

**ESTANDARIZACIÓN DE LAS CONDICIONES QUE INFLUYEN EN EL
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMESTICA UTILIZANDO LA TÉCNICA
DE HUMEDALES ARTIFICIALES**



NAZLY EFREDIS SÁNCHEZ PEÑA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
MARZO, 2007**

**ESTANDARIZACIÓN DE LAS CONDICIONES QUE INFLUYEN EN EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUAL DOMESTICA UTILIZANDO LA
TÉCNICA DE HUMEDALES ARTIFICIALES**



NAZLY EFREDIS SÁNCHEZ PEÑA

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**DIRECTOR:
MSc JUAN CARLOS CASAS ZAPATA**

**CODIRECTOR:
PhD GUSTAVO ANTONIO PEÑUELA MESA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
MARZO, 2007**

NOTA DE ACEPTACIÓN:

FIRMA DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

POPAYAN, 19 DE ABRIL DE 2007

**“DEDICADO A LAS PERSONAS MAS IMPORTANTES EN MI VIDA,
A QUIENES DEBO MUCHO DE LO QUE HOY HE LOGRADO,
PERO SOBRETUDO A DOS ANGELES QUE DESDE EL CIELO
MOTIVAN CADA MOMENTO DE MI EXISTENCIA E INSPIRARON
CADA UNA DE LAS LINEAS DE ESTE TEXTO”.
A JHON JAIRO Y YUZLY DAMARIS**

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Cauca, en especial la Facultad de Ingeniería Civil por hacer de nosotros personas íntegras, con fundamentos éticos y comprometidos con la ciencia e investigación.

A los profesores del Departamento de ingeniería ambiental de la Universidad del Cauca, por todo el gran aporte que año tras año hacen para lograr en nosotros profesionales íntegros con alto enfoque investigativo.

Al Ing. Juan Carlos Casas, por toda su colaboración recibida en el transcurso de este trabajo de grado.

Al Doctor Gustavo A. Peñuela coordinador del grupo Diagnóstico y control de la contaminación, por creer en mí al darme la oportunidad de hacer parte de su grupo de investigación y por estar dispuesto siempre a colaborar en todos los inconvenientes propios de trabajos de un trabajo de grado.

A la profesora Gloria Maria Mejia mas que compañera de trabajo fué amiga y madre, a ella gracias por enseñarme la mayoría de conocimientos adquiridos en los ocho meses de permanencia en Medellín.

A mis padres, sobrino y mi hermana Yoana Marcela, por la colaboración, apoyo y motivación en cada momento de mi vida.

A Claudio, Carolina Machado, Carolina Domínguez, Blady, Catalina R., Catalina S., Julian, Hernando, Juan Pablo, Paulita, Fernando y demás compañeros de laboratorio de calidad de aguas de la Universidad de Antioquia que con paciencia estuvieron dispuestos a resolver dudas sobre el quehacer investigativo.

A los profesores de la Universidad Politécnica de Cataluña Jordi Morato y Francesc Codony dispuestos igualmente a resolver inquietudes y colaborar en el mejoramiento del diseño de los modelos de humedales.

TABLA DE CONTENIDO

	Pg.
INTRODUCCION	12
2. ANTECEDENTES	14
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
4. MARCO TEÓRICO	21
4.1 GENERALIDAD	22
4.1.1 Definición	22
4.2 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES	22
4.2.1 Humedales Artificiales de Flujo Libre (Surface flow constructed wetlands).	22
4.2.2 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (subsurface flow constructed wetlands)	23
4.2.3 Ventajas y Desventajas Humedales de flujo subsuperficial (H.F.S)	24
4.2.4 Ventajas de los Humedales De Flujo Subsuperficial Respecto A Los De Flujo Superficial.	27
4.3 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.	28
4.3.1 El Agua	28
4.3.2 Vegetación	28
4.3.3 Medio De Soporte	31
4.3.4 Estructura De Entrada Y Salida	32
4.4 MECANISMOS DE REMOCIÓN	33
4.4.1 Eliminación de la Materia Orgánica e Inorgánica	33
4.4.2 Eliminación de Nitrógeno	35
4.4.3 Eliminación de Fósforo	36
4.4.4 Eliminación de Metales	36
4.4.5 Eliminación de Coliformes Fecales	36
5. OBJETIVO GENERAL	38
5.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	38
6. METODOLOGIA.	39
6.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	39
6.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL A ESCALA PILOTO	39
6.2.1 Montaje Final de los Humedales	41
6.2.2 Dispositivos De Entrada y Salida	42

6.3 CALCULO DEL CAUDAL PARA LOS HUMEDALES	43
6.4 PREPARACION DEL AGUA RESIDUAL SINTETICA	44
6.5 COSECHADO DE PLANTAS Y SOSTENIMIENTO DE MICROORGAN.	44
6.6 ESTUDIO EXPERIMENTAL	46
6.6.1 Descripcion de Las Campañas experimentales y puntos de muestreo	46
6.6.2 Parámetros Analizados	47
6.6.3 Análisis de Muestras	48
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
7.1 CALIDAD DE AFLUENTE Y EFLUENTE	53
7.2 ESTUDIO DE LOS DIFERENTES PARAMETROS ANALIZADOS	56
7.2.1 pH	56
7.2.2 Conductividad	58
7.2.3 Temperatura	60
7.2.4 DBO ₅	61
7.2.5 COT	65
7.2.6 Sólidos Totales	67
7.2.7 Fósforo Total (PT) Y Fósforo Soluble (PO ₄ ³⁻)	68
8. CONCLUSIONES	73
9. RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFIA	77
ANEXOS	82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características más comunes de las plantas emergentes usadas en los humedales artificiales.	30
Tabla 2 Penetración De Las Raíces De Las Plantas Emergentes.....	31
Tabla 3 Características Usuales del Medio para los Humedales De Flujo Subsuperficial	32
Tabla 4 Combinaciones en los Humedales Piloto de Flujo Subsuperficial	39
Tabla 5. Caudal Calculado Para Cada Tipo de Humedal	43
Tabla 6. Componentes Agua Residual Sintética	44
Tabla 7. Parámetros Medidos.....	47
Tabla 8. Resultados Afluente	52
Tabla 9. Resultados Humedal Tipo A.....	53
Tabla 10. Resultados Humedal Tipo B.....	54
Tabla 11. Resultados Humedal Tipo C.....	54
Tabla 12. Resultados Humedal Tipo D.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Tipos de Humedales</i>	23
Figura 2. <i>Componentes del Humedal</i>	31
Figura 3. <i>Vista en perfil del Montaje para el Funcionamiento de los Humedales</i>	41
Figura 4. <i>Esquema del tratamiento y montaje final de los humedales piloto</i>	42
Figura 5. <i>Distribución espacial de puntos de muestreo</i>	47
Figura 6. <i>Valores de pH entrada y salida de los humedales</i>	56
Figura 7. <i>Valores de conductividad entrada y salida de los humedales</i>	59
Figura 8. <i>Valores de temperatura entrada y salida de los humedales</i>	60
Figura 9. <i>Evolución en la remoción de materia orgánica medida como DBO5</i>	62
Figura 10. <i>Evolución en la remoción de materia orgánica medida como COT</i>	66
Figura 11. <i>Evolución en la remoción de materia orgánica en términos de ST</i>	67
Figura 12. <i>Evolución en la remoción de nutrientes PO_4^{3-}</i>	69
Figura 13. <i>Evolución en la remoción de nutrientes PT</i>	69

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. REGISTRO FOTOGRAFICO.....	83
ANEXO B. CALCULO DE LA POROSIDAD.....	89
ANEXO C. CÁLCULO DEL CAUDAL.....	90
ANEXO D. RESULTADOS MUESTREO DE MICROORGANISMOS.....	92
ANEXO E. ANALISIS ESTADISTICO.....	94

INTRODUCCION

El recurso hídrico es de vital importancia para todos los seres vivos, sin el estos no podrían subsistir, el contacto directo entre el agua y el hombre es una practica inevitable pero, así como el agua es fuente de vida también puede llegar a ser un vehiculo de enfermedades, debido a la descarga de contaminantes en los cursos naturales de agua. Lo que obliga a encontrar métodos de depuración eficaces.

Atendiendo a esta necesidad surgen diferentes alternativas de depuración de aguas utilizando medios anaerobios o aerobios dependiendo las características del afluente, pero las grandes inversiones requeridas en plantas de tratamiento convencionales para depurarlas, ha sido uno de los principales inconvenientes para dar solución satisfactoria a este problema, de esta forma surge la idea de estudiar mecanismos naturales y sobretodo económicos para depurar agua residual por medio de filtros biológicos (humedales artificiales).

Los humedales artificiales consisten normalmente en unos tanques con policultivo o monocultivo de plantas acuáticas emergentes o flotantes, en donde por medio de consorcios de microorganismos se logra la remoción de los contaminantes. Aun existe a nivel mundial un conocimiento limitado sobre humedales artificiales sobre todo en condiciones del trópico, y teniendo en cuenta el sinnúmero de procesos involucrados en los humedales construidos, en países como Colombia el conocimiento sobre la tecnología es aun más escaso y se ha limitado a ciertas experiencias aisladas (Higuera F, 2005).

Con el presente trabajo se pretende construir, dar inicio y determinar la madurez de humedales subsuperficiales piloto, con los cuales se continuarán realizando trabajos de investigación con estudiantes de maestría y doctorado. Se han

construido cuatro humedales subsuperficiales, los cuales tienen diferente profundidad y diámetro de grava. Esto con el fin de determinar su influencia en el grado de remoción de los contaminantes.

En el presente trabajo se hizo el estudio con agua sintética, sin la presencia de algún contaminante tóxico y recalcitrante, pero inmediatamente se continuará con el estudio de estos contaminantes.

Con el agua sintética, que tienen sustratos favorables al metabolismo de los microorganismos, se pretende facilitar la visualización de la influencia de la profundidad y diámetro de la grava en la remoción de los compuestos orgánicos.

2. ANTECEDENTES

El manejo de residuos líquidos se remonta a la antigüedad cuando en ciudades prehistóricas como Creta se construyó sistemas de drenaje de los residuos líquidos para conducirlos a zonas lejanas de los centros habitados, desde esta época ya se tenían las primeras nociones sobre la necesidad de saneamiento básico. Hacia finales de la edad media empezaron a usarse en Europa, lo que en futuro se denominaría letrina o pozo excavado en donde se depositaban los residuos líquidos y periódicamente se vaciaban utilizando tales desechos como fertilizantes en granjas cercanas (OMS, 1996).

Posteriormente para el siglo XIX, llegaron los sistemas de drenaje de aguas residuales y con estos los primeros sistemas de alcantarillado modernos. Un sistema de este tipo fue desarrollado por Joseph Bazalgette entre 1859 y 1875 con el objetivo de desviar aguas lluvias y aguas residuales hacia la parte baja del Támesis, en Londres.

Para el siglo XX, se empezó a tomar conciencia que el vertido de residuos líquidos directamente a los ríos y quebradas generaba problemas de salud pública, se incentivo la investigación en depuración de aguas residuales y como resultado se construyeron plantas de tratamiento de agua residuales domésticas, utilizando la técnica del filtro de goteo. Durante la segunda década del siglo se desarrollo el proceso de lodos activados en gran Bretaña, por cuanto se empezó a utilizar en muchas localidades del mismo y actualmente es altamente utilizado en todo el mundo a pesar de la energía requerida para mover el proceso y los altos costos de aplicación.

La sistematización de información acerca de los humedales artificiales se remonta hacia mediados del siglo XX, no obstante el concepto es antiguo, pues se tiene conocimiento de que algunas culturas como la China y la Egipcia, utilizaban los humedales naturales para la disposición de aguas residuales (Rodríguez, 2003).

El uso de humedales artificiales para tratar agua residual data de mediados del siglo pasado, esta tecnología se implemento a raíz de los óptimos resultados obtenidos de los humedales naturales, al observar su capacidad depuradora, concebidos en aquella época y hoy en día como los mejores receptores de aguas servidas. En 1971 se inició el estudio de un humedal natural al que se vertía un efluente secundario con el objetivo de evitar la eutrofización de un lago situado aguas abajo (Houghton Lake, Michigan) (García, 2004).

A partir de 1972 se empezaron a estudiar otros humedales construidos de flujo superficial en Florida, Michigan y California. Todos estos humedales trataban efluentes secundarios (García, 2004). Al determinar el papel purificador desarrollado por los humedales naturales hacia la cuarta década del siglo XX Dra. Kathe Seidel realizo el primer reporte científico en donde señala la gran posibilidad que tienen las plantas emergentes en la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales, este estudio se realizo en Max Planck Institute System (MPIS). En el informe de sus investigaciones ella plantea que mediante el empleo del junco común (*Schoenoplectus Lacustris*) era posible la remoción de una serie de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas como también la remoción de una serie de bacterias presentes en el agua residual (Rodríguez, 2003).

A partir de entonces y durante dos décadas Seidel desarrollo el sistema de tratamiento de flujo subsuperficial relleno de arcilla. Durante las siguientes dos

décadas Seidel trabajo con Kickuth y desarrollaron un sistema que se llamo método de zona de raíces o root zone methods, que consistió en el diseño de tanques rectangulares con un lecho de suelo específico en los que sembraban *Phragmites Australis* y el flujo de agua residual era subsuperficial horizontal.

En principio se pensó utilizar los humedales naturales para depurar aguas residuales pero se encontró que ocurrían cambios en las especies comunes de estos sitios por lo que se decidió comenzar a diseñar humedales construidos a escala real para tratar el agua residual.

El primer estudio de un humedal construido de flujo subsuperficial a escala real se realizó en 1974 en Wolverton, Mississippi. En Europa, el primer humedal de flujo subsuperficial a escala real se construyó en Othfresen (Alemania) en 1974. Este humedal al día de hoy sigue operando y trata agua residual doméstica. Fue diseñado siguiendo el modelo del Instituto Max Plank. (Vymazal, 2005).

En Inglaterra el interés por los humedales se inició en 1985 cuando un grupo de investigadores del *Water Research Center* (Swindon) visitó Alemania para documentar las experiencias de Seidel y Kickuth. Como resultado de la visita, se construyeron múltiples instalaciones y como novedad se dotó de pendiente el fondo de los humedales (García, 2004).

Hasta casi finales de los 80 se comprendió que no se podía utilizar como sustrato el propio suelo, a no ser que se garantizara una conductividad hidráulica adecuada y permanente (Brix, 1994).

A finales del año 1980 apareció el primer manual con criterios de diseño y constructivos (USEPA, 1988) y se realizó el primer simposio internacional sobre la tecnología en Chattanooga (EEUU), que se sigue repitiendo cada dos años (Hammer, 1989). También se creó el grupo especializado en humedales de la International Water Association. Según (Morato, 2005), desde entonces han aparecido excelentes manuales científicos y técnicos, y capítulos de libros que han ido recopilando el conocimiento y el estado del arte de la tecnología, como por ejemplo: WPCF (1990), US EPA (1993), Reed et al. (1995), Wissing y Hofmann (1995), Kadlec y Knight (1996), Cooper et al. (1996), Vymazal et al. (1998), Campbell y Ogden (1999), Kadlec et al. (2000), USEPA (2000) y Días (2003). (García, 2004) Según estudios recientes, los humedales artificiales sirven para mejorar la calidad del agua a tratar: aguas residuales domésticas (Healy and Cawley, 2002), drenajes de minas de carbón (Perry and Kleinmann, 1991), efluentes urbanos (Mallin et al., 2002), aguas residuales procedentes de la acuicultura (Lin et al., 2002; Tilley et al., 2002) y drenajes de la agricultura (Peeverly, 1982; Kovacic et al., 2000; Moore et al., 2001), ejemplos citados por (Kloer et al., 2004).

En Sur América la investigación se realizó inicialmente en Brasil al considerar la construcción de humedales artificiales en estanques con jacinto de agua, la información sobre el uso de humedales construidos en América Latina es limitado, de todas maneras al parecer existen humedales en funcionamiento en Brasil, Ecuador, Uruguay, Argentina y con seguridad en Colombia además de otros países centroamericanos.

Específicamente sobre parámetros de diseño como profundidad de agua y tamaño de grava se han realizado algunos experimentos como La construcción de humedales de flujo subsuperficial en las Franqueses de Valles España (Morato, 2004), en donde evaluaron diferentes tamaños de grava, profundidades de agua y

diferentes relaciones largo/ancho en los lechos, por un periodo de 3 años, los resultados indicaron que la altura de agua es un factor determinante en el rendimiento de los humedales de flujo subsuperficial. El lecho con profundidad menor y con grava fina produjo un efluente de mejor calidad que aquellos con grava gruesa, aunque el tamaño de grava no resulto ser un parámetro tan determinante como si lo fué la profundidad de agua (García, 2004).

La literatura reporta estudios con *Phragmites Australis*, y otras plantas (Vymazal,2005 Kallner;2005),que han permitido reconocer el aporte de materia orgánica de estas para el soporte de los organismos heterótrofos, esta relación se ha estudiado extensamente en Europa para lograr la remoción de carga orgánica en aguas residuales domesticas.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad miles de personas mueren anualmente por contacto directo con agua contaminada, una de las principales causas de la contaminación del agua es el vertido de efluentes residuales. Se considera que en países como Colombia el 95% de las aguas residuales son destinadas en los cauces sin tratamiento previo, los cuales a su vez son fuente de abastecimiento de agua para las comunidades. Este problema se incrementa si consideramos que la demanda de agua potable aumenta dado la creciente densidad poblacional y la industrialización.

En países en vía de desarrollo que no cuentan en sus zonas rurales, industriales y urbanas con sistemas de depuración de aguas residuales y por consiguiente vierten sus residuos a cuerpos receptores de agua, deben buscar soluciones para resolver el problema de abastecimiento de agua potable. Los humedales artificiales se convierten por tanto en una solución viable cuando de depuración de aguas residuales se trata, dado las grandes ventajas sobre los sistemas convencionales sobre todo en países en vía de desarrollo ya que por ser un sistema natural sus costos de construcción y mantenimiento son bajos (EPA, 2000).

Aun así, los humedales han sido estudiados en países estacionales con climas fríos, pero en el caso concreto de países que cuentan con clima tropical como Colombia, se hace necesario realizar estudios que tiendan a determinar parámetros óptimos y condiciones de los humedales artificiales a nivel del trópico para adecuar los modelos a condiciones locales.

En solución al anterior problema se desarrolla este trabajo de grado que tiene como principal pregunta:

¿Cuáles son los parámetros de diseño óptimos a aplicar en humedales artificiales de flujo subsuperficial para tratar agua residual domestica, en cuanto a profundidad de la lámina de agua y diámetro de grava, por medio de los cuales se obtenga la mayor remoción de materia orgánica y nutrientes?.

4. MARCO TEÓRICO

Según el Convenio de Ramsar sobre humedales (artículo 1.1), se definen como: «Extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros» (Ramsar Convention, 1971). Por su parte se definen los humedales artificiales como todos aquellos creados por el ser humano, pero que reúnen características ecológicas de rareza, peculiaridad, biodiversidad, refugio de especies o comunidades ecológicas, mantenimiento de etapas críticas del ciclo biológico de especies silvestres, sitios de descanso, alimentación y/o reproducción de especies y en otros casos depurador de aguas (Ramsar Convention, 1971).

