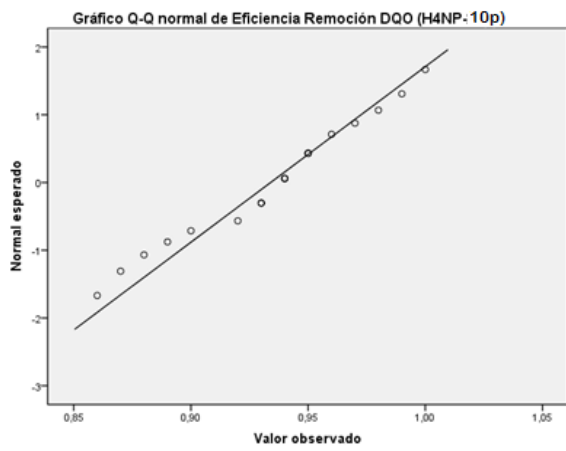
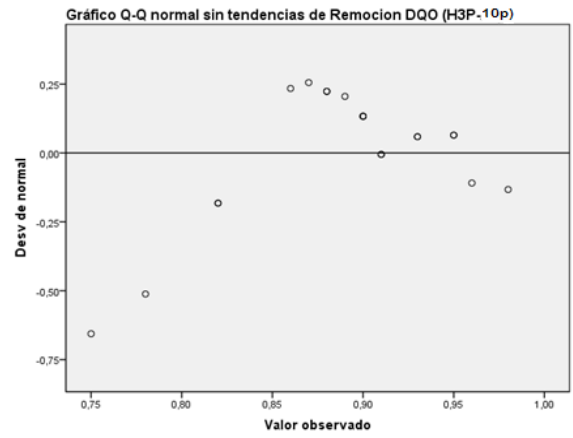
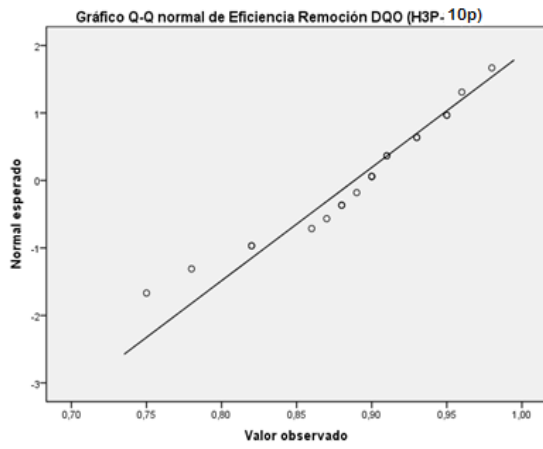
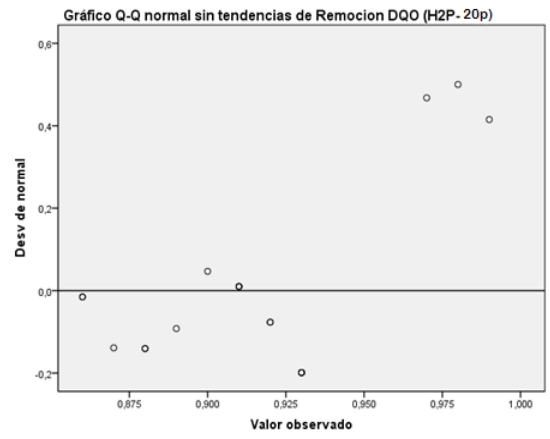
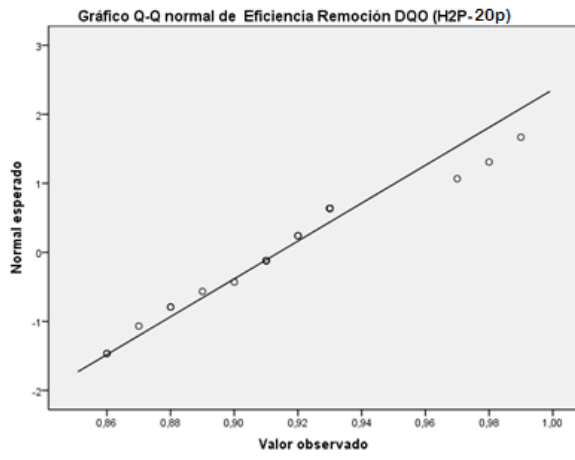


Anexo 2. Prueba de normalidad: Eficiencia de remoción Demanda Química De Oxígeno.

