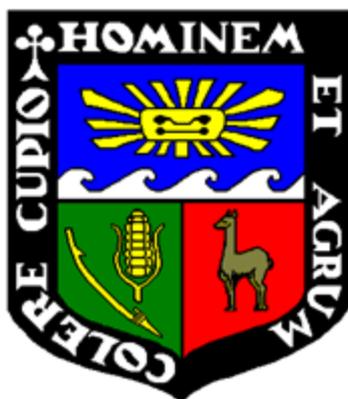


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE HUMEDALES
ARTIFICIALES VERTICALES EMPLEANDO *Cyperus alternifolius* Y
Chrysopogon zizanioides PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
SERVIDAS”**

Presentado por:

YELHSIN MIGUEL GÓMEZ LORDAN

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

Lima – Perú

2017

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. A mi madre por ser la persona más paciente, que con sus actos me ha enseñado a superar los momentos difíciles y valorar los momentos en familia. A mi padre quien con sus consejos ha sabido guiarme para culminar mi carrera y desarrollarme en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi patrocinadora, la ingeniera Rosa Miglio, por su tutela para el desarrollo de este trabajo y compromiso personal como docente y maestra.

A las compañeras de tesis, Luciana Oyarce y Melisa Ponce, por su ayuda en los distintos trabajos que fueron necesarios para sacar adelante la investigación.

A Carlos Mestanza y María Fernanda Moya por su valioso apoyo en el desarrollo de la tesis.

A mis queridos hermanos Betsy, Mirian, Jean Carlos y Andrea, por alegrar, motivar e iluminar mis días.

A mí querido sobrino Sthephano, que llegó en el momento indicado para alegrarme y darme la motivación necesaria.

A mi prima Sonia, por ser ejemplo de constancia y perseverancia.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LA LITERATURA	4
2.1	Agua residual.....	4
2.1.1	Clasificación de aguas residuales	4
2.1.2	Composición de las aguas residuales domesticas.....	5
2.1.3	Propiedades de las aguas residuales	6
2.1.4	Parámetros de calidad de las aguas residuales domésticas.....	7
2.2	Tratamiento de aguas residuales domesticas.....	10
2.2.1	Niveles de tratamiento de aguas residuales	11
2.3	Humedales.....	12
2.3.1	Humedales artificiales	13
2.3.2	Funciones generales de los humedales artificiales	14
2.3.3	Tipos de humedales artificiales	15
2.3.4	Componentes de los humedales artificiales.....	19
2.3.5	Relación entre plantas y microorganismos.....	22
2.4	Tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales	23
2.4.1	Mecanismos que intervienen en la remoción de contaminantes en humedales artificiales.....	23
2.4.2	Contaminantes removidos en el proceso de depuración.....	25
2.5	Parámetros de diseño para humedales artificiales	30
2.6	Plantas acuáticas apropiadas para el tratamiento.....	31
2.6.1	Plantas acuáticas flotantes	31
2.6.2	Plantas acuáticas sumergidas.....	32
2.6.3	Plantas acuáticas emergentes.....	32

2.7	Biomasa.....	42
2.7.1	Medición de biomasa de las plantas.....	43
2.8	Experiencias en otros países con vetiver y paragüitas.....	43
2.8.1	Experiencias con <i>Cyperus alternifolius</i>	43
2.8.2	Experiencias con el <i>Crysopogon zizanioides</i>	48
2.9	Marco legal de referencia.....	54
III.	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE LA UNALM.....	58
3.1	Antecedentes	58
3.2	Situación.....	58
3.3	Distribución de los sistemas.....	58
3.3.1	Tratamientos primarios	60
3.3.2	Tratamientos secundarios.....	62
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS	65
4.1	Ubicación	65
4.2	Duración.....	65
4.3	Metodología	65
4.3.1	Pre-operación	65
4.3.2	Operación y evaluación.....	67
4.3.2.1	Evaluación del desarrollo de las plantas.....	67
4.3.2.2	Determinación de los parámetros de operación del humedal artificial	67
4.3.2.3	Monitoreo de la calidad del agua	70
4.3.2.4	Determinación de la eficiencia de remoción	75
4.3.3	Mantenimiento del sistema.....	75
4.3.3.1	Determinación de la biomasa de plantas	75
4.3.4	Análisis estadístico.....	77
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	78
5.1	Relación del crecimiento de la planta y la temperatura.....	78
5.2	Evaluación de biomasa del Paragüitas y Vetiver	79
5.3	Determinación de los caudales del sistema	80

5.3.1	Determinación de caudal de entrada	80
5.3.2	Determinación de caudal de salida.....	81
5.4	Determinación de los parámetros de operación del humedal.....	82
5.4.1	Determinación del tiempo de retención.....	82
5.4.2	Determinación de la carga hidráulica.....	83
5.4.3	Determinación de la carga orgánica (c).....	83
5.4.4	Determinación del área requerida por habitante equivalente	84
5.5	Caracterización del agua residual.....	85
5.6	Caracterización del agua residual pre-tratada.....	85
5.7	Caracterización del agua residual tratada.....	86
5.7.1	Parámetros físicos	88
5.7.2	Parámetros químicos	92
5.7.3	Parámetros biológicos	104
VI.	CONCLUSIONES	107
VII.	RECOMENDACIONES	109
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
IX.	ANEXOS.....	119

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición de las Aguas Domésticas.....	5
Cuadro 2: Concentraciones típicas encontradas en aguas servidas pre-tratadas	6
Cuadro 3. Compuestos olorosos asociados con agua residuales	8
Cuadro 4. Características y descripciones de humedales artificiales	13
Cuadro 5. Ventajas y Desventajas del sistema de humedales artificiales	14
Cuadro 6. Principales mecanismos de remoción con humedales	16
Cuadro 7. Principales mecanismos de remoción y transformación en humedales.....	24
Cuadro 8: Ciclo del nitrógeno	27
Cuadro 9. Adaptación de 12 especies al tratamiento de efluentes residuales con humedales artificiales.....	33
Cuadro 10. Taxonomía de la especie vegetal <i>Cyperus alternifolius</i>	37
Cuadro 11. Taxonomía del <i>Chrysopogon zizanioides</i>	41
Cuadro 12. Porcentaje de remoción usando <i>Cyperus alternifolius</i> y suelo Ferralítico rojo.	45
Cuadro 13: Características y resultados de la investigación hecha por Mellisho, 1999.....	46
Cuadro 14: Características y resultados de la investigación hecha por Miglio, 2003	47
Cuadro 15: Eficiencia de Vetiver en la eliminación de N y P a partir de agua contaminada del río.	49
Cuadro 16. Resultados de la eficiencia del Vetiver investigada por (Lishenga, 2015).....	49
Cuadro 17. Altura de plantas al principio de cada semana	50
Cuadro 18: Calidad del efluente antes y después del tratamiento Vetiver.....	51
Cuadro 19. Límites Máximos Permisibles para los efluentes de PTAR	57
Cuadro 20. Dimensionamiento del Tanque Baffled	60
Cuadro 21: Dimensiones de la celda francesa.....	62
Cuadro 22. Dimensiones del humedal horizontal.....	63
Cuadro 23. Dimensiones del humedal vertical.....	64
Cuadro 24: Parámetros evaluados para la caracterización del agua residual	74
Cuadro 25: Resultados de medición de caudal de entrada	81
Cuadro 26: Resultados de medición de caudal de salida de los humedales	81
Cuadro 27: Tiempos de retención en humedales.....	82
Cuadro 28: Carga hidráulica	83

Cuadro 29: Carga orgánica.....	83
Cuadro 30: Simulación de carga hidráulica y orgánica.....	84
Cuadro 31: Área por habitante equivalente.....	84
Cuadro 32: Resumen de caracterización del agua residual pretratada	85
Cuadro 33: Resumen de la caracterización del agua residual tratada.	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Composición de los sólidos en aguas residuales.....	8
Figura 2: Parámetros químicos a medirse en aguas residuales.....	9
Figura 3. Clasificación microbiológica en aguas residuales.	10
Figura 4: Esquema de clasificación de los sistemas.....	15
Figura 5: Humedal superficial de flujo libre.....	16
Figura 6: Humedal de flujo subsuperficial.....	18
Figura 7: Esquema de la sección transversal de un HFH.....	18
Figura 8: Esquema en corte de un humedal vertical HFV.....	19
Figura 9: Relación simbiótica cíclica entre plantas y bacterias.....	22
Figura 10: Procesos de depuración de los humedales artificiales.....	25
Figura 11: Rizomas del <i>Cyperus alternifolius</i>	35
Figura 12: Semillas del <i>Cyperus alternifolius</i>	35
Figura 13: Reproducción de plantas por corte.....	36
Figura 14: Flor del <i>Cyperus alternifolius</i>	37
Figura 15: Sistemas de raíces masivas.....	39
Figura 16: Macollas de Vetiver.....	39
Figura 17: Características de la hoja del Vetiver.....	41
Figura 18: Tratamiento con Vetiver.....	51
Figura 19: Plantación de Vetiver en una planta procesadora de mariscos.....	52
Figura 20: Unidad de humedal después de 6 semanas.....	53
Figura 21: Calidad del efluente antes y después del tratamiento.....	54
Figura 22: Esquema general de la PTAR.....	59
Figura 23: Limpieza de humedales.....	66
Figura 24 : Sembrío de macrófitas.....	66
Figura 25: Medición del caudal de ingreso al humedal.....	68
Figura 26: Medición del caudal de salida del humedal.....	68
Figura 27: Puntos de Muestreo.....	72
Figura 28: Toma de Muestras en el pretratamiento.....	73
Figura 29: Toma de Muestras en Humedales.....	73
Figura 30: Relación del crecimiento de las plantas y la temperatura.....	78

Figura 31. Análisis del desarrollo biomásico del Paragüitas y Vetiver.....	80
Figura 32. Variación de la temperatura durante el periodo de monitoreo.....	88
Figura 33: Variación de pH durante el periodo de monitoreo.....	89
Figura 34: Variación de la conductividad eléctrica durante el periodo de monitoreo.....	90
Figura 35: Variación de turbiedad durante el periodo d monitoreo	91
Figura 36: Eficiencia de remoción de la Turbiedad	91
Figura 37: Variación de oxígeno disuelto durante el periodo de monitoreo	92
Figura 38: Comparación de niveles de oxígeno disuelto entre humedales	93
Figura 39: Variación del nitrógeno amoniacal durante el periodo de monitoreo.....	94
Figura 40: Comparación de eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal entre humedales	95
Figura 41: Variación del fósforo total durante el periodo de monitoreo.....	96
Figura 42: Comparación de eficiencia de remoción de fósforo total entre humedales	96
Figura 43: Variación del nitrógeno total durante el periodo de monitoreo	97
Figura 44: Comparación de eficiencia de remoción de fósforo total entre humedales	98
Figura 45: Variación de la Demanda bioquímica durante el periodo de monitoreo.....	99
Figura 46: Comparación de eficiencia de remoción de DBO ₅ entre humedales	100
Figura 47: Variación de la Demanda química de oxígeno durante el periodo de monitoreo	101
Figura 48: Comparación de eficiencia de remoción de DQO entre humedales	101
Figura 49: Variación de sólidos suspendidos totales durante el periodo de monitoreo	103
Figura 50: Comparación de eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales entre humedales	103
Figura 51: Variación de los coliformes fecales durante el periodo de monitoreo.....	105
Figura 52: Comparación de la eficiencia de remoción de Coliformes fecales entre humedales. ...	105
Figura 53: Análisis de significancia de Temperatura.....	134
Figura 54: Análisis de significancia de pH	135
Figura 55: Análisis de significancia de la conductividad eléctrica	135
Figura 56. Análisis de significancia de la turbiedad	136
Figura 57. Análisis de significancia de niveles de oxígeno disuelto.....	137
Figura 58. Análisis de significancia de niveles Nitrógeno amoniacal.....	137
Figura 59. Análisis de significancia de niveles Fósforo total.....	138
Figura 60. Análisis de significancia de niveles nitrógeno total.....	139
Figura 61. Análisis de significancia de niveles Demanda bioquímica de oxígeno	139
Figura 62. Análisis de significancia de niveles Demanda química de oxígeno	140
Figura 63. Análisis de significancia de niveles sólidos suspendidos totales.....	141
Figura 64. Análisis de significancia de niveles coliformes fecales.....	141

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 : Evaluación del crecimiento y rendimiento biomásico de las plantas	119
ANEXO 2: Mediciones y datos de temperatura.....	120
ANEXO 3: Resultados de caudales de entrada y salida.....	125
ANEXO 4: Resultados de evaluación de parámetros in situ.....	125
ANEXO 5: Resultados de Evaluación del sistema -Mediciones en laboratorio	127
ANEXO 6: Análisis Estadístico	130
ANEXO 7: Galería fotográfica	142
ANEXO 8: Planos de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la UNALM	151

RESÚMEN

En esta investigación se evaluaron diversos parámetros de las aguas servidas para ver el comportamiento y la potencialidad fitodepuradora de dos tipos de plantas, se evaluaron dos humedales artificiales verticales sembrados con *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides*. Los humedales estuvieron ubicados en la planta piloto de tratamiento de aguas servidas de la Universidad Nacional Agraria La Molina, y fueron evaluados durante los meses de enero a noviembre del año 2016. Se tomaron muestras en tres puntos, una a la entrada de los humedales que representa el agua residual pretratada, las otras dos a la salida de cada humedal representando el agua residual tratada. Se determinaron parámetros operacionales, entre ellos se determinó el promedio de la carga orgánica superficial para ambos humedales registrándose valores de 14.79 y 17 g/m².día para un caudal de 2.45 y 2.88 m³/día respectivamente. Estos valores se encuentran dentro de los rangos recomendados por Hoffman (2011). Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se evaluaron teniendo como referencia el “Standar Methods For The Examination of Water and Wastewater”; los humedales artificiales verticales alcanzaron buenos niveles de remoción con valores de 98.6 y 96.4% de DBO₅, 93 y 90% de DQO, 89.2 y 87.2% en SST y 4 y 5 unidades logarítmicas/100 ml de coliformes termotolerantes o fecales para los humedales con Paragüitas y Vetiver en ese orden. Respecto a la vegetación el Paragüitas y el Vetiver tuvieron una buena adaptación durante todo el proceso de la investigación dentro de la cual se hizo un corte de mantenimiento con la cual se pudo evaluar el rendimiento biomásico en peso seco de ambas plantas obteniendo valores de 31.3 Tn.ha/año para el *Cyperus alternifolius* y 31.1 Tn.ha/año para el *Chrysopogon zizanioides*. Los humedales no presentaron malos olores, encharcamiento, ni presencia de vectores sobre su superficie. Estadísticamente se encontró que no existen diferencias significativas de remoción de materia orgánica y sólidos entre ambas plantas.

I. INTRODUCCIÓN

En el marco de la LATINOSAN 2016, se explicó que, de los 30 millones de habitantes que tiene el Perú, alrededor de 9 millones viven en zonas rurales y el número de personas de estas zonas que han accedido a agua y saneamiento, en los últimos cinco años, se duplicó, pasando de 3 millones a 6 millones. No obstante, 9.7 millones que no tienen servicios de saneamiento. (LATINOSAN, 2016)

En cuanto a la cobertura de saneamiento en los ámbitos urbano y rural, la brecha existente es bastante amplia. Al año 2014 el sector urbano tenía una cobertura de 84.0%, mientras que el sector rural apenas alcanzaba el 18.5%. Así, 3.8 millones de personas del ámbito urbano no cuentan con servicios de saneamiento y en el ámbito rural 6 millones de personas padecen de la misma carencia. (MVCS ,2016).

El gran desafío para el estado, es garantizar el acceso de toda la población, a los servicios de agua potable y saneamiento, reconociendo la importancia que tienen para el cuidado de la salud pública, la superación de la pobreza, la dignidad humana, el desarrollo económico y la protección del medio ambiente. (CEPAL, 2010). Según la (OMS 2014), una adecuada oferta de agua, saneamiento e higiene contribuye sustancialmente a la reducción de la incidencia de enfermedades diarreicas. Es por ello que existe una fuerte relación entre los servicios de agua y saneamiento con la economía, evidenciando beneficios en el sector salud y para el Estado.

El desarrollo económico trae como consecuencia el proceso de urbanización y con ello la migración de habitantes rurales a la ciudad, adicionándole a esto, la baja capacidad de planificación y políticas inversión lentas, sin capacidad de desarrollar infraestructura básica al mismo ritmo de crecimiento de las zonas urbanas, generando barrios periféricos sin servicios de agua y saneamiento. La falta de los mismos limita la productividad de sus habitantes y pone en riesgo la salud de los mismos.

Los sistemas semi-descentralizados (sistemas localizados), se plantean como sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas y permiten incrementar el porcentaje de tratamiento del agua residual en el país; sin embargo es necesario investigar tecnologías blandas y de bajo costo que puedan ser ejecutadas a todo nivel por comunidades urbanas, periurbanas y rurales, ya que estos sistemas permiten disminuir la complejidad y los costos de tratamiento.

Los sistemas de tratamiento semi-descentralizados son apropiados para poblaciones periféricas en crecimiento, dado que requieren de menos planificación puesto que su implementación es sencilla y por tanto la inversión en infraestructura es incremental (se realiza a medida que la ciudad crece). Otro beneficio es que, si la demanda va en incremento, entonces las nuevas plantas pueden usar nuevas tecnologías de tratamiento aumentando su eficiencia. (Heredia, 2013)

Una de las tecnologías aplicables a sistemas semi-descentralizados, es el uso de humedales artificiales verticales, los cuales, están constituidos por grava o arena gruesa, que ayuda a la filtración de sólidos y las plantas acuáticas, que cumplen la función de depuración y adsorción de nutrientes.

En el año 2013, se construyó una planta piloto de tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional Agraria La Molina, aplicando humedales artificiales; una de las líneas de tratamiento está conformada por una celda francesa como tratamiento primario y humedales artificiales de flujo vertical como tratamiento secundario.

Objetivo general

- Evaluar la eficiencia de los humedales artificiales verticales empleando las macrófitas *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides* para el tratamiento de aguas residuales, instaladas en el área de CEMTRAR, Universidad Nacional Agraria La Molina.

Objetivos específicos siendo los siguientes:

- Evaluar el desarrollo biomásico de las plantas *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides*.

- Determinar los parámetros de operación de los humedales artificiales verticales.
- Evaluar parámetros físico-químicos y microbiológicos antes y después del tratamiento con humedales artificiales verticales.
- Comparar las eficiencias de remoción de los dos humedales artificiales verticales.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 AGUA RESIDUAL

Metcalf-Eddy (1999), denomina aguas residuales a la combinación de los líquidos y residuos arrastrados por el agua proveniente de actividades humanas, provenientes de casas, edificios, fábricas e instituciones, estas llevan en su composición un gran volumen de agua (99.9%) y que generalmente son vertidos a cursos o a masas de aguas continentales o marinas.

2.1.1 CLASIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Espigares (1985), clasifica las aguas residuales en:

- Agua residual doméstica, son las aguas residuales producidas por el consumo de agua potable: lavado de platos, duchas, lavatorios, servicios sanitarios y similares. Su calidad es muy uniforme y conocida y varía un poco con respecto al nivel socioeconómico y cultural de las poblaciones.
- Agua residual industrial, son las aguas que ha sido utilizadas en procesos industriales y que han recibido subproductos contaminantes como efecto de ese uso. Su calidad es sumamente variable y prácticamente se requiere un estudio particular para cada industria.
- Agua residual urbana, las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial. Todas ellas habitualmente se recogen en un sistema colector y son enviadas a una planta de tratamiento de agua residual.

2.1.2 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

Seoanez (1995), señala que los constituyentes encontrados en las aguas residuales domésticas pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. De los constituyentes de agua residual, los sólidos suspendidos, los compuestos orgánicos biodegradables y los organismos patógenos son de mayor importancia, y por ello la mayoría de instalaciones de manejo de aguas residuales deben ser diseñadas para su remoción. La composición de las aguas residuales es muy variada. Para el caso particular de aguas residuales domésticas se tienen estudios que permiten determinar los contaminantes presentes, así como los rangos de concentración de las mismas, los cuales se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Composición de las Aguas Domésticas

Componente	Concentración Fuerte (mg/L)	Concentración Media (mg/L)	Concentración Débil mg/L
Solidos Totales	1200	720	35
Disueltos	950	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
Suspendidos	350	220	100
Fijos	75	55	20
Volátiles	275	165	80
Sedimentables	20	10	5
DBO	400	220	110
COT	290	160	80
DQO	1000	500	250
Nitrógeno Total	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniacal	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fosforo Total	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad	200	100	50
Grasas-Aceites	150	100	50

Fuente: Adaptado de Metcalf and Eddy, 1985

La composición típica de las aguas residuales pre-tratadas se muestra en el Cuadro 2

Cuadro 2: Concentraciones típicas encontradas en aguas servidas pre-tratadas

Parámetro	Unidad	Valores promedio
Temperatura	C°	25.9
pH	Und.	7.1-7.18
Conductividad eléctrica	mmhos/cm	1.61
Turbidez	NTU	265.8
Demanda química de oxígeno(DQO)	mg/l	252.72
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/l	252.72
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/l	194.23-194.53
Nitrógeno total (NT)	mg/l	-
Amonio(NH4)	mg/l	-
Fósforo total(PT)	mg/l	-
Fosfato(PO4-3)	mg/l	-
Coliformes fecales (CF)	NMP/100ml	9.3E+07 - 1.00e+08

Fuente: Adaptado de Rojas, Vera y Vidal (2013), y Vera, Araya, Andrés, Sáez y Vidal (2014).