El convenio Ramsar da una definición de humedal artificial muy general, aquí se incluyen aquellos humedales creados para restauración ecológica y otros usos, igualmente dentro de la definición como complemento también manifiestan que los humedales son utilizados para la depuración de agua residual, este es el uso más común dado a los humedales y que interesa en este trabajo, por lo tanto en adelante cuando el presente documento se refiera a humedales artificiales lo hará exclusivamente para referirse a aquellos construidos con el propósito de depurar agua residual.

Dentro de los usos más comunes dados a los humedales construidos se encuentran

- Para mejorar la biodiversidad del país.
- Mejorar las características ecológicas de las zonas

- Como mecanismo compensatorio por humedales naturales perdidos
- Para **depurar aguas residuales**, en sumatoria de origen doméstico aunque se ha utilizado para tratar aguas residuales industriales como las generadas en industria papelera, productos químicos, farmacéuticos entre otras.

4.1. GENERALIDAD

4.1.1. Definición: Zonas húmedas (micrófitos acuáticos) y en los que los procesos de descontaminación son ejecutados simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos (García, 2004), los humedales artificiales utilizan plantas acuáticas y animales para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Los sistemas de tratamiento acuático cubren un rango amplio de tipos de sistemas dentro de los que incluyen una variedad de sistemas de humedales artificiales (Tchobanoglous, 2000).

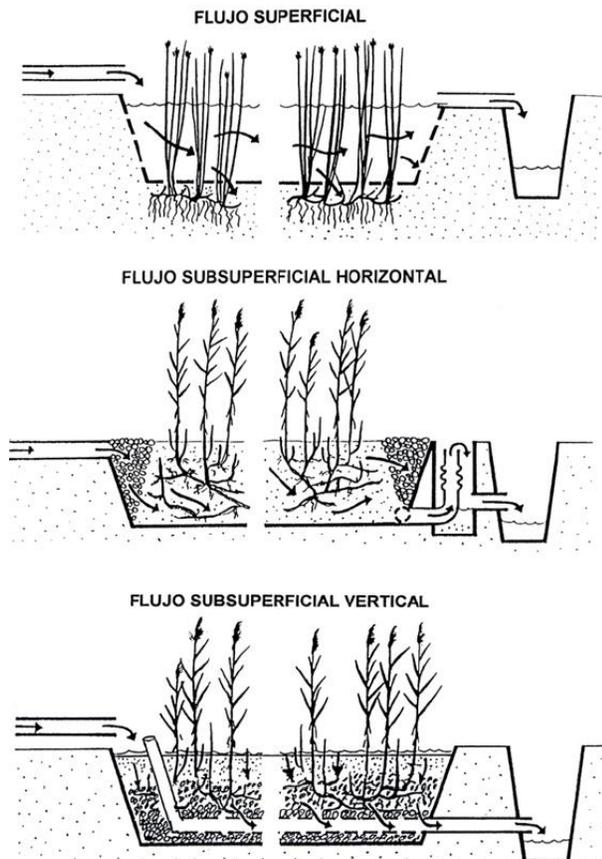
4.2. TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Los principales tipos humedales artificiales son humedales artificiales de flujo superficial (HFL) y humedales artificiales de flujo subsuperficial (HFS) (Ver figura Nro. 1) atendiendo al recorrido del agua, existen otros tipos como sistemas combinados hoy en día poco explorados.

4.2.1. Humedales Artificiales de Flujo Libre (Surface flow constructed wetlands). Es el modelo de humedal más similar al humedal natural, en este tipo de humedal el agua fluye en contacto con la atmósfera a lo largo del lecho, en donde el agua residual por contacto con plantas flotantes, macrófitas emergentes y microorganismos se obtiene la remoción de contaminantes. Básicamente son constituidos por canales estrechos e impermeables de gran longitud, con

profundidades relativamente pequeñas que permiten el paso de agua a bajas velocidades.

Figura 1: Tipos de Humedales



4.2.2. Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (subsurface flow constructed wetlands). (FSS, *subsurface flow wetlands*) está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado (EPA, 2000). Los humedales artificiales de flujo subsuperficial están constituidos por canales con un lecho filtrante a través del

cual se hace pasar el caudal residual sin que la altura de agua sobrepase la superficie del material de relleno que puedes grava utilizada de diferentes tamaños o sustrato, en estos lechos se ubican las plantas emergentes.

Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican a su vez en humedales subsuperficiales de flujo horizontal y vertical (Ver figura Nro. 1), el primero usualmente utiliza tuberías perforadas ubicadas en la entrada del humedal garantizando una entrada de flujo uniforme a lo ancho del lecho y por tanto un acercamiento al flujo pistón. En los humedales de flujo subsuperficial vertical, la entrada del agua se da usualmente en la parte superior del lecho utilizando un flujo intermitente de agua que consiste en inundar la superficie esperar un tiempo y posteriormente vaciar el lecho. En recientes estudios estos últimos humedales han presentado eficiencias altas dado que el oxígeno captado por el afluente y con altos tiempos de retención resultan ser adecuados para depurar los lotes de agua residual alternando condiciones aeróbicas (durante el drenaje) y anaeróbicas (en la inundación).

El presente trabajo de grado enfoca su estudio hacia los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, por lo tanto en adelante se adentrará en ellos.

4.2.3. Ventajas y Desventajas Humedales de flujo subsuperficial (H.F.S). A continuación se enumeran algunas de las ventajas y desventajas de los H.FS (según la EPA, 2000):

Ventajas

- Los HFS proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados.

- Los HFS pueden ser menos costosos de construir, y usualmente también son menos costosos para operar y mantener, que los procesos mecánicos.
- La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos.
- La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semicálidos.
- Los sistemas de HFS no producen biosólidos, ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.
- Los HFS son muy efectivos en la remoción de la DBO, la DQO, los SST, los metales y algunos compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles es también posible pero se requiere un tiempo de retención mucho mayor.
- Los mosquitos y otros insectos vectores similares no son un problema con los HFS mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial de flujo se mantenga. También se elimina el riesgo de que niños y mascotas estén expuestos al agua residual parcialmente tratada.

Desventajas

- Un HFS requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.

- La remoción de DBO, DQO y nitrógeno en los HFS es un proceso continuo renovable. El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
- En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, NH_3 y NO_3^- . Un aumento en el tiempo de retención puede compensar por la disminución de las tasas pero el incremento en el tamaño de los humedales en climas extremadamente fríos puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico, problema tal que no se presenta en climas tropicales.
- La mayoría del agua contenida en los HFS es anóxica, limitando el potencial de nitrificación del amoníaco del agua residual. El aumento del tamaño del humedal y el tiempo de retención puede hacerse como compensación, pero puede no ser eficiente en términos económicos. Métodos alternos de nitrificación en combinación con los HFS han sido utilizados con éxito. Los humedales FS no pueden ser diseñados para lograr una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias coliformes. Los ciclos ecológicos en estos humedales producen concentraciones naturales de esos compuestos en el efluente.
- Los sistemas de HFS típicamente reducen al menos un orden de magnitud el contenido de coliformes fecales. Esto no es siempre suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección subsiguiente. La desinfección con luz ultravioleta ha sido utilizada con éxito en varias aplicaciones.

- Si bien los humedales FS pueden ser de menor superficie que los humedales HFL para la remoción de la mayoría de los constituyentes del agua residual, el costo mayor del medio de grava en los humedales HFS puede dar como resultado costos de construcción más altos para sistemas con una capacidad mayor a 227,000 litros por día.

4.2.4. Ventajas de los Humedales De Flujo Subsuperficial Respecto A Los De Flujo Superficial. Las principales ventajas de los humedales de flujo subsuperficial respecto a los de flujo superficial son (Según García, 2004):

- Menor incidencia de malos olores debido a la naturaleza subterránea del flujo. Esta ventaja es relativa ya que los sistemas de flujo superficial se suelen aplicar para mejorar la calidad de efluentes secundarios, con lo que ya reciben aguas bastante tratadas, con bajo potencial para la emisión de malos olores.
- Bajo riesgo de exposición directa de las personas y de aparición de insectos gracias también al flujo subterráneo. El control de insectos puede llegar a ser una actividad costosa en sistemas con flujo superficial.
- Protección térmica debida a la acumulación de restos vegetales y del flujo subterráneo que reduce la posible estratificación térmica del agua y evita flujos preferenciales. Esta es una ventaja interesante en los países nórdicos, donde la cobertura de hielo y nieve invernal no afectan de esta forma al proceso. También evita la aparición de gradientes térmicos acusados. Por ejemplo, en un humedal sin plantas ni restos vegetales el gradiente térmico medido en verano ha sido de hasta 12 °C/m, mientras que en un humedal con plantas (1800 g/m² de biomasa aérea expresada en peso seco) y restos vegetales (310 g/m²) ha sido de 3,4 °C/m (García *et al.*, 2003).

4.3 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.

4.3.1. El Agua. Es uno de los componentes más importantes dentro de los humedales artificiales es el agua residual que fluye a través del lecho, incluso la hidrología es el factor de diseño mas importante en un humedal construido porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor de éxito o fracaso de los humedales (Lara, 1999). Dependiendo de las características del agua residual igualmente se elige la aplicabilidad del sistema, además se determinan parámetros de diseño importantes.

4.3.2. Vegetación. Para el tratamiento de agua residual utilizando humedales artificiales de flujo subsuperficial se utilizan plantas propias de zonas húmedas. Estas macrófitas acuáticas originan un importante gradiente de luz, viento y temperatura desde el suelo hasta el límite superior de dicha vegetación, disminuyendo la velocidad del viento, la luz, y amortiguando los cambios de temperatura permitiendo temperaturas más cálidas en invierno y más frías en verano (Brix, 1994).

La vegetación igualmente provee de oxígeno la zona radicular actuando como soporte a diferentes microorganismos aerobios, también sirve de obstáculo al paso del agua, lo que ocasiona disminución en la velocidad favoreciendo la sedimentación de partículas. La parte de la vegetación ubicada por encima del suelo no es de gran utilidad, salvo porque allí hay toma de nutrientes y crecimiento vegetal.

Una de las mayores controversias en el tema de humedales artificiales es precisamente el papel de la vegetación en la depuración de agua residual (Brix,1994; García, 2004; Kadlec & Knight,1996), algunos autores afirman que la

cantidad de oxígeno aportada por transferencia directa desde la atmósfera es más importante que el aporte convectivo realizado por las plantas, pues si bien éstas presentan realmente capacidad para el transporte de oxígeno, la mayor parte del mismo lo utilizan para consumo propio (Brix, 1994).

Algunos manuales consideran las plantas solamente como adornos, aun así las evidencias confirman que la eliminación de contaminantes en HFS plantados es mayor que en sistemas sin plantar (Hammer, 1989). En general las plantas mejoran el rendimiento del proceso, aunque sus resultados no sean casi siempre estadísticamente diferentes del obtenido en sistemas paralelos sin plantar (Bécares, 2004).

La vegetación en los sistemas de flujo subsuperficial es similar que en los humedales de flujo libre y tienden a estar compuesta por juncos y carrizos, las características de estas plantas se reúnen en la tabla 1.

- Liberación de sustancias por la raíz. Las plantas liberan diversos compuestos orgánicos a través de sus raíces y hojas, algunos con propiedades alelopáticas que evitan el crecimiento de otras especies, (Wium-Andersen *et al*, 1982,) citado por (Bécares, 2004), así como una gran variedad de compuestos con diferentes propiedades (Dellagrecia *et al.*, 2001). Estos compuestos orgánicos liberados por las plantas suponen entre el 5 y el 25% del carbono fijado fotosintéticamente, y podrían actuar como fuente de carbono para bacterias desnitrificantes u otros microorganismos de la rizosfera, influyendo sobre la estructura de las comunidades microbianas que en ella se desarrollan (Kadlec *et al.*, 2000). También se ha descrito en algunos estudios la posible liberación de sustancias antibióticas por parte de las raíces (Becares, 2004).

Tabla 1. Características más comunes de las plantas emergentes usadas en los humedales artificiales.

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTIFICO	TEMPERATURA (Grados Centígrados)		RANGO DE Ph PARA EFECTIVIDAD	TOLERANCIA MAXIMA DE SALINIDAD (ppm)
		DESEABLE	GERMINACION DE SEMILLAS		
totorá, junco	<i>Scirpus spp.</i>	16-27		04-Sep	20
Enea, enoe	<i>Typha Latifolia</i>	Oct-30	Dic-24	04-Oct	30
Punta de flecha	<i>Sagittaria latifolia</i>				
Carrizo	<i>Phragmites Australis</i>	Dic-23	Oct-30	02-Ago	45
Junco	<i>Juncos spp.</i>	16-26		5-7.5	20
Juncia	<i>Carex spp.</i>	14-32		5-7.5	
Yellow flag	<i>Iris pseudacorus</i>				

Fuente: Stephenson et al. (1980)

Nota: ppm = pares por mil.

- Generalidades de la planta *phragmites australis*. En general la especie pertenece al género de las gramíneas, es una planta herbácea con tallos redondeados generalmente huecos, con las hojas en dos hileras alternas de venas paralelas y compuestas de dos partes:
 - La vaina de forma tubular, abierta por los lados.
 - La lámina, generalmente en forma de cinta plana, doblada o con las márgenes enrolladas.

La raíz, tallo y hojas constituyen órganos vegetativos de la planta, su flor se reduce a órganos esenciales.

En la presente investigación se utilizó el carrizo común o *Phragmites Australis*, esta macrófita crece desarrollando un denso enlace de rizomas de altas profundidades (Ver tabla 2) y raíces que atraviesan en sentido vertical y

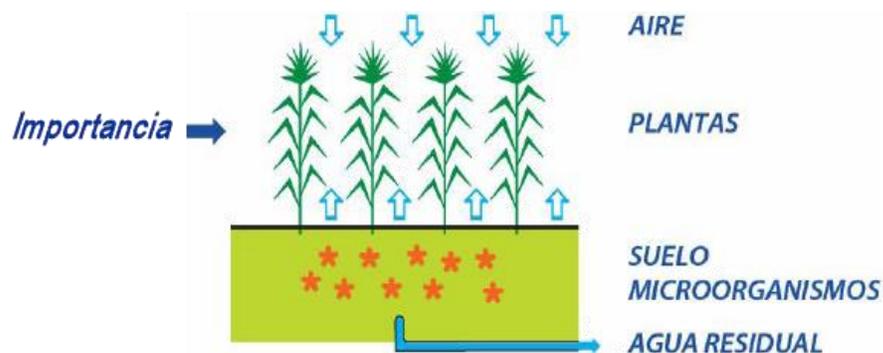
horizontal el medio de crecimiento favoreciendo transferencia de oxígeno y contribuyendo a determinar las características hidráulicas del lecho indispensable para obtener el flujo subsuperficial del sistema.

Tabla 2 Penetración De Las Raíces De Las Plantas Emergentes

Plantas emergentes	Penetración de las raíces en el medio (cm)
<i>Scirpus</i>	76
<i>Phragmites</i>	>60
<i>Typha</i>	30

Presenta una alta capacidad de transferir oxígeno desde la atmósfera hasta las partes sumergidas (Ver figura Nro. 2), el que es absorbido por las hojas y estelas, siendo transferido y dejado libre por la rizósfera. Se estima que las macrófitas pueden transferir desde 5 a 45 grO₂/dia/m² de superficie húmeda. (Tanner y Kadlec, 2003, citado por García, 2004).

Figura 2. Componentes del Humedal



4.3.3. Medio De Soporte. El medio que se utiliza en los humedales de flujo subsuperficial es con frecuencia grava. El tamaño de grava oscila entre 0.12 y 1.25 pulgadas (3 a 32 mm)(Ver tabla 3) , y en la zona de la entrada es de 2

pulgadas de largo. La zona de entrada debe tener un medio de diámetro más grande para disminuir el potencial de obstrucción (Tchobanoglous, 2000).

Tabla 3 Características Usuales del Medio para los Humedales De Flujo Subsuperficial

Tipo de medio	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Porosidad (n)	Conductividad hidráulica (ks)($m^3 m^{-2} d$)
Arena gruesa	2	28-32	100-1000
Arena gravosa	8	30-35	500-5000
Grava fina	16	35-38	1000-10 000
Grava media	32	36-40	10 000-50 000
Roca gruesa	128	38-45	50 000-250 000

Fuente: Tchobanoglous 2000

- Profundidad Del Medio. La profundidad del medio puede variar, de entre 0.5m a 1m, dependiendo de la profundidad de enraizamiento de la planta a utilizar (Tabla 2), para obtener profundidades de enraizamiento mayores la profundidad del agua debe reducirse sistemáticamente durante varias estaciones de crecimiento para obligar a las raíces a penetrar con más profundidad (Tchobanoglous, 2000). El nivel de agua se debe mantener de entre 5 a 10 cm por debajo de la parte superior de la grava.

4.3.4. Estructura De Entrada Y Salida. El sistema de entrada debe estar diseñado de manera que el flujo fluya uniformemente distribuido a lo largo de la zona de entrada. El equipo característico que se utiliza para la distribución de afluente consta de tuberías de entrada, tuberías perforadas, o vertederos en V.

El equipo de salida consta de tuberías perforadas y sumergidas en el fondo del lecho con válvulas o tuberías de salida de nivel ajustable para controlar la profundidad de agua. (Tchobanoglous, 2000)

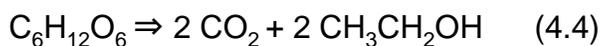
4.4. MECANISMOS DE REMOCIÓN

4.4.1. Eliminación de la Materia Orgánica e Inorgánica. La materia orgánica presente en el agua residual se puede clasificar en particulada y disuelta. La materia orgánica asociada a la materia en suspensión quedará retenida dentro del humedal construido por la disminución de la velocidad del agua y la amortización que proporciona el sistema radicular de la planta y el medio granular. Así habrá una reducción de la DBO asociada a los sólidos retenidos. La degradación de la materia orgánica disuelta se produce por la presencia de los microorganismos que forman la biopelícula sobre la raíz de las plantas y el material granular. En este sentido se asume que los compuestos orgánicos son degradados de forma simultánea mediante procesos aeróbicos y anaerobios, aunque resulta difícil cuantificar la proporción en que se producen cada uno de ellos. La degradación aeróbica de materia orgánica disuelta se produce por la acción de las bacterias aeróbicas heterótrofas. Un aporte insuficiente de oxígeno hace decaer rápidamente el crecimiento de este grupo de bacterias. La reacción genérica que tiene lugar es la mostrada en la ecuación (4.1):



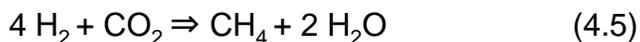
La degradación anaeróbica se produce en varias etapas y en las zonas de humedal donde hay ausencia de oxígeno disuelto. El proceso es realizado por bacterias heterótrofas de tipo anaeróbico estricto o facultativo. En la primera etapa

las moléculas complejas se transforman por fermentación en compuestos sencillos intermedios como ácido acético (4.2), ácido láctico (4.3), etanol (4.4) y gases como el CO₂ y el H₂.