DQO	kolmogorov-smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Grados Libertad	Significancia	Estadístico	Grados Libertad	Significancia
Eficiencia Remoción H1 (P-10p)	,185	20	,071	,96	20	,537
Eficiencia Remoción H2 (NP-10p)	,180	20	,087	,939	20	,231
Eficiencia Remoción H3 (P-20p)	,143	20	,200	,945	20	,302
Eficiencia Remoción H4 (NP-20p)	,159	20	,200	,964	20	,627

Significancia > 0,05 ----- población normal

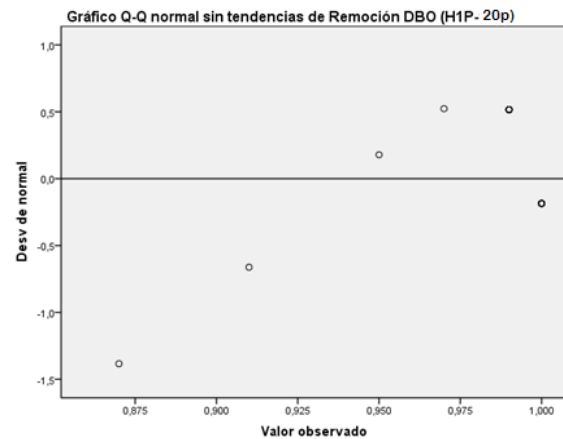
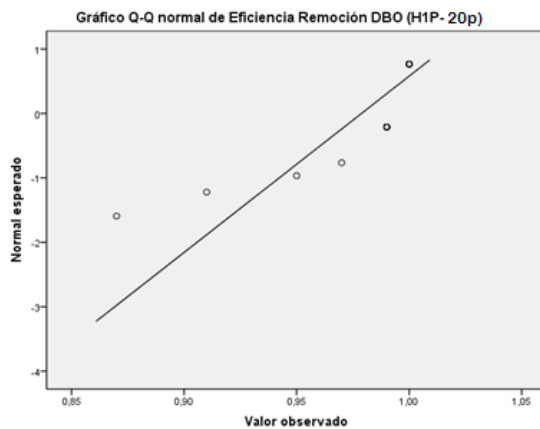