2.1.3 PROPIEDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES

Seoanez (1995), menciona que las propiedades de las aguas residuales son las siguientes:

- **Caudal**

El volumen del afluente por unidad de tiempo, es un dato fundamental para diseñar y proyectar un sistema de tratamiento de aguas residuales tanto domesticas como industriales. Por lo tanto, existen varios factores que orientan y condicionan el caudal como son el nivel de vida de la población, los hábitos de uso de agua, caudal de agua potable que recibe la población, las pérdidas que existen tanto en la red de agua potable como en los colectores de aguas residuales y las variaciones del caudal a lo largo del día y de noche.

- **Propiedades físicas**

Estas propiedades son adquiridas según el contenido total de sólidos flotantes, sustancias coloidales y productos disueltos. Entre los cuales se tiene: los sólidos, el color de los efluentes, la temperatura, olor y contenido de sales.

- **Propiedades químicas**

Están representadas por la materia orgánica, nitrógeno orgánico, fósforo, elementos pesados y trazas, zinc, cobre, níquel y el boro.

- **Propiedades biológicas**

El componente biológico de las aguas residuales es de fundamental importancia en el control de enfermedades causadas por organismos patógenos de origen humano, y por el papel activo de las bacterias y de otros microorganismos como hongos, algas, protozoos, virus, plantas y animales dentro de la descomposición y estabilización de la materia orgánica en plantas de tratamiento de aguas residuales. Como son: las bacterias, parásitos, nutrientes orgánicos, organismos coliformes y los virus.

2.1.4 PARÁMETROS DE CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.

La evaluación de parámetros de calidad de agua en general se realiza mediante una serie de análisis de laboratorio dirigidos a conocer cualitativa y cuantitativamente, las características físicas, químicas y biológicas más importantes que pueden afectar, su uso real y potencial, como el tipo y grado de tratamiento requerido para un adecuado acondicionamiento.

La Asociación Americana de Salud Pública (American Public Health Association, APHA), La Asociación Americana de Abastecimiento de Agua (American Water Works Association, AWWA) y la Federación para el control de la contaminación de las aguas (Water Pollution Control Federation, WPCF), han establecido normas internacionales para la caracterización de la calidad del agua las cuales se encuentran incluidas en los denominados “Métodos Normales para el examen de las Aguas y de las Aguas Residuales” (Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater), de común adopción por numerosos países en todo el mundo. (APHA-AWWA-WPCF, 1992)

Los métodos físicos-químicos más usados en la determinación de la Calidad del agua están basados en los métodos de análisis recomendados por el “Standar Methods For The Examination of Water and Wastewater” y que son utilizados normalmente por los diferentes laboratorios de aguas.

- **Parámetros físicos**

CEPIS (1985), Los análisis físicos miden y registran aquellas características del agua que pueden ser observadas por los sentidos haciéndola inadecuada para uso doméstico e industrial. Sin embargo, estas características tienen menor importancia desde el punto de vista sanitario, ellas son: Color, olor, sabor, turbiedad, temperatura, residuos y la conductividad eléctrica. En el Cuadro 3 y en la Figura 1 se observan algunas características asociadas a las aguas residuales.

Cuadro 3. Compuestos olorosos asociados con agua residuales

Compuestos Olorosos	Fórmula Química	Olor Característico
Amoniaco	NH ₃	Amoniacal
Dimetilsulfuro	CH ₃ -S-CH ₃	Vegetales descompuestos
Sulfuro de Hidrogeno	H ₂ S	Huevos podridos
Eskatol	C ₉ H ₉ NH	Material fecal

Fuente: Adaptado de Crites, 2000

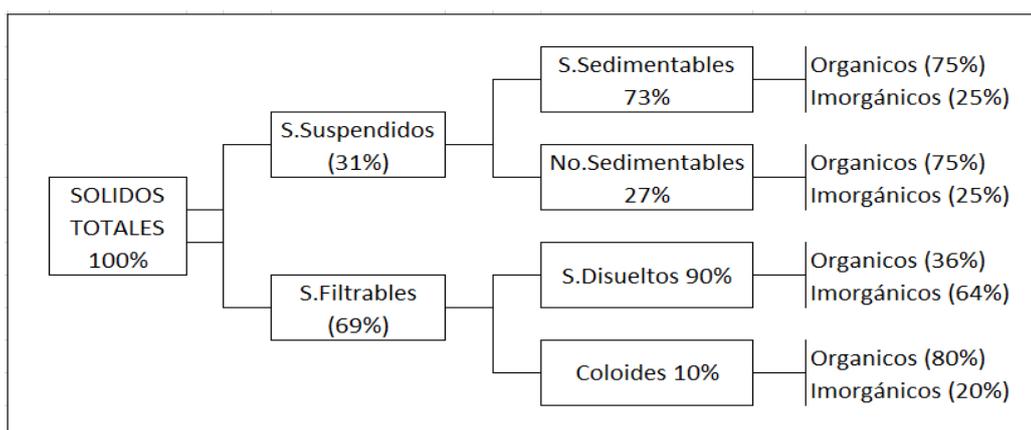


Figura 1: Composición de los sólidos en aguas residuales

Fuente: Adaptado de Crites, 2000

- **Parámetros químicos**

CEPIS (1985), Los análisis químicos tienen como objetivo fundamental determinar la concentración de las sustancias de naturaleza mineral y orgánica que pueden afectar la calidad del agua, proporcionando información sobre posible contaminación o mostrando las variaciones producidas por el tratamiento a que pueden ser sometidos. En la Figura 2 se muestra la clasificación de los parámetros químicos.

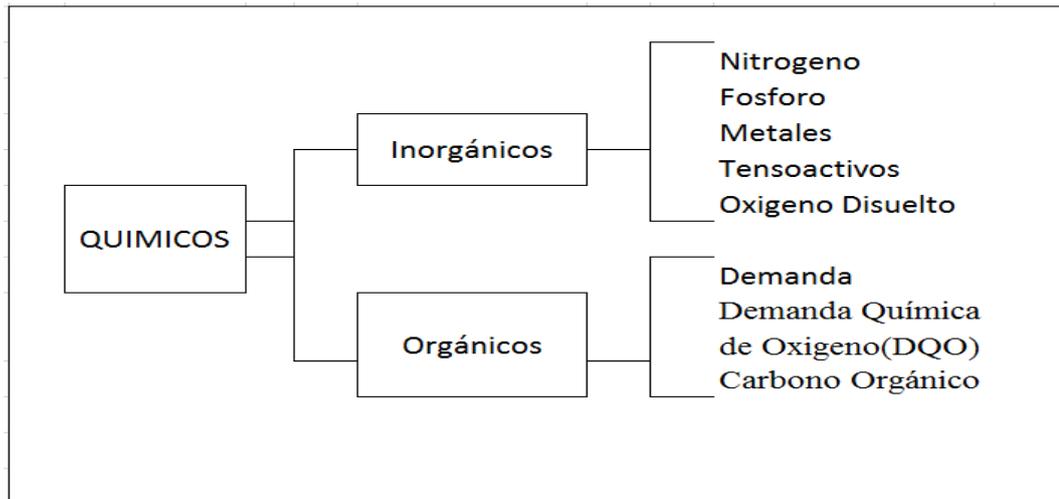


Figura 2: Parámetros químicos a medirse en aguas residuales

Fuente: Adaptado de Crites, 2000

Es necesario ampliar sobre los parámetros DBO y DQO ya que estos parámetros son la base cuando se requiere diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales. Según Hernández (1992), una aproximación cuantitativa de la biodegradabilidad de un efluente va a estar dada por la relación de la demanda bioquímica de oxígeno a la demanda química de oxígeno. De este índice se tiene una referencia acerca de la biodegradabilidad de un efluente determinado. Así se tiene lo siguiente:

Si $(DQO/DBO_5) < 2.5$ es un efluente o compuesto biodegradable, pudiéndose utilizar sistemas biológicos como fangos activos o lechos bacterianos. Y cuando $2.5 < (DQO/DBO_5) < 5$ es biodegradable siendo recomendable el empleo de lechos bacterianos.

- **Parámetros microbiológicos**

CEPIS (1985), Los indicadores biológicos más usados para estos fines son los llamados organismos coliformes, cuya presencia, además de estar asociada con posibles riesgos para la salud, es utilizada como indicador de la eficiencia de tratamiento al cual es sometida el agua. Se emplean dos métodos: Técnica de los tubos Múltiples de Fermentación y el Contaje de Colonias.

En la Figura 3 se muestra la clasificación de los parámetros microbiológicos según Crites (2000).

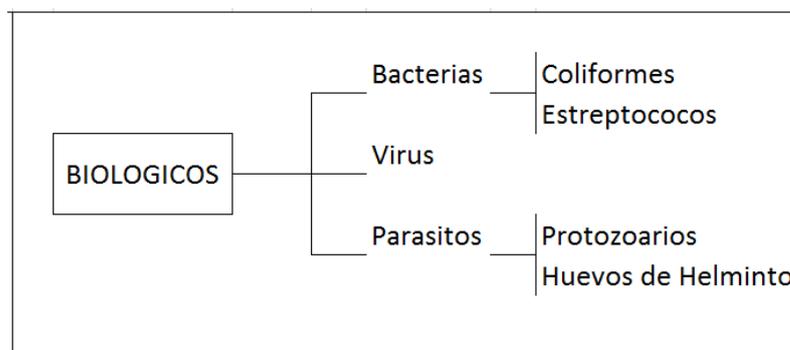


Figura 3. Clasificación microbiológica en aguas residuales.

Fuente: Adaptado de Crites, 2000

2.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

El objetivo principal del tratamiento de aguas residuales, es la estabilización de la materia orgánica. Por estabilización se entiende que la materia orgánica sea descompuesta por acción bacteriana hasta sustancias más simples que ya no se descompondrán, la estabilización puede realizarse por bacterias aeróbicas y anaeróbicas. La acción de estas últimas se aprovecha para la estabilización de la materia orgánica que se ha separado de las aguas por sedimentación y el proceso se denomina digestión de fangos y lodos. BRIX (1994)

La estabilización anaeróbica requiere de mucho más tiempo que en el proceso aeróbico, normalmente la digestión anaeróbica de fangos no se prolonga hasta la estabilización completa, sino hasta un punto en donde toda posterior descomposición es tan lenta que no se producen olores ni otros problemas. BRIX (1994).

La estabilización por las bacterias aeróbicas no solo es más rápida, sino que se realiza sin la presencia de olores desagradables. Si el suministro de oxígeno se interrumpe este proceso, entonces se producirá una regresión al proceso anaeróbico con posible aparición de olores. BRIX (1994).

2.2.1 NIVELES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Crites (2000), considera que los niveles de tratamiento de aguas residuales se clasifican en:

- **Pre tratamiento:** Tiene por finalidad la retención y eliminación de los sólidos de gran volumen por medio del cribado y la sedimentación, también grasas y aceites por medio de la flotación. Para cumplir con estos objetivos se utilizan las siguientes unidades de tratamiento: 1) Cámara de rejillas, 2) Cribas o mallas, 3) Desarenadores, 4) Desmenuzadores, 5) Desengrasadores.
- **Tratamiento primario:** Es aquel en el que se logra una eliminación de una parte de sólidos suspendidos y flotantes por medio físicos y químicos si fuesen necesarios. Los procesos que se dan son: sedimentación de sólidos suspendidos, floculación de sólidos coloidales con coagulantes químicos seguida de sedimentación, precipitación de sólidos disueltos por medio de agentes químicos. Para desarrollar estos procesos se emplean las siguientes unidades: 1) Tanques sedimentadores, 2) Tanques sépticos, 3) Tanques Imhoff, 4) Lagunas de estabilización de fase anaeróbica.
- **Tratamiento secundario:** Es aquel en el que se suministran medios para satisfacer la demanda de oxígeno y vienen en general precedidos de uno o más tratamientos primarios. Se utilizan procesos biológicos.
Este nivel de tratamiento se clasifica principalmente en aerobios y anaerobios según el proceso de degradación de la materia orgánica, pudiendo existir algunos procesos que agrupan a ambos y que se desarrollen simultáneamente recibiendo el nombre de facultativos. Dependiendo al tipo de proceso estos pueden emplear las siguientes unidades de tratamiento: 1) Los procesos netamente aerobios son la filtración biológica y los lodos activados que comprende como variantes la aireación extendida

y las zanjas de oxidación, 2) El proceso anaeróbico, utiliza Reactores Anaeróbicos de flujo Ascendente, 3) Las lagunas de estabilización pueden tener variantes, pudiendo clasificarse en aerobias, anaerobias y facultativas. 4) Los humedales artificiales también están incluidos en este nivel de tratamiento ya que según el tipo de flujo y sustrato presentan medios anaeróbicos o aeróbicos.

- **Tratamiento terciario:** Agrupa aquellos utilizados para reducir la concentración de sustancias orgánicas e inorgánicas (nutrientes, metales pesados, detergentes u otras sustancias tóxicas) en el efluente proveniente de un tratamiento secundario. Dentro este nivel se encuentran las siguientes unidades: 1) Filtración, 2) Humedales artificiales, 3) Intercambio iónico, 4) Coagulación química, 5) Osmosis inversa, 6) Electrodiálisis, 7) Absorción y radiación gamma.
- **Tratamiento avanzado:** Se puede incluir un proceso de desinfección para la eliminación de organismos patógenos realizando la cloración del efluente de la planta de tratamiento. Los procesos complementarios agrupan diversos métodos para el tratamiento de la materia sedimentada conocida como “lodo”: Digestores, Canchas de secado e incineradores.

2.3 HUMEDALES

Los humedales son zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio y la vida vegetal y animal asociada a él. Los humedales se dan donde la capa freática se halla en la superficie terrestre cerca de ella o donde la tierra está cubierta por aguas poco profundas. (Ramsar, 2006). Los humedales son complejos mosaicos compuestos por vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a las condiciones ambientales de estos sistemas. Estos organismos, junto con procesos físicos, químicos y biológicos son capaces de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia y productos contaminantes, por esta razón los humedales son llamados “los riñones del mundo”. El ser humano ha tratado de aprovechar la gran capacidad depuradora de los humedales diseñando instalaciones capaces de reproducir las características de estos sistemas y aplicándolas al tratamiento de las aguas residuales (Lahora, 1995).

2.3.1 HUMEDALES ARTIFICIALES

Los sistemas diseñados para imitar las características y procesos (físicos, químicos y biológicos) de un humedal natural son comúnmente conocidos como “Humedales artificiales”. Los humedales construidos son sistemas complejos e integrados en los que tienen lugar interacciones entre agua, planta, animales, microorganismos, energía solar, suelo y aire; con el propósito de mejorar la calidad del agua residual y promover un mejoramiento ambiental. (EPA, 1998). Según Seoanez (1995), los humedales artificiales, al igual que los naturales, pueden reducir una amplia gama de contaminantes del agua tales como: sólidos en suspensión, DBO, nutrientes, metales, patógenos, y otros productos químicos. La principal diferencia entre un humedal natural y un humedal artificial es que el humedal artificial permite el tratamiento de aguas residuales bajo diseños que se basan en objetivos específicos de calidad del efluente. En el Cuadro 4 se muestran las características propias de los humedales artificiales que las potencian.

Cuadro 4. Características y descripciones de humedales artificiales

Características	Descripción	Referencia
Funcionamiento	Actividad Bioquímica de microorganismos.	García y Corzo, 2008
	Aporte de oxígeno a través de las plantas durante el día.	
	Apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de plantas y filtro.	
Funciones	Fijan físicamente los contaminantes a la superficie del suelo y la materia orgánica.	EPA, 1998
	Utilizan y transforman los elementos por medio de microorganismos.	
	Logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento.	
Rendimiento	Rendimientos superiores al 80% en la remoción de la DBO.	Lara, 1999
	Remueve niveles significativos de trazas orgánicas metales y patógenos.	
	Presentan bajo rendimiento en la remoción de fosforo.	
Aplicaciones	Tratamiento de aguas municipales, industriales y agrícolas.	Silvia y Zamora, 2005
	Tratamiento de aguas subterráneas contaminadas.	

Fuente: Elaboración propia

El tratamiento de aguas residuales por medio de humedales artificiales presenta, al igual que otros sistemas, algunas ventajas y desventajas comparativas que pueden tomarse en cuenta al momento de elegir el sistema de tratamiento. En el Cuadro 5 se presentan algunas de ellas.

Cuadro 5. Ventajas y Desventajas del sistema de humedales artificiales

Ventajas	Desventajas
Bajos costos operacionales.	Los costos de construcción necesitan de un capital medio a alto.
Bajo consumo de materiales e insumos de energía.	Para su construcción necesitan de extensiones amplias de terreno.
Toleran una amplia gama de contaminantes.	Acumulación de sustancias tóxicas e el suelo y sedimentos.
Método natural y sostenible para el tratamiento de aguas residuales.	Ya que son sistemas naturales, pueden presentar variaciones en su rendimiento debido a los cambios estacionales.
En ellos se desarrolla una amplia gama de procesos de depuración.	Limitado control operacional sobre los procesos de tratamiento.
A parte de dar tratamiento a aguas residuales pueden tener múltiples beneficios (p.ej. hábitat para fauna silvestre).	Bajo ciertas circunstancias los beneficios adicionales pueden estar bajo conflicto (p.ej. causar problemas a la fauna local, atraer fauna nociva).

Fuente: Adaptado de Knigh, 2000

2.3.2 FUNCIONES GENERALES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales tienen tres funciones básicas que les confiere un potencial atractivo para el tratamiento de aguas residuales: (1) Fijan físicamente los contaminantes a la superficie del suelo y a la materia orgánica, (2) Utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y (3) Logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento. (EPA,1998).

En cuanto a rendimiento, los humedales artificiales pueden tratar con eficiencia niveles altos de DBO, sólidos suspendidos y nitrógeno (rendimientos superiores al 80%), así como niveles significativos de trazas orgánicas, metales y patógenos.

No ocurre lo mismo con la eliminación de fósforo, que es mínima en estos sistemas. (Lara,1999).

2.3.3 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Según Seoanez (1995), existen dos tipos de humedales artificiales, que se diferencian según sea el sistema de circulación de las aguas aplicadas, sin embargo, también influye el tipo de macrófita utilizada como se muestra en la Figura 4.

- Humedal superficial de flujo libre (FWS)
- Humedal de flujo subsuperficial (SSF)

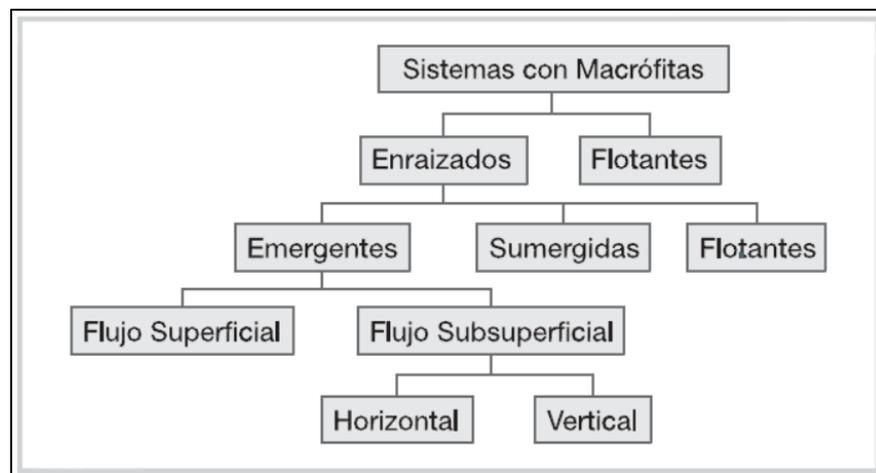


Figura 4: Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.