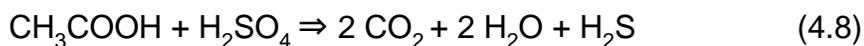


En una segunda etapa otros grupos de bacterias degradan los productos intermedios. En función del sustrato existente se pueden dar varios procesos, los más importantes son:

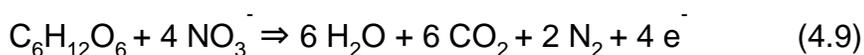
a) Metanogénesis:



b) Sulfatoreducción:



c) Desnitrificación:



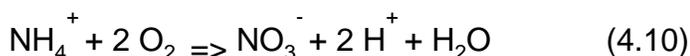
Las bacterias aeróbicas obtienen con un mismo sustrato más energía que las bacterias anaeróbicas, de ahí que éstas sean más eficientes. El oxígeno necesario

para llevar cabo la respiración aeróbica procede de la transferencia directa del aire o del transporte convectivo que realizan las plantas (Aguirre, 2004).

4.4.2. Eliminación de Nitrógeno. El nitrógeno se elimina de estos sistemas principalmente mediante nitrificación / desnitrificación. El nitrógeno orgánico está en general asociado a la materia en suspensión presente en el agua residual, por tanto, se elimina en gran parte por retención de esta materia.

Los compuestos orgánicos que contienen nitrógeno se degradan para producir amonio. El nitrógeno amoniacal presente en el agua residual se puede eliminar por diferentes vías (volatilización, absorción, asimilación y nitrificación-desnitrificación).

En los HFS las vías principales son la adsorción y la nitrificación. En el caso de que la nitrificación no vaya acoplada con la desnitrificación, no se produce una pérdida neta de nitrógeno. El amonio afluente y el procedente de la degradación de moléculas orgánicas se adsorben temporalmente, mediante reacciones de intercambio iónico, sobre las partículas del medio y sobre las partículas orgánicas dotadas de carga. Debido a que la capacidad de adsorción es limitada, para que se libere el amonio adsorbido y poder regenerar los campos de adsorción, es necesario que se lleve a cabo el proceso de nitrificación. Por tanto, la nitrificación es el proceso de transformación principal para la reducción de concentraciones de amonio en los HFS. La nitrificación consiste en un proceso microbiano de transformación de dos fases que acaba convirtiendo el nitrógeno amoniacal en nitratos por oxidación. La velocidad de nitrificación depende directamente de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua (Aguirre, 2004). El proceso de nitrificación se puede resumir en una sola ecuación:



La desnitrificación la describe la ecuación (4.10).

4.4.3. Eliminación de Fósforo. La eliminación del fósforo en HFS se puede dar por procesos bióticos y abióticos. Los bióticos incluyen la asimilación por las plantas y microorganismos, y la mineralización de los restos de vegetación y del fósforo orgánico. Los procesos abióticos incluyen la sedimentación, la adsorción por el suelo y los intercambios entre el suelo y el agua residual que circula (Aguirre, 2004).

Aun así la remoción de fósforo es baja dado el limitado contacto que existe entre el agua residual y la tierra, por la impermeabilización de los lechos.

4.4.4. Eliminación de Metales. La eliminación de metales se da por asimilación por parte de las plantas, adsorción y precipitación. Los metales pueden acumularse en los humedales artificiales.

4.4.5. Eliminación de Coliformes Fecales. Los humedales artificiales son en general capaces de remover de una a dos unidades logarítmicas con tiempos de retención hidráulico de 3 a 7 días, con tiempos de retención mayores se pueden lograr remociones del orden de 5 unidades logarítmicas.

La mayoría de los estudios realizados en humedales construidos muestran como la eliminación de bacterias coliformes fecales en los humedales pueden alcanzar valores entre 1 y 2.5 unidades logarítmicas (Rivera *et al*, 1995; Tanner *et al*, 1995; Ottová *et al.*, 1995, citado por Morato, 2004).

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL.

Optimizar las condiciones de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto, para el tratamiento de aguas residuales utilizando diferentes dos alturas de agua y dos tamaños de grava.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la eficiencia de la remoción de la materia orgánica y los nutrientes usando humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto con alturas de agua de 20 y 40 cm.
- Estudiar el efecto del diámetro de la grava en relación con la eficiencia de la remoción de la materia orgánica y los nutrientes usando humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.
- Determinar la mejor configuración de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, de cuatro opciones como resultado de combinar dos tamaños de grava y dos alturas de agua.
- Determinar pH, temperatura, conductividad, DBO₅, Carbono Orgánico Total COT, Sólidos Totales ST, fósforo total PT y PO₄³⁻ en el afluente y efluente de los cuatro humedales.

6. METODOLOGIA

El trabajo de grado se logró gracias al apoyo recibido por el grupo de investigación Diagnóstico y Control de La Contaminación (GDCON), ubicado en la Sede de Investigaciones Universitarias (SIU) de la Universidad de Antioquia. Los humedales piloto se ubicaron en la terraza de la Sede de Investigación Universitarias de la Universidad de Antioquia (SIU), y los análisis se realizaron en el laboratorio de calidad de aguas del grupo GDCON en el mismo edificio.

6.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

En el transcurso de la investigación y durante toda la fase preliminar del proyecto se recolectó información, y se hizo una previa revisión de libros, artículos científicos, revistas, informes técnicos y bases de datos con el propósito de documentar lo realizado hasta ahora en cuanto a optimización de parámetros en humedales, y de esta manera tener un conocimiento mas claro de lo que podría suceder en el transcurso de la investigación y de la posible inclinación hacia una de las hipótesis planteadas.

6.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL A ESCALA PILOTO.

Se construyeron cuatro humedales a escala piloto en fibra de vidrio, todos los tanques tienen la misma dimensión 1m de largo, 0.6 m de ancho y 0.6m de alto, con una relación largo/ancho cercana a 2/1. La investigación comprendió los cuatro humedales piloto con las siguientes combinaciones (soporte fotográfico Anexo 1):

Humedal tipo A: este humedal tiene una profundidad de agua de 0.2 m, una altura de grava de 0.3 m y un tamaño de grava grueso ($D = 1 - 1/2$ in).

Humedal tipo B: este humedal tiene una profundidad de agua de 0.2 m, una altura de grava de 0.3 m y un tamaño de grava grueso ($D = 1/4 - 1/8$ in).

Humedal tipo C: este humedal tiene una profundidad de agua de 0.4 m, una altura de grava de 0.5 m y un tamaño de grava gruesa ($D = 1 - 1/2$ in).

Humedal tipo D: tiene una profundidad de agua de 0.4 m, una altura de grava de 0.5 m y un tamaño de grava fina ($D = 1/4 - 1/8$ in).

Las combinaciones que presentan cada humedal se resumen en la tabla Nro. 4, (Ver Anexo 1).

Tabla 4. Combinaciones en los Humedales Piloto de Flujo Subsuperficial

TIPO DE HUMEDAL	PROFUNDIDAD DE AGUA (m)	ALTURA DE GRAVA (m)	DIAMETRO DE GRAVA (in)	AREA (m ²)	POROSIDAD %
A	0.2	0.3	1 1/2	0,6	53%
B	0.2	0.3	1/4 1/8	0,6	39%
C	0.4	0.5	1 1/2	0,6	53%
D	0.4	0.5	1/4 1/8	0,6	39%

Fuente: Elaboración propia.

Durante la construcción de los piloto se contó con la experiencia y el apoyo de profesores de la Universidad Politécnica de Cataluña.

La grava contenida en los tanques, es una grava no calcárea pre-lavada poco angulosa, pero con alta rugosidad, con porosidad de 39% para la grava fina y de

53% para la grava gruesa (Ver Anexo B), se depositaron en los tanques aproximadamente 2 m³ de grava en total.

6.2.1. Montaje Final de los Humedales. El montaje de los humedales consta de dos soportes metálicos con 2 niveles uno alto y otro medio, en cada soporte metálico en su parte alta se ubica un tanque de abastecimiento de 60 L cada uno, en este tanque se depositó el agua residual sintética para surtir los dos humedales piloto en la base media del soporte. A la entrada de cada humedal se ubica una válvula de cierre lento para controlar el caudal e inmediatamente después de esta se ubicó una conexión universal que permite separar la tubería y controlar el caudal por métodos volumétricos (Ver figura 4).

Al nivel del suelo se ubicaron valdes para recolectar el efluente y tomar las respectivas muestras de agua.

Figura 3. Vista en perfil del Montaje para el Funcionamiento de los Humedales

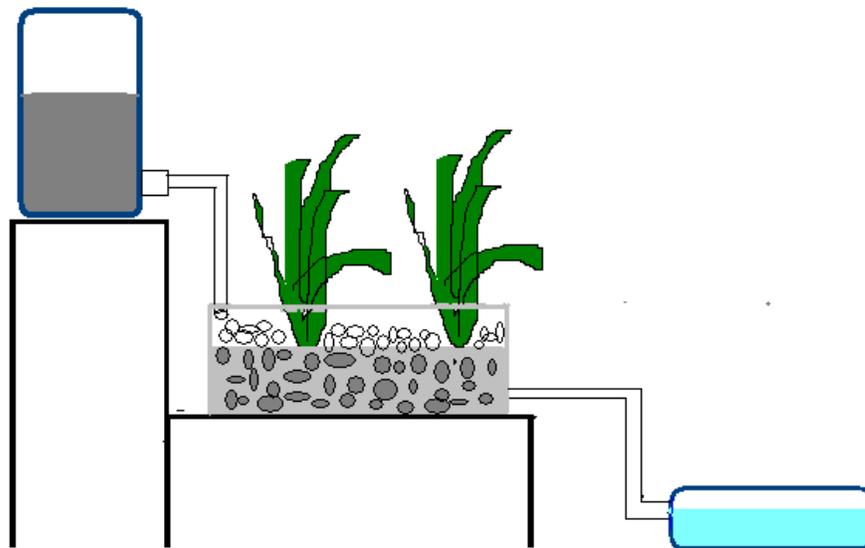
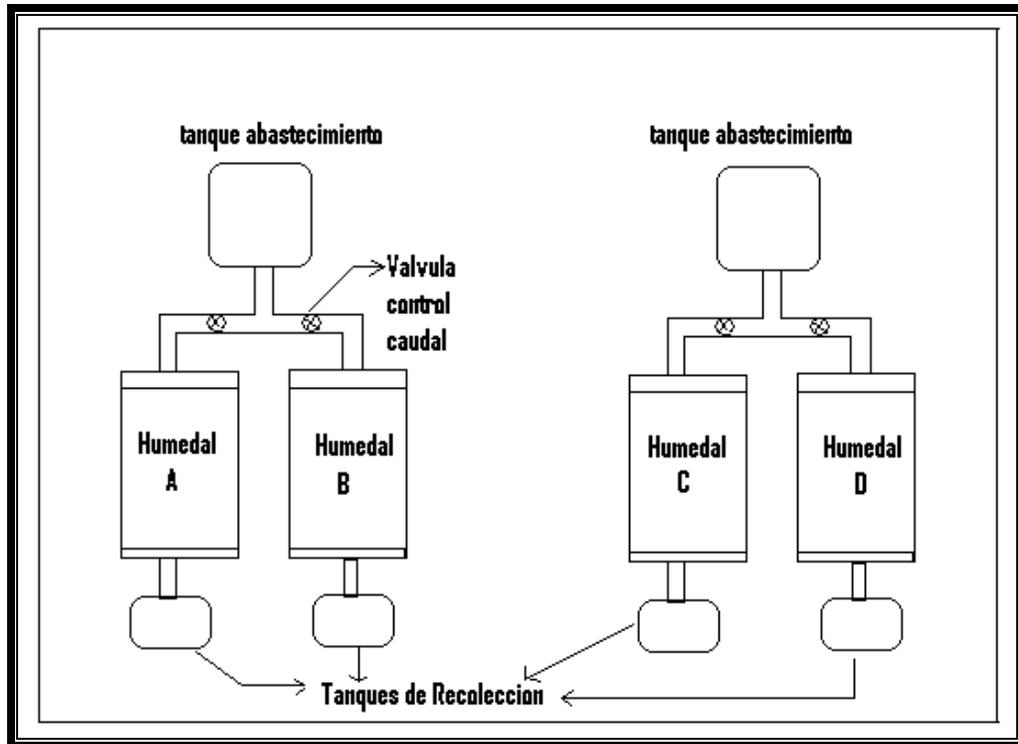


Figura 4 Esquema del tratamiento y montaje final de los humedales piloto.



Fuente: Elaboración Propia

6.2.2. Dispositivos De Entrada y Salida. En los humedales se requiere garantizar flujo pistón por tanto el dispositivo de entrada debe lograr una distribución uniforme a lo ancho del humedal. Con el objetivo de cumplir este requisito se ubicó un sistema de distribución en forma de tubo flauta a la entrada y a la salida de cada humedal con perforaciones a lo largo de la tubería de $\frac{1}{2}$ " a una distancia de 4 cm entre perforaciones y con un diámetro de 4 mm cada uno (Ver anexo 1).

El agua que llega a la entrada del humedal es transportada por la conducción y se distribuyó uniformemente a lo ancho del humedal mediante un sistema de repartición que se encuentra en la cabecera de éste, sobre el nivel superior de grava. Dicha tubería instalada horizontalmente ocupa todo el ancho del humedal y es perpendicular a la dirección del flujo de agua que atraviesa por el humedal.

Al ubicarse la entrada arriba del nivel superior de grava se evitan las obstrucciones que puedan ocasionar el material y por tanto se evita el empaquetamiento en grava de mayor tamaño para la zona de entrada.

Las observaciones y ajustes de la estructura permite una distribución del agua uniforme a lo largo y ancho del humedal, pero no se puede asegurar una distribución perfectamente homogénea debido a la horizontalidad de la tubería ya que esta puede verse alterada debido a las deformaciones del plástico como consecuencia de variaciones térmicas o el movimiento de la propia grava sobre la que se apoya. A pesar de todo, en estas instalaciones se asume una distribución homogénea correcta (Garcia et.al, 2004).

En la salida de los humedales se ubica también una estructura de tubo en flauta (Ver anexo I), con las mismas dimensiones, ubicándose transversalmente a lo ancho del humedal y conduciendo el agua de salida a otra estructura en herradura con manguera transparente flexible que utiliza el principio de vasos comunicantes para mantener el nivel de agua constante dentro del lecho del humedal.

6.3. CALCULO DEL CAUDAL PARA LOS HUMEDALES.

El flujo en los piloto fue continuo, controlándose tanto a la entrada como a la salida mediante válvulas de paso libre con cierre lento, garantizando un tiempo de retención de 7 días en cada uno de los humedales, este tiempo de residencia es considerado en la literatura como el necesario para degradar la materia orgánica y nutrientes (Tchobanoglous, 2000).

El caudal se calculó teniendo en cuenta el volumen útil, y el tiempo de retención, (los cálculos se muestran en el Anexo 3), resultando caudales muy bajos pero

posibles de controlar. Los flujos para cada tipo de humedal se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Caudal Calculado Para Cada Tipo de Humedal

TIPO DE HUMEDAL	Q (cm ³ /min)
A	6.3
B	4.6
C	12,6
D	9.3

Fuente: Elaboración propia.

6.4. PREPARACION DEL AGUA RESIDUAL SINTETICA.

En el laboratorio del grupo GDCON se preparó agua residual sintética (Ver Anexo 1, fotografía 9) que simula los componentes usuales de un agua residual, cuyas concentraciones aparecen en la tabla 6.

La importancia de preparar agua sintética radica en que para próximas investigaciones se pueden realizar replicas, lo que no se podría lograr con un agua residual normal.

6.5 COSECHADO DE PLANTAS Y SOSTENIMIENTO DE MICROORGANISMOS

En cada uno de los módulos se sembró *phragmites australis*, una planta que presenta buena adaptación y realiza fitorremediación de contaminantes, además es resistente a condiciones extremas y se encuentra silvestremente en muchos sitios.

Se sembraron 6 plantas por modulo a 0.5 m de distancia cada una atendiendo las recomendaciones dadas en la literatura para carrizos y juncos (Tchobanoglous, 2000).

Tabla 6. Componentes Agua Residual Sintética

NOMBRE	CONCENTRACION	
Acetato de sodio	5 mg/l	FUENTE DE CARBONO
Propionato de sodio	5 mg/l	
Almidón	5 mg/l	
Triptona	5 mg/l	
Etanol	0.375 mg/l	
Extracto de carne deshidratado	105 mg/l	
Cloruro de Amonio	272.6 mg/l	FUENTE DE AMONIO
Cloruro de Manganeso tetrahidratado	257.525 mg/l	MICROELEMENTOS
Cloruro de Zinc dihidratado	2.675 mg/l	
Cloruro de Cobre dihidratado	29.96 mg/l	
Sulfato de Manganeso heptahidratado	8121 mg/l	
Cloruro de Hierro hexahidratado	1284 mg/l	
Cloruro de Calcio dihidratado	1963.45mg/l	
Fosfato dihidrogenado de Potasio	25.5mg/l	BUFFER FOSFATO
Fosfato dipotásico hidrogenado	65.25 mg/l	
Fosfato disódico hidrogenado y heptahidratado	100.2 mg/l	

Se transplantaron los rizomas desde un humedal subsuperficial horizontal ubicado en el matadero municipal del municipio de San Vicente (Antioquia) al sitio de ubicación de los pilotos. Se sembraron todas a 15 cm de la superficie superior de grava dejando 5 cm del rizoma fuera del agua residual para obligar a la planta a profundizar su raíz y colonizar el lecho (Experiencias no referenciadas).

Se le permitió un tiempo de adaptación y crecimiento de la película bacteriana por 2 meses, alcanzando de esta manera una fase estacionaria. Para realizar muestreos de los microorganismos y controlar el nivel del agua dentro del

humedal, se ubicaron dos tubos muestreadores denominados piezómetros en cada uno de los humedales, uno a la entrada del humedal y otro a la salida, y dentro de cada tubo a su vez se ubicaron 5 reactores de lecho empacado en angeo, rellenos de grava (Ver Anexo 1).

Los piezómetros se construyeron en malla en acero inoxidable de aproximadamente 6 cm de diámetro y 30 0 50 cm de profundidad dependiendo de la altura de grava en cada humedal. La malla de la que están contruidos los humedales permite tener un espacio libre de grava y a la vez permite el libre transcurso del flujo de agua a través del lecho granular. Estos piezómetros están ubicados a la salida y entrada del lecho granular y distribuidos equidistantemente con respecto a estas estructuras.

6.6. ESTUDIO EXPERIMENTAL.

6.6.1. Descripción de Las Campañas experimentales y puntos de muestreo. Se programaron 7 muestreos, uno por semana, recogándose muestra a la entrada y a la salida de cada humedal, entre las 9:00 a.m. y 10:00 a.m. de cada martes. Se tomaban 2 L de muestra a la salida de cada humedal en el tanque de recolección del efluente.