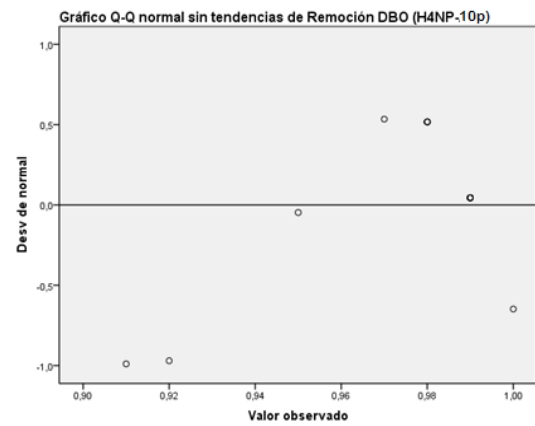
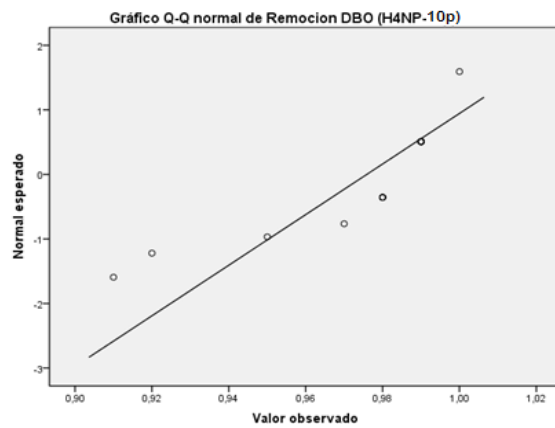
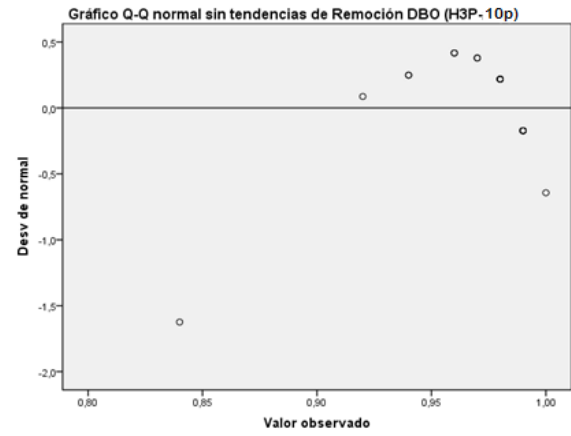
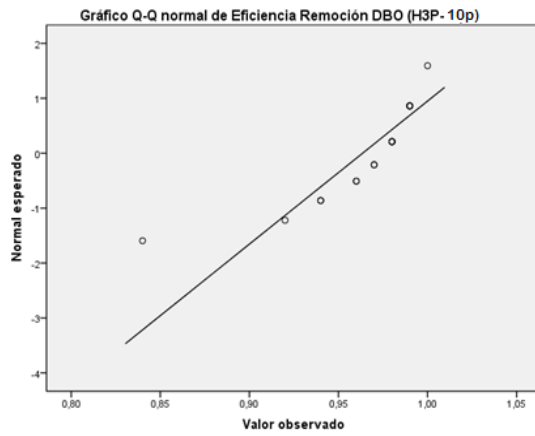
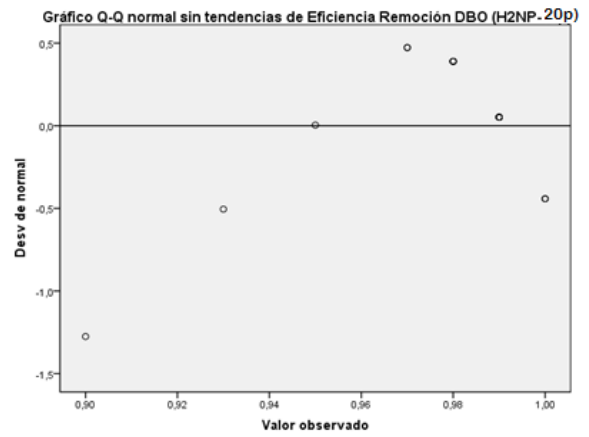
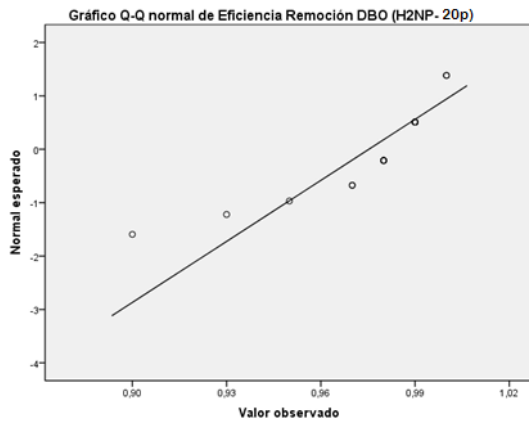


Anexo 3. Prueba de normalidad: Eficiencia de remoción demanda bioquímica de oxígeno.

DBO	kolmogorov-smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Grados Libertad	Significancia	Estadístico	Grados Libertad	Significancia
Eficiencia Remoción H1 (P-20p)	,385	17	,000	,630	17	,000
Eficiencia Remoción H2 (NP-20p)	,277	17	,001	,767	17	,001
Eficiencia Remoción H3 (P-10p)	,228	17	,019	,749	17	,000
Eficiencia Remoción H4 (NP-10p)	,329	17	,000	,702	17	,000

Significancia > 0,05 ----- población normal





Anexo 4. Prueba de normalidad: Eficiencia de remoción Sólidos suspendidos totales.

SST	Kolmogorov-smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Grados Libertad	Significancia	Estadístico	Grados Libertad	Significancia
Eficiencia Remoción H1 (P-20p)	,213	20	,018	,859	20	,007
Eficiencia Remoción H2 (NP-20p)	,191	20	,054	,874	20	,014
Eficiencia Remoción H3 (P-10p)	,133	20	,200	,941	20	,245
Eficiencia Remoción H4 (NP-10p)	,162	20	,175	,935	20	,192

Significancia > 0,05 ----- población normal