Fuente: Villaroel, 2005

- **Humedal superficial de flujo libre (FWS)**

Se definen como humedales Artificiales de flujo libre superficial a aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. Los humedales artificiales FWS (Free Water Surface) consisten normalmente de una o más cuencas o canales de poca profundidad que pueden o no tener un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible a contaminación y una capa sumergida de suelo para soportar las raíces de la vegetación macrófita emergente. Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para

asegurar una distribución uniforme del agua residual aplicada y su recolección. (EPA, 1998). (Figura 5)

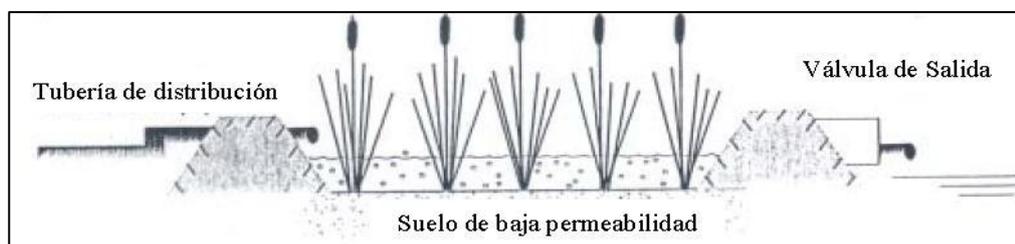


Figura 5: Humedal superficial de flujo libre

Fuente: Villaroel, 2005

La vegetación en este sistema está parcialmente sumergida en el agua, cuya profundidad varía entre 4 a 18 pulgadas (0.1 a 0.45 m). La vegetación común para los humedales de flujo libre incluye éneas, carrizos, juncias y juncos. Zambrano y Saltos (2009). El agua residual normalmente se alimenta en forma continua y el tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente. (Serrano, 2008).

En estos humedales se emplea una superficie promedio de 20 m² por persona (PE) las remociones obtenidas para los distintos contaminantes son elevadas (96% SST; 96% DBO; 87 % DQO; 40% NTK y 30% PT). (Rodríguez, 2008).

En el Cuadro 6 se muestra los principales mecanismos de remoción que evidencian su funcionamiento.

Cuadro 6. Principales mecanismos de remoción con humedales

Constituyente	Humedal Artificial De Flujo Libre	Humedal Artificial De Flujo Subsuperficial
Compuestos orgánicos biodegradables	Bioconversión por bacterias aerobias, facultativas y anaerobias de DBO soluble, filtración y sedimentación de la DBO particulada.	Bioconversión por bacterias aerobias, anaerobias y facultativas en las plantas y detritos de la superficie.
Sólidos Suspendidos totales	Sedimentación, filtración.	Sedimentación, filtración.

Fósforo	Sedimentación, asimilación vegetal.	Sedimentación, asimilación vegetal.
Nitrógeno	Nitrificación/denitrificación, asimilación vegetal, volatilización.	Nitrificación/denitrificación, asimilación vegetal, volatilización.
Metales pesados	Adsorción de las plantas y detritos de la superficie, sedimentación.	Adsorción de las plantas y detritos de la superficie, sedimentación.
Componentes orgánicos traza	Volatilización adsorción biodegradación.	Adsorción, biodegradación.

Fuente: Elaboración propia

- **Humedal de Flujo Subsuperficial (SSF)**

Los SSF (Subsurface Flow) están contruidos típicamente en forma de un lecho o canal que, al igual que el sistema FWS, puede o no tener una barrera que impida la percolación del agua hacia el subsuelo, además contiene un medio apropiado (grava, arena u otro material) que soporta el crecimiento de las plantas; la vegetación emergente es la misma que en el sistema de humedal de flujo libre. El nivel del agua está por debajo de la superficie del soporte (Figura 6) y fluye únicamente a través del medio que sirve para el crecimiento de la película microbiana, que es la responsable en gran parte del tratamiento que ocurre, las raíces penetran hasta el fondo del lecho. (Silva, 2005).

Tiene especial importancia en este tipo de sistemas que se lleve a cabo un tratamiento previo de las aguas residuales para remover los sólidos gruesos que pueda contener, con la finalidad de evitar problemas de obstrucción al medio de soporte granular y la consecuente afectación que esto pueda tener sobre el funcionamiento del sistema.

Los humedales de flujo sub-superficial pueden ser de dos tipos en función de la forma de aplicación de agua al sistema: (1) Humedales SSF de flujo horizontal y (2) Humedales SSF de flujo vertical. El Cuadro 6 muestra los principales mecanismos de remoción que caracterizan su tipo.

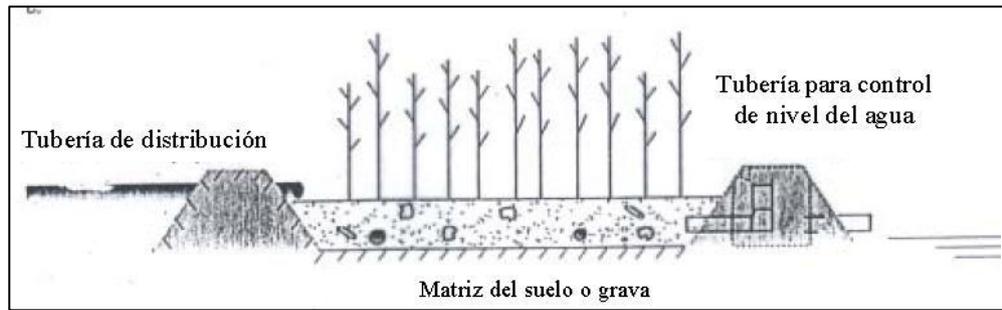


Figura 6: Humedal de flujo subsuperficial

Fuente: Villarroel, 2005

- Humedales SSF de flujo horizontal:** En este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y de los rizomas y raíces de las plantas. El agua ingresa al sistema por la parte superior de un extremo y es recogida por un tubo de drenaje en la parte inferior opuesta. La profundidad del agua varía entre 0.3 y 0.9 m, se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentra entre 0.05 y 0.1 m por debajo de la superficie) y con cargas alrededor de 6 g DBO/m²/día. (García, 2012). Los humedales con flujo sub-superficial horizontal son sistemas eficientes en la remoción de DBO y SST, sin embargo, no son eficientes en la remoción de nutrientes. La calidad de los efluentes depende de la calidad del agua residual afluente, aunque se plantea que las eficiencias medias logradas son de: 91% para los SST; 89% para la DBO; 33% NT y 32% PT. (Rodríguez, 2008). En la Figura 7 se muestra el corte de un humedal horizontal.

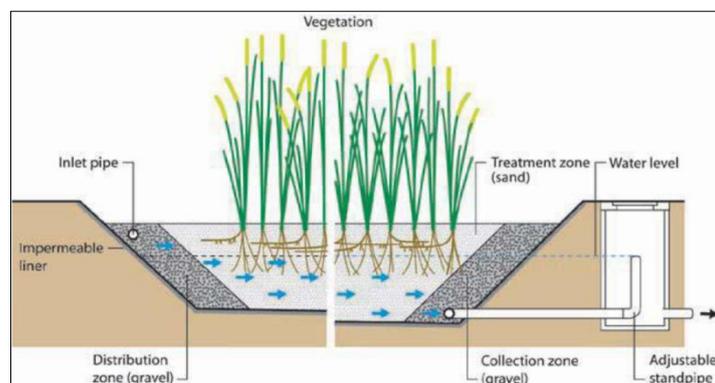


Figura 7: Esquema de la sección transversal de un HFH.

Fuente: Morel y Diener, 2006

- **Humedales SSF de flujo Vertical:** Los sistemas verticales con flujo sub-superficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación en la cama son seguidas por periodos de insaturación estimulando el suministro de oxígeno. Este tipo de humedales las aguas residuales son aplicadas de arriba hacia abajo por medio de un sistema de tuberías y recogidas posteriormente por una red de drenaje situada en el fondo del humedal. Los sistemas con flujo vertical operan con cargas superiores que los horizontales (entre 20 y 40 g DBO/m²/día) y llegan a producir efluentes más oxigenados y sin malos olores. (García, 2012). En la Figura 8 se muestra el corte de un humedal de flujo vertical.

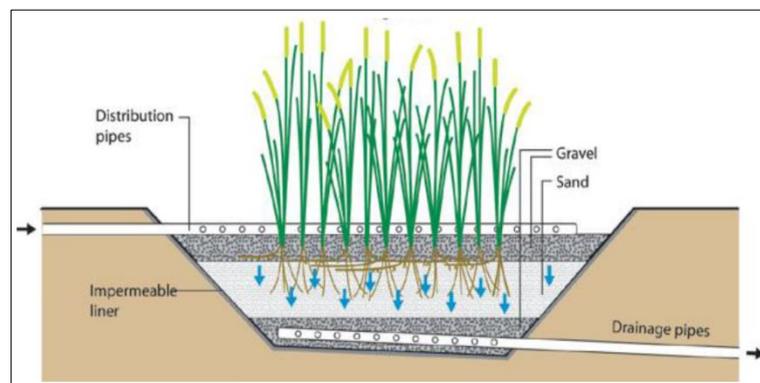


Figura 8: Esquema en corte de un humedal vertical HFV

Fuente: adaptado de Morel y Diener, 2006

2.3.4 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

De manera general la composición de un humedal es agua, vegetación, medio filtrante y microorganismos, además de condiciones ambientales como luz solar y temperatura. Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual aplicada y su recolección. (EPA,1998).

- **Agua**

Las aguas residuales son las que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población. Después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades

domésticas, industriales y comunitarias, son recogidas por una red de alcantarillado que las conducirá hacia el humedal, en este caso. (Rolim, 2000).

Según su uso precedente, estas aguas resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con residuos de industrias, de actividades agrícolas, así como las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación. (Rolim, 2000).

- **Sustrato**

El medio es responsable directo de la extracción de algunas sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas.

La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos. (Lara, 1999).

El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende en el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar. (Arias, 2004).

- **Vegetación**

Las plantas presentan varias propiedades que las hacen ser un componente indispensable en los humedales construidos. La función de mayor importancia de las macrófitas en relación con el proceso de tratamiento de las aguas residuales es el efecto físico que producen. Las macrófitas estabilizan la superficie del lecho proporcionando buenas condiciones para la filtración y, en el caso de los sistemas con flujo vertical, previniendo las obstrucciones, además de proporcionar área superficial para el crecimiento de los microorganismos adheridos (Rodríguez, 2003).

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos foto autótrofos, es decir que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación. (Arias, 2004).

La selección de la vegetación que se va a usar en un sistema de humedales debe tener en cuenta las características de la región donde se realizara el proyecto, así como las siguientes recomendaciones. (García y Corzo, 2008)

- ✓ Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.
- ✓ Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima asimilación de nutrientes.
- ✓ La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento del biofilm.
- ✓ Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.
- ✓ Debe tratarse de especies con una elevada productividad.
- ✓ Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.
- ✓ Se debe utilizar especies propias del lugar.

- **Microorganismos**

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección. (Rodríguez, 2008).

Los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales son: helmintos, bacterias, levaduras, hongos, virus y protozoarios. El indicador más utilizado son los coliformes fecales, aunque también se ha estudiado el comportamiento en humedales construidos de otros grupos microbianos, como los *estreptococos fecales*, *Salmonella*, *Yersinia*, *Pseudomonas* y *Clorstridium* (Herskowitz, 1986). La biomasa microbiana consume gran parte del carbono y muchos nutrientes. La actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato afectando así a la capacidad de proceso del humedal. Asimismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera. (Lara ,1999).

2.3.5 RELACIÓN ENTRE PLANTAS Y MICROORGANISMOS

El oxígeno necesario en los humedales se obtiene por aireación natural de la superficie y de las plantas que producen oxígeno por fotosíntesis. El oxígeno liberado de las plantas por la fotosíntesis se utiliza por las bacterias para la degradación aerobia de la materia orgánica. Los productos de esta degradación (CO_2 , amoníaco, fosfatos) son utilizados de nuevo por las plantas. Esta relación simbiótica cíclica entre plantas y bacterias se presenta esquemáticamente en la Figura 9.

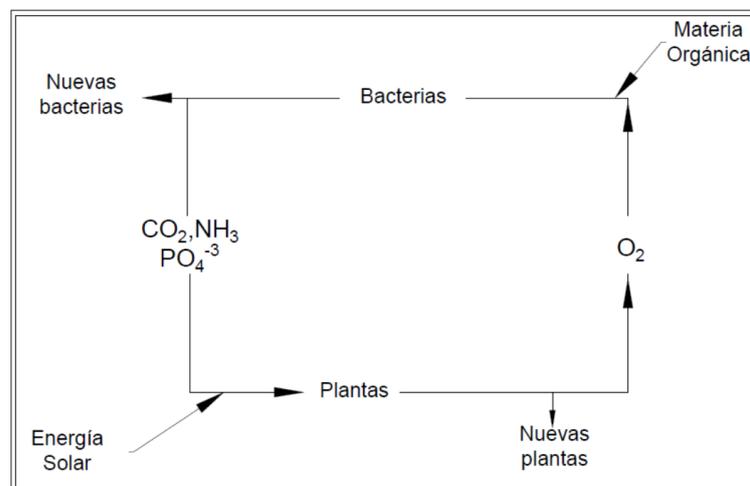


Figura 9: Relación simbiótica cíclica entre plantas y bacterias.

Fuente: Adaptado de Ramalho, 2003

El mecanismo representado en la figura 9 explica las variaciones diurnas del nivel de oxígeno disuelto y del pH que se presenta en humedales de aguas residuales. Durante el día, en presencia de la luz solar, se produce la fotosíntesis y la producción de oxígeno como consecuencia de ello. Aunque parte del oxígeno producido se utiliza en la respiración, durante el día se puede estar en la situación de obtener una cantidad adicional importante de oxígeno que haga que los valores de OD excedan a los de saturación. Durante la noche no hay producción de oxígeno, aunque plantas y bacterias lo utilizan, lo que dan lugar a una disminución de OD. Asimismo, durante la noche la liberación de dióxido de carbono hace disminuir el pH. Durante el día el amoníaco resultante de la degradación de los compuestos orgánicos nitrogenados contribuye al aumento del pH. En consecuencia, de esto las aguas residuales pueden ser ácidas en la noche y básicas durante el día. Las variaciones adversas de pH pueden llevar a unas condiciones adversas para las algas y los microorganismos.

Si la DBO del afluente es alta, la demanda de oxígeno es superior a la que se puede cubrir mediante fotosíntesis y aireación superficial natural. Bajo estas circunstancias la concentración de OD en el agua residual cae bruscamente hasta un nivel muy bajo prevaleciendo la degradación anaerobia. Los productos finales de la degradación anaerobia de la materia carbonosa son $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$, en contraste con $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ de la degradación aerobia.

2.4 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDALES ARTIFICIALES

El tratamiento de aguas residuales es esencialmente biológico, la depuración ocurre de manera natural y mediante la actividad metabólica de las bacterias y las plantas.

2.4.1 MECANISMOS QUE INTERVIENEN EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES ARTIFICIALES

En un humedal artificial se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual. Un amplio rango de procesos biológicos, físicos y químicos tienen lugar,

por lo tanto, la influencia e interacción de cada componente involucrado es bastante compleja (Delgadillo, 2010). En el Cuadro 7 se muestran los principales procesos y mecanismos de remoción que ocurren en los humedales artificiales.

Cuadro 7. Principales mecanismos de remoción y transformación en humedales.

Constituyentes Del Agua Residual	Mecanismos De Remoción
Sólidos suspendidos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación/Filtración
Materia Orgánica biodegradable (DBO)	<ul style="list-style-type: none"> • Degradación microbiana (aerobia, anaerobia y facultativa). • Sedimentación y filtración.
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Amonificación seguida por la nitrificación Desnitrificación bacteriana • Volatilización del amonio. • Toma por la planta
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Sorción en el suelo (reacciones de adsorción precipitación con el aluminio, hierro, calcio y minerales de la arcilla en el suelo) • Toma por la planta.
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación/Filtración • Muerte natural • Radiaciones ultra violeta • Excreción de antibióticos por las raíces de las plantas

Fuente: Adaptado de Brix, 1994 y Crites, 2000

Los procesos descritos en el Cuadro 6 se esquematizan en la Figura 10. Los sistemas de humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos y patógenos. La remoción de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo (Lara, 1999).

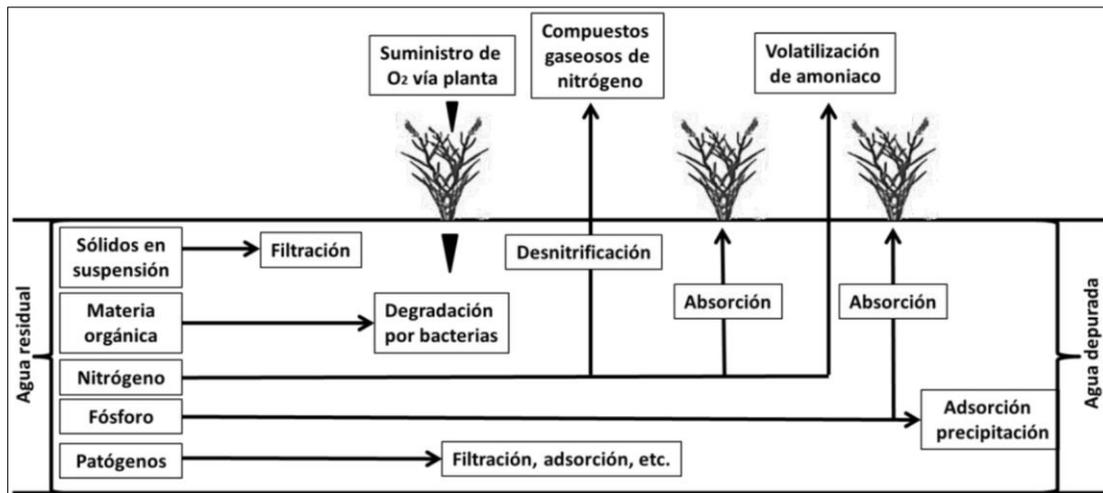


Figura 10: Procesos de depuración de los humedales artificiales

Fuente: Lara, 1999

2.4.2 CONTAMINANTES REMOVIDOS EN EL PROCESO DE DEPURACIÓN

A través de los mecanismos descritos en el ítem anterior, es posible lograr la remoción de diversos contaminantes durante el proceso de tratamiento en un sistema de humedales artificiales:

a. Sólidos en suspensión

Los sólidos son removidos mediante el proceso de filtración ya que el sustrato que se emplea en humedales es arena y grava por lo general. Las raíces de las macrófitas y el sustrato reducen la velocidad del agua, favoreciendo la sedimentación de sólidos. Sin embargo, se recomienda un tratamiento previo para evitar la rápida colmatación del humedal.

Según García y Corzo, (2008), estos sistemas pueden llegar a tener un 90% de eficiencia de remoción de sólidos, produciendo efluentes con concentraciones menores de 20mg/l de forma sistemática.

b. Materia orgánica

La eliminación de la materia orgánica en los humedales es compleja ya que es el resultado de la interacción de numerosos procesos físico-químicos y biológicos que suceden en forma simultánea. Dicha degradación sucede mediante la biodegradación aeróbica y anaeróbica,

mientras una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La materia particulada es retenida por filtración cerca a la entrada en humedales horizontales, mientras en que, en verticales, cerca de la superficie.

La biodegradación es realizada por microorganismos, los cuales están adheridos a las plantas, en particular a las raíces y a la superficie del sustrato, este conjunto de microorganismos es denominado biofilm. El tipo de biofilm establecido en el humedal depende del tipo de entorno que se da en el humedal ya que existe dos tipos de biodegradación microbial, la aeróbica o la anaeróbica, los cuales tienen lugar en humedales artificiales, dependiendo de la presencia de oxígeno disuelto. (Kadleck et al., 2000).

En la degradación aeróbica, dos grupos de microorganismos participan en este proceso de degradación: aeróbicos quimioheterótrofos, oxidando compuestos orgánicos y liberando amonio; y aeróbicos quimioautótrofos, las cuales oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato. Sin embargo, los responsables de la remoción de materia orgánica son los heterótrofos; por lo tanto, la presencia de oxígeno es un factor limitante, más aún en humedales verticales.

Según García y Corzo (2008) los humedales verticales alcanzan mejores rendimientos de eliminación, ya que prevalecen las vías aerobias, mientras que en los horizontales prevalece la vía anaerobia. Los rendimientos de remoción en humedales verticales como horizontales son óptimos si están diseñados, construidos y operados de la manera correcta. En los estudios de García y Corzo, 2008 se menciona que los rendimientos tanto para DQO y DBO₅ alcanzan valores que van desde 75 y 95% dando como resultado efluentes con concentraciones de DQO menor a 60 mg/l y de DBO₅ menor de 20 mg/l.

c. Nitrógeno

La remoción biológica se basa en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno, el cual está compuesto por los diversos procesos naturales mediados por microorganismos, que mantienen un constante equilibrio entre las distintas formas de nitrógeno. (Wiesmann, 1994). El nitrógeno en el medio acuático puede existir en cuatro formas diferentes: nitrógeno

orgánico, nitrógeno amoniacal, compuesto en forma de nitritos y compuesto en forma de nitratos.

Generalmente en el agua residual sin tratar están presentes las dos primeras. La descomposición por las bacterias transforma fácilmente el nitrógeno orgánico en amoniacal, en la cantidad relativa de amoníaco presente es un indicativo de la edad del agua residual. En la naturaleza, y en presencia de O₂, el nitrógeno amoniacal se transforma en nitrito y éste, rápidamente, en nitratos, que es la forma más oxidada que se encuentra el nitrógeno en el agua.