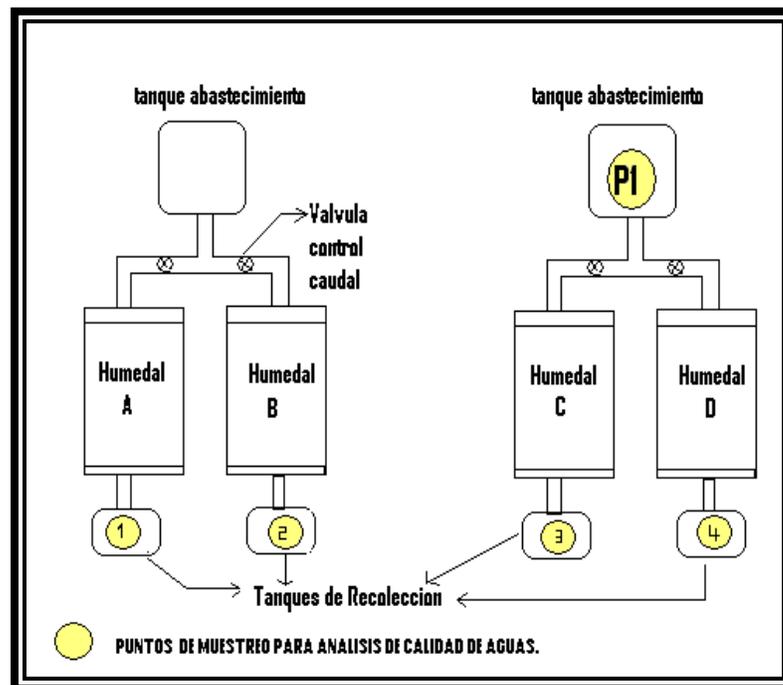
Los puntos de muestreo ubicado a la entrada de los humedales, corresponde a la misma agua que sale de los tanques de suministro o abastecimiento (Ver Figura 6).

En 5 puntos se tomaron muestras de aguas para los análisis, las cuales se realizaron en el laboratorio del grupo GDCON. Estos puntos de muestreo son:

La salida del Punto 1 (1P), en el tanque de distribución o abastecimiento del agua sintética a los humedales. Los dos tanques de abastecimiento tienen características fisicoquímicas de calidad aguas parecidas, ya que se prepararon de la misma forma, y por lo tanto, solo se tomaron muestras a la salida de uno de los tanques de abastecimiento.

A la salida de los humedales, constituyendo cuatro puntos de muestreo.

Figura 5. Distribución espacial de puntos de muestreo.



Fuente: Elaboración propia.

A las muestras recogidas se les hacían inmediatamente los análisis fisicoquímicos.

6.6.2. Parámetros Analizados. Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos que están en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros Medidos.

PARAMETRO	EQUIPOS UTILIZADOS	METODO*
pH	pHmetro portable marca WTW 320	-
Conductividad	Conductivimetro 720 WTW inolab	-
Temperatura	Conductivimetro 720 WTW inolab	2550B
DQO	Termoreactor inolab	5220D
DBO ₅	O.D. mediante O.D.meter LDO, HQ10 portable Disolved Oxigen Meter (4500-0G)	5210B análisis de ROB(s)
COT	Total Organic Analyzer o.i. Analytical. Wintoc 1010, TOC firmware version: 5.2 rcv. 346	5310 D
ST	Equipo baño Maria, Horno	2540B
Fósforo Soluble	Espectrofotometer	4500-PB, 4500-PE
Fósforo Total	Espectrofotometer	4500-PE

* Fuente: Métodos normalizados para el análisis de calidad de Aguas potable y residuales “ Standard methods” for the examination of water and wastewater. 17 Edition, 1992.

6.6.3. Análisis de Muestras.

- Potencial De Hidrógeno (pH). Es el término utilizado universalmente para expresar la intensidad de la condición ácido/ base de la solución, expresa la concentración de iones hidronio (H⁺) (EIA, 2004).

El pH se midió en un equipo portátil provisto con un electrodo de pH. Para calibrar el equipo se utilizó una solución de pH conocidas de 4 y 7. Entre mediciones siempre se limpiaba el electrodo con agua destilada y se hacía la medición de otra muestra.

- Conductividad. La conductividad eléctrica se define como la medida de disponibilidad de una solución acuosa para conducir la corriente eléctrica y varía de acuerdo con la cantidad y el tipo de iones que contenga (EIA, 2004).

Algunos iones, al tener mayor carga por unidad de átomo y al tener un tamaño más pequeño, tienen mayor movilidad, y por lo tanto, producen mayor conductividad eléctrica. Además, no todos los compuestos se ionizan, y por lo tanto, a pesar que pueda haber una gran cantidad de sólidos disueltos, tener una baja conductividad.

El equipo para la medición se calibra con una solución electrolítica y se chequea con agua desionizada con conductividad 0, posteriormente se procede a medir la conductividad a las muestras de interés. Para medición de este parámetro se utiliza un equipo que consta de un sensor y de una parte electrónica desde donde se envía una señal eléctrica hacia dicho sensor durante cada medición. En el presente estudio se utilizó un Conductímetro marca inolab, WTW 720. Para la toma de la conductividad el electrodo se introduce en los recipientes que contienen la muestra y se realiza directamente la lectura.

- Temperatura. La temperatura ejerce una gran influencia en los procesos biológicos y químicos, (García, 2005) en los primeros como en la germinación de semillas en las plantas y actividad microbiana. Por esta razón, los compuestos pueden ser biodegradados más rápidamente al incrementarse la temperatura.

La medición de la temperatura se realizó con el conductímetro e igualmente se hicieron mediciones con termómetros.

- Demanda Química De Oxígeno (DQO). El DQO es una medida aproximada de la demanda teórica de oxígeno, es decir, el oxígeno requerido para la oxidación total de los constituyentes orgánicos y algunos inorgánicos (como el amonio).

En la DQO, la materia orgánica se oxida por acción de una mezcla de dicromato y ácido sulfúrico, en presencia de catalizador y fuertemente calentamiento. El equipo que se utiliza es:

- Termorreactor.
 - Tubos para digestión de DQO
 - Gradilla con soporte porta –tubos
 - Transfer pipetas graduadas hasta 5 cm³
 - Espectrofotómetro.
- Demanda Bioquímica De Oxígeno A 5 Días (DBO₅). Se refiere a la cantidad de Oxígeno disuelto que requieren los microorganismos para la degradación aeróbica de la materia orgánica presente en el agua de desecho transcurridos 5 días. La magnitud de la DBO₅ por tanto es una indicación de la materia orgánica presente en el efluente.

Con base al valor de la DQO se realizó la correspondiente dilución de la muestra para hacer la DBO₅ de la siguiente manera: a un litro de agua destilada se colocó un mililitro de inóculo de microorganismos, se adicionaron nutrientes y un volumen determinado de muestra, el cual dependía del valor de la DQO. Antes de colocar la muestra diluida en un Winkler, se midió el oxígeno disuelto con un oxímetro. Finalmente al quinto día se volvió a medir el oxígeno disuelto.

- Carbono Orgánico Total (COT).El ensayo COT se realizó en un analizador de COT, filtrando previamente la muestra a través de una membrana de 0.45 µm.

- **Sólidos Totales.** Los sólidos totales se refieren al contenido de material remanente luego de la evaporación y el secado a 103-105°C. Por tanto se determinaron sólidos totales secando las capsulas con el agua residual en baño maría y llevándolas posteriormente al horno a una temperatura de 103°C.
- **Fósforo Soluble y Fósforo Total.** El fósforo es una medida de concentración de nutrientes en el agua, los fosfatos están presentes en ciertas rocas y arenas, en las aguas negras, en los abonos naturales y en el suelo.

El aumento del contenido de fósforo en las aguas residuales domésticas es debido, más que todo al uso de intensivo de detergentes sintéticos ricos en polifosfatos, a la orina, la materia fecal y los desperdicios (EIA, 2004).

Se determinaron por métodos colorimétricos: el ion fosfato se combina con el molibdato de amonio bajo condiciones ácidas para formar un complejo coloreado denominado fosfomolibdato, el color producido por el compuesto coloidal es amarillo, existe una modificación que mejora la sensibilidad del método y que se uso para los análisis en el presente trabajo, y que consiste en la adición de un agente reductor como ácido ascórbico. Los resultados se obtuvieron mediante una curva de calibración previamente construida.

Para determinar el fósforo total se acidificó la muestra para generar digestión y se llevo a la estufa hasta la aparición de humos blancos, posteriormente se neutralizo y se procedió a determinar fósforo total por el método anteriormente descrito.

6.6.4. **Análisis Estadísticos.** Se analizarán diferentes parámetros estadísticos que permitirán hacer las comparaciones entre las poblaciones de datos recolectadas, para de esta manera determinar diferencias estadísticas entre el afluente y entre el

efluente y como resultado final mediante esta herramienta encontrar la mejor configuración de humedal de flujo subsuperficial horizontal.

Dentro de las pruebas estadísticas a analizar están:

- Máximos y mínimos.
- Promedio.
- Varianza.
- Desviación estándar.
- ANOVA (Análisis de varianza).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se mostraran y discutirán los resultado obtenidos en los análisis.

7.1 CALIDAD DE AFLUENTE Y EFLUENTE.

La tabla 8 muestra los resultados obtenidos en el análisis del afluente de los humedales piloto. Los resultados de DQO para la entrada en los humedales fueron muy similares, el resto de parámetros tienen diferencias apreciables, muy seguramente esto se debe a cambios en las características del agua de entre un día y otro por el almacenamiento en el tanque. El agua sintética se preparaba cada tres días, ya que el recipiente de abastecimiento tenía un volumen que solo alcanzaba para el suministro de agua en tres días. En la columna 2 de la Tabla 8, se muestra el día en el que se tomó la muestra luego de haberse preparado el agua sintética. Seguramente en el afluente se degradaron lentamente algunos compuestos por estar expuesto al ambiente, cambiando de esta manera su composición.

Tabla 8. Resultados Entrada A Humedales.

Fecha	Día	pH	Cond. (µs/cm)	T (c)	DQO (ppm)	DBO ₅ (ppm)	COT (ppm)	ST (ppm)	PO ³⁻⁴ (ppm)	PT (ppm)
30/01/07	3	5,23	428	23,0	251	177	39,362	466	6,600	6,300
06/02/07	1	5,10	524	22,1	231	124	39,538	892	18,000	20,000
13/02/07	2	4,41	421	25,2	234	126	33,467	800	9,000	9,700
Promedio		4,90	458	23,4	239	142	37,455	720	11,200	12,000

En la tabla anterior se reportan los resultados de afluente (entrada a los humedales) para cada uno de los tres días de almacenamiento, presentándose leves cambios en el parámetro DQO, pH y COT. Esto se debe al proceso de fermentación que se da dentro del tanque, aun así, en la siguiente evaluación se tendrá en cuenta el promedio de cada uno de los parámetros en base a que el

agua residual sintética para cada llenado del tanque abastecimiento contenía las mismas concentraciones de contaminantes.

Los datos del primer muestreo no fueron lógicos, por lo tanto no se tomaron en cuenta en el cálculo del promedio para la caracterización final del agua sintética.

En las tablas 9 a 12 aparecen los resultados de los análisis fisicoquímicos del efluente en los cuatro humedales, cuyos parámetros que miden concentración de contaminantes orgánicos como DQO, DBO₅ y COT disminuyeron con respecto a los valores del afluente. En los humedales piloto la remoción varió debido a que los cuatro humedales tenían diferencias entre si, en cuanto a la profundidad de la lámina de agua y del tamaño de la grava, por lo tanto, la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos y nutrientes fue diferente.

Los ST, los fósforos solubles y totales disminuyeron. Este resultado era de esperarse porque tanto los microorganismos como las plantas los requieren para sus procesos de crecimiento.

Tabla 9. Resultados Humedal Tipo A.

Fecha	pH	Cond. (µs/cm)	T (c)	DQO (ppm)	DBO₅ (ppm)	COT (ppm)	ST (ppm)	PO³⁻⁴ (ppm)	PT (ppm)
30/01/07	5,55	477	23,1	207	69	6,049	58	0,003	0,068
06/02/07	6,20	513	20,8	124	38	26,093	474	1,021	3,600
13/02/07	6,13	395	24,4	211	110	26,425	240	1,300	1,400
20/02/07	6,12	339	23,7	144	11	9,658	228	0,240	1,070
27/02/07	5,88	381	27,1	224	23	7,221	366	0,409	1,570
06/03/07	6,35	590	23,0	54	21	10,678	436	2,960	3,020

Tabla 10. Resultados Humedal Tipo B.

Fecha	pH	Cond. (µs/cm)	T (c)	DQO (ppm)	DBO ₅ (ppm)	COT (ppm)	ST (ppm)	PO ³⁻⁴ (ppm)	PT (ppm)
30/01/07	5,27	808	23,1	230	49	4,018	340	0,003	0,012
06/02/07	5,45	745	22,5	327	14	5,328	608	0,044	0,280
13/02/07	5,24	784	25,3	67	16	4,095	556	0,049	0,210
20/02/07	5,53	844	24,1	141	11	3,420	750	0,018	0,130
27/02/07	6,26	1035	26,8	130	42	22,474	800	0,008	0,098
06/03/07	6,26	986	24,0	60	36	6,860	1042	0,180	2,520

Tabla 11. Resultados Humedal Tipo C.

Fecha	pH	Cond. (µs/cm)	T (c)	DQO (ppm)	DBO ₅ (ppm)	COT (ppm)	ST (ppm)	PO ³⁻⁴ (ppm)	PT (ppm)
30/01/07	5,70	202	23,4	154	37	6,170	12	0,420	2,930
06/02/07	6,09	203	22,8	101	6	5,028	24	0,800	4,200
13/02/07	6,13	259	23,5	91	39	9,252	156	0,490	3,700
20/02/07	6,31	217	23,0	54	6	5,608	148	1,500	4,440
27/02/07	6,40	201	25,9	67	10	6,357	198	1,770	3,340
06/03/07	6,51	211	24,0	131	18	5,365	304	1,750	2,890

Tabla 12. Resultados Humedal Tipo D.

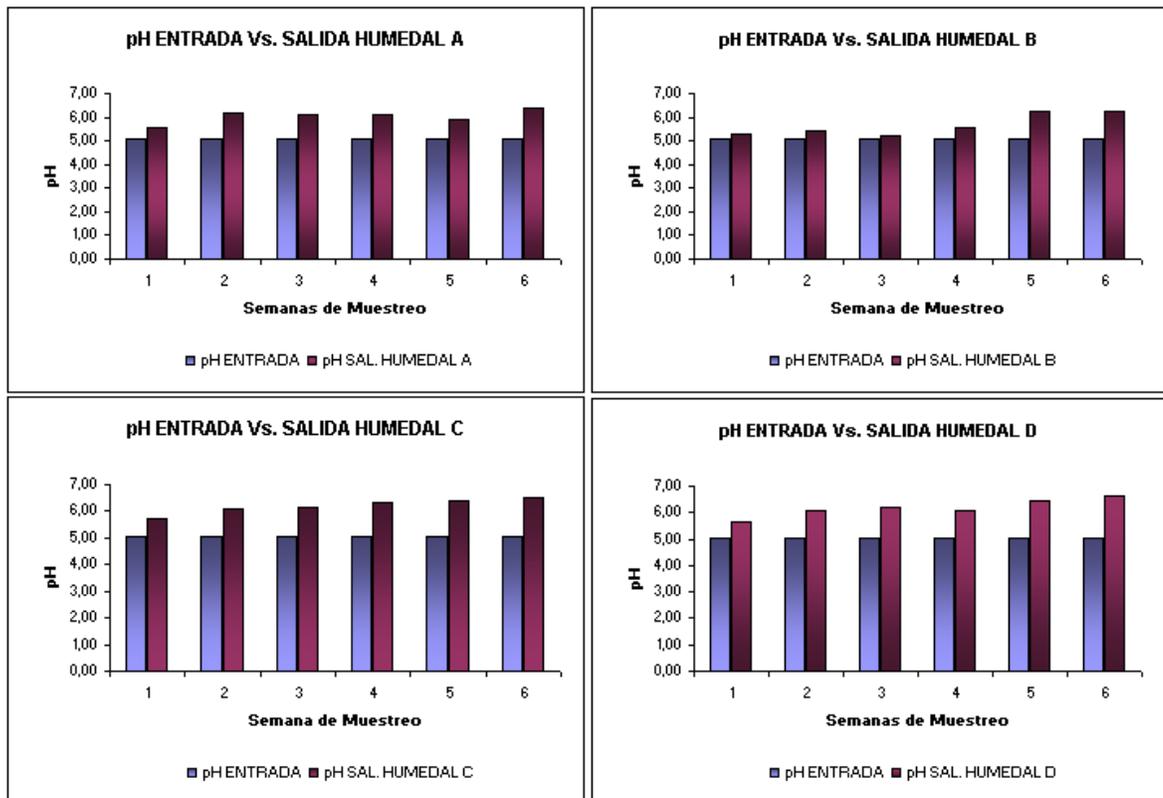
Fecha	pH	Cond. (µs/cm)	T (c)	DQO (ppm)	DBO ₅ (ppm)	COT (ppm)	ST (ppm)	PO ²⁻⁴ (ppm)	PT (ppm)
30/01/07	5,65	504	23,3	94	18	4,723	88	0,013	0,100
06/02/07	6,10	406	23,3	7	2,0	6,072	308	0,064	0,300
13/02/07	6,20	326	25,3	91	30	4,646	154	0,140	0,330
20/02/07	6,08	442	23,1	97	24	4,492	332	0,054	0,810
27/02/07	6,43	387	26,4	157	16	6,831	282	0,220	1,030
06/03/07	6,62	557	24,0	211	19	8,624	318	0,390	2,710

En el Anexo E, se muestra el análisis estadístico de los datos, sin tener en cuenta la primera semana de muestreo (23 enero 2007) que no fue representativa del funcionamiento real del humedal dado que los compuestos del agua sintética no se mezclaron completamente, por lo tanto los resultados fueron errados para esta muestra.

7.2 ESTUDIO DE LOS DIFERENTES PARAMETROS ANALIZADOS

7.2.1 pH. En general, el pH óptimo para el crecimiento y desarrollo de las bacterias esta en el rango de 6,5 y 7,5. Muchas de estas bacterias (heterótrofas totales como las nitrogenadas involucradas en el proceso de depuración de aguas residuales) sobreviven a ciertos rangos de pH, adoptar un rango óptimo puede fomentar el crecimiento de microorganismos, igualmente cuando las bacterias crecen en un medio ajustado a un pH por ejemplo 7, este puede cambiar como resultado del efecto de compuestos ácidos o básicos producidos durante el crecimiento. Tal variación llega a ser tan grande que en algún momento puede inhibir el crecimiento de los microorganismos.

Figura 6. Valores de pH en la entrada y salida en los humedales.



El afluente de los cuatro humedales tuvieron pH ácidos (menor de 7.0), en especial los que están por debajo de 6.0, lo que pudo ocasionar que la velocidad de degradación no haya sido la mejor, para futuros ensayos en el grupo GDCON se elevarán los pH de los humedales. En la figura 6 se puede apreciar que los valores de pH a la salida de todos los humedales fueron muy similares al valor de entrada, esto se puede justificar por el hecho que el agua sintética contiene sales de tipo fosfato que actúan como amortiguadores, por ejemplo el fosfato dihidrogenado de potasio (KH_2PO_4) y el fosfato dipotásico hidrogenado (K_2HPO_4). Aun, así las reacciones como nitrificación pueden ocasionar pequeños incrementos de pH que igualmente influyeron de alguna forma en los humedales piloto (Fabregas, 2005). Si el pH no incrementó en mayor valor fue por la presencia de los nitratos (la cual es una base), ya que contrarresta el CO_2 (produce ácido carbónico cuando se disuelve en agua) producido por el metabolismo aerobio de los microorganismos (METCALF & EDDY, 2003).

Como resultado de la prueba de ANOVA (Ver Anexo E) para comparación de promedios de más de dos poblaciones estadísticas constituyéndose en valores de las diferentes variables numéricas correspondientes a los diferentes tipos de humedales en estudio. El resultado de la prueba es menor que 0.05% para el parámetro pH, por tanto indica una diferencia estadística significativa. También podemos concluir que la diferencia entre las medias estadísticas de las variables efluente y afluente fue positiva indicando que el pH aumento en el transcurso del lecho. La variación se ubica entre los limites críticos de 0.75 para el humedal B y 1.27 para el humedal D.

Como se puede observar en la figura 7 correspondiente a los humedales C y D, los rangos de pH son más altos que el resto de humedales esto se puede corroborar en que las diferencias de las medias para estos sistemas son más altas que para los sistemas A y B según el estudio estadístico ANOVA (Anexo E), aún

así los valores tienden a ser ácidos, lo que pudo afectar algunos procesos metabólicos. Esto se pudo comprobar porque las mejores eficiencias en remoción de materia orgánica se obtuvieron en humedales con pH más altos como se observa más adelante.

Diversos estudios muestran que los pH usuales encontrados en humedales piloto están entre 7 y 7,6 (García T., 2005), otro estudio reporta valores de entre 7,4 y 7,8 (García, 2004) la misma investigación reporta rangos de pH para el afluente de entre 7 y 8, en el presente proyecto de grado se encontró rango de pH entre 5,24 y 6,62 (Ver máximos y mínimos Anexo E) para el efluente y de 4,9 para el afluente por debajo de los rangos normales reportados en literatura. Dada la capacidad amortiguadora de los humedales el pH no cambio significativamente aún así el valor de entrada es bajo, por tanto para próximos estudios se debe ajustar el pH a un valor dentro del rango normal para agua residual domestica simulando así de una manera mucho más precisa los valores típicos para este tipo de agua.

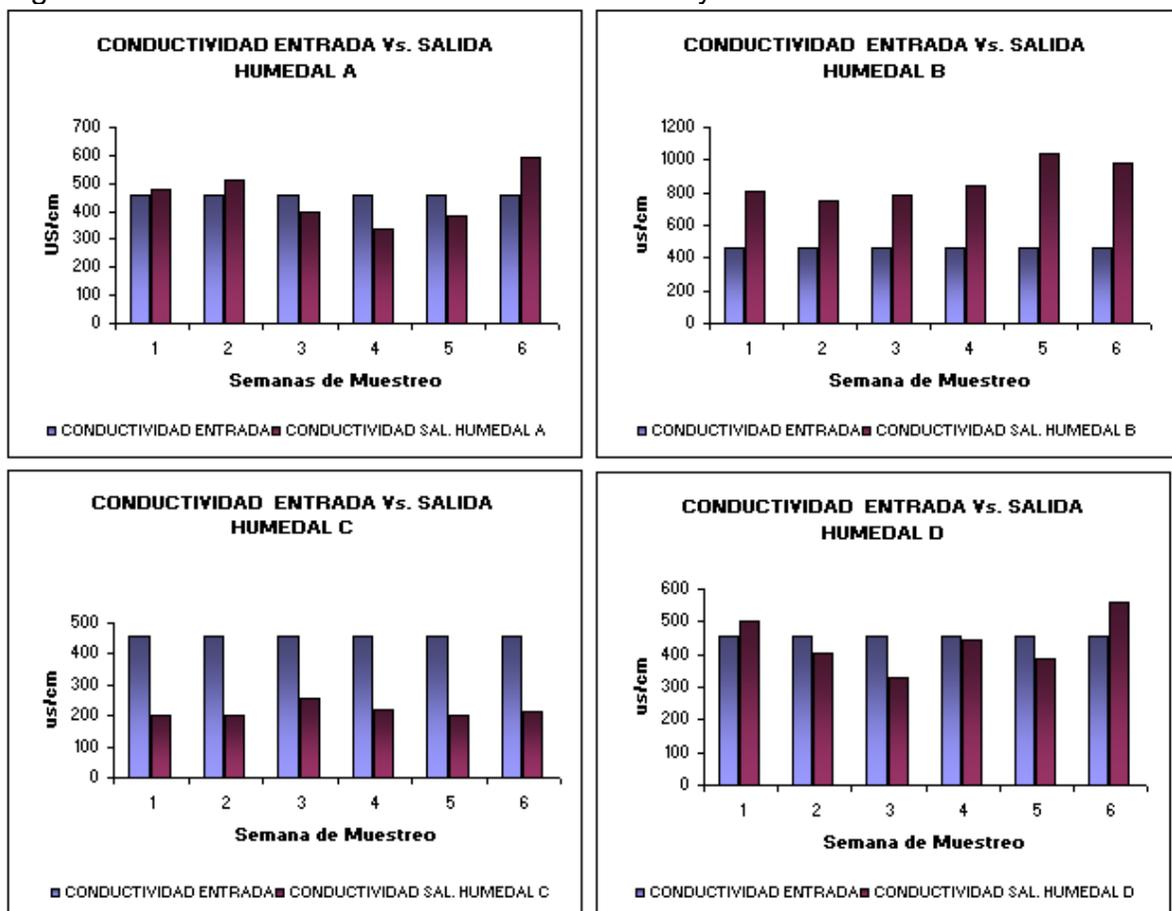
7.2.2. Conductividad. En la figura 7 para el humedal C, se muestra que la conductividad a la salida de este sistema, es menor que a la entrada, por lo tanto el humedal no esta aportando sales disueltas al agua residual, al contrario esta removiéndolas. En el humedal B sucede lo contrario, ya que la conductividad es mucho mayor a la salida. A pesar de que la grava proviene de la misma fuente y se les realizó el mismo prelavado, posiblemente el material granular en este piloto proporcionó sales disueltas al agua (Velasco *et al*, 2006), además para impermeabilizar el lecho, a la conexión de salida se adicionó silicona y cementante en PVC, lo que puede estar ocasionando migración de compuestos al efluente.

El resultado de la prueba ANOVA es menor que 0.05% para el parámetro conductividad, por tanto indica una diferencia estadística significativa al 5%. La conductividad aumento en el transcurso del lecho para el humedal B y disminuyo

para los otros sistemas según la diferencia de medias. La variación se ubica entre los límites críticos de 409.33 para el humedal B y -242.17 para el humedal C. Por lo anterior se concluye que en el humedal B con diferencia de media positiva y crítica el lecho esta aportando sales disueltas al humedal por lo que la conductividad aumenta. El contrario de este, el humedal C con diferencia de media negativa crítica indica que el humedal retuvo las sales disueltas.

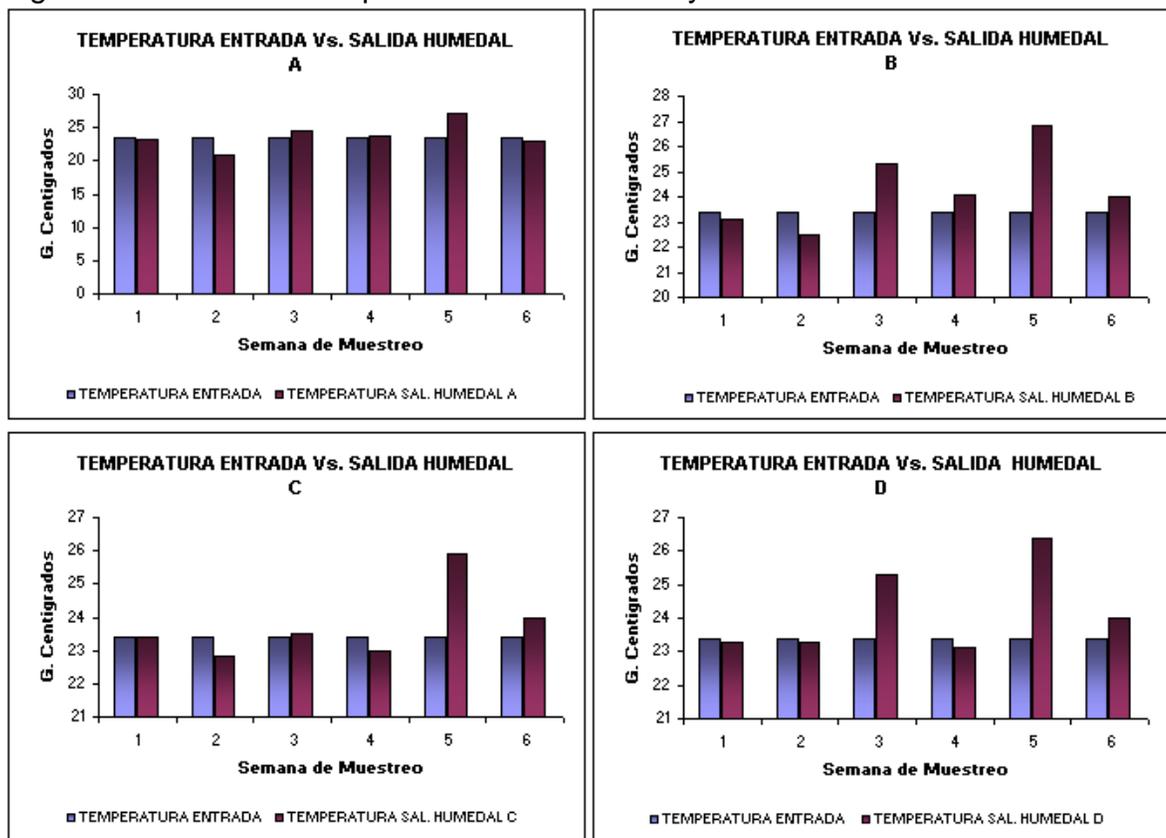
Para los humedales A y D, el valor de la diferencia de medias fue negativo más no crítico lo que indica que se retuvieron sales disueltas pero no en gran medida.

Figura 7. Valores de conductividad en la entrada y salida en los humedales.



7.2.3. Temperatura. Los procesos de crecimiento de los microorganismos y de biodegradación las constituyen reacciones químicas, las cuales están influenciadas por la temperatura, y por ende en la eficiencia de depuración en los humedales (Reed *et al.* 1995).

Figura 8. Valores de Temperatura en la Entrada y salida en los humedales.



La temperatura a la salida en todos los casos es similar a la temperatura de entrada al humedal. Esto se puede comprobar mediante el resultado de la prueba ANOVA (Anexo E) en donde el Sig. es mayor que 0.05% para el parámetro temperatura, por tanto estadísticamente no hay diferencia significativa al 5%. La temperatura aumento para todos los sistemas en el transcurso del lecho para el humedal A en 0.25 °C, para el B en 0.867 °C, para el C en 0.333 °C y para el D en 0.8 °C. Los datos anteriores se obtuvieron según la diferencia de medias.

Igualmente se observa en la figura 8 que durante el muestreo en la semana 6 la temperatura aumentó en todos los casos, esto se debe a que el día de muestreo (27 de febrero de 2007) la radiación solar era intensa, lo que ocasionó un incremento en la temperatura ambiente promedio para Medellín y por tanto en el valor del parámetro para el efluente.

En promedio la temperatura a la salida en todos los humedales fue de 23 a 25°C (Ver Anexo E), que es una temperatura adecuada para el crecimiento, desarrollo y procesos metabólicos de los microorganismos.

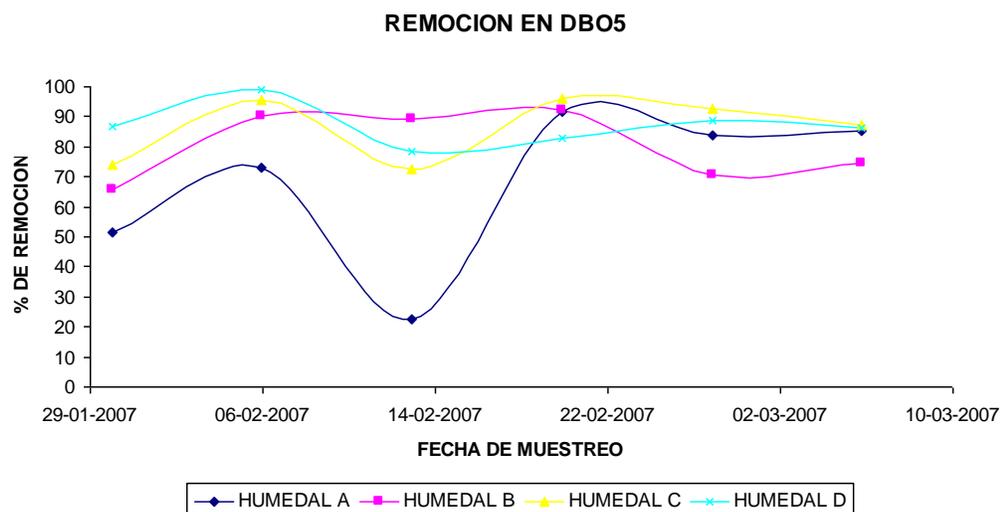
A pesar de que los piloto tienen alturas de agua diferentes, se evidenció que esta variable no tuvo influencia directa sobre la temperatura final en el efluente, este resultado se justifica porque en los humedales A y B en donde se espera un gran aumento de temperatura por tener una profundidad de agua baja (20 cm), se tenían tanques de 0,6 m de profundidad, (Ver fotos Anexo A), lo que protegía en cierto grado el lecho de la radiación solar, por tanto la temperatura no aumento como se esperaba.

7.2.4. DBO₅. La diferencia estadística entre las medias en términos de DBO₅ es significativamente alta. Las variaciones entre medias son negativas y críticas (Ver Anexo E), lo que indica que en general que hubo alta remoción de materia orgánica en términos de DBO₅.

El agua sintética entró a los humedales con una concentración de 142 mg/L en DBO₅, alcanzándose una buena disminución en los efluentes, con algunas excepciones como la que se obtuvo en el humedal A, que en el algún muestreo disminuyó solo hasta 68,76 mg/L, obteniéndose por tanto una remoción del 22%. Esta baja remoción se debió a que el caudal a la entrada del humedal A se incrementó generando un flujo superficial y parte llegó a la salida del humedal.

El humedal A presentó una remoción global de aproximadamente 64%, el B de 81%, el C de 86% y el D de 87%, Estos porcentajes de remoción son altos, cumpliendo así (a excepción del humedal A), con la resolución 1594 de 1984 sobre “Usos del agua y residuos líquidos” que exige remociones de materia orgánica superiores al 80% en DBO₅. En el cálculo de las remociones globales expuestas no se consideró las eficiencias obtenidas la primera semana de muestreo . En la literatura se reportan eficiencias entre el 65-86% (Tchobanoglous, 2000) para humedales a escala real de flujo subsuperficial (HFS), en otros HFS se puede obtener una eliminación de la DBO alrededor del 85% si se diseñan, construyen y mantienen de forma adecuada. No obstante, no consiguen eliminar por completo la materia orgánica, siempre existe una concentración de fondo ya que los mismos humedales generan materia orgánica (por ejemplo los restos de plantas y la acumulación de partículas) (Aguirre, 2004). Valores típicos de concentraciones de fondo son de 1 a 10 mg/L para la DBO₅ (Kadlec-Knight,1996).

Figura 9. Evolución en Remoción de Materia Orgánica Medida como DBO₅, para cada uno de los Humedales.



El humedal A presentó una remoción global de aproximadamente 64%, el B de 81%, el C de 86% y el D de 87%. En el cálculo de las remociones globales expuestas no se consideró las eficiencias obtenidas la primera semana de muestreo. En la literatura se reportan eficiencias entre el 65-86% (Tchobanoglous, 2000) para humedales a escala real de flujo subsuperficial (HFS), en otros HFS se puede obtener una eliminación de la DBO alrededor del 85% si se diseñan, construyen y mantienen de forma adecuada. No obstante, no consiguen eliminar por completo la materia orgánica, siempre existe una concentración de fondo ya que los mismos humedales generan materia orgánica (por ejemplo los restos de plantas y la acumulación de partículas) (Aguirre, 2004). Valores típicos de concentraciones de fondo son de 1 a 10 mg/L para la DBO₅ (Kadlec-Knight,1996).

Teniendo en cuenta estos reportes de literatura y a pesar de la inmadurez de los sistemas, la remoción en todos los humedales piloto esta dentro de los rangos normales encontrados en estudios previos (Aguirre, 2004, Arroyave, 1997; Axler et al, 2000; Barret; 2000, US. EPA.1993,; Davison et al 2000; Gerba *et al*, 1999, Kadlec & Knight, 1996 Nakamura.K, 2000, Salati et al, 2000, Vymazal, J, 2000) citados por García 2004). Aun así la remoción en el humedal A sigue estando muy cercano al límite inferior.

Igualmente se observó que las plantas se adaptaron mejor al humedal A que estuvo altamente colonizado por vegetales, le seguía el humedal B en donde los vegetales igualmente se desarrollaron bien, luego el humedal D y por último el C, en donde la adaptación de las plantas fue difícil lo que ocasiono baja densidad de vegetación a lo largo del lecho (Ver anexo A, fotografía 11). Al transplantar los rizomas a los piloto en opinión de algunos biólogos y microbiólogos coincidieron en que la planta se debía sembrar con el sustrato y por tanto con los microorganismos asociados a la raíz, tal situación pudo contribuir para que en el

humedal A donde hubo una mejor adaptación de las plantas, se aportara materia orgánica y por tanto se vieran afectados los resultados finales de remoción en comparación con el resto de humedales donde las plantas muertas fueron retiradas junto con su materia orgánica asociada (Tchobanoglous, 2000).

Uno de los aspectos más contradictorios durante años ha sido los resultados entre los sistemas plantados y sin plantar, llegando a considerar las plantas como meros adornos (Bécares, 2004). El humedal con alta densidad de vegetación (como el humedal A) no logró grandes eficiencias en la remoción de materia orgánica, al contrario se muestra que en los piloto con mejor adaptación de *phragmites australis* fue menor la eliminación de materia orgánica, esto se debe posiblemente al aporte que realizaron las plantas al agua residual teniendo en cuenta las dimensiones tan pequeñas del lecho y además porque a pesar de que los humedales no contenían suelo sino grava, los rizomas transplantados traían consigo sustrato adherido que aportó materia orgánica al lecho.