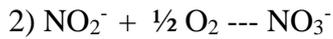
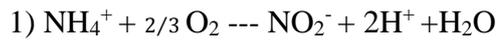
Según se muestra en el Cuadro 8 los pasos a, b y c se dan en presencia de oxígeno disuelto, iniciado el paso a, con valores de pH inferiores a 9.3, en el paso b, desciende el pH por la liberación de radicales hidroxilos provocados por la nitrificación, por lo que es necesario mantener el pH en valores de 7.5 a 8.6, en el paso c, la conversión a de nitrito a nitrato requiere también de oxígeno y la bacteria encargada es el nitrobacter, y por último el paso d, respecto a la desnitrificación, este es un proceso respiratorio anóxico, realizado principalmente por bacterias heterotróficas.

Cuadro 8: Ciclo del nitrógeno

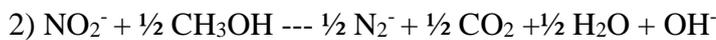
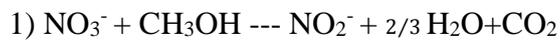
Ciclo Del Nitrógeno	
De	A
N ₂ atmosférico	N orgánico
a. N Orgánico	N amoniacal
b. N amoniacal	Nitrito (Nitrosomas)
c. Nitrito	Nitrato (Nitrobacter)
d. Nitrato	N ₂

Fuente: Adaptado de Crites, 2000

El proceso de conversión de amonio a nitritos en humedales horizontales es bajo, ya que hay pocas zonas aerobias, mientras que en los humedales verticales se obtienen muy buenos rendimientos de conversión del amonio al nitrato dado el carácter aeróbico de la gran parte del lecho. En general la nitrificación es total. (Delgadillo et al., 2010).



Sin embargo, como se mencionó líneas arriba el proceso de desnitrificación permite eliminar el nitrato formado previamente por la nitrificación y convertirlo en nitrógeno gas, este proceso solo es posible en un medio anóxico que solo es posible en los humedales horizontales. Por esta razón los humedales verticales tienen dificultades para eliminar el nitrato formado, por ello es recomendable combinar en serie seguidos de humedales horizontales (Delgadillo et al., 2010).



Otro mecanismo de remoción del nitrógeno, es la adsorción directa por parte de las plantas y el sustrato. El nitrógeno asimilado es incorporado a la biomasa y por lo tanto eliminado del agua. (García y Corzo, 2008).

d. Fósforo

Igual que en los sistemas de depuración biológicos convencionales, la eliminación de fósforo en los humedales es complicada. En general no se suele eliminar más del 10-20 por ciento, y sin haber grandes diferencias entre sistemas horizontales y verticales.

Los mecanismos de eliminación del fósforo pueden ser del tipo biótico y abiótico. Los bióticos incluyen la asimilación por parte de las plantas y los microorganismos, mientras los abióticos abarcan fundamentalmente la adsorción por el medio granular.

Según García y Corzo, (2008), la mayor parte de adsorción de fósforo sucede cuando se pone en marcha e humedal ya que el sustrato limpio tiene la capacidad de adsorción, pero esta se va perdiendo rápidamente en el pasar del tiempo.

e. Patógenos

Para garantizar buenas condiciones sanitarias, es importante eliminar o reducir la concentración de microorganismos fecales. La eliminación de microorganismos es un proceso de gran complejidad ya que depende de varios factores como la filtración, adsorción y la depredación.

Para evaluar la eficiencia de eliminación de los patógenos se suele estudiar la eliminación de microorganismos indicadores de la contaminación fecal, con son por ejemplo los coliformes fecales. El grado de eliminación obtenido en sistemas horizontales y verticales es similar y oscila entre 1 y 2 unidades logarítmicas/100ml aproximadamente para todos los indicadores. Este nivel, de eliminación no suele ser suficiente para producir efluentes de buena calidad aptos para reuso, por lo que se tendría que plantear una desinfección u otras alternativas que sirvan para eliminar los patógenos presentes en los efluentes. (García y Corzo, 2008).

Orozco (2010) indica que, en un estudio, combinando humedales de flujo horizontal y vertical sembrados ambas con *Cyperus papyrus*, el agua residual cruda tenía una concentración promedio de Coliformes de $9,35 \cdot 10^7$ UFC/100ml, y salió del humedal Vertical-Horizontal con vegetación, con una concentración de promedio de $9,61 \cdot 10^2$ UFC/100ml. Se alcanzaron remociones promedio de Coliformes Totales de 4 Log y 5 Log.

Rodríguez y Ospina (2005) indicó que, en un estudio, realizado en Colombia se ha reportado una eficiencia de remoción de coliformes totales de 49% en humedales verticales, alimentados con agua del río Bogotá y sembrados con *Cyperus papyrus*.

Según Lara (1999), los humedales artificiales son capaces de una reducción de coliformes fecales de entre uno o dos logaritmos con tiempos de retención de 3 a 7 días, siendo necesario emplear tiempos de retención superiores a 14 días para remover de 3 a 4 logaritmos. En humedales que cuentan con un medio de grava fina de río, los coliformes fecales se han reducido de $8 \cdot 10^4$ NMP/100ml a 10/100 ml de media.

Según Guerra (2006), la remoción principal de coliformes es debida a los largos tiempos de retención hidráulica y biofiltración, lo que propicia su sedimentación y muerte natural, por depredación por invertebrados y otros mecanismos y al ataque por antibióticos excretados por las raíces de las plantas emergentes.

2.5 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA HUMEDALES ARTIFICIALES

Hoffman et al. (2011) mencionan que existen varios parámetros de diseño para los humedales artificiales de flujo subsuperficial, los cuales son usados en diferentes puntos de cálculo, dependiendo del tipo de agua residual a tratar y el clima del lugar.

Este autor publicó recomendaciones básicas para el diseño y operación de un humedal artificial vertical de flujo subsuperficial (HFV). A continuación se muestran las consideraciones tomadas por el autor que incluye los comportamientos que deben adoptar en climas fríos y cálidos.

- La superficie superior del filtro debe mantener un mismo nivel y las tuberías de distribución a menudo son cubiertas con grava para evitar la acumulación de agua durante los periodos de bombeo.
- Las tuberías de distribución deben ser diseñadas de tal manera que den una distribución uniforme de las aguas residuales, previamente tratadas, en toda la superficie del humedal artificial. Esto se consigue seleccionando el tamaño exacto de las tuberías de distribución, la longitud de las tuberías, el diámetro de los agujeros y el espaciamiento entre los agujeros entre las tuberías de distribución.
- La distancia entre los tubos de drenaje se basa en diseño detallado, pero pueden ser como máximo de hasta 5 metros. Para permitir un buen drenaje los tubos deberán estar cubiertos con grava.
- Para los grandes humedales artificiales HFV es importante que el fondo tenga una pendiente 0.5 – 1 % en dirección a la salida.
- La profundidad el lecho de arena (zona activa) debe ser de al menos 50 cm. En la base para cubrir las tuberías de drenaje, se necesita adicionalmente 20 cm de grava y en la parte superior del lecho 10 cm de grava. La grava en la parte superior evita la acumulación de agua al aire libre, y se podría omitir si no hubiese acceso del público

al humedal artificial, se debe evitar que la superficie sea pisada. Se debe dejar al menos unos 15 cm de bode libre para la acumulación de agua.

- La carga orgánica por unidad de superficie debe limitarse a 20 g DQO/m²/d en los climas fríos. Estos se aplican para las aguas grises y aguas residuales. Sin embargo, los autores han tenido buenas experiencias con HFV diseñados en climas cálidos, con alrededor de 60 – 70 g DQO/m²/d, que corresponde alrededor de unos 30 – 35 g DBO₅/m²/d.
- La carga hidráulica para HFV en climas fríos no debe exceder a los 100 – 120 mm/d. Las experiencias de los autores demostraron que en climas cálidos las tasas hidráulicas de aguas residuales pre-tratadas pueden ser aplicadas sin influencia negativa hasta unos 200mm/d. Durante los eventos de lluvia se puede aplicar una carga hidráulica de corto plazo de hasta 500 mmm/d.

2.6 PLANTAS ACUÁTICAS APROPIADAS PARA EL TRATAMIENTO

En los humedales construidos se han utilizado una variedad de plantas emergentes semejantes a las encontradas en los humedales naturales. Las plantas que con más frecuencia se utilizan son: las espadañas o eneads (*Typha* spp.), la caña o junquillo (*Phragmites* spp.) y los juncos (*Juncus* spp.) (*Scirpus* spp.) y (*Carex* spp).

Las plantas acuáticas llamadas también macrófitas, pueden calificarse en: flotantes, sumergidas y emergentes.

2.6.1 PLANTAS ACUÁTICAS FLOTANTES

Las raíces de estas plantas cuelgan en el agua y no se fijan en los suelos, por lo que frecuentemente están expuestas a ser movidas por el viento. Dentro de este grupo se tiene especies como el Lirio acuático o Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), la Lechuga de agua (*pistra stratiotes*), la salvinia (*Salvinia* sp), la azolla (*Azolla pinnata*) y la lenteja de agua (*Lemna* sp, *Wolfia arrhiga*). Estas especies no son dependientes de suelo o de la profundidad del agua.

2.6.2 PLANTAS ACUÁTICAS SUMERGIDAS

Estas plantas crecen bajo la superficie del agua, formando una densa pared de vegetación desde el fondo hasta la superficie. Las especies sumergidas solo pueden crecer donde hay suficiente luz, y pueden verse afectadas por la turbidez del agua y por poblaciones excesivas de algas, las cuales disminuyen la penetración de la luz. Dentro de este grupo se tienen especies como la hydrilla (*Hydrilla verticillata*) y el milfoil de agua (*Myriophyllum spicatum*). Estas plantas resultan poco adecuadas para incorporarlas en los sistemas de depuración de aguas por su baja productividad.

2.6.3 PLANTAS ACUÁTICAS EMERGENTES

Son plantas anfibias que viven en aguas poco profundas, arraigadas en el suelo, y cuyos tallos y hojas emergen fuera del agua pudiendo alcanzar alturas de dos y tres metros. Dentro de este grupo se encuentran los Cattails (*Thypha spp*), espadañas (*Typha angustifolia*), Papyrus (*Cyperus papyrus*), carrizo (*Phragmites australis*), Common reed (*Phragmites comunis*), los juncos (*Scirpus sp*, *Juncus sp*), la Tototra (*Schoenoplectus totora*).

Son plantas vivaces, cuyas hojas se secan en invierno, rebrotando en primavera a partir de órganos subterráneos como los rizomas, que persisten durante el periodo frío. Estas plantas, intermedias entre las terrestres y las acuáticas propiamente dichas, son muy vigorosas y productivas ya que aprovechan las ventajas de los dos medios, el terrestre y el acuático, no sufren limitaciones de agua y tienen un mayor acceso a la luz que las plantas sumergidas.

Por otro lado, están adaptadas para tolerar las condiciones de falta de oxígeno que se producen en el suelo encharcado, ya que poseen canales o zonas de aireación (parénquima) que facilitan el paso del oxígeno de las hojas a las raíces.

No todas las especies de plantas pueden ser utilizadas para la rehabilitación de los sitios contaminados. En particular, las plantas con raíces fibrosas, de profundidad y de crecimiento rápido, tales como hierbas, son útiles en la fitorremediación. Además, la capacidad de crecer en condiciones de estrés es una característica importante (Siciliano y Germida, 1998).

En el Cuadro 9 propuesto por Liao (2000), se evalúa el potencial de cada macrófita para el tratamiento de aguas residuales. El peso ponderado expresado en porcentaje significa la relevancia del ítem para la eficiencia del tratamiento. El número asignado para cada ítem en las distintas plantas, es dado por el autor según su consideración y experiencia. El valor expresado en la columna “Total” permite clasificar a las 11 plantas evaluadas según la puntuación sumada de los valores entre paréntesis. Para el caso de *Crypsopogon zizanioides*: (24) resulta del producto del peso ponderado 30% con el puntaje de adaptación 80, haciendo el mismo procedimiento para todas las columnas resulta un valor de 84.5, dando a la planta un de tratamiento segundo lugar en eficiencia.

Cuadro 9. Adaptación de 12 especies al tratamiento de efluentes residuales con humedales artificiales.

Ítems	Tolerancia a la Contaminación	Biomasa	Raíces	Vistosidad	Facilidad de Manejo	Total	Clasificación
Peso (%)	30	25	25	10	10	100	
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	80(24)	80(20)	90(22.5)	80(8)	100(10)	84.5	2
<i>Saururus chinensis</i>	70(21)	50(12.5)	50(12.5)	60(6)	50(5)	57.5	7
<i>Cyperus alternifolius</i>	80(24)	100(25)	100(25)	100(10)	100(10)	94	1
<i>Pennisetum purpureum</i>	50(15)	85(21)	70(17.5)	80(8)	100(10)	71.5	4
<i>Calla palustris</i>	40(12)	50(12.5)	50(12.56)	50(5)	60(6)	48	10
<i>Alocasia marorrhiza</i>	80(24)	75(18.8)	50(12.5)	50(5)	60(6)	66.3	6
<i>Cyperus exaltatus</i>	70(21)	80(20)	80(20)	80(8)	100(10)	79	3
<i>Polygonum hydropiper</i>	100(30)	25(6.3)	30(7.5)	50(5)	40(4)	52.8	8

«Continuación»

<i>Polygonum lapathifolium</i>	90(27)	25(6.3)	30(7.5)	50(5)	40(4)	49.8	9
<i>Juncellus serotinus</i>	60(18)	80(20)	50(12.5)	80(8)	100(10)	68.5	5
<i>Ranunculus cantoniensis</i>	40(12)	30(7.5)	30(7.5)	60(6)	50(5)	38	12
<i>Scirpus triangulatus</i>	30(9)	40(10)	50(12.5)	80(8)	50(5)	44.5	11

Fuente: Adaptado de Liao, 2000

Se observa que las plantas más eficientes señaladas en el Cuadro 9 son a) *Cyperus alternifolius*, b) *Chrysopogon zizanioides*.

A continuación se describen dos de las mejores especies de este estudio.

a. Paragüitas (*Cyperus alternifolius*)

- **Origen y Dispersión:** Especie originaria de África tropical occidental, Arabia, Madagascar, islas Reunión y Mascarenes. Introducida y adaptada en muchas zonas tropicales y subtropicales del Mundo. Se adapta con facilidad en humedales, orillas de ríos y acequias, canales, etc., (Liao et al., 1995)
- **Descripción:** El Paragüitas (*Cyperus alternifolius*) es una hierba perenne, que crece en zonas húmedas o pantanos, crece rápidamente con un fuerte sistema de raíces, su productividad es alta y puede formar un buen paisaje. Alcanza un tamaño de 50-150cm de altura, rizomas de tamaño medio y tallo de 4 – 7mm de diámetro. El Paragüitas tiene fuertes raíces subterráneas (Figura 11) y erecto tallo aéreo, con la construcción de núcleo hueco y sin ramificación. El Paragüitas es monoica con flores bisexuales; la etapa de floración es de junio a Julio y la etapa de maduración es de septiembre a octubre. Aguanta mucho sol y altas temperaturas; sin embargo, es todo lo contrario en cuanto al frío. Temperaturas por debajo de 10° C paralizan el crecimiento vegetativo del *Cyperus alternifolius*, así que en invierno es necesario protegerlo, con una cubierta vegetal de otras plantas. Cuando las hojas se ponen de

color amarillo es síntoma de afección por bajas temperaturas. La solución es realizar una poda desde los tallos y eliminar las hojas amarillentas. (Liao et al., 1995)



Figura 11: Rizomas del *Cyperus alternifolius*

Fuente: Liao, 2000

- **Cultivo:** Puede ser fácilmente multiplicado por semillas (Figura 12), división de planta o de corte (Figura 13). Normalmente, 3-5 divisiones se pueden utilizar para la siembra como un grupo en la primavera (marzo).



Figura 12: Semillas del *Cyperus alternifolius*

Fuente: Liao ,2000



Figura 13: Reproducción de plantas por corte

Fuente: Liao ,2000

La multiplicación por división de planta o de corte es muy sencilla: un corto tallo se extrae de la planta a la longitud de 10-20 cm de longitud. Se sumerge en un recipiente de agua, con la previsión de reducir a la mitad la duración del follaje.

El esquema de Paragüitas en cada otoño puede convertirse en plántulas en zona húmeda. El Paragüitas es ampliamente usado en paisajismo, el papel, el sombrero, la cestería y también puede ser utilizado como una planta de cubierta para protección de taludes contra la erosión del suelo. (Liao et al., 1995)

- **Botánica:** Planta herbácea rizomatosa, con las hojas reducidas a vainas. Inflorescencia con 11-25 brácteas involucrales lineares, de hasta 20 cm de longitud, en umbela compuesta de 20-25 radios. Espiguillas de color pajizo, oblongas, cada una con 10-30 flores (Figura 14). Glumas lanceoladas, con 3-5 nervios. Fruto en aquenio de lanceolado a oblongo, de aproximadamente 1 mm de longitud, de color pardo en la madurez, diminutamente papiloso. Florece de junio a septiembre. Se reproduce tanto por semilla como vegetativamente por medio de rizomas. Necesita suelos con humedad edáfica, preferiblemente encharcados. Especie termófila, no aguanta las heladas. Bastante indiferente al sustrato, soporta salinidades moderadas en el agua. Produce abundante semilla, rebrota vigorosamente de los rizomas cuando es cortada. (Sanz et al., 2004)



Figura 14: Flor del *Cyperus alternifolius*

Fuente: Liao ,2000

Taxonomía: En el cuadro 10 se muestra la descripción taxonómica, etimológicamente el nombre *Cyperus* deriva del griego que significa “junco” y *alternifolius*, es un epíteto latino que significa “con hojas alternas”.

Cuadro 10. Taxonomía de la especie vegetal *Cyperus alternifolius*

Reino	Plantae
Sub-reino:	Tracheobionta
División:	Magnoliophyta
Grupo:	Monocotiledoneas
Clase:	Liliopsida
Subclase:	Commelinidae
Orden:	Poales
Familia:	Cyperaceae
Género:	Cyperus
Nombre científico:	<i>Cyperus alternifolius</i>
Nombre común:	Paragüitas, Papiro Paragüitas
Origen:	Madagascar

Fuente: (Sanz et al., 2004)

b. Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*)

- **Origen y Dispersión:** El Vetiver es una planta cuyo origen se localiza en las planicies inundables del norte de la India, Bangla Desh y Birmania. Se han reconocido dos cultivares principales: el silvestre, el del norte de la India, que florece y produce semillas, viables cuando se encuentra en su habitat natural, que se corresponde con zonas pantanosas y riveras de los cursos de agua; y el domesticado, del Sur de la India, que ha sido seleccionado para la producción de aceite y aunque florece, su semilla no es viable. Este último es el que se ha difundido por todo el mundo tropical y subtropical (Rodríguez, 1997)
- **Descripción:** El éxito del uso del Vetiver para fitoremediar suelos y aguas contaminadas radica en la interacción de sus raíces con los cuerpos contaminados. El sistema de raíces puede alcanzar de 3 a 4 metros de profundidad (Figura 15) durante el primer año de la plantación (Hengchaovanich, 1998) y adquirir un largo total de 7 metros después de 36 meses (Lavania, 2003). Las características propias del sistema de raíces permiten su sobrevivencia bajo condiciones de sequía extrema, al absorber humedad de las profundidades del suelo. El pasto, sin embargo, no puede penetrar mucho más abajo del nivel freático; por lo tanto, en lugares en los que el nivel del agua está cerca de la superficie, el sistema de raíces puede no ser tan largo como en lugares más secos (Van and Truong, 2008). El crecimiento vertical de las raíces del Vetiver alcanza hasta 3 cm por día a una temperatura del suelo de 25°C. A una mayor temperatura del suelo, el crecimiento de las raíces es mayor pero no significativo. Ocho meses después de sembrarse, el Vetiver produce 0.48 kg de raíces secas por planta. La forma del sistema de raíces del Vetiver ofrece una gran superficie de contacto con las partículas del suelo y los contaminantes, dando como resultado una eficiente fitorremediación de suelos y aguas residuales. En estudios realizados en Australia en condiciones de invernadero, se probó el Vetiver en condiciones extremas de acidéz, salinidad y alcalinidad, encontrándose que puede llegar ser tolerante a la acidéz si se le fertiliza con N y P; puede llegar a soportar condiciones salinas hasta

17 dS/m-1, así como mediana tolerancia al Na y alta alcalinidad (pH de 9.6), Truong y Baker (1996).