Como se observa en la figura 9, los humedales B y D presentan buena eliminación de materia orgánica con diferencia entre medias de -114.33 y -124.17 siendo este valor la diferencia más crítica entre entrada y salida, mostrando por tanto este ultimo como la mejor configuración de humedal, con tamaño de grava pequeño y altura de agua de 40 cms. Las altas eficiencias en remoción para estos humedales (B y D) radican en que su tamaño de grava es menor que el de los humedales tipo A y C, por lo tanto la variable determinante en la remoción de contaminantes fue el tipo de medio granular utilizado ya que a menor tamaño de grava aumenta la superficie específica de soporte para los microorganismos. Además en los humedales de flujo subsuperficial la depuración del agua se lleva a cabo principalmente por la biopelícula que crece en el medio granular y en las raíces y rizomas de los macrófitos. Esta biopelícula es la responsable de la degradación de

la materia orgánica y también está involucrada en la eliminación de nutrientes, especialmente de nitrógeno. (Aguirre, 2004)

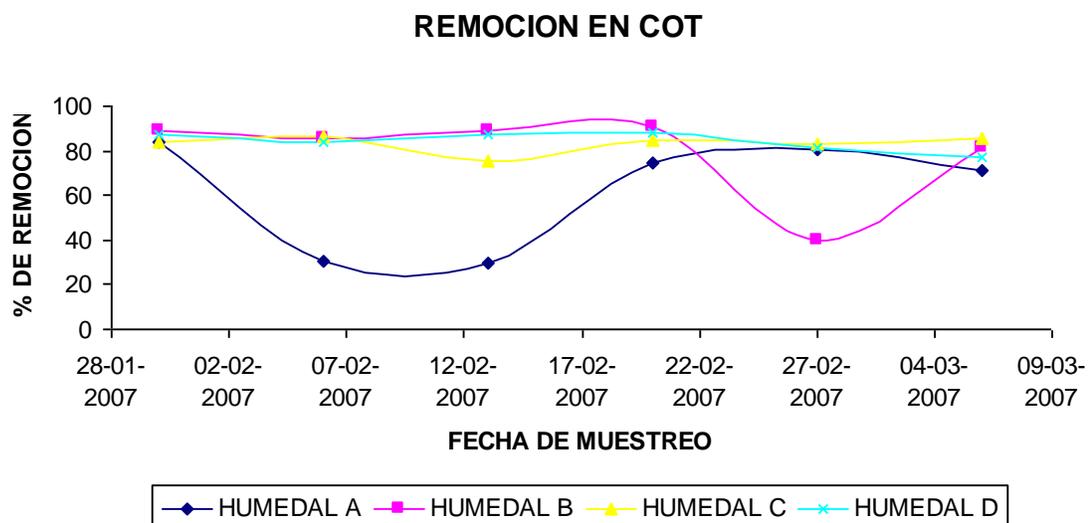
La altura de agua es un factor importante en la eficiencia de humedales de flujo subsuperficial usados para el tratamiento de efluentes (García et. al, 2004). A menor profundidad del humedal se permite una mayor reaeración debido al aumento de la velocidad transversal del agua, y también proporciona una mejor distribución de las raíces y los rizomas en el medio granular. Además las bacterias aeróbicas con un mismo sustrato obtienen mayor energía que las bacterias anaeróbicas (Aguirre, 2004).

7.2.5. COT. El COT mide la concentración de carbono orgánico dentro del agua residual y la DBO₅ se refiere al oxígeno requerido por los microorganismos aerobios para degradar dicha materia orgánica. Por tanto, el COT es una medida directa de la concentración de la materia orgánica. En los humedales se obtuvieron remociones globales en materia orgánica medida en términos de COT de 62% para el humedal A, 79% para el humedal B, 83% para humedal C y 84% para el humedal D, con diferencia de medias negativas y críticas, siendo la mas critica la correspondiente al sistema D (-31,557), por cuanto la variación del COT entre la entrada y la salida es significativa, constituyéndose por tanto este sistema estadísticamente como el de mejor configuración en la remoción de COT, seguido de el humedal C, B y A (Ver Anexo E, prueba ANOVA). Es la misma tendencia en remoción que la obtenida mediante la DBO₅, aunque las eficiencias en la eliminación obtenidas con COT son más bajas que las dadas por medio de la DBO₅.

Según la figura 10 se deduce un mejor funcionamiento para el humedal D con tamaño de grava menor. Por tanto la discusión dada en la DBO₅ es sustentada igualmente con los resultados obtenidos en remoción de COT.

Gracias a la actividad biodegradadora que se lleva a cabo en el interior de los humedales, la concentración de carga orgánica medida como COT se ve reducida en el avance del agua al interior del lecho, reduciendo la concentración inicial hasta valores comprendidos entre 3 - 26 ppm (Ver anexo E).

Figura 10. Evolución en remoción de materia orgánica medida como COT, para cada uno de los humedales.

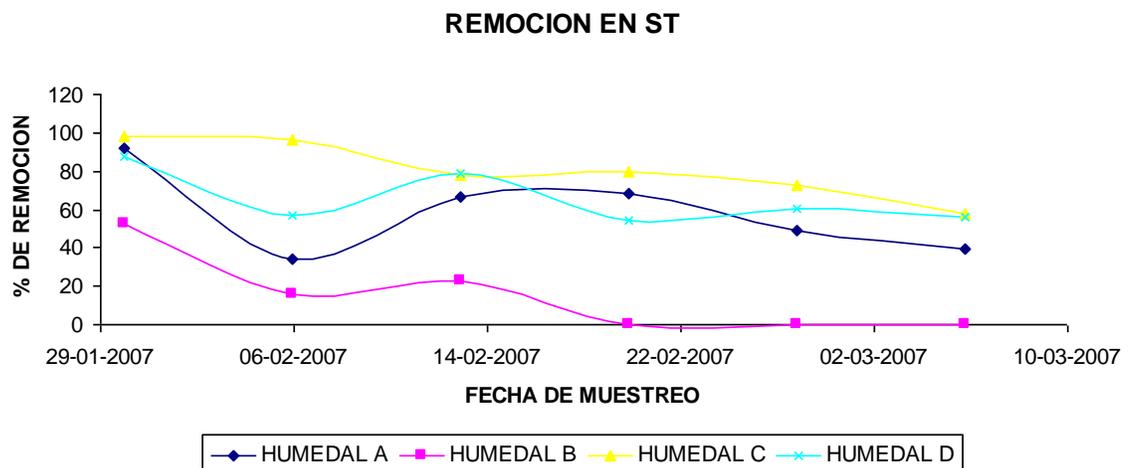


Estudios demuestran que la reducción de materia orgánica en términos de COT, puede superar el 80% (García, 2005), en el presente proyecto se encontraron valores que incluso superan el porcentaje reportado en literatura, por lo que queda demostrada la eficiencia en remoción de materia orgánica medida como TOC sobre todo en los piloto con tamaño de grava pequeño.

7.2.6. Sólidos Totales. La remoción general en sólidos totales fue de 62% para el humedal A, 18% para el B, 85% para el C y 68% para el D. Lográndose efluentes con concentraciones de 12 mg/L de ST en el mejor de los casos. Los sólidos totales pueden disminuir debido a que los microorganismos biodegradan algunos sólidos disueltos y que las plantas los absorben. Las diferencias en los porcentajes de remoción se deben a que la cantidad de microorganismos en la grava en cada uno de los humedales no es la misma.

Según la ANOVA (Anexo E), el parámetro ST presenta una diferencia estadística significativa entre la entrada y la salida de cada uno de los humedales, determinándose valores negativos en todos los casos con puntos críticos en los humedales A, C y D siendo el más crítico el sistema C (-579.0), constituyéndose esta configuración (Tipo C) como la más eficiente estadísticamente hablando en remoción de ST, seguida del Tipo D, A y B.

Figura 11. Evolución en remoción de materia orgánica medida como ST, para cada uno de los humedales.



Prácticamente casi todos los sólidos totales eran disueltos, ya que todos los compuestos que se agregaron al agua sintética eran solubles en aguas, por lo tanto, en teoría si disminuyen los sólidos totales disminuye la conductividad. Sin embargo, podría ocurrir que un compuesto de alto peso molecular soluble se hidrolice en varios pequeños compuestos solubles, por ejemplo las proteínas en aminoácidos y se incremente la conductividad. Por lo tanto, podría disminuir los sólidos pero formarse otros compuestos que tengan una mayor conductividad.

7.2.7. Fósforo Total (PT) Y Fósforo Soluble (PO_4^{3-}). Tal como lo muestra las figuras 12 y 13, las remociones en fósforo total y fósforo soluble para los 4 humedales fueron altas, la remoción global de fósforo para el humedal A fue de 91% medido en fósforo soluble y del 85% en fósforo total, para el humedal B las remociones alcanzadas fueron del 99% en fósforo soluble y 95% en fósforo total, en el humedal C las remociones alcanzadas fueron del 90% en fósforo soluble y 70% en fósforo total, y el humedal D se lograron remociones del 99% en fósforo soluble y 93% en fósforo total.

Tanto como para PT y PO_4^{3-} las diferencias estadísticas entre el afluente y el efluente son significativas según la ANOVA (Anexo E). La diferencia de media indica que para todos los humedales en los dos parámetros hubo remoción de los nutrientes, las diferencias de medias dio negativas y en todos los casos fue igualmente crítico. Los mayores puntos críticos para ambos parámetros se presentaron en el humedal B con una diferencia de media de -11.45 para PT y -11.14 para PO_4^{3-} siendo esta la mejor configuración de humedal para la remoción de fósforo en términos estadísticos., seguido del humedal D, A y C.

La eliminación del fósforo en humedales de flujo subsuperficial se puede dar por procesos bióticos y abióticos. Los bióticos incluyen la asimilación por las plantas y microorganismos, y la mineralización de los restos de vegetación y del fósforo

orgánico. Los procesos abióticos incluyen la sedimentación (precipitación cuando en el agua existe calcio), la adsorción por el suelo y los intercambios entre el suelo y el agua residual que circula a lo largo del lecho. (Aguirre, 2004)

Figura 12. Evolución en remoción de nutrientes medida como PO_4^{3-}

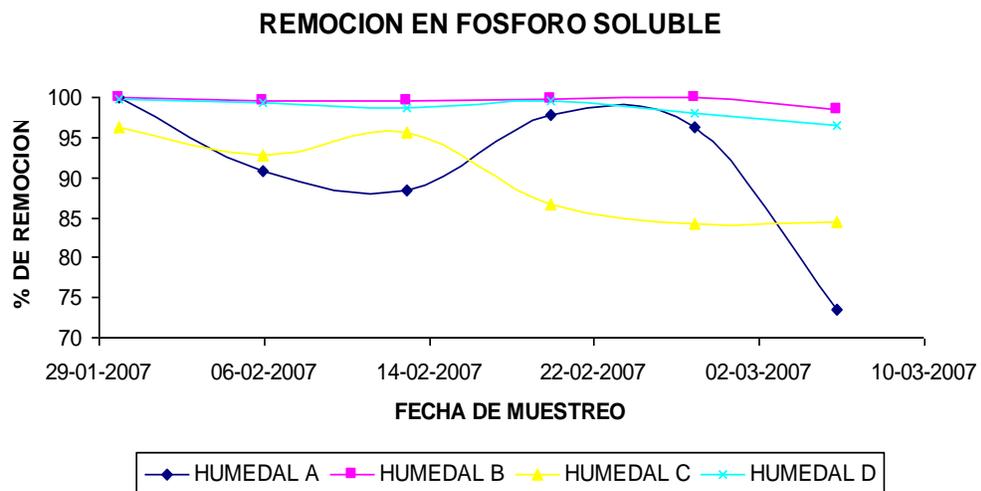
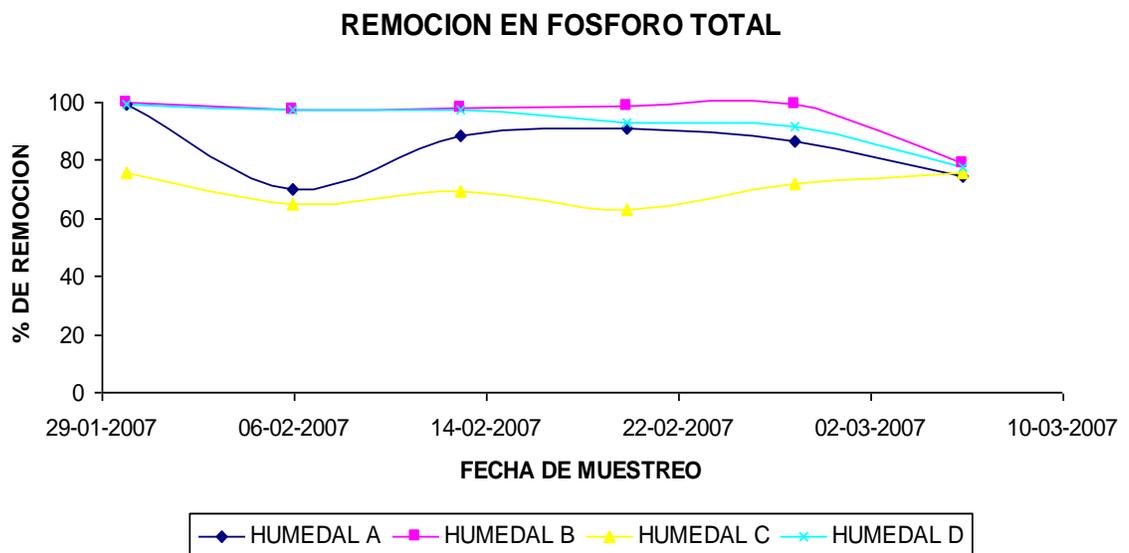


Figura 13. Evolución en remoción de nutrientes medida como PT



Los estudios realizados en las tres plantas con humedales de flujo subsuperficial indican que los porcentajes de eliminación no superan el 15%, e incluso en muchos casos se obtienen efluentes con concentraciones de fósforo mayores que los registrados a la entrada (Aguirre, 2004). Dependiendo de las tasas de carga, el tiempo de retención y las características del medio las remociones pueden variar de entre 10 y 40% (Tchobanoglous, 2000). De igual forma en algunos otros estudios se ha encontrado que los humedales alcanzan a remover más del 90% del fósforo total que ingresa al sistema (Arroyave, 1997; García T., 2000).

Ocurren confusiones comunes en reportes que afirman que los humedales pueden remover significativamente fósforo, dado que tal fenómeno se presenta básicamente por dos factores: en primer lugar a que muchos estudios se han llevado a cabo con aguas muy poco concentradas, con lo que los porcentajes de eliminación han sido altos y en segundo lugar a que un buen número de investigaciones se han realizado en humedales construidos nuevos, en los cuales los datos no son representativos del funcionamiento a largo plazo (García, 2004). Los macrófitos que crecen en humedales de reciente construcción asimilan más fósforo que los macrófitos de humedales maduros.

Medios granulares recién instalados tienen disponibles más lugares para la adsorción del fósforo que medios con un cierto tiempo de operación. La eliminación de fósforo de forma continuada requiere la utilización de substratos específicos que lo retengan y que se tienen que reponer periódicamente (Arias *et al.*, 2003, tomado por García, 2004).

Los humedales presentaron altas eficiencias en remoción de fósforo lo que se podría argumentar dado que los sistemas son muy nuevos, a pesar de que las remociones son altas y se encuentran arriba del rango de remociones usuales para sistemas de humedales de flujo subsuperficial, los piloto presentaron un descenso en la eliminación de fósforo con el tiempo sobretodo en el último

muestreo, lo que sustenta la afirmación dada, que los humedales maduros tienen una capacidad limitada en remoción de nutrientes.

La degradación biológica del fósforo se da en dos fases. La primera en la zona anaerobia donde se consumen los ácidos grasos volátiles, se degrada el glicógeno, y se libera polihidroxybutirano, polihidroxicvalerato y PO_4^{3-} , la segunda fase se da por procesos aeróbicos una vez liberados estos compuestos (García T, 2000), en esta fase se acumula glicógeno, biomasa y PO_4^{3-} y así ocurre la liberación de fósforo.

Es complicado verificar si estos procesos de eliminación biológica del fósforo se dan dentro de los humedales piloto, aun así las condiciones están dadas para potencializar los procesos pues las zonas aeróbicas se encuentran cerca a la raíz y en los primeros centímetros de los humedales expuesto a la atmósfera, además existen zonas anaerobias cercana al fondo del lecho.

Según un estudio hecho paralelo a este trabajo sobre tipos de microorganismos presentes los humedales piloto, muestra que efectivamente el humedal está altamente colonizado por bacterias anaerobias (Ver anexo D), nitrogenadas, azufradas y heterótrofos totales, por lo que aseguramos que el humedal presenta zonas con presencia y ausencia de oxígeno. Lo que potencializa la degradación de nutrientes por medio biológico, para ampliar la visión sobre los tipos de microorganismos encontrados en los pilotos se muestran los resultados de los 2 primeros meses de muestreo, en el anexo D, proporcionando estos resultados a manera de información pues el verdadero propósito de este trabajo de grado fue evaluar precisamente parámetros fisicoquímicos y no los tipos de microorganismos desarrollados dentro del lecho de los humedales.

Las remociones en fósforo para todos los casos fue alta pero las mayores eficiencias se presentaron en los humedales B y D según la prueba ANOVA como se menciona anteriormente (Ver Figuras 13 y 14). La única variable que comparten estos humedales es precisamente el tamaño de grava pequeño, tal situación indica que a menor tamaño de grava mayor será la remoción de fósforo, esto se debe a la adsorción de nutrientes por el medio granular ya que a menor tamaño de grava la superficie específica será mayor por tanto mayor adsorción, lo que lleva a percibir que este proceso es el principal mecanismo de remoción de fósforo dentro del lecho de los humedales.

El humedal A presentó remociones de fósforo un poco menores a la de los otros humedales a pesar de que el humedal estaba altamente colonizado por *phragmites australis*, esto indica que la asimilación de fósforo por parte de las plantas no fue significativa tanto como si lo fue la adsorción por el medio de soporte, tal fenómeno sucedió a pesar de que las macrófitas son jóvenes y tienden a asimilar una mayor cantidad de nutrientes en el periodo inicial de crecimiento.

8. CONCLUSIONES

- Los cambio de pH a la salida de los humedales varían dentro de 0.75 y 1.27 siendo esta una variación significativa comparada con los valores de entrada, esto se debe a la reducida capacidad amortiguadora de los humedales piloto a cambios bruscos de pH producto de generación de ácidos y CO₂ en la remoción de materia orgánica. Se encontraron valores de pH a la salida mas altos que los valores de entrada, aún así estos primeros tienden a la acidez lo que pudo afectó algunos procesos metabólicos que requieren valores de pH de entre 6,5 y 7,2.
- El incremento de la temperatura en los humedales, comparando la entrada con la salida, fue dentro del rango de 0.25 °C y 0.86 °C, medido en diferencia de medias, el leve aumento se puede explicar por la actividad metabólica de los organismos y el calentamiento del lecho por radiación solar.
- La conductividad a la salida de todos los humedales es estadísticamente diferente al valor de entrada presentándose puntos críticos en los valores de los sistemas B y C para la diferencia media entre el afluente y el efluente, aumentando en el tipo B y disminuyendo en el tipo C. Esto probablemente se debe a un aporte (tipo B) o retención (tipo C) significativa de sales disueltas por materiales utilizados en la construcción del humedal.
- Las tendencias de los resultados en parámetros DBO₅ y COT son iguales, mostrando estadísticamente mayor eficiencia de remoción en el humedal D según la prueba ANOVA, lo cual se debe a que este humedal contiene un tamaño de grava más pequeño, lo que proporciona mayor superficie de soporte

a los microorganismos, por tanto la variable tamaño de grava es la que presenta mayor importancia en la remoción de materia orgánica.

- La variable altura de agua tiene poca o nula influencia en la remoción de materia orgánica, incluso el humedal A con altura de agua menor presentó la remoción de materia orgánica mas baja de los cuatro humedales.
- Los sólidos totales no es un buen parámetro para determinar eficiencia en humedales artificiales, ya que este valor incluye el aporte de materia orgánica e inorgánica, y puede ocurrir que la materia orgánica disminuya por su biodegradación pero la inorgánica disminuya por la mineralización de la primera.
- La remoción de fósforo en general es muy alta comparada con remociones usuales reportados en la literatura, esto se debe a que los humedales son nuevos. Las mejores remociones se encontraron en los humedales B y D según la prueba ANOVA que comparten la variable tamaño de grava pequeña, por tanto, igual que para remoción de materia orgánica la variable tamaño de grava menor es la de mayor influencia en la eliminación del fósforo, además la eliminación del nutriente en los prototipos se da principalmente por adsorción del medio granular.
- El humedal D fue el sistema con mejor remoción en materia orgánica y el tipo B con mas alta remoción de fósforo. Estos dos humedales comparten el tamaño de grava de (1/4" - 1/8") que según el estudio realizado, es el más recomendable en humedales de flujo subsuperficial horizontal.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar investigaciones de degradación de contaminantes específicos como los recalcitrantes y tóxicos, tendiendo a determinar el real efecto que tiene una menor altura de agua en la remoción final de materia orgánica y nutrientes.
- Se recomienda a nivel del trópico, diseñar humedales de flujo subsuperficial con diámetro de grava aun más pequeña que la usada en el presente trabajo, para determinar si aun tiene una mayor influencia en la remoción de materia orgánica y nutrientes.
- Para próximos estudios se debe realizar los ensayos con pH próximos o alrededor de 7.0, para garantizar condiciones adecuadas a los microorganismos.
- Se debe tener la mayor precaución posible al momento de construir los humedales a escala piloto o de laboratorio, para evitar residuos inorgánicos, que puedan llegar a ocasionar conclusiones erróneas.
- Se deben realizar estudios considerando otras variables que podrían influir en los humedales tales como temperatura y flujos.
- Se debe garantizar los nutrientes y el nivel de agua necesario para que las macrófitas se desarrollen adecuadamente, pues estas plantas son sensibles sobre todo a la disminución del nivel de agua dentro de los humedales.

- Igualmente se recomienda sobre todo en humedales a escala piloto controlar muy bien el caudal haciendo chequeos constantes pues pequeños cambios en el flujo ocasionan una gran distorsión en los parámetros a la salida.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Aguirre, P.** Mecanismos de Eliminación de Materia Orgánica y Nutriente en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial. En: Nuevos criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos. Barcelona, 2004.
- [2] **Arroyave, F.** Remoción de Contaminantes de Aguas Residuales Con Humedales Artificiales De Flujo Subsuperficial. En: Revista Métodos De Investigación. Uniandes. Santa fé de Bogota, 1997.
- [3] **Arias C. BRIX H. y JOHANSEN N.** Phosphorus Retention in Subsurface Constructed Wetlands: Investigations Focused on Calcareous Materials and their Chemical Reactions. En: Water Science & Technology, 2003.
- [4] **Bécares E.** Función de la Vegetación y Proceso de Diseño de Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal y de Flujo Superficial. En: Nuevos Criterios Para el Diseño y Operación de Humedales Construidos. Barcelona, 2004.
- [5] **Brix H.** Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. En: Water Science & Technology, 1994.
- [6] **Cenagua.** Sistemas de tratamiento de aguas servidas por medio de humedales artificiales. OPS, Societe Quebecoise d` assainissement des eaux. Santa fe de Bogota D.C, 1999.

[7] **Corzo A.** Tesis: Influencia Del estado Físico De La Materia Orgánica en la eficiencia de Humedales Construidos De Flujo Subsuperficial. Universidad Politecnica de Cataluña, 2004.

[8] **Della Greca M,** Fiorentino A, Isidori M. y Zarrelli, A. Toxicity evaluation of natural and synthetic phenantrenes in aquatic systems. En: Environmental Toxicology Chemistry, 2001.

[9] **EPA.** Agency, Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, Humedales de flujo libre superficial, United States Office of Water EPA 832-F-00-024 Environmental Protection Washington, D.C. Septiembre ,2000.

[10] **Evaluación** de la calidad del agua, Folleto Escuela de Ingeniería de Antioquia, 2000.

[11] **Fabregas,**T. V. SBR Technology for Waterwater treatment: suitable gerational conditions for a nutrient removal; Ph. D. Tesis; Universitat de Girona, Laboratori de engingeria quimica I ambiental,2004.

[12] **García, J;** Aguirre P. Barragan Jesús y otros. Paper: Efect of Key Design Parameters On The Efficiency Of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands: Long-Term Performace Pilot Study. Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.

[13] **Garcia T;** Paper: Diseño, Construcción y Evaluación Preliminar De Un Humedal de Flujo Subsuperficial, Universidad de Los Andes, Bogota Colombia, 2006.

[14] Guerreo J; Garcia S. Manejo De Aguas Residuales Orientado Hacia el Proceso De Tratamiento Por Humedales Artificiales. En: Scientia et Técnica. Vol. 8 Nro. 18, Abril de 2002.

[15] Huang, Y, Ortoz L y otros; Paper: Effect Of Design Parameter In Horizontal Flow Constructed Wetlands On The Behaviour Of Volatile Fatty Acids and Volatile Alkylsulfides. 2004.

[16] Hammer D.A. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment.* Lewis Publisher, Chelsea, 1989.

[17] Headley T. y otros, Paper: Treatment At Different Depths And Vertical Mixing Within a 1-m Deep Horizontal Subsurface- Flow Wetlands. Science Direct, 2005.

[18] Langergraber G. The Role Of Plant Uptake On The Removal Of Organic Matter And Nutrients In Subsurface Flow Constructed Wetlands: a Simulation Study. En: Water Science & Technology Vol. 51, Nro. 9, abril de 2005.

[19] Lara J. A. Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Universidad Politecnica de Cataluña, 1999.

[20] Kadlec, R.H., Knight, R.L., Treatment Wetlands. CRC Press, Boca Raton, FL, 893 , 1996.

[21] Kadlec R.H., Knight, R.L., y otros. Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. En: E IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollutions Control, 2000.

[22] Kallner, S. Bastviken , P.G. Eriksson , A. Premrov , K. Tonderski. Potential denitrification in wetland sediments with, different plant species detritus, Ecological Engineering 25 , 2005.

[23] Kohler, E.A; V.L. Poole, Z.J. Reicher , R.F. Turco Nutrient, metal, and pesticide removal during storm and nonstorm events by a constructed wetland on an urban golf course. Ecological Engineering 23, 2004.

[24] Leclerc, G. Sistema de tratamiento de aguas servidas por medio de humedales artificiales, Sociedad Quebequense de tratamiento. En: Estudios técnicos de sustitución aplicables al saneamiento de aguas servidas de pequeñas comunidades, Santa fe de Bogotá, 1999.

[25] METCALF & EDDY. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Fourth edition, Mcgraw Hill, 2003.

[26] Morato, J, Garcia, J, Bayona, J S; Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos, Una alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales, Barcelona, 2004.

[27] Reed S.C., Crites R.W. y Middlebrooks E.J.. Natural Systems for Waste Management and Treatment. 2nd Edition. MCGraw-Hill, New Cork, 1995.

[28] Rodríguez C.; Humedales Construidos, Estado Del arte. En: Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Vol. XXIV Nro. 3, 2003.

[29] **Sherrard**, R.M, J.S. Bearrb, C.L. Murray-Guldec, J.H. Rodgers Jr.b, Y.T. Shah. Feasibility of constructed wetlands for removing chlorothalonil and chlorpyrifos from aqueous mixtures. Environmental Pollution 127, 2004.

[30] “**Stándar Methods** for Examination of Water and Waster Water”, métodos normalizados para el análisis de agua potable y residuales, edición 17, 1992.

[31] **Universidad de Antioquia**, facultad de ingeniería departamento de ing. Sanitaria y ambiental. Manual para las prácticas de laboratorio de procesos fisicoquímicos para el tratamiento de aguas, 2005.

[32] **USEPA**, (United States Environmental Protection Agency). Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. EPA 625/1-88/022, 1988.

[33] **Tchobanoglous G.** Y otros, Small and Decentralized wastewater managment system. Mc Graw Hill International, Singapure, 2000.

[34] **Velasco M**, Vivas Y. Humedales artificiales como alternativa para el tratamiento de agua residual. En: Ingenieria Hoy, Popayán, 2006.

[35] **Vymazal, J**, Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. Ecological Engineering. En: agriculture, biology & environmental sciences, 2005.

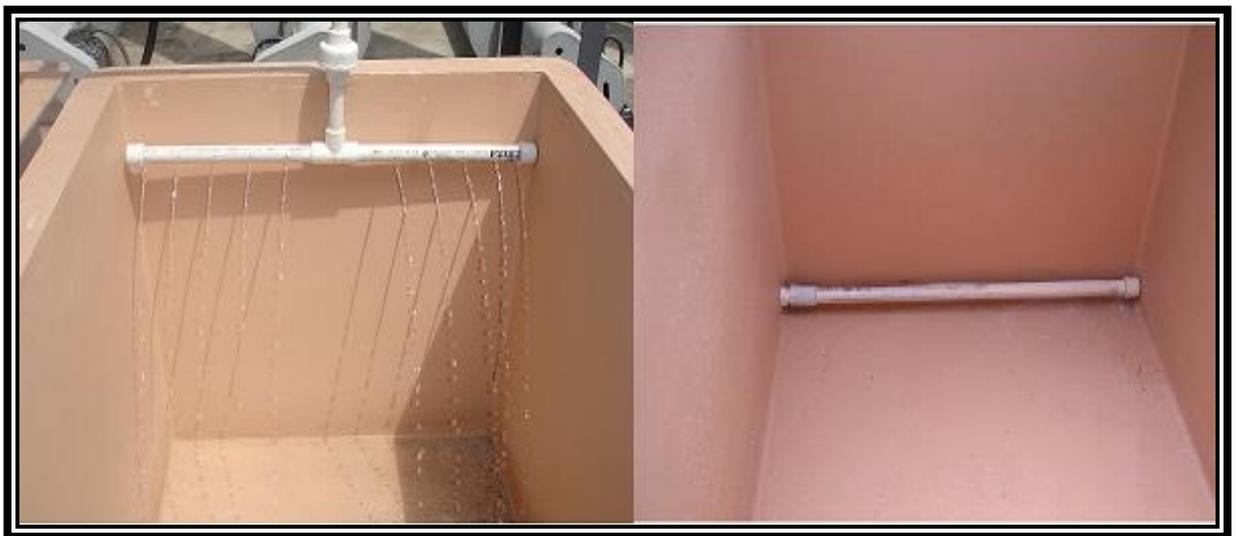
[36] **Vymazal, J.**; Lenka Kr“opfelov; Growth of *phragmites australis* and *phalaris arundinacea* in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic. En: Ecological Engineering, 2005.

ANEXOS

ANEXO A. REGISTRO FOTOGRAFICO



Imagen Nro. 1 Etapa de concepción y construcción de los humedales, a) concepción de la estructura de salida, b) Estructura de salida.



a)

b)

Imagen Nro. 3 estructura de entrada, salida y pruebas hidráulicas, a) Estructura de entrada b) Estructura de salida.



Imagen Nro. 4 Montaje Final de los humedales artificiales

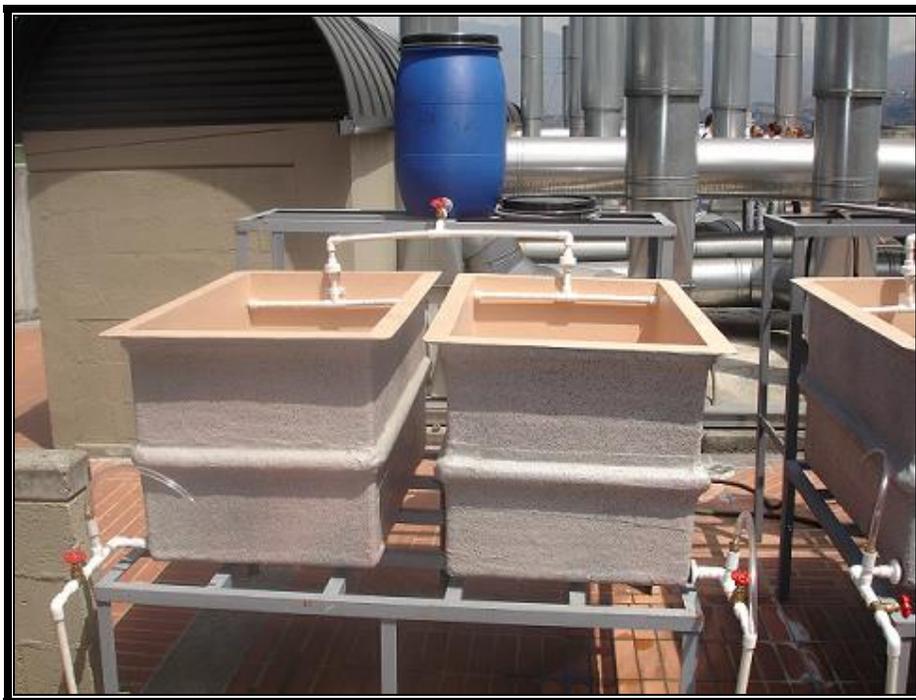


Imagen Nro. 5 Vista frontal del montaje final de los Humedales Artificiales



a)

b)

Imagen Nro. 6 montaje final primer día de aclimatación, a) montaje final humedales piloto vista frontal, b) detalle montaje Humedal A.



Imagen Nro. 7 Montaje final al día 52 de aclimatación

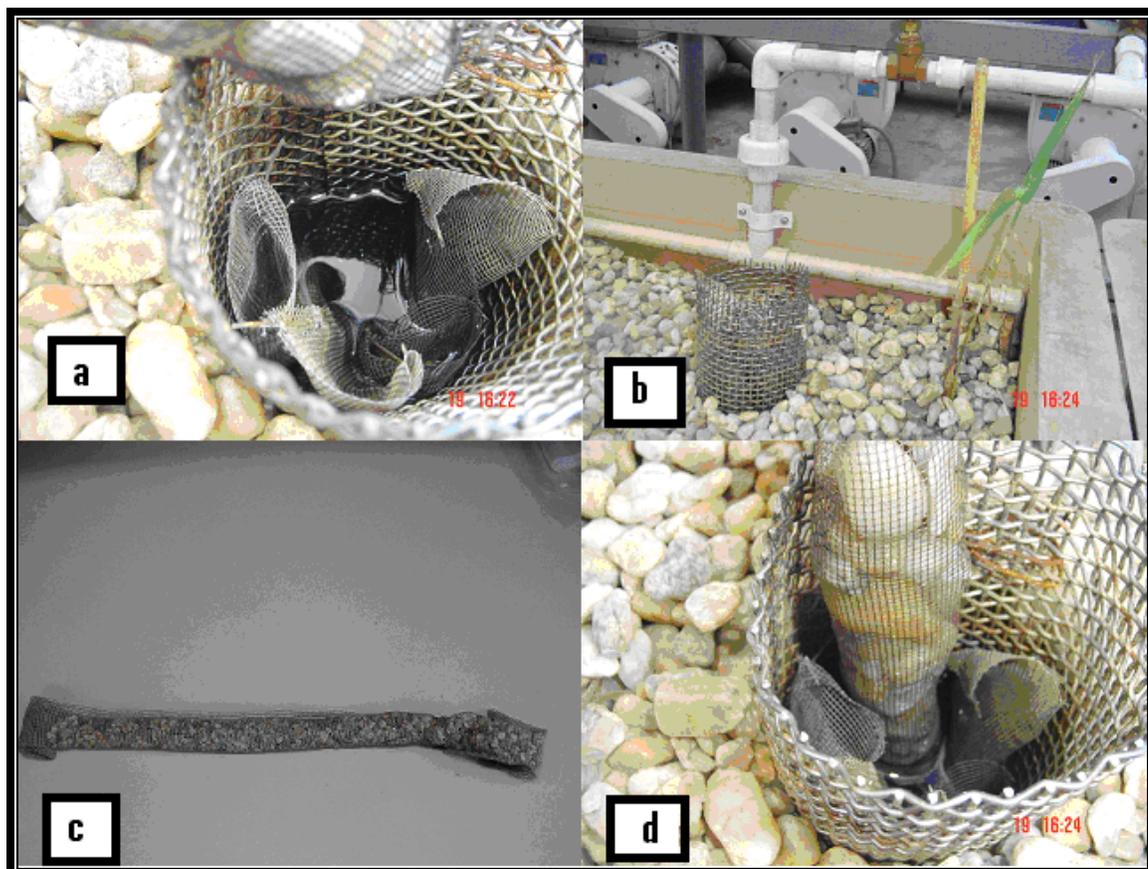


Imagen Nro. 8 Piezómetro con muestreadores de microorganismos en angeo, a) Piezómetros muestreadores con sus rectores de lecho empacado, b) Vista del piezómetro en la entrada del humedal C, c) Etapa de montaje de los reactores de lecho empacado relleno de grava pequeña. d) Reactores de lecho empacado



Imagen Nro. 9 a) Agua sintética preparada en el laboratorio
b) Agua a la salida del sistema de tratamiento



Imagen Nro. 10 Aforo volumétrico del caudal en el humedal A

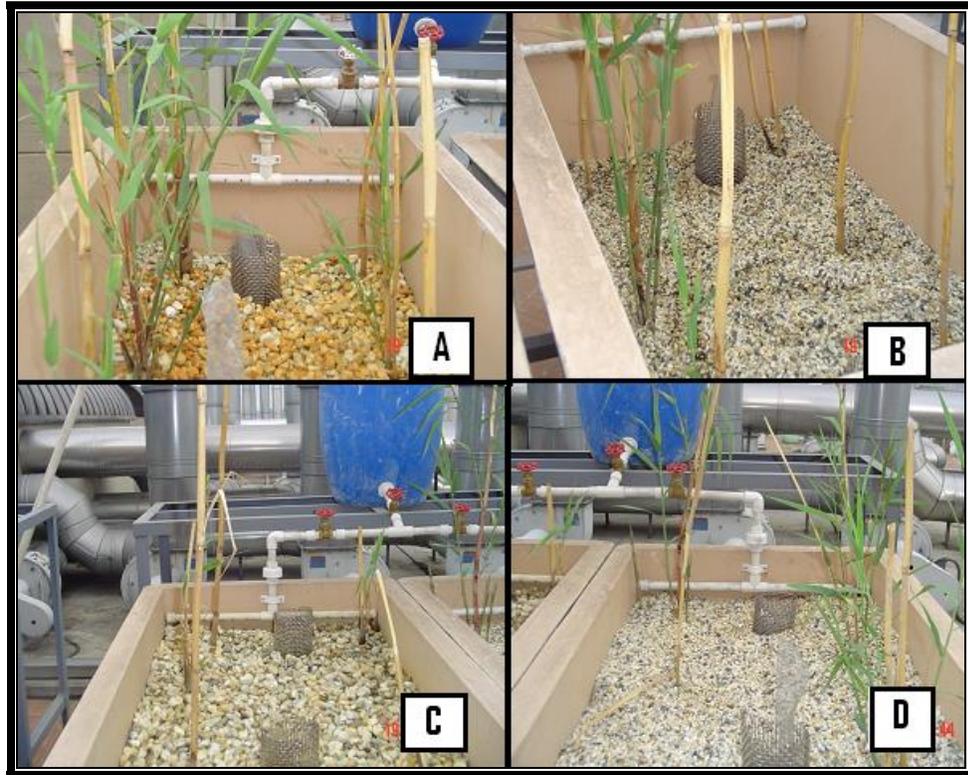


Imagen Nro. 11 Humedales piloto primer mes de aclimatación
 a) Humedal piloto de flujo subsuperficial tipo A, b) Humedal piloto de flujo subsuperficial tipo B, c) Humedal piloto de flujo subsuperficial tipo c, d) Humedal piloto de flujo subsuperficial tipo D.