Figura 15: Sistemas de raíces masivas

Fuente: Arochas et al, 2010



Figura 16: Macollas de Vetiver

Fuente: Arochas et al, 2010

- **Cultivo:** La forma más sencilla de propagar el Vetiver es mediante la separación de vástagos o renuevos (hijos) de macollas (Figura 16) previamente extraídas del terreno. Las raíces son cortadas entre 5 y 10 cm de largo y las hojas entre 15 y 20 cm. Los renuevos son separados en grupos o cepas de dos o tres hijos si existe material suficiente. En Tailandia, se ha demostrado que la inmersión en agua antes de la siembra favorece el enraizamiento y mejora las posibilidades de sobrevivencia de las plantas o también se puede dar el caso en mantener la humedad de los macollos o cepas para conservarlos mejor. (Rodríguez, 1997).
- **Botánica:** La inflorescencia de *Chrysopogon zizanioides* está formada por numerosos racimos delgados y verticilados en un eje largo. La panícula crece entre 15 y 40 cm de largo y es de color rosado púrpura. Es una planta perenne cuyo hábito de crecimiento es en forma de macollas erectas con un porte de 150 a 200 cm de altura. Sus raíces son fibrosas, de aspecto esponjoso y masivo, no tiene estolones y sus rizomas son gruesos y no invasores, las mismas pueden alcanzar más de tres metros de profundidad. Las cañas tienen entre 0.5 y 1.5m de altura, son fuertes y lignificadas formando una especie de empalizada impenetrable que lo hace especialmente apto como barrera viva. Sus hojas promedian unos 75 cm. de largo y de 0.5 a 1 cm de ancho, de color verde oscuro y brillante, siendo suaves hacia las puntas, pero firmes y fuertes hacia su base. Se propaga por división de raíces, esquejes, vástagos o renuevos. (Rodríguez, 1997). Liao et al (2003) descubrió que las hojas de Vetiver que crecen en los humedales son más delgadas y la densidad de las estomas aumenta, una combinación ideal para tratar aguas residuales; pero en condiciones de sequía, las hojas se cierran reduciendo la transpiración para conservar la humedad (Figura 17).



Figura 17: Características de la hoja del Vetiver

Fuente: Rodríguez, 1997

- **Taxonomía:** En el trabajo realizado por Detrinidad y Carballo (2003), se menciona que de las diez especies de gramíneas ordinarias y perennes que se encuentran en las regiones tropicales del Viejo mundo y que pertenecen a la familia Poaceae, la *Chrysopogon zizanioides* ha demostrado ser ideal para la fitorremediación del agua y suelo. En el Cuadro 11 se muestra las características de su taxonomía.

Cuadro 11. Taxonomía del *Chrysopogon zizanioides*

Reino	Vegetal
Clase:	Angiosperma
Subclase:	Monocotiledónea
Familia:	Gramínea
Género:	Chrysopogon
Especie	<i>zizanioides</i>
Nombre científico:	<i>Chrysopogon zizanioides</i>
Nombre común:	Vetiver
Origen:	Sur de la India

Fuente: Detrinidad, y Carballo, (2003)

2.7 BIOMASA

Según Hodgson (1979) la biomasa se refiere a la medida instantánea a nivel del suelo del peso total del forraje por unidad de superficie. Esta definición implica que la única forma de conocer la cantidad de materia seca (MS) presente en un sitio determinado y en un momento del tiempo sería cortando, secando y pesando el total del forraje en el campo sin pérdida de material. Pero también es posible pesar toda la materia fresca en campo y extrapolar el total de la materia seca en laboratorio, secando una masa representativa al horno a una temperatura controlada.

Huerto et al. (2004) en una investigación menciona que para efectos de la distribución de los resultados de biomasa un conjunto de hidrófitas sumergidas, flotadoras y herbáceas cuyos pesos seco promedio por unidad de superficie no alcanza los 2 kg/m² y por otro las emergentes, cuyos promedios de peso seco rebasan los 4 kg/m².

Rodríguez y Brisson (2002), en una investigación con humedales artificiales señala que las plantas *Phragmites australis* y *Phragmites arundinacea*, mostraron diferentes distribuciones de biomasa arriba y abajo. *P. australis* tenía una densidad de tallo menor (586m²), pero tallos más altos (2,4m), comparado con *P. arundinacea* con una densidad muy alta (1600m²) de tallos finos y cortos (1,7m). Sin embargo, la biomasa seca promedio fue similar para ambas especies (2,2 kg/m²).

En el caso del Vetiver y Paragüitas hay evidencias de investigación relacionados a su biomasa, del primero, mientras que de la segunda no se han realizado investigaciones, sin embargo, se ha encontrado estudios de especies de igual género (*Cyperus papyrus*).

Mburu et al. (2014), menciona en sus resultados obtenidos que el *Cyperus papyrus* tiene una productividad neta de biomasa seca de hasta 6000 g/m²-año en áreas semiáridas tropicales y templadas, donde más del 50% de biomasa seca es tallo y hoja.

Por otro lado, se ha demostrado el potencial del Vetiver, el cual tiene una capacidad de producir hasta 132 t/ha/año de materia seca, biomasa, muy por encima de cualquier gramínea. Una capacidad potencial de exportar hasta 1.920 kg/ha/año de nitrógeno y 198 kg/ha/año de fósforo; pero puede crecer con suplencias hasta de 6.000 kg/ha/año nitrógeno

combinado con una suplencia de 250 kg de fósforo /ha/año. Esto le comunica a esta planta unas extraordinarias capacidades para eliminar tales nutrientes de aguas contaminadas (Troung et al, 2003).

2.7.1 MEDICIÓN DE BIOMASA DE LAS PLANTAS

No hay un método establecido para la medición de biomasa de las plantas, sin embargo la ASTM cuenta con una metodología publicada en “Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil”, dichos métodos están ya establecidos y desarrollados para el análisis de otros materiales. En este caso para la caracterización de biomasa, se aplica las recomendaciones establecidas en el procedimiento de la norma ASTM, desarrollados para la caracterización de combustibles sólidos, especialmente carbones y son dos las principales pruebas, el análisis proximal y el análisis último que miden como un carbón específico o una muestra similar al carbón se desempeña cuando es destinado en procesos de combustión de combustibles fósiles. (ASTM, 1984).

2.8 EXPERIENCIAS EN OTROS PAÍSES CON VETIVER Y PARAGÜITAS

Los resultados obtenidos en otros países, teniendo en cuenta las condiciones climáticas, consideran que la aplicación de los sistemas de humedales construidos, en zonas periurbanas, en pequeños núcleos rurales y para industrias agrícolas es de gran interés. Los altos niveles de radiación solar y las altas temperaturas en el verano dan lugar al crecimiento espectacular de estas plantas y por ello probablemente se pueden llegar a obtener eficiencias depuradoras superiores a las obtenidas en países más septentrionales.

2.8.1 EXPERIENCIAS CON *Cyperus alternifolius*

Hossein (2013), reporta en un estudio la comparación de la eficiencia de *Cyperus alternifolius* y *Phragmites australis* en el tratamiento de aguas residuales municipales por el método de humedales subsuperficiales.

En este estudio se consideraron tres reactores 1) piloto de control, 2) planta piloto con *Cyperus alternifolius* y 3) planta piloto con *Phragmites australis*, los cuales fueron diseñados por el método de humedal subsuperficial construido. Se tomaron 90 muestras de entrada y salida de los reactores. El tiempo de retención fue de cuatro días. Estas muestras fueron analizadas y finalmente se mostraron los resultados de la eficiencia de eliminación de los parámetros tales como DQO, DBO₅, SST, NO₃-N, N-NH₃, PO₄ -P, coliformes totales y coliformes fecales fue de 74, 73, 84, 40, 36, 70, 33 y 38% en el humedal con *Cyperus alternifolius*, 44, 34, 77, 15, 0,3, 1, 17 y 26% en el humedal de control y 59, 54, 73, 6, 3, 10, 93 y 50 en el humedal con *Phragmites australis*, respectivamente. Esta tasa de reducción en todos los parámetros, excepto en coliformes fecales fue estadísticamente significativa ($p = 0,05$).

Los resultados de este estudio mostraron la macrófita *Cyperus alternifolius* ha tenido una mayor eficiencia en la eliminación de los parámetros químicos, mientras que *Phragmites australis* tuvo eficacia adecuada en la eliminación de los parámetros microbiológicos. Por lo tanto, se puede concluir que la aplicación de estas dos plantas puede ser eficaz en el tratamiento de aguas residuales.

Yao (2011), demostró en un estudio que existían diferencias significativas de liberación de oxígeno de las raíces de las plantas en humedales que han sido evaluados, y el proceso bioquímico de la raíz fue la principal fuente de liberación de oxígeno. Se analizaron dos condiciones 1) solución de nutrientes y 2) aguas residuales artificiales, en la que la liberación de oxígeno de las raíces del *Chrysopogon zizanioides* y *Cyperus alternifolius* fueron de 74-77% y 71-72%, respectivamente.

Se sugirió que el potencial de liberación de oxígeno de la raíz podría ser utilizado como un parámetro para seleccionar plantas de humedales que pueden aumentar el suministro de oxígeno al suelo o sustrato de humedales construidos y mejorar la transformación de nutrientes y la eliminación, y el *Chrysopogon zizanioides* con el potencial más alto de la liberación de oxígeno raíz y una mayor tolerancia a las aguas residuales podría ser recomendado para establecer los humedales con vegetación para el tratamiento de aguas residuales ricas en nutrientes tales como aguas residuales domésticas.

Pérez (2012) propuso en una investigación un humedal sub-superficial vertical, por las características de las aguas residuales con niveles bajos de oxígeno disuelto y la alimentación intermitente (dos veces a la semana). El humedal sub-superficial vertical cuenta con un área superficial de aproximadamente 20 m² con 0,8 m de altura, el sustrato usado fue *suelo Ferralítico rojo* que contienen hierro y aluminio, lo que favorece la eliminación de fósforo. El humedal fue sembrado con *Cyperus alternifolius*. Se obtuvo una reducción significativa de los contaminantes en el agua residual después de 12 semanas de funcionamiento.

Los resultados mostrados en el Cuadro 12, demostraron que el uso de humedales de flujo sub-superficial vertical, son tratamientos apropiados para reducir los contaminantes en las aguas residuales. Después de haber obtenido un aumento significativo de oxígeno disuelto (5 mg / L), la reducción de los nutrientes en las aguas residuales del efluente (alrededor de 1,5 mg de fósforo total por litro y 2 mg de nitrógeno total por litro) y el nivel de DBO₅ (6 mg / L) y DQO (15 mg / L) también se redujeron (Figura 18). De acuerdo con estos resultados, se puede concluir que el sistema de humedales utilizado en esta investigación podría ser una solución adecuada para la purificación de aguas residuales. Los valores obtenidos para todos los parámetros estuvieron de acuerdo a las regulaciones *cubanas*. El aumento significativo de oxígeno disuelto en el efluente de aguas residuales fue de 5, 45 mg / l con respecto a las aguas residuales del afluente que fue 1,07 mg / l. El rendimiento total de eliminación de fósforo fue de 76%, siendo este valor mayor que las eficiencias de fósforo reportados típicamente para sustrato de grava (20-30%). (Prochaska y Zouboulis, 2006).

Cuadro 12. Porcentaje de remoción usando *Cyperus alternifolius* y suelo *Ferralítico rojo*.

Parámetros	Nivel Permitido	Afluente	Efluente	% Remoción
pH (u)	6.5-8.5	7.25	7.04	-
Conductividad Eléctrica (μS/cm)	1400	690	677	-
DQO (mg/l)	70	94	10.04	89.8
DBO ₅ (mg/l)	30	42.17	6.39	84.9
Oxígeno Disuelto (mg/l)	-	1.07	5.45	-
Fosforo Total (mg/l)	2	7.11	1.67	76.5
Nitrógeno Kjeldahl (mg/l)	5	13.98	2.43	82.7

NH4 (mg/l)	-	2.59	1.53	82.2
NO2 (mg/l)	-	0.03	0.03	-
NO3 (mg/l)	-	4.98	8.02	-
Sólidos Totales suspendidos (mg/l)	-	19.75	0.38	98.1

Fuente: Adaptado Pérez, 2012

Mellisho (1999) señala que en su investigación se construyeron tres pantanos de las mismas características geométricas con sección trapezoidal. Dentro de cada pantano se colocó un sustrato de grava y arena usando tres tamaños de material dispuestos desde el fondo hacia arriba (piedra chancada de 1/2" 0.25m, confitillo de 3/ 8" 0.10 m, arena gruesa 0.10 m y confitillo de 3/8" 0.05). Además, en cada uno de los pantanos se sembró una especie acuática emergente para el pantano P-1 (*Cyperus papyrus*), para el pantano P-2 (*Cyperus aff. Feroz*) y para el pantano P-3 (*Phragmites australis*).

Las especies acuáticas se adaptaron a los 2 y 3 meses de sembradas, debido a que estas crecen muy fácilmente en climas templados y son plantas perennes. El tipo de flujo utilizado fue sub superficial y en condiciones tipo "batch" es decir que se llenó de agua cada pantano y se mantuvo retenida dentro de él por periodos de 24 y 48 horas, para evaluar el tiempo de retención requerido para el tratamiento. El caudal promedio con que se operó el sistema fue de 0.45 l/s. Los parámetros físicos-químicos evaluados en los efluentes presentaron variaciones mínimas en relación al agua cruda a excepción de los sólidos suspendidos y del pH, observándose un porcentaje de remoción de sólidos del 59% para el pantano P-1 y 56% para el pantano P-2. Los parámetros químicos se muestran en el Cuadro 13.

Cuadro 13: Características y resultados de la investigación hecha por Mellisho, 1999

Parámetros	Agua residual cruda		TR 24 hr		TR 48 hr	
			Agua Tratada		Agua Tratada	
	P-1	P-2	P-1	P-2	P-1	P-2
DBO ₅	334.75	298.33	44.78	52.05	40.83	60.40
%Remoción			88%	87%	88%	83%
Nitrógeno Amoniacal	62.65	71.87	19.25	18.73	18.80	20.67
%Remoción			76%	85%	76%	82%

Fósforo Total	1.97	4.09	1.89	3.90	2.53	2.70
%Remoción			92%	74%	33%	94%

* El punto P-3 no se pudo evaluar por problemas inesperados.

*TR: Tiempo de retención

Fuente: Adaptado de Mellisho, 1999

Miglio et al. (2003), evaluaron la capacidad depuradora de dos plantas (*carrizo* y *cyperus*) comparadas con un sistema en blanco (sin plantas). El módulo experimental trató las aguas servidas de la granja de porcinos reproductores de la UNALM; este módulo estuvo conformado por tres sistemas, en los cuales se sembraron las dos especies y el tercero fue un sistema en blanco.

Cada uno de los sistemas estuvo formado por dos pantanos colocados en serie; el primero de flujo vertical descendente y el segundo de flujo vertical ascendente. El sistema captó el agua residual mediante una pequeña compuerta instalada sobre el canal de desagüe de la granja y la derivó hacia un tanque sedimentador desde donde fue conducida mediante tuberías hacia los pantanos de flujo vertical. El estudio concluyó que al haberse logrado más de un 90% de eficiencia en la remoción de DQO y nitrógeno total, se puede afirmar que el sistema funcionó satisfactoriamente. Obteniéndose mejores resultados en el sistema con el cultivo de *cyperus*. Los resultados se muestran en el Cuadro 14.

Cuadro 14: Características y resultados de la investigación hecha por Miglio, 2003

Parámetros	Punto de Muestreo			
	Canal	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
	Agua cruda	Carrizo	Cyperus	Blanco
Oxígeno Disuelto (mg/l)	0.45	4.44	5.5	3.46
PH	8.39	7.46	7.65	7.77
CE (ms/cm)	6.36	6.95	8.04	6.53
Temperatura (°C)	18.02	17.97	17.92	18.14
Sólidos totales (mg/l)				
% de Remoción		-7.64	-92.2	9.52
Sólidos sedimentales (ml/l)		0	0	0
% de remoción	15.99	100	100	100
Sólidos fijos (mg/l)		4155.56	6155.56	3288.89
% de remoción	4377.78	5.08	-40.61	24.87
Sólidos volátiles (mg/l)		3511.11	7533.33	3155.56
% de remoción	2744.44	-27.94	-174.49	-14.98

DQO (mg/l)	2737.12	175.39	141.97	314.81
% de remoción		93.59	94.81	88.5
Nitrógeno total (mg/l)	1831.94	117.87	111.32	366.72
% de remoción		93.57	93.92	79.98
Coliformes totales -	5.00E+07	2.30E+03	3.00E+05	5.00E+04
Parásitos	presentes	ausentes	ausentes	ausentes

Fuente: Adaptado de Miglio et al, 2003

2.8.2 EXPERIENCIAS CON EL *Cryspogon zizanioides*

Anon (1997) mostró en China en una investigación, que el Vetiver se puede utilizar para eliminar altas concentraciones solubles de N y P en aguas de río contaminado.

En el Cuadro 15 se muestra que el porcentaje de eliminación de P total que fue de 76 a 91% después del crecimiento de 2 semanas, y más del 98% después de 3 o 4 semanas. La velocidad de eliminación fue mayor en el agua del río I que en el agua del río II. Esto podría deberse a que el Vetiver plantado en el agua del río I tenía más raíces y por lo tanto la capacidad de absorción fue más fuerte. El porcentaje de eliminación del N total fue un poco menor que la del P total; 34-45% después de 1 ó 2 semanas, y 71 a 74% después de 4 o 5 semanas. Estos indican que la eficacia de eliminación de P por Vetiver es superior a la de N. El fósforo generalmente se considera que es un elemento clave en la eutrofización del agua.

Por lo tanto, el sistema Vetiver puede ser utilizado de manera muy eficaz para controlar el crecimiento de algas en el agua infestada de algas azul-verde. Esto se puede lograr mediante la plantación de Vetiver en los bordes de las corrientes o en las partes superficiales de lagos donde se produjeron generalmente altas concentraciones de N soluble y P. Alternativamente el Vetiver puede ser cultivado hidropónicamente en plataformas flotantes, lo que podría ser instalado en las regiones más afectadas del lago o estanque. Las ventajas de este método innovador plataforma flotante resultan beneficioso ya que se pueden cosechar fácilmente como material de alimentación o las raíces de Vetiver puede ser extraída para la producción de aceite esencial.

**Cuadro 15: Eficiencia de Vetiver en la eliminación de N y P
a partir de agua contaminada del río.**

Tiempo de crecimiento (semana)	1	2	3	4	5
Agua de río (I):					
Fósforo Total (mg/l)	0.3	0.083	0.007	0.009	
% Remoción	68.1	91.2	99.3		
Nitrógeno Total (mg/l)	9.1			4	
% Remoción	34.1			71	
Agua de río (II):					
Fósforo Total (mg/l)		0.25	0.065	0.027	0.023
% Remoción		75.8	93.7	97.4	97.8
Nitrógeno Total (mg/l)		5.76	4.4		2.71
% Remoción		45.1	58.1		74.2

Fuente: Adaptado de Anon 1997

Lishenga (2015) menciona una investigación que realizó en una granja de flores de la localidad Mombas en Kenya.

Este trabajo describe el rendimiento comparativo de los sistemas de pasto Vetiver en el tratamiento de aguas residuales domésticas, la planta se estableció usando tres diferentes técnicas: en un medio de suelo, con raíces en suspensión en el agua y como un híbrido de estos dos.

En el afluente y el efluente se tomaron muestras a intervalos de cinco días y se analizó la DBO₅ (demanda bioquímica de oxígeno), NT (Nitrógeno Total), PT (fósforo total) y SST (sólidos suspendidos totales). Las tasas de crecimiento de los brotes fueron estudiadas en términos de aumento de la altura con el tiempo.

Los resultados y las cantidades de NT, PT, DBO y SST retirados de las aguas residuales se presentan en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Resultados de la eficiencia del Vetiver investigada por (Lishenga, 2015)

Parámetros	Control	Hidropónico	Hibrido	Base Suelo
NT inicial(mg/l)	45.64	45.64	45.64	45.64
NT final(mg/l)	33.71	23.11	22.92	19.59

% Remoción	26.14	49.35	49.77	57.07
PT inicial(mg/l)	6.56	6.56	6.56	6.56
PT final(mg/l)	5.59	4.65	4.64	4.41
% Remoción	14.85	29.12	29.27	32.9
DBO ₅ inicial(mg/l)	92.67	92.67	92.67	92.67
DBO ₅ final(mg/l)	56.87	31.34	28.79	22.7
% Remoción	38.67	66.2	68.95	75.52
SST inicial(mg/l)	173.66	173.66	173.66	173.66
SST final(mg/l)	99.93	81.32	80.53	73.32
% Remoción	42.46	53.17	53.63	57.78

Fuente: Adaptado de *Lishenga, 2015*

El Cuadro 17, muestra las alturas de las plantas en las diversas unidades de tratamiento al comienzo de cada semana.

Cuadro 17. Altura de plantas al principio de cada semana

Tratamiento	Altura de la planta en cm.						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Promedio
Base Suelo	30	47.5	62.9	75.8	82.3	97.6	65.85
Hidropónico	30	41.2	62.1	73.6	80.3	95.9	63.85
Híbrido	30	38.5	61.2	72.5	78.4	95.1	62.62

Fuente: adaptado de *Lishenga, 2015*

Los resultados del estudio confirman que el Vetiver es una planta útil en el tratamiento de aguas residuales ya que todas las unidades que contenían plantas de Vetiver realizan mejor tratamiento que los controle. También se estableció que los sistemas basados en el suelo se desempeñan mejor que el híbrido y los sistemas hidropónicos esto nos informa de manera efectiva de la importancia del medio del suelo. Esto sugiere que siempre que sea posible construir unidades de tratamiento de aguas residuales usando Vetiver en los humedales deben incluir un medio sólido adecuado.

Ash (2003) menciona un estudio hecho en una planta de tratamiento en Toogoolawah, un pequeño pueblo en el subtrópico de Australia, que se construyó en los años 70. Se utilizó sedimentación primaria (*tanque Imhoff*) seguido de tres estanques de almacenamiento. El efluente de los estanques fue diseñado para fluir a un humedal y rebosar después a un arroyo local. Se consideró un sistema de tratamiento con Vetiver que pudiera absorber la mayor parte del agua, así como los nutrientes, los compuestos orgánicos y los metales pesados del drenaje.

El tratamiento con Vetiver tenía dos componentes (Figura 18):

- Un tratamiento hidropónico en estanques de almacenamiento
- Un humedal estacional



Figura 18: Tratamiento con Vetiver

Los resultados del tratamiento a lo largo del periodo 2002 - 2004 se resumen en el Cuadro 18.

Cuadro 18: Calidad del efluente antes y después del tratamiento Vetiver.

Pruebas (requeridas por el permiso)	Afluente	Efluente	Eficiencia (%)
pH (6.5 - 8.5)	7.3 - 8.0	7.6 - 9.2	-
Oxígeno Disuelto (2.0 mg/l min)	0 - 2	8.1 - 9.2	-
DBO ₅ (20 - 40 mg/l máx.)	130 - 300	7 - 11	95
Sólidos suspendidos (30 - 60 mg/l máx.)	200 - 500	11 - 16	96
Nitrógeno Total (6.0 mg/l máx.)	30 - 80	4.1 - 5.7	91
Fósforo Total (3.0 mg/l máx.)	10 - 20	1.4 - 3.3	84

Danh (2006) hizo un estudio en el delta del río Mekong, en Vietnam, una prueba se realizó en una planta procesadora de mariscos para determinar el tiempo de tratamiento requerido (tiempo de retención) para retener el efluente en un campo de Vetiver para reducir las concentraciones de nitrato y fosfato a niveles aceptables (Figura 19). El experimento se inició cuando las plantas tenían tres meses de edad. Se tomaron muestras cada 24 horas durante 3 días. Los resultados analíticos demostraron que el contenido total de N en las aguas residuales (4.79 mg L^{-1}) se redujo en 88% y en 91% después de 48 y 72 horas respectivamente. El P total (0.72 mg L^{-1}) se redujo un 80% y un 82% después de 48 y 72 horas respectivamente. La cantidad de N y P retirado en 48 y 72 horas de tratamiento no mostraron una diferencia significativa.



Figura 19: Plantación de Vetiver en una planta procesadora de mariscos.

Triana (2013) realizó un estudio en Colombia, en una compañía llamada Ecopetrol que implementó una prueba piloto para investigar el potencial del Vetiver para remover grasas, aceites y sólidos suspendidos en aguas residuales que eran generados durante el proceso de producción de aceite. El Vetiver se plantó en una plataforma flotante de un humedal construido de $6 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, con el nivel de agua manteniéndose a 60 cm. de profundidad y un flujo de 0.24 L por segundo 1 . Resultados preliminares obtenidos en el periodo de 32 a 49 días después de la siembra indicaron que el Vetiver en la plataforma flotante pudo retirar del 73 al 100% de grasas y aceites y del 29 al 75% de sólidos suspendidos en los rangos de 0.33 a 5.23 y 1.7 a 18 mg L^{-1} , respectivamente. El estudio todavía continúa y se espera que pruebe el comportamiento del sistema y los rangos de remoción de otros parámetros.

Truong (2008) en la recopilación de información publicada en “El sistema Vetiver para mejorar la calidad del agua”, hace mención a un estudio piloto que se llevó a cabo para probar la conveniencia de utilizar pasto Vetiver para tratar un efluente de una planta manufacturera de aluminio en Tanger, Marruecos, que estuvo altamente contaminado con aluminio y metales. Después de neutralizar y decantar las sales suspendidas de Al, el efluente fue descargado a un contenedor de arena sembrado con Vetiver con capacidad de filtrar 500 L por día (85 L descargados 6 veces al día). Diez semanas después del sembrado, aun cuando el sistema no estaba totalmente maduro (Figura 20), el Vetiver demostró su efectividad para purificar este afluente altamente contaminado (Figura 21).

A continuación se muestran los resultados obtenidos por este tratamiento:

- Reducción de niveles de DQO y DBO del 98%
- Reducción de niveles de sólidos suspendidos del 99%
- Reducción del nivel de N del 95%
- Reducción del nivel de Fósforo del 97%
- Reducción de los niveles de metales pesados de un 99.99%



Figura 20: Unidad de humedal después de 6 semanas



Figura 21: Calidad del efluente antes y después del tratamiento.

2.9 MARCO LEGAL DE REFERENCIA

Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM

Aprueba límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.

Artículo 1.- Aprobación de Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de Plantas de Tratamiento de Agua Residuales Domésticas o Municipales (PTAR)

Aprobar los Límites Máximos Permisibles para efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, los que en Anexo forman parte integrante del presente Decreto Supremo y que son aplicables en el ámbito nacional.

Artículo 2.- Definiciones Para la aplicación del presente Decreto Supremo se utilizarán los siguientes términos:

- Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR): Infraestructura y procesos que permiten la depuración de las aguas residuales Domésticas o Municipales.

- Límite Máximo Permisible (LMP).- Es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el MINAM y los organismos que conforman el Sistema de Gestión Ambiental.

- Protocolo de Monitoreo.- Procedimientos y metodologías establecidas por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en coordinación con el MINAM y que deben cumplirse en la ejecución de los Programas de Monitoreo.

Artículo 3.- Cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles de Efluentes de PTAR

3.1 Los LMP de efluentes de PTAR que se establecen en la presente norma entran en vigencia y son de cumplimiento obligatorio a partir del día siguiente de su publicación en el Diario Oficial El Peruano.

3.2 Los LMP aprobados mediante el presente Decreto Supremo, no serán de aplicación a las PTAR con tratamiento preliminar avanzado o tratamiento primario que cuenten con disposición final mediante emisario submarino.

3.3. Los titulares de las PTAR que se encuentren en operación a la dación del presente Decreto Supremo y que no cuenten con certificación ambiental, tendrán un plazo no mayor de dos (02) años, contados a partir de la publicación del presente Decreto Supremo, para presentar ante el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento su Programa de Adecuación y Manejo Ambiental; autoridad que definirá el respectivo plazo de adecuación.

3.4 Los titulares de las PTAR que se encuentren en operación a la dación del presente Decreto Supremo y que cuenten con certificación ambiental, tendrán un plazo no mayor de tres (03) años, contados a partir de la publicación del presente Decreto Supremo, para presentar ante el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, la actualización de los Planes de Manejo Ambiental de los Estudios Ambientales; autoridad que definirá el respectivo plazo de adecuación.

Artículo 4.- Programa de Monitoreo

4.1 Los titulares de las PTAR están obligados a realizar el monitoreo de sus efluentes, de conformidad con el Programa de Monitoreo aprobado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. El Programa de Monitoreo especificará la ubicación de los puntos de control, métodos y técnicas adecuadas; así como los parámetros y frecuencia de muestreo para cada uno de ellos.

4.2 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento podrá disponer el monitoreo de otros parámetros que no estén regulados en el presente Decreto Supremo, cuando existan indicios razonables de riesgo a la salud humana o al ambiente.

4.3 Sólo será considerado válido el monitoreo conforme al Protocolo de Monitoreo establecido por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, realizado por Laboratorios acreditados ante el Instituto Nacional de Defensa del Consumidor y de la Propiedad Intelectual - INDECOPI.

Artículo 5.- Resultados de monitoreo

5.1 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento es responsable de la administración de la base de datos del monitoreo de los efluentes de las PTAR, por lo que los titulares de las actividades están obligados a reportar periódicamente los resultados del monitoreo de los parámetros regulados en el Anexo de la presente norma, de conformidad con los procedimientos establecidos en el Protocolo de Monitoreo aprobado por dicho Sector.

5.2 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento deberá elaborar y remitir al Ministerio del Ambiente dentro de los primeros noventa (90) días de cada año, un informe estadístico a partir de los datos de monitoreo presentados por los Titulares de las PTAR, durante el año anterior, lo cual será de acceso público a través del portal institucional de ambas entidades.

Artículo 6.- Fiscalización y Sanción

La fiscalización del cumplimiento de los LMP y otras disposiciones aprobadas en el presente Decreto Supremo estará a cargo de la autoridad competente de fiscalización, según corresponda.

Artículo 7.- Refrendo

El presente Decreto Supremo será refrendado por el Ministro del Ambiente y por el Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Los valores de los límites máximo permisibles se muestran en el Cuadro 19.

Anexo.

Cuadro 19. Límites Máximos Permisibles para los efluentes de PTAR

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

Fuente: MINAM, MVCSM

III. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE LA UNALM

3.1 ANTECEDENTES

Este proyecto denominado “Planta piloto para el tratamiento de aguas residuales domesticas por medio de humedales artificiales”, fue elaborado por Rotaria del Perú SAC. El objetivo principal del sistema implementado, fue la investigación y enseñanza de las diferentes alternativas de tratamiento en una escala piloto dentro de la Universidad Nacional Agraria La Molina. El sistema se implementó en el marco del proyecto “Programa de educación en ciencia y tecnología del agua para la población infanto juvenil de Perú, financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), en cooperación con la Universidad de Ramón Llull de Barcelona, España, entre el 2011 y 2012.

3.2 SITUACIÓN

El proyecto fue diseñado para captar aguas residuales domesticas de un buzón de la red de la universidad, que permite tomar el caudal necesario para las líneas de tratamiento y retorna el sobrante a la red de alcantarillado. Se instalaron 2 líneas de tratamiento, cada una diseñada idealmente para tratar el desagüe de 30 *personas equivalentes* (PE) o aproximadamente 6m³/día, pero esta dotación será variable según la investigación que se esté realizando.

3.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS SISTEMAS

La planta piloto cuenta con dos líneas de tratamiento, pero por criterios de investigación, estas líneas se podrán combinar y/o modificar los caudales a tratar, lo que permitirá tener una gama de opciones de tratamiento.

- La primera línea está compuesta por un tanque Baffled con cuatro cámaras de contacto y dos humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.
- La segunda línea de tratamiento está compuesta por una celda francesa seguida por dos humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical.

La planta piloto está localizada en el Centro Modelo de Tratamiento de Residuos (CEMTRAR) de la UNALM. El plano de la PTAR piloto se presenta en el Anexo 8.

La Figura 22 muestra la distribución espacial de las líneas de tratamiento, donde se observa también la distribución de las tuberías.

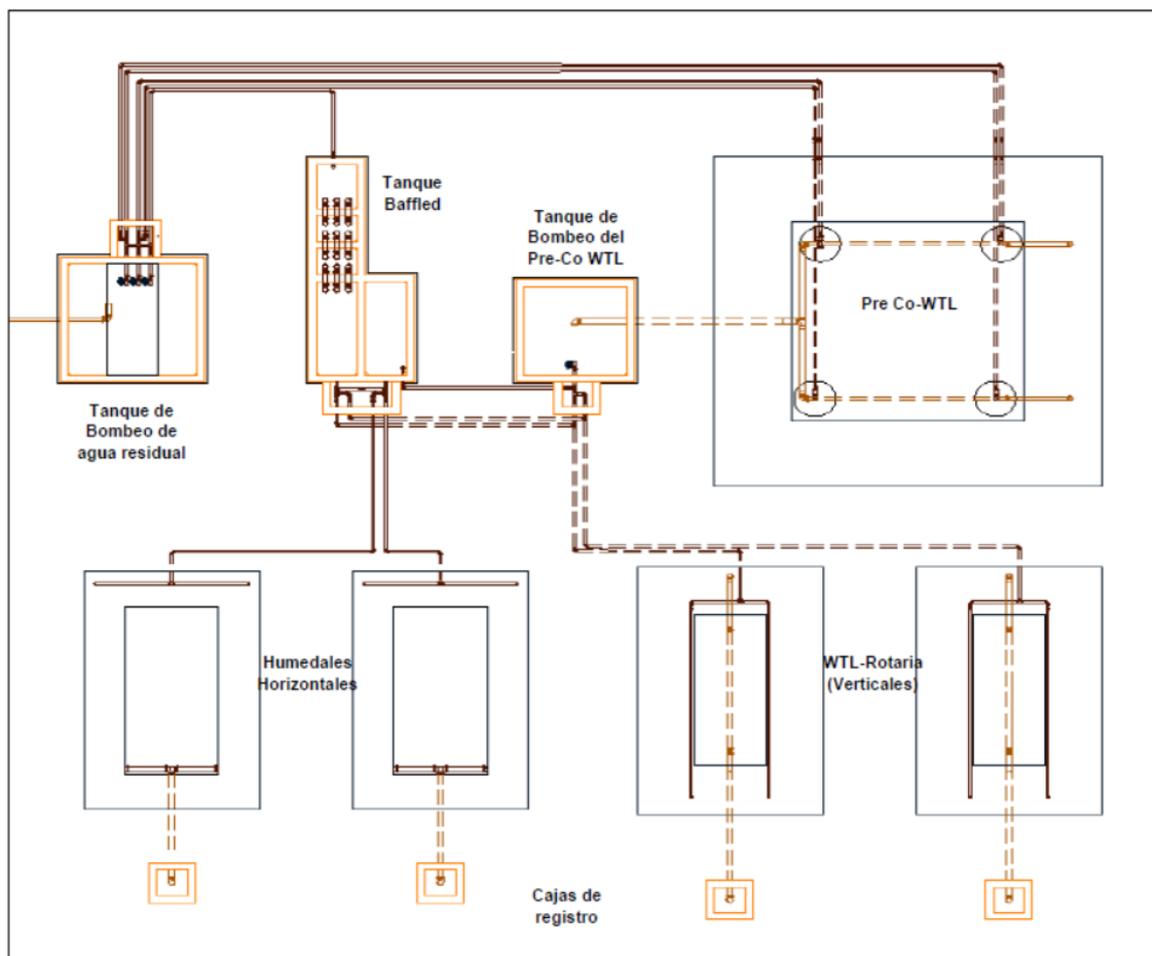


Figura 22: Esquema general de la PTAR

Fuente: Rotaria del Perú SAC

3.3.1 TRATAMIENTOS PRIMARIOS

El tratamiento primario tiene como objetivo eliminar los sólidos suspendidos, sedimentables, grasas, fibras, etc. Es decir solo es remoción de sólidos mediante procesos físicos como sedimentación y filtración principalmente para este caso.

Este tratamiento es muy importante para evitar la obstrucción de los humedales del tratamiento secundario, que es la obstrucción de los poros debido a la acumulación de sólidos. En la planta se utilizaron dos tipos de tratamientos primarios:

a. Tanque Baffled

El tanque fue diseñado para atender el desagüe generado por 30 *personas equivalentes*, o un caudal de 6 m³/día. El Tanque Baffled contiene 03 cámaras de sedimentación y 01 cámara final para la distribución del agua pre-tratada por gravedad hacia los humedales. Además se construyó 01 cámara paralela a esta última, de 2 m³ donde puede almacenar el agua proveniente de la celda francesa para combinar su tratamiento con los humedales horizontales.

El tanque es alimentado mediante bombeo, aplicando el bombeo de 1 minuto de duración cada hora, la tubería de ingreso se encuentra ubicada a 130 cm sobre la base interna del tanque, la altura del agua residual dentro de las cámaras es aproximadamente 120 cm. El tiempo de retención de diseño en el tanque es 11 horas en total. Las dimensiones del tanque se muestran en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Dimensionamiento del Tanque Baffled

Compartimientos	Volumen útil (m ³)	Tiempo medio de retención (horas)	Largo efectivo (cm)	Ancho efectivo (cm)	Altura Efectiva (cm)
1era cámara	0.96	5	100	80	120
2da cámara	0.58	3	60	80	120
3era cámara	0.58	3	60	80	120
Cámara de distribución	2.00		210	80	120
Total	4.12	11	430	80	120

Fuente: Rotaria del Perú SAC

El paso del agua de una cámara a la siguiente se realiza mediante tuberías de 4 pulgadas de diámetro, 3 líneas de estas tuberías reciben el desagüe y lo distribuyen hacia la siguiente cámara. Estas tuberías se encuentran a 120 cm sobre el nivel de la base del tanque, teniendo un desnivel de 10 cm con la tubería de entrada. Las paredes externas e internas tienen 15 cm de espesor y estas están totalmente pulidas para evitar infiltraciones, además de contener aditivos impermeabilizantes.

b. Celda Francesa

Es un humedal del tratamiento primario. Esta unidad funciona con flujo vertical, su lecho está conformado por piedra y gravilla, y está encargado de la separación física de los sólidos del agua residual; recibe el agua residual cruda sin ningún tipo de tratamiento anterior. Ha sido diseñado para tratar los desagües de 30 *personas equivalentes*.

La distribución del efluente sin tratar se da mediante tuberías de 3" instaladas en la superficie del humedal mediante pequeñas piletas. Este tipo de tratamiento exige la presencia de dos o más canchales que realizan un pre-tratamiento en paralelo, de manera que cuando unos están en operación, los otros descansan y los sólidos en la superficie se secan y degradan. Para la planta piloto se utilizaron cuatro canchales. El humedal se impermeabilizó con geomembrana de HDPE de 1mm de espesor.

La celda francesa tiene un área efectiva de 36 m², con dimensiones de 6.5 m por 6.5 m en total (tienen 0.5 m más para las divisiones de las celdas), sus taludes son de 45° para dar estabilidad. Los canchales están subdivididos dentro de la celda francesa, y cada uno tiene una tubería independiente que viene de la cámara de bombeo, cada subdivisión cuenta con un radio efectivo de 3 metros de distribución de agua residual, o un área aproximada de 9 m². Las dimensiones se presentan en el Cuadro 21.

Cuadro 21: Dimensiones de la celda francesa

Dimensiones	Valor	Unidad
Área efectiva superficial	36	m ²
Profundidad efectiva	100	cm
Borde Libre	50	cm
Grava huso 67	60	cm
Piedra Chancada de ½"	25	cm
Piedra Chancada de 1"	15	cm

Fuente: Rotaria del Perú SAC

La celda francesa cuenta con un pozo de bombeo y una bomba sumergible de $\frac{3}{4}$ HP, desde el cual se distribuye el efluente hacia humedales artificiales de flujo vertical, o hacia la cámara lateral del tanque baffled. Este pozo tiene un volumen de 2 m³.

3.3.2 TRATAMIENTOS SECUNDARIOS

El tratamiento secundario está diseñado para degradar sustancialmente el contenido de materia orgánica disuelta en el agua, para este caso se utilizaron los humedales artificiales de flujo subsuperficial.

a. Humedal Sub superficial Horizontal

Se construyeron 02 humedales de flujo horizontal con las mismas características. Cada humedal es alimentado por el agua residual mediante gravedad, cuenta con un área superficial efectiva de 15 m², y dimensiones de 3 m de ancho, por 5 m de largo. Además, tiene un borde libre de 0.10 m. Cada humedal está diseñado para 15 personas equivalentes.

El humedal es alimentado con una tubería perforada de 2"; ubicada en la cabecera del humedal en forma transversal. Las perforaciones se ubican cada 10 cm y el diámetro de perforación es de 8 mm. Una tubería con diámetro y perforaciones iguales, se encuentra ubicada al pie del humedal y está encargada de recepcionar el agua residual tratada. Tanto en la entrada como en la salida del humedal, se colocó piedra chancada de 1 pulgada para mejorar el drenaje en la distribución y recolección del agua.

Se colocaron 4 puntos de observación con tuberías de 4 pulgadas, estos van desde la cabecera hacia el pie del humedal, están ubicados en 2 líneas paralelas y distribuidos

equidistantes en la longitud del humedal. Los puntos de observación permitirán saber las condiciones de tratamiento dentro del humedal. Los humedales horizontales están impermeabilizados con geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1 mm de espesor. Las dimensiones se presentan en el Cuadro 22.

Cuadro 22. Dimensiones del humedal horizontal

Dimensiones	Valor	Unidad
Área efectiva superficial	15	m ²
Profundidad efectiva	70	cm
Borde Libre	10	cm
Grava huso 7	60	cm
Grava de 1"	100 (*)	cm

(*) Es la distancia horizontal, la altura que tienen es igual a la altura efectiva.

Fuente: Rotaria del Perú SAC

b. Humedales Sub superficiales Verticales

Se construyeron 02 humedales de flujo vertical con las mismas características; cada uno tiene un área efectiva de 15 m². Cada humedal fue diseñado para tratar el desagüe de 15 *personas equivalentes*, o un caudal de 3 m³/día.

El agua se distribuye mediante tuberías de 2", perforadas y distribuidas sobre el humedal de manera longitudinal; la tubería de alimentación divide mediante una tee las 02 tuberías perforadas, distribuyendo uniformemente sobre toda la superficie del humedal; El fondo se impermeabilizó con geomembrana de HDPE de 1mm de espesor.