Imagen Nro. 12 Muestreadores de microorganismos.

ANEXO B. CALCULO DE LA POROSIDAD

La porosidad en humedales artificiales se refiere a la proporción de del sistema que realmente esta ocupado por el agua y varia según el tipo de humedal. El rango de porosidad para material de soporte en humedales artificiales varia de 0,65-0,75 para grava gruesa y de 0,3-0,4 para grava pequeña.

Para calcular la porosidad de las gravas utilizadas en el presente trabajo de grado, nos remitimos al manual para las prácticas del laboratorio de procesos fisicoquímicos para el tratamiento de aguas.

Procedimiento

- A una probeta de 100 ml (1) agregar grava hasta 50 ml (V1).
- Desde una probeta (2), llena con 100 ml de agua, vaciar por las paredes de la probeta (1) agua hasta alcanzar 2 cm por encima del nivel de grava, durante el vaciado de agua debe agitar suavemente la probeta para extraer el aire.
- Medir el volumen final (arena+agua) en la probeta 1: V2.
- Medir el volumen final de agua en la probeta 2: V3.

$$P = \frac{((100 - V3) - (V2 - V1))}{V1}$$

Donde P es la porosidad.

ANEXO C. CÁLCULO DEL CAUDAL

Como se discutió anteriormente el tiempo de retención para los humedales piloto de flujo subsuperficial fue de 7 días, para lo cual se debió calcular el caudal que garantice este periodo de residencia.

$$Q = \frac{n * V_{total}}{t} \quad (C1)$$

Donde:

$Q = \text{Caudal}$

$n = \text{Porosidad}$

$V_{total} = \text{Volumen}$

$t = \text{Tiempo de retención}$

HUMEDAL A

$$V_{total} = 60\text{cm} * 100\text{cm} * 20\text{cm} = 120000\text{cm}^3$$

Utilizando la ecuación (C1)

$$Q = \frac{0,53 * 120000\text{cm}^3}{7\text{d}} = 9085,7\text{cm}^3 / \text{dia} = \underline{6,3\text{cm}^3 / \text{min}}$$

HUMEDAL B

El Volumen total para este tipo de humedal es el mismo que para el humedal A.

Utilizando la ecuación (C1)

$$Q = \frac{0,39 * 120000\text{cm}^3}{7\text{d}} = 6685,7\text{cm}^3 / \text{dia} = \underline{4,6\text{cm}^3 / \text{min}}$$

HUMEDAL C

$$V_{total} = 60\text{cm} * 100\text{cm} * 40\text{cm} = 240000\text{cm}^3$$

Utilizando la ecuación (1)

$$Q = \frac{0,53 * 240000 \text{cm}^3}{7d} = 18171,4 \text{cm}^3 / \text{dia} = \underline{12,6 \text{cm}^3 / \text{min}}$$

HUMEDAL D

El volumen total para este tipo de humedal es el mismo que para en humedal C.

Utilizando la ecuación (1)

$$Q = \frac{0,39 * 240000 \text{cm}^3}{7d} = 13371,4 \text{cm}^3 / \text{dia} = \underline{9,3 \text{cm}^3 / \text{min}}$$

ANEXO D. RESULTADOS MUESTREO DE MICROORGANISMOS

Tabla D1. Resultados Primer Muestreo De Microorganismos.

HUMEDAL A		
MICROORGANISMO	ENTRADA UFC/100 ml * 10 ⁶	SALIDA UFC/100 ml * 10 ⁶
Heterótrofos totales	9	35
Nitrogenadas	6	18
HUMEDAL B		
MICROORGANISMO	ENTRADA UFC/100 ml * 10 ⁶	SALIDA UFC/100 ml * 10 ⁶
Heterótrofos totales	24	30
Nitrogenadas	320	14
HUMEDAL C		
MICROORGANISMO	ENTRADA UFC/100 ml * 10 ⁶	SALIDA UFC/100 ml * 10 ⁶
Heterótrofos totales	14	16
Nitrogenadas	3	2
HUMEDAL D		
MICROORGANISMO	ENTRADA UFC/100 ml * 10 ⁶	SALIDA UFC/100 ml * 10 ⁶
Heterótrofos totales	9	70
Nitrogenadas	230	18

Al encontrar estos datos la primera semana de muestreo, se decidió indagar porque los humedales presentaban un número tan bajo de microorganismos y porque no crecieron otro tipo de bacterias como las anaerobias, se descubrió que al agua potable a la que se le mezclaban los compuestos para formar el agua residual sintética, se le estaba adicionando un biocida llamado BIOPURIN que elimina mesófilos, levaduras, coniformes, anaerobios y otros tipos de microorganismos.

Observado este problema se decidió dejar el agua potable expuesta a la radiación solar y agitar para eliminar el biocida, que podría estar eliminando los microorganismos dentro del humedal.

Solucionado el anterior problema se decidió tomar una segunda muestra de microorganismos y disminuir igualmente la dilución.

Tabla D2. Resultados Segundo Muestreo De Microorganismos.

HUMEDAL A		
MICROORGANISMO	ENTRADA UFC/100 ml * 10⁴	SALIDA UFC/100 ml * 10⁴
Heterótrofos totales	>6500	>6500
Nitrogenadas	>6500	>6500
Del azufre	60	120
Anaeróbios	>6500	>6500
HUMEDAL B		
MICROORGANISMO	ENTRADA UFC/100 ml * 10⁴	SALIDA UFC/100 ml * 10⁴
Heterótrofos totales	>6500	>6500
Nitrogenadas	>6500	>6500
Del azufre	>6500	>6500
Anaeróbios	>6500	>6500
HUMEDAL C		
MICROORGANISMO	ENTRADA UFC/100 ml * 10⁴	SALIDA UFC/100 ml * 10⁴
Heterótrofos totales	>6500	>6500
Nitrogenadas	40	>6500
Del azufre	>6500	>6500
Anaeróbios	>6500	>6500
HUMEDAL D		
MICROORGANISMO	ENTRADA UFC/100 ml * 10⁴	SALIDA UFC/100 ml * 10⁴
Heterótrofos totales	>6500	>6500
Nitrogenadas	>6500	37
Del azufre	>6500	>6500
Anaeróbios	>6500	>6500

Como se puede notar la radiación solar y el agitar el agua fue una medida eficaz para eliminar el biocida y por tanto aumentar la cantidad de microorganismos dentro del humedal, así como permitir el crecimiento de otras bacterias como las anaerobias que juegan un papel importante en la degradación de materia orgánica y en la eliminación de nutrientes.

ANEXO E. ANALISIS ESTADISTICO DE LOS DATOS RECOLECTADOS

Datos de pH

Modelo para el cálculo de varianza y desviación estándar para el pH en el humedal A.

$$Varianza = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{Varianza}$$

Tabla E1. Datos Registrados Humedal Tipo A

SEMANA	pH (y _i)	(y _i -y) ²	Varianza	Desv. Estandar
2	5,55	0,24	0,067	0,26
3	6,20	0,025		
4	6,13	0,0081		
5	6,12	0,0064		
6	5,88	0,0256		
7	6,35	0,0961		

N = 6

y = 6,04

Suma = 0,4012

Tabla E2. Estadística para los datos de pH

Tipo Humedal	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza	Desv. Estándar
A	6,35	5,55	6,04	0,067	0,26
B	6,26	5,24	5,66	0,185	0,43
C	6,51	5,67	6,19	0,069	0,26
D	6,62	5,65	6,18	0,092	0,30

Tabla E3. Estadística para los datos de Conductividad.

Tipo Humedal	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza	Desv. Estándar
A	640	339	449,17	7400,1	86,02
B	1035	808	867	11361,3	106,58

C	259	201	215,5	410,58	20,26
D	557	387	437	5782,6	76,04

Tabla E4. Estadística para los datos de Temperatura

Tipo Humedal	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza	Desv. Estándar
A	27,1	20,8	23,7	3,55	1,88
B	26,8	22,5	24,3	2,01	1,42
C	25,9	22,8	23,8	1,05	1,02
D	26,4	23,1	24,2	1,48	1,21

Tabla E5. Estadística para los datos de DBO₅

Tipo Humedal	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza	Desv. Estándar
A	110,4	11,6	45,58	1174,6	34,27
B	48,76	11,3	27,97	220,2	14,83
C	39,24	5,95	19,39	188,9	13,74
D	30,40	1,63	18,39	77,1	8,78

Tabla E6. Estadística para los datos de COT

Tipo Humedal	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza	Desv. Estándar
A	26,42	6,04	14,35	73,15	8,55
B	22,47	3,42	7,69	44,91	6,7
C	9,25	5,03	6,48	1,95	1,39
D	8,62	4,72	5,89	2,21	1,48

Tabla E7. Estadística para los datos de ST

Tipo Humedal	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza	Desv. Estándar
A	474	58	515	20079,22	141,70
B	1042	340	683	47743,55	218,50
C	304	12	140	10069,88	100,35
D	318	88	247	8523,66	92,32

Tabla E8. Estadística para los datos de PT

Tipo Humedal	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza	Desv. Estándar
A	3,02	0,068	1,78	1,41	1,18
B	2,52	0,098	0,54	0,79	0,88
C	4,44	2,89	3,58	0,35	0,59
D	2,71	0,10	0,88	0,66	0,81

Tabla E9. Estadística para los datos de PO³⁻⁴

Tipo Humedal	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza	Desv. Estándar
A	2,96	0,003	0,988	0,975	0,987
B	0,049	0,003	0,022	0,00029	0,017
C	1,77	0,18	1,121	0,3260	0,571
D	0,39	0,013	0,146	0,0163	0,127

Tabla E10. Descripción de datos para la realización del análisis de varianza.

		Descriptives							
		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
PH	Afluente	3	4,9133	,4407	,2544	3,8185	6,0081	4,41	5,23
	Efluente A	6	6,0383	,2835	,1157	5,7408	6,3359	5,55	6,35
	Efluente B	6	5,6683	,4710	,1923	5,1741	6,1626	5,24	6,26
	Efluente C	6	6,1900	,2880	,1176	5,8878	6,4922	5,70	6,51
	Efluente D	6	6,1800	,3328	,1359	5,8307	6,5293	5,65	6,62
	Total	27	5,8963	,5262	,1013	5,6881	6,1045	4,41	6,62
Conductividad (µs/cm)	Afluente	3	457,67	57,55	33,23	314,70	600,64	421	524
	Efluente A	6	449,17	94,23	38,47	350,27	548,06	339	590
	Efluente B	6	867,00	116,76	47,67	744,46	989,54	745	1035
	Efluente C	6	215,50	22,20	9,06	192,21	238,79	201	259
	Efluente D	6	437,00	83,30	34,01	349,58	524,42	326	557
	Total	27	488,33	239,48	46,09	393,60	583,07	201	1035
T(c)	Afluente	3	23,433	1,595	,921	19,472	27,395	22,1	25,2
	Efluente A	6	23,683	2,064	,843	21,517	25,850	20,8	27,1
	Efluente B	6	24,300	1,553	,634	22,670	25,930	22,5	26,8
	Efluente C	6	23,767	1,125	,459	22,586	24,948	22,8	25,9
	Efluente D	6	24,233	1,335	,545	22,832	25,635	23,1	26,4
	Total	27	23,933	1,472	,283	23,351	24,516	20,8	27,1
DBO5(ppm)	Afluente	3	142,33	30,04	17,34	67,71	216,95	124	177
	Efluente A	6	45,33	37,59	15,35	5,88	84,78	11	110
	Efluente B	6	28,00	16,31	6,66	10,88	45,12	11	49
	Efluente C	6	19,33	15,12	6,17	3,46	35,20	6	39
	Efluente D	6	18,17	9,39	3,83	8,31	28,02	2	30
	Total	27	40,44	43,70	8,41	23,16	57,73	2	177
Carbono Orgánico Total (ppm)	Afluente	3	37,45567	3,45541	1,99498	28,87196	46,03937	33,467	39,538
	Efluente A	6	14,35400	9,36943	3,82505	4,52138	24,18662	6,049	26,425
	Efluente B	6	7,69917	7,34132	2,99708	-5,07201E-03	15,40341	3,420	22,474
	Efluente C	6	6,29667	1,53006	,62465	4,69096	7,90237	5,028	9,252
	Efluente D	6	5,89800	1,62830	,66475	4,18920	7,60680	4,492	8,624
	Total	27	11,77237	11,20204	2,15583	7,34099	16,20375	3,420	39,538
Solidos totales (ppm)	Afluente	3	719,33	224,16	129,42	162,48	1276,19	466	892
	Efluente A	6	300,33	155,23	63,37	137,43	463,23	58	474
	Efluente B	6	682,67	239,36	97,72	431,48	933,86	340	1042
	Efluente C	6	140,33	109,93	44,88	24,97	255,69	12	304
	Efluente D	6	247,00	101,14	41,29	140,86	353,14	88	332
	Total	27	384,44	277,52	53,41	274,66	494,23	12	1042
PO34	Afluente	3	11,20000	6,00999	3,46987	-3,72965	26,12965	6,600	18,000
	Efluente A	6	,98883	1,08187	,44167	-,14652	2,12418	,003	2,960
	Efluente B	6	5,0333E-02	6,6232E-02	2,7039E-02	-1,91728E-02	,11984	,003	,180
	Efluente C	6	1,12167	,62499	,25515	,46578	1,77756	,420	1,770
	Efluente D	6	,14683	,13994	5,7132E-02	-2,83012E-05	,29369	,013	,390
	Total	27	1,75726	3,85641	,74217	,23171	3,28281	,003	18,000
Fosforo total	Afluente	3	12,00000	7,13372	4,11866	-5,72115	29,72115	6,300	20,000
	Efluente A	6	1,78800	1,30178	,53145	,42187	3,15413	,068	3,600
	Efluente B	6	,54167	,97356	,39746	-,48003	1,56336	,012	2,520
	Efluente C	6	3,58333	,64723	,26423	2,90411	4,26256	2,890	4,440
	Efluente D	6	,88000	,96162	,39258	-,12916	1,88916	,100	2,710
	Total	27	2,84289	4,10500	,79001	1,21901	4,46677	,012	20,000

Tabla E11. Estadística de análisis de varianza.

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
PH	Between Groups	4,332	4	1,083	8,308	,000
	Within Groups	2,868	22	,130		
	Total	7,200	26			
Conductividad (µs/cm)	Between Groups	1334795,000	4	333698,750	46,954	,000
	Within Groups	156353,000	22	7106,955		
	Total	1491148,000	26			
T(c)	Between Groups	2,638	4	,660	,270	,894
	Within Groups	53,702	22	2,441		
	Total	56,340	26			
DBO5(ppm)	Between Groups	37868,500	4	9467,125	17,674	,000
	Within Groups	11784,167	22	535,644		
	Total	49652,667	26			
Carbono Orgánico Total (ppm)	Between Groups	2505,379	4	626,345	18,197	,000
	Within Groups	757,248	22	34,420		
	Total	3262,627	26			
Solidos totales (ppm)	Between Groups	1383406,000	4	345851,500	12,292	,000
	Within Groups	618996,667	22	28136,212		
	Total	2002402,667	26			
PO34	Between Groups	306,505	4	76,626	21,029	,000
	Within Groups	80,165	22	3,644		
	Total	386,670	26			
Fosforo total	Between Groups	316,416	4	79,104	14,299	,000
	Within Groups	121,710	22	5,532		
	Total	438,126	26			

Tabla E12. Comparación de los datos ANOVA.

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dunnnett t (2-sided)^a

Dependent Variable	(I) Tipo de Humedal	(J) Tipo de Humedal	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
PH	Efluente A	Afluente	1,1250*	,2553	,001	,4697	1,7803
	Efluente B	Afluente	,7550*	,2553	,022	9,974E-02	1,4103
	Efluente C	Afluente	1,2767*	,2553	,000	,6214	1,9319
	Efluente D	Afluente	1,2667*	,2553	,000	,6114	1,9219
Conductividad (µs/cm)	Efluente A	Afluente	-8,50	59,61	,999	-161,50	144,50
	Efluente B	Afluente	409,33*	59,61	,000	256,33	562,33
	Efluente C	Afluente	-242,17*	59,61	,002	-395,17	-89,17
	Efluente D	Afluente	-20,67	59,61	,984	-173,67	132,33
T(c)	Efluente A	Afluente	,250	1,105	,997	-2,586	3,086
	Efluente B	Afluente	,867	1,105	,799	-1,969	3,702
	Efluente C	Afluente	,333	1,105	,991	-2,502	3,169
	Efluente D	Afluente	,800	1,105	,837	-2,036	3,636
DBO5(ppm)	Efluente A	Afluente	-97,00*	16,37	,000	-139,00	-55,00
	Efluente B	Afluente	-114,33*	16,37	,000	-156,34	-72,33
	Efluente C	Afluente	-123,00*	16,37	,000	-165,00	-81,00
	Efluente D	Afluente	-124,17*	16,37	,000	-166,17	-82,16
Carbono Orgánico Total (ppm)	Efluente A	Afluente	-23,10167*	4,14852	,000	-33,74940	-12,45393
	Efluente B	Afluente	-29,75650*	4,14852	,000	-40,40424	-19,10876
	Efluente C	Afluente	-31,15900*	4,14852	,000	-41,80674	-20,51126
	Efluente D	Afluente	-31,55767*	4,14852	,000	-42,20540	-20,90993
Solidos totales (ppm)	Efluente A	Afluente	-419,00*	118,61	,006	-723,43	-114,57
	Efluente B	Afluente	-36,67	118,61	,990	-341,09	267,76
	Efluente C	Afluente	-579,00*	118,61	,000	-883,43	-274,57
	Efluente D	Afluente	-472,33*	118,61	,002	-776,76	-167,91
PO34	Efluente A	Afluente	-10,21117*	1,34979	,000	-13,67559	-6,74674
	Efluente B	Afluente	-11,14967*	1,34979	,000	-14,61409	-7,68524
	Efluente C	Afluente	-10,07833*	1,34979	,000	-13,54276	-6,61391
	Efluente D	Afluente	-11,05317*	1,34979	,000	-14,51759	-7,58874
Fosforo total	Efluente A	Afluente	-10,21200*	1,66317	,000	-14,48076	-5,94324
	Efluente B	Afluente	-11,45833*	1,66317	,000	-15,72710	-7,18957
	Efluente C	Afluente	-8,41667*	1,66317	,000	-12,68543	-4,14790
	Efluente D	Afluente	-11,12000*	1,66317	,000	-15,38876	-6,85124

*. The mean difference is significant at the .05 level.

^a Dunnnett t-tests treat one group as a control, and compare all other groups against it.