El desagüe tratado es recepcionado en el fondo del lecho mediante una tubería de 4 pulgadas perforada. Las dimensiones se presentan en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Dimensiones del humedal vertical

Dimensiones	Valor	Unidad
Área efectiva superficial	15	m ²
Profundidad efectiva	90	cm
Borde Libre	20	cm
Grava huso 7	10	cm
Arena	60	cm
Grava huso 7	20	cm

Fuente: Rotaria del Perú SAC

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 UBICACIÓN

El presente trabajo de investigación se realizó en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales, ubicada en la Universidad Nacional Agraria La Molina en el área de CEMTRAR.

4.2 DURACIÓN

La presente investigación se llevó a cabo durante un periodo de tiempo de 10 meses, se evaluó el tratamiento de dos humedales artificiales de flujo vertical que recibieron el efluente pre-tratado por una celda francesa.

4.3 METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló en tres etapas: Pre-operación, operación y evaluación y mantenimiento del sistema. En cada una de las etapas se desarrollaron diferentes actividades que se detallan a continuación.

4.3.1 PRE-OPERACIÓN

a. Acondicionamiento de los humedales artificiales

Para la puesta en marcha de los humedales se procedió a la limpieza de las celdas de los humedales que se observan en la Figura 23 mediante descargas de agua limpia para el

lavado de gravas y arena, antes de dar inicio a los monitoreos. Esta operación fue necesaria porque la planta piloto se construyó el año 2012 y estuvo 3 años sin operar.



Figura 23: Limpieza de humedales

b. Sembrío de plantas (macrófitas)

Se procedió a la siembra de las plantas en cada humedal, esto se hizo en el mes de enero. Se trasplantaron un grupo de 4 macollos por m^2 de la especie de *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides*. En la Figura 24 se muestran las especies sembradas con una distancia de 1 m entre plantas y entre hileras.



Figura 24 : Sembrío de macrófitas

c. Operación del tablero eléctrico y adecuación de tiempos de operación.

Se evaluó la operación del tablero eléctrico que regula el encendido y el apagado automático de las bombas que abastecen el sistema. Se verificó el nivel de las boyas para el suministro del caudal adecuado, se verificó el nivel de la boya del reservorio del sistema evaluado para regular la cantidad de bombeos al día.

4.3.2 OPERACIÓN Y EVALUACIÓN

4.3.2.1 Evaluación del desarrollo de las plantas

Luego del sembrado de las plantas, se esperó un tiempo de 30 días (tiempo de adaptación de las plantas) para iniciar su monitoreo en dos etapas; la primera se hizo después de un mes del sembrío, obteniendo siete reportes y la segunda después de un corte de mantenimiento. En esta última, se realizó un corte a 30 cm de altura de ambas especies para después monitorearlas, obteniendo igual cantidad de datos que en la anterior. Ambas etapas se midieron con una frecuencia de 12 días.

4.3.2.2 Determinación de los parámetros de operación del humedal artificial

Con la finalidad de verificar las condiciones de operación de los humedales artificiales, se determinaron los principales parámetros de operación del sistema: caudales de ingreso, carga orgánica, carga hidráulica, tiempos de retención y superficie específica.

a. Determinación del caudal de ingreso y salida

La determinación del caudal se realizó tanto a la entrada (por bombeo) como a la salida (gravedad) en ambos humedales. Los caudales fueron expresados en litros por segundo (l/s) teniendo en cuenta el tiempo de bombeo.

El caudal de entrada a los humedales: depende de la frecuencia de bombeo hacia el pretratamiento, ya que la bomba que impulsa a los humedales se enciende cuando la cisterna que recibe el agua pretratada alcanza el nivel máximo de 60cm de la base;

bombeando un tirante de 40 cm ya que el nivel mínimo es de 20 cm. El sistema realiza 3 bombeos diarios, con una duración de 15 minutos.

La medición del caudal de entrada se realizó tomando volúmenes en los orificios de la tubería que alimenta los humedales. Se tomaron ocho mediciones, usando un balde de plástico de cuatro litros de capacidad (método volumétrico). Figura 25



Figura 25: Medición del caudal de ingreso al humedal

El caudal de salida de los humedales: se midió en la caja de registro de cada humedal. Se tomaron 6 medidas usando un balde de plástico de 4 litros de capacidad (método volumétrico) y un cronómetro para determinar el tiempo de llenado. Figura 26. (Ver detalle en Anexo 3.2).



Figura 26: Medición del caudal de salida del humedal

b. Determinación del tiempo de retención

El tiempo de retención real, es el tiempo que demora en filtrar el agua desde la superficie hasta la salida del humedal. Se determinó mediante el método colorimétrico haciendo uso de un trazador. El trazador empleado fue *Fluoresceína Sódica*, para ello se disolvieron 10 gramos en un volumen de 1.6 m³ de agua. Luego de homogenizar la solución, se bombeó a los humedales y se procedió a medir el tiempo en el cual el agua empezó a salir coloreada.

El cambio de color se determinó de manera visual comparando fotografías que se pueden observar en el Anexo 7.4-7.6

c. Determinación de la carga hidráulica

Para la determinación de la carga hidráulica, se utilizó la siguiente ecuación:

$$Qh = \frac{\text{Caudal de ingreso pretratada}}{\text{Área superficial}} \dots \dots \dots \left(\frac{m^3}{m^2.dia} \right)$$

Dónde:

Q= Caudal pre-tratado de ingreso (m³/dia).

As= Área superficial del humedal artificial (m²)

d. Determinación de la carga orgánica (C)

Para la determinación de la carga orgánica (C) se utilizó la ecuación de Sherwood, 1998.

$$C = \frac{Qx(DBO_i - DBO_f)}{As} \dots \dots \dots \left(\frac{g}{m^2.dia} \right)$$

Dónde:

Q= Caudal pre-tratado de ingreso (m³/dia).

DBO_f= Valor promedio de la DBO₅ a la salida del humedal (mg/l).

DBO_i= Valor promedio de la DBO₅ a la entrada del humedal (mg/l).

As= Área superficial del humedal artificial (m^2)

El caudal fue determinado según la metodología explicada en el ítem **a**, y los valores de DBO_5 promedio (salida y entrada del humedal), fueron tomados de los ensayos realizados en el laboratorio de saneamiento y medio ambiente de la UNALM.

e. Área requerida por habitante equivalente

$$PE = \frac{Q \times DBO}{AP} \dots \dots \dots (\text{hab. Eq})$$

Dónde:

PE= Habitante Equivalente

Q= Caudal

DBO_5 = Demanda Bioquímica de Oxígeno

AP = Aporte per cápita ($\frac{g}{\text{Hab.día}}$)

$$\frac{\text{Área}}{PE} = \frac{At}{N^{\circ} PE} \dots \dots \dots \left(\frac{m^2}{\text{hab.Eq}} \right)$$

Dónde:

At= Área total de la superficie de tratamiento

PE= Habitante Equivalente

4.3.2.3 Monitoreo de la calidad del agua

Se evaluó la calidad del agua residual pre-tratada y tratada. El agua pre-tratada, es agua residual doméstica que ha pasado por un primer tratamiento en una celda francesa (Humedal de flujo vertical que recibe el desagüe crudo). Se evaluaron parámetros físicos, químicos, químicos y biológicos. Se tomaron datos en campo y en laboratorio.

a. Parámetros de Campo

Los parámetros evaluados directamente en campo fueron:

- Temperatura
- pH
- Conductividad Eléctrica (C.E.)
- Oxígeno Disuelto (O.D.)

Se utilizó un medidor multiparámetro marca *Waterproff* para medir el pH, Temperatura y la conductividad eléctrica; y un oxímetro marca *Hach* para evaluar el oxígeno disuelto.

b. Parámetros de Laboratorio

Los parámetros que se midieron en laboratorio fueron:

- Sólidos Suspendidos.
- Sólidos Totales
- Turbidez
- Nitratos y Nitritos
- Fósforo Total
- DBO₅. (Demanda Bioquímica de Oxígeno)
- DQO (Demanda Química de Oxígeno)
- Coliformes Totales
- Coliformes fecales

c. Ejecución del muestreo

- Puntos de muestreo

En la Figura 27 se muestran los puntos de muestreo: los cuales se indican a continuación: C) Entrada a los humedales, C1) Salida del humedal sembrada con Paragüitas y V1) Salida del humedal sembrado con Vetiver.

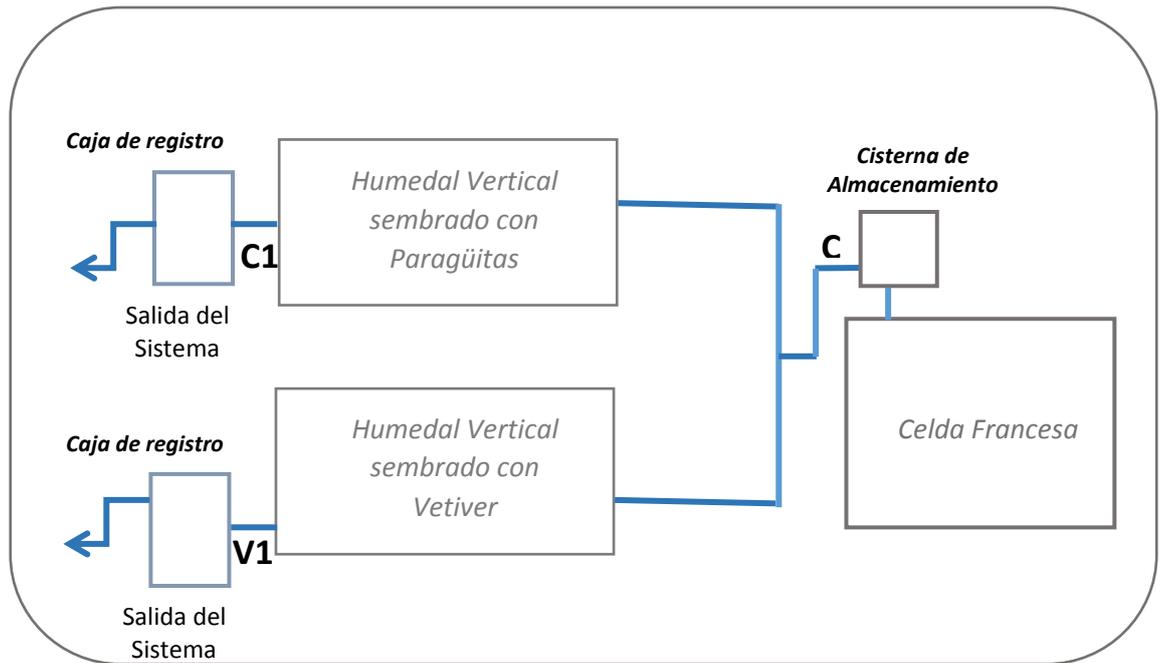


Figura 27: Puntos de Muestreo

d. Frecuencia de Muestreo

La frecuencia de muestreo fue semanal un periodo de 2 meses intercalados, Junio y Agosto respectivamente.

El horario de la toma de muestra fue los días jueves a las 10 am., ya que se detectó un caudal representativo, extendiéndose hasta 12:00am.

La muestra del agua residual pre-tratada se tomó después de 7 minutos de encendida la bomba que deriva el agua residual cruda hacia la celda francesa (pre-tratamiento) ya que durante la puesta en operación del sistema se observó que el agua resultaba homogénea en color, siendo así la más representativa para el análisis. Figura 28



Figura 28: Toma de Muestras en el pretratamiento (C)

La toma de muestras a la salida del humedal se tomó 30 minutos después de encendida la bomba que deriva el agua residual pre-tratada hacia los humedales, se optó por esperar este tiempo para obtener un caudal de salida uniforme en ambos humedales. Figura 29.



Figura 29: Toma de Muestras en Humedales

e. Métodos de ensayo y número de muestras

En el Cuadro 24 se muestran los métodos de ensayo aplicados, volumen de muestra tomada y número de muestras colectadas.

Cuadro 24: Parámetros evaluados para la caracterización del agua residual

Parámetros	Unidad	Método de Medición/Ensayo	Volumen de Muestra	Tipo de Envase	Preservante	Número de Muestras		
						C: Pretamien to	C1: Paragüit as	V1: Veti ve r
Ph	Ph	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+B, 22nd Ed.(Campo)	500ml	P	Medido insitu	8	8	8
Temperatura	C°	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510B, 22nd Ed.(Campo)	500ml	P	Medido insitu	8	8	8
Conductividad	Us/cm	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510B, 22nd Ed.(Campo)	500ml	P	Medido insitu	8	8	8
Oxígeno Disuelto	mg/l	Electrometric Method 4500-OG.	500ml	P	Medido insitu	8	8	8
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	Respirometric Method 10099 BODTRAK™II APPARATUS	1000ml	V	Refrigerar ≤ 6°C	8	8	8
Demanda química de Oxígeno	mg/l	Usepa Reactor Digestion Dicromate Method	1000ml	V	Refrigerar ≤ 6°C	8	8	8
Sólidos suspendidos totales	mg/l	Sólidos suspendidos totales secados a 103-105 C° APHA, AWWA, PWPCF 17th ed. 1p992 2540 D pág.2-83	1000ml	P	Refrigerar ≤ 6°C	8	8	8
Turbidez	NTU	APHA, AWWA, WPCF 17th Ed. 1992 2130 B. pág. 2-83	1000ml	P	Refrigerar ≤ 6°C	8	8	8
Nitrógeno Total	mg/l	Nitrogen, Total, Persulfate Digestion TNT METHOD (25.0 MG/L)	500ml	P	Refrigerar ≤ 6°C	8	8	8
Nitrógeno amoniacal	mg/l	Nitrogen-Amonia,Salicylate Tnt Method (50.0 MG/L)	500ml	P	Refrigerar ≤ 6°C	8	8	8
Fósforo Total	mg/l	Phophorus, Total, Phosver 3 Tnt Method (3.50 MG/L)	500ml	P	Refrigerar < 8°C	8	8	8
Coliformes Fecales	UFC/10 0ml	SMEWW 21 st Ed. 2005, Part 9221, APHA-AWWA-WEF	200ml	V	Refrigerar < 8°C	8	8	8

P: Recipiente de plástico; V: Recipiente de vidrio

4.3.2.4 Determinación de la eficiencia de remoción

La determinación de la eficiencia del humedal artificial vertical consistió en calcular el porcentaje de remoción de contaminantes de acuerdo con los resultados en laboratorio a la entrada y salida del humedal.

La eficiencia de remoción de contaminantes se expresó en porcentaje, usando la siguiente fórmula:

$$C = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100$$

Dónde:

E : eficiencia de remoción de contaminantes (porcentaje)

C_i: Concentración inicial

C_f: Concentración final

4.3.3 MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

El mantenimiento del sistema consistió en: 1) Retiro de maleza cada 15 días durante tres meses hasta que las plantas crecieron y fueron más competentes, 2) Limpieza de la bomba que abastece los humedales, se hizo una sola vez durante toda la evaluación, 3) Corte de las plantas sembradas, se hizo un corte a 30 cm de altura a ambas especies.

4.3.3.1 Determinación de la biomasa de plantas

La evaluación de la biomasa consistió en calcular el potencial de producción de materia seca y determinar la cantidad de humedad en cada especie.

a. Acondicionamiento de las muestras

Pesado de la muestra húmeda: Se hizo el corte de las plantas de cada especie, luego fue pesado de la cual se obtuvo el peso de la materia fresca o húmeda.

b. Obtención de la muestra representativa

Se separó una muestra de cada especie, se incluyó parte del tallo, hojas y flores, luego se picó y distribuyó de una manera homogénea.

c. Análisis proximal

El contenido de humedad se determina con los protocolos dados en la norma ASTM D-871-82 para maderas y ASTM D 1348-94 para celulosa, ASTM D 1762-84 para biocarbón, y E-949-84 para el contenido total de humedad.

Para este caso se emplearon los lineamientos paralelos a los de la Norma ASTM D1762-84(07) (Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal). Se evaluaron las siguientes propiedades:

d. Procedimiento de cálculo

Considerado el contenido de humedad como la cantidad de masa de agua perdida, asumiendo que este es el único material volátil presente en el carbón a los 105°C y es expresado como el porcentaje de agua con respecto a la muestra húmeda mediante la ecuación dada por: ASTM, 2007.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(W_h - W_s)}{W_h} \times 100$$

Dónde:

W_h = Peso Húmedo

W_s = Peso seco

- Determinación del rendimiento de biomasa mediante las ecuaciones dadas por McLaughlin, 2010.

$$\text{Rendimiento de Biomasa en peso húmedo} = \frac{(Wh)}{As} \left(\frac{g}{m^2} \right) o Tn/ha.año$$

$$\text{Rendimiento de Biomasa en peso seco} = \frac{(Ws)}{As} \left(\frac{g}{m^2} \right) o Tn/ha.año$$

Dónde:

W_h = Peso Húmedo

W_s = Peso seco

A_s = Área superficial

4.3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se utilizó el análisis de varianzas (ANOVA) para la comparación de las propiedades y características de las muestras de aguas residuales en niveles de pretratamiento y tratamiento en base a ocho muestras recolectadas en dos periodos. Posteriormente se realizó la prueba de Tukey para comparar los tratamientos de cada humedal vertical. Así también, se realizaron análisis gráficos para comparar el comportamiento de los parámetros. Esto facilitó el análisis de significancia para evaluar si existe diferencia estadística. Los cálculos se realizaron en el programa estadístico R.3.0.2. Ver Anexo 6.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la fase experimental se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se relacionan de forma directa con los objetivos planteados para la presente investigación.

5.1 RELACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LA PLANTA Y LA TEMPERATURA

En la Figura 30 se observan los valores promedio del crecimiento de las plantas y su relación con la temperatura.

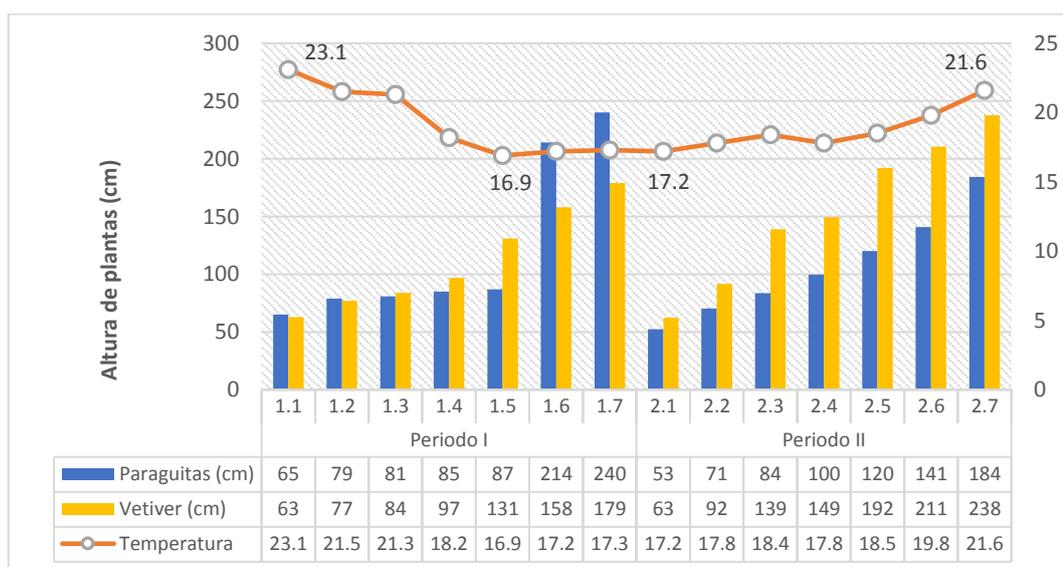


Figura 30: Relación del crecimiento de las plantas y la temperatura

El desarrollo de las plantas fue evaluado en dos periodos, uno 30 días después de la siembra y el otro después del corte de mantenimiento. En la Figura 30 se observa que en el primer periodo la temperatura promedio tuvo un comportamiento descendente, con un máximo de 23.1 C° y un mínimo de 16.9 °C, mientras que en el segundo se registró un mínimo de 17.2 y un máximo de 21.6 C°, comportamiento ascendente.

Comparando las alturas de las plantas, el Paragüitas llegó hasta un máximo de 2.40m en el primer periodo de evaluación, mientras que el Vetiver alcanzó 2.38 en el segundo periodo de evaluación.

Se observa también que tasa de crecimiento en el primer periodo fue de 1.47 y 2.11 cm/semana, para el humedal con Paragüitas y Vetiver, respectivamente. Este comportamiento de las plantas se relaciona con las temperaturas mostradas en la Figura 30, ya que se puede apreciar una relación directa entre temperatura y crecimiento, resultando que el Paragüitas presentó mejor desarrollo que el Vetiver en este periodo.

Sin embargo, analizando el resultado en la segunda mitad de evaluación, donde se hizo el corte de mantenimiento (Anexo 7.18), la temperatura tuvo una variación ascendente y el crecimiento de las plantas se acelera, más, desarrollándose mejor el Vetiver, con un promedio de 3.83 cm/día frente a 3.78 cm/día del Paragüitas. Este incremento en la tasa de crecimiento, es debido a que el Vetiver tuvo una recuperación rápida después del corte, porque las ramas cortadas siguieron creciendo y mostrando nuevos brotes, en comparación del Paragüitas, donde solo se observaron nuevos brotes más no el crecimiento de las ramas cortadas. Ver Anexo 7.19

5.2 EVALUACIÓN DE BIOMASA DEL PARAGÜITAS Y VETIVER

En la Figura 31 se observan el valor promedio de pesos húmedos, secos, rendimientos en peso húmedo, seco y los porcentajes de humedad para cada planta.

En la Figura 31 se observa que el Paragüitas presenta un peso húmedo superior al Vetiver, por lo tanto también supera en el rendimiento de biomasa (peso húmedo). Sin embargo analizando los pesos secos, llegan a tener una producción de biomasa en peso seco similar con una diferencia no significativa para ambas plantas.

Rodríguez y Brisson (2002), en una investigación usando *Phragmites australis* y *Phragmites arundinacea*, en humedales artificiales encontraron biomasa similar con 2,2 kg/m², en contraste con el autor citado, en este estudio se obtuvo 1.57 kg/m² para Paragüitas y Vetiver.

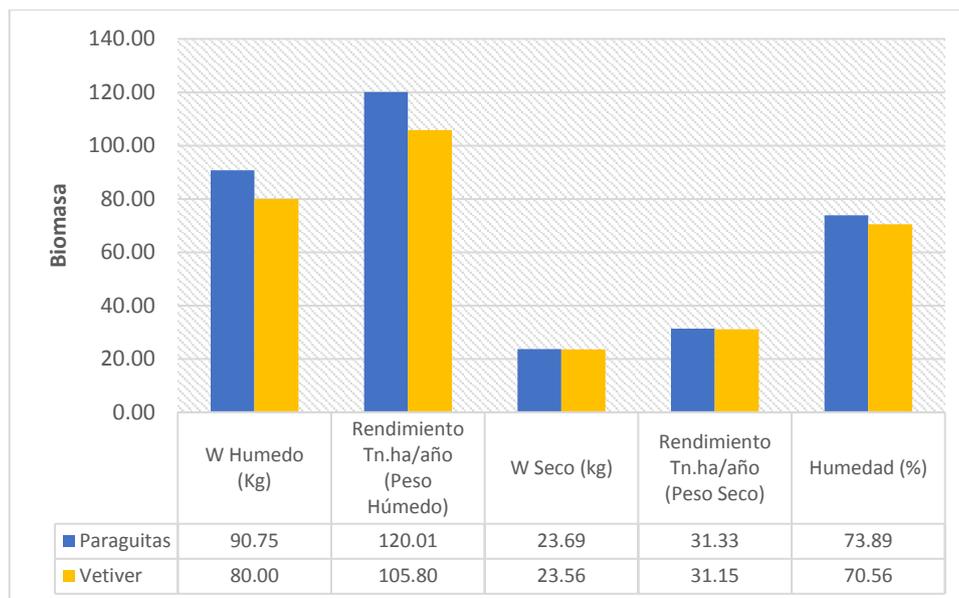


Figura 31. Análisis del desarrollo biomásico del Paraguitas y Vetiver

Mburu et al. (2014), menciona en sus resultados que el *Cyperus papyrus* tiene una productividad neta de biomasa seca de hasta 6000 g/m²-año en áreas semiáridas tropicales (27°C) y templadas (23°C). Mientras que en el presente estudio el Paraguitas (*Cyperus alternifolius*) alcanzó una productividad de 3132.98 g/m²-año reportándose así la mitad de biomasa en contraste con el investigador citado.

Truong *et al.* (2003) ha demostrado que el Vetiver tiene un potencial de producir hasta 132 t/ha/año de materia seca en humedales artificiales combinados (Campos de infiltración y sistema hidropónico en balsas), biomasa muy por encima de cualquier gramínea. Sin embargo la producción de biomasa resultante en este estudio fue de 31.15 t/ha/año, esta poca producción obtenida se debe a la baja densidad de siembra que se tuvo para no saturar el humedal.

5.3 DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES DEL SISTEMA

5.3.1 DETERMINACIÓN DE CAUDAL DE ENTRADA

En el Cuadro 25 se muestra el caudal instantáneo expresado en l/s y en m³/15min de acuerdo al tiempo de bombeo. (Ver detalle en Anexo 3.1)

Cuadro 25: Resultados de medición de caudal de entrada

Ítem	Paragüitas		Vetiver	
	Caudal instantáneo (l/s)	Caudal (m ³ /15 min)	Caudal instantáneo (l/s)	Caudal (m ³ /15 min)
1	0.89	0.801	1.01	0.909
2	0.83	0.747	0.98	0.882
3	0.83	0.747	1.08	0.972
4	0.75	0.675	1.02	0.918
5	0.94	0.846	1.07	0.963
6	0.82	0.738	1.21	1.089
7	0.91	0.819	1.12	1.008
8	0.83	0.747	1.1	0.99
Caudal instantáneo promedio (l/s)	0.91		1.07	
Caudal promedio (m ³ /15 min)		0.819		0.963
Caudal promedio (m³/día)		0.819 x 3 bombeos = 2.457		0.963 x 3 bombeos = 2.889

Los resultados muestran que el caudal promedio instantáneo para los humedales sembrados con Paragüitas y Vetiver fue de 0.91 l/s y 1.07 l/s, convirtiendo estos valores se obtuvo 2.457 m³/día y 2.889 m³/día, respectivamente. Estos valores están próximos al caudal de diseño de 3 m³/día para cada celda.

5.3.2 DETERMINACIÓN DE CAUDAL DE SALIDA

El Cuadro 26 muestra los resultados obtenidos en la medición del caudal de salida. Ver detalle en el Anexo 3.2.

Cuadro 26: Resultados de medición de caudal de salida de los humedales

Ítem	Paragüitas		Vetiver	
	Caudal (l/s)	Caudal (m ³ /45 min)	Caudal (l/s)	Caudal (m ³ /50 min)
1	0.432	1.1664	0.313	0.939
2	0.21	0.567	0.232	0.696
3	0.21	0.567	0.308	0.924
4	0.426	1.1502	0.298	0.894

5	0.269	0.7263	0.303	0.909
6	0.243	0.6561	0.312	0.936
Caudal Promedio (l/s)	0.298		0.294	
Caudal promedio (m ³ /45min)		0.8055		
Caudal promedio (m ³ /50min)				0.883
Caudal promedio (m ³ /día)		0.8055 x 3= 2.416		0.883 x 3= 2.649

Los resultados muestran que el caudal promedio de salida para los humedales sembrados con Paragüitas y Vetiver fue de 2.416 m³/día y 2.649 m³/día, respectivamente. Estos caudales difieren en lo mínimo de los caudales de ingreso, esto es debido a factores que se puedan dar en el sistema de humedales por ejemplo la evapotranspiración, temperatura y humedad en el ambiente.

También se observa según los resultados obtenidos, los tiempos de recuperación de los caudales que salen de los humedales son mayores, esto se justifica por la disminución de la velocidad de filtrado a causa de las raíces de las plantas y la resistencia dada por el sustrato.

5.4 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL HUMEDAL

5.4.1 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN

En el Cuadro 27 se muestran los tiempos medidos después de la aplicación del trazador.

Cuadro 27: Tiempos de retención en humedales

Tiempos de retención en humedales (minutos)	
Humedal con <i>Cyperus alternifolius</i>	50
Humedal con <i>Chrysopogon zizanioides</i>	90

Se observa en el Cuadro 27 que existe una diferencia en los tiempos de retención de ambos humedales, esto es debido a la mayor densidad de raíces que presenta el Vetiver con respecto al Paragüitas.

5.4.2 DETERMINACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA

En el Cuadro 28 se presenta el resultado de la carga hidráulica superficial para un área de humedal de 15 m².

Cuadro 28: Carga hidráulica

Especie	Carga hidráulica (Qh) $\left(\frac{mm}{dia}\right)$
Paragüitas	163.8
Vetiver	192.6

La carga hidráulica superficial, en humedales con Paragüitas y Vetiver, obtenidas bajo las condiciones de operación fue de 163.8 mm/día y 192.6 mm/día. Estos valores son similares a los medidos por Hoffman, 2011, ya que según investigaciones hechas en climas cálidos la carga hidráulica puede llegar hasta un valor de 200 mm/día.

La diferencia de los resultados en esta investigación con los medidos por el autor citado, es debido a que esta investigación se llegó a bombear menos que el caudal de diseño de 3 m³/día por algunos percances en la puesta en operación de la bomba.

5.4.3 DETERMINACIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA (C)

En el Cuadro 29 se presenta el resultado de la carga orgánica

Cuadro 29: Carga orgánica

Especie	Carga Orgánica (C) $\left(\frac{g}{m^2.dia}\right)$
Paragüitas	14.79
Vetiver	17.00

Estos valores son menores a los recomendados por Hoffman, 2011, en experiencias con HFV diseñados en climas cálidos donde se aplicaron cargas entre 30 – 35 gDBO₅/m².día.

Según el Cuadro 30 es posible incrementar en 25 % y 10% el caudal de ingreso obteniendo valores de carga orgánica de 18.49 y 18.70 gDBO₅/m².día, sin afectar la carga hidráulica

resultando valores de 204.75 mm/día y 211 mm/día, en humedales sembrados con Paragüitas y Vetiver respectivamente, tales valores son cercanos a lo obtenido por Hoffman, 2011.

No obstante, si se toma como punto crítico la carga orgánica, es posible duplicar el caudal para obtener un máximo de 29.5 y 34 gDBO₅/m².dia, pero con ello se afectaría la carga hidráulica y quedaría fuera de lo recomendado por Hoffman, 2011.

Cuadro 30: Simulación de carga hidráulica y orgánica

Incremento de caudal	Carga hidráulica ($\frac{mm}{dia}$)		Carga Orgánica ($\frac{g}{m^2.dia}$)	
	Paragüitas	Vetiver	Paragüitas	Vetiver
0	163.8	192.6	14.79	17.00
10	180.18	211.86	16.27	18.71
15	188.37	221.49	17.01	19.56
20	196.56	231.12	17.75	20.41
25	204.75	240.75	18.49	21.26
30	212.94	250.38	19.23	22.11
35	221.13	260.01	19.97	22.96
40	229.32	269.64	20.71	23.81
50	245.7	288.9	22.19	25.51
60	262.08	308.16	23.67	27.21
70	278.46	327.42	25.15	28.91
80	294.84	346.68	26.63	30.61
90	311.22	365.94	28.11	32.31
100	327.6	385.2	29.59	34.01

5.4.4 DETERMINACIÓN DEL ÁREA REQUERIDA POR HABITANTE EQUIVALENTE

El área requerida por habitante equivalente es calculada en base a un aporte per-cápita de 50 $\frac{g}{m^2.dia}$.

Cuadro 31: Área por habitante equivalente

Especie	PE	Área/hab.Eq $\frac{m^2}{hab. Eq}$
Paragüitas	4.48	3.34
Vetiver	5.27	2.84

Hoffman, 2011, señala que en climas cálidos se debe obtener normalmente de 1 a 2 m² /PE y en climas fríos de 3 a 4 m²/PE.

Como se presenta en el Cuadro 31, el área requerida por habitante equivalente, calculada bajo las condiciones de operación fue de 3.34 y 2.84 m²/PE, para humedales sembrados con Paragüitas y Vetiver respectivamente, cuyos valores están por debajo para climas cálidos que son: 1 -2m² /PE y muy cercanos a 3 - 4 m²/PE para climas fríos, ambos citados por Hoffman, 2011.

Los valores bajos se justifican porque la investigación se realizó en los meses de junio y agosto, meses con temperaturas promedio de 19 y 17 °C respectivamente, dichas temperaturas no fueron favorables para la degradación de materia orgánica.

5.5 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

El agua residual cruda fue tomada del buzón cercano a CEMTRAR, buzón del cual se alimenta la cisterna principal de la planta piloto de tratamiento proveniente de una red de desagüe doméstico de las partes altas de la Molina.

5.6 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL PRE-TRATADA

En el Cuadro 32, se observan los valores promedio del agua pretratada en la celda francesa

Cuadro 32: Resumen de caracterización del agua residual pretratada

Parámetros	Unidades	Pre-tratamiento (C)
		Valores Promedios
T	°C	21.98
pH	und.	7.35
CE	us/cm	1742.46
Turbiedad	NTU	150.48
OD	mg/l	0.68
Amonio	mg/l	23.39
Fósforo Total	mg/l	29.52
Nitrógeno Total	mg/l	97.25

DBO ₅	mg/l	91.61
DQO	mg/l	158.13
SST	mg/l	25.53
CFT	UFC/100ml	7.02E+06

El agua residual pre-tratada presenta valores dentro del rango promedio de aguas residuales según lo mencionado por Metcalf and Eddy, 1985 y Rojas et al, 2013, Vera et al 2014 en los Cuadros 1 y 2 respectivamente.

Se observan valores ligeramente superiores en contenidos sólidos disueltos y conductividad eléctrica, debido a que principalmente el agua de la zona proviene de pozo.

La relación DBO₅/DQO fue 0.57 lo que indica que es fácilmente biodegradable, y que se le puede aplicar cualquier tratamiento biológico.

5.7 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

En el Cuadro 33, se muestran las características del agua residual tratada en cada humedal vertical.

Cuadro 33: Resumen de la caracterización del agua residual tratada.

Parámetros	Unidades	Promedios de entrada	Promedio de las mediciones		Promedio del porcentaje de remoción (%)	
		Pre-tratamiento C	Paragüitas C1	Vetiver V1	Paragüitas C1	Vetiver V1
T	°C	21.98	20.19	20.68	-	-
pH	Und.	7.35	6.84	6.84	-	-
CE	us/cm	1742.46	2210.29	1913.75	-	-
NTU	NTU	150.48	0.89	1.49	99.42	99.01
OD	mg/l	0.68	1.83	1.38	-	-
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	23.39	0.42	1.46	98.14	93.67
Fósforo Total	mg/l	29.52	2.75	3.21	91.24	89.47
Nitrógeno Total	mg/l	97.25	50.38	42.00	48.82	56.59
DBO ₅	mg/l	91.61	1.30	3.31	98.52	96.31
DQO	mg/l	158.13	11.13	15.63	92.98	90.14
SST	mg/l	25.53	2.76	3.28	88.01	85.66
CFT	UFC/100ml	7.02E+06	2.89E+04	6.29E+05	99.59	91.04

5.7.1 PARÁMETROS FÍSICOS

a. Temperatura

En la Figura 32 se observan los valores promedio de temperatura registrados por el multiparámetro de campo vs la temperatura ambiental registrada en la estación meteorológica A. Von Humboldt-UNALM. (Ver Anexo 2).

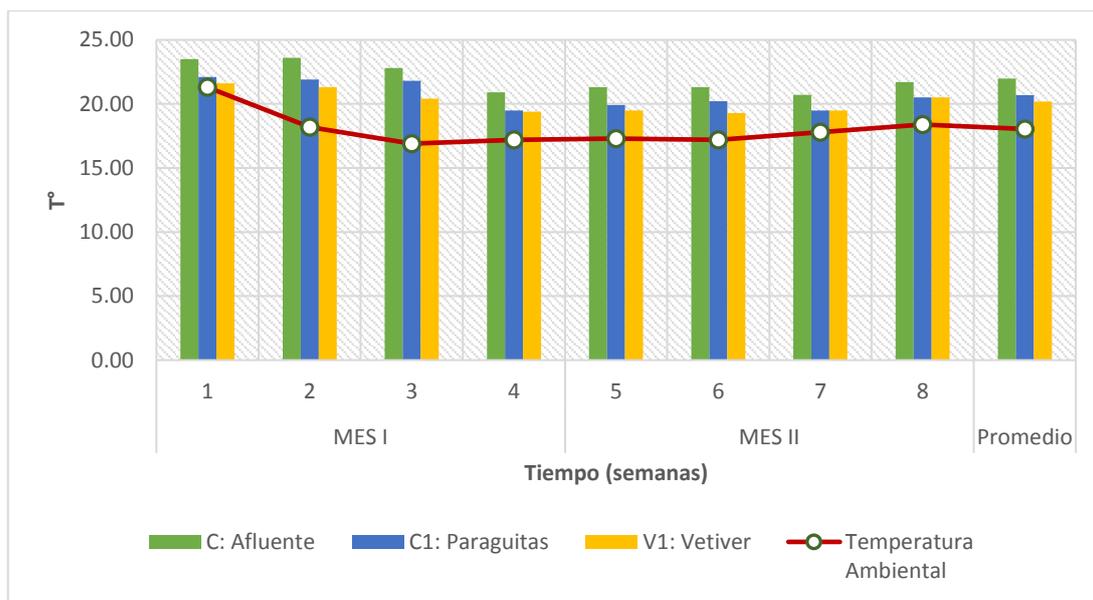


Figura 32. Variación de la temperatura durante el periodo de monitoreo

Con relación a la temperatura ambiental, se observa que la temperatura en los humedales sembrados con Paragüitas y Vetiver respectivamente, decrece en promedio de 2 y 2.5 °C.

Estadísticamente se observa que no hay diferencia significativa en la temperatura entre ambos humedales. (Ver Figura 53-Anexo 6.2)

En términos generales, el rango de temperatura del agua residual, entre 21.9°C y 23.3°C, es aceptable para el desarrollo de la actividad microbiana y resulta tolerable para el crecimiento de las plantas en estudio. Liao et al., (1995), menciona que el Paragüitas aguanta mucho sol y altas temperaturas, pero temperaturas por debajo de 10° C paralizan el crecimiento vegetativo. Van and Truong, (2008), mencionan que el Vetiver se desarrolla óptimamente a una temperatura de 25°C ya que sus raíces en esas condiciones pueden crecer hasta 3cm por día.

b. pH

En la Figura 33 se observan los valores promedio de pH, el afluente tuvo el valor 7.35, observándose que presenta valores ligeramente alcalinos, mientras que al salir de los humedales el valor disminuye con promedios de 6.87 y 6.84 para el Vetiver y Paragüitas respectivamente.

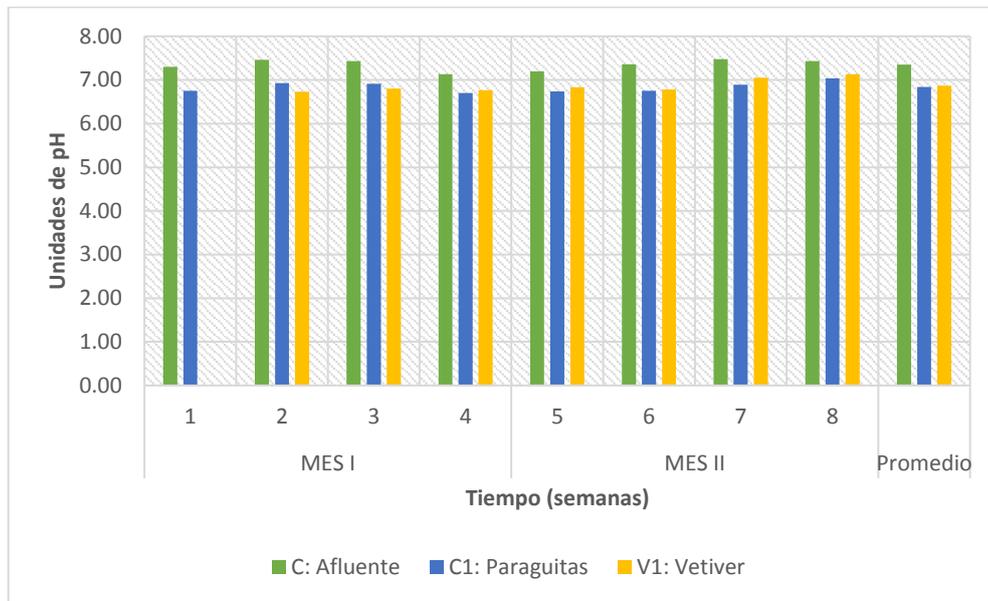


Figura 33: Variación de pH durante el periodo de monitoreo

La disminución de pH se explica por la liberación de dióxido de carbono a consecuencia de la degradación de materia orgánica producida por las bacterias. (Ramalho, 2003).

En términos generales según Pérez, (2012), el rango de pH permitido por el Paragüitas es de 6.5-8.5 para un adecuado desarrollo, mientras que en el Vetiver según Truong, P. y Baker, D., (1995), el Vetiver puede soportar condiciones extremas de acidéz, si se le fertiliza con N y P; puede también llegar a soportar condiciones de alta alcalinidad (pH de 9.6).

Estadísticamente existe diferencia significativa del pH entre el pre-tratamiento y los tratamientos, pero no entre los tratamientos en ambos humedales. (Ver Figura 54 - Anexo 6.2).

c. Conductividad eléctrica

En el Figura 34 se observan los valores promedio de conductividad eléctrica, dichos valores se incrementan a la salida de los humedales con promedios de 2210.9 us/cm y 1913.7 us/cm en el Paragüitas y Vetiver respectivamente, con respecto a la entrada que es de 1742.4 us/cm.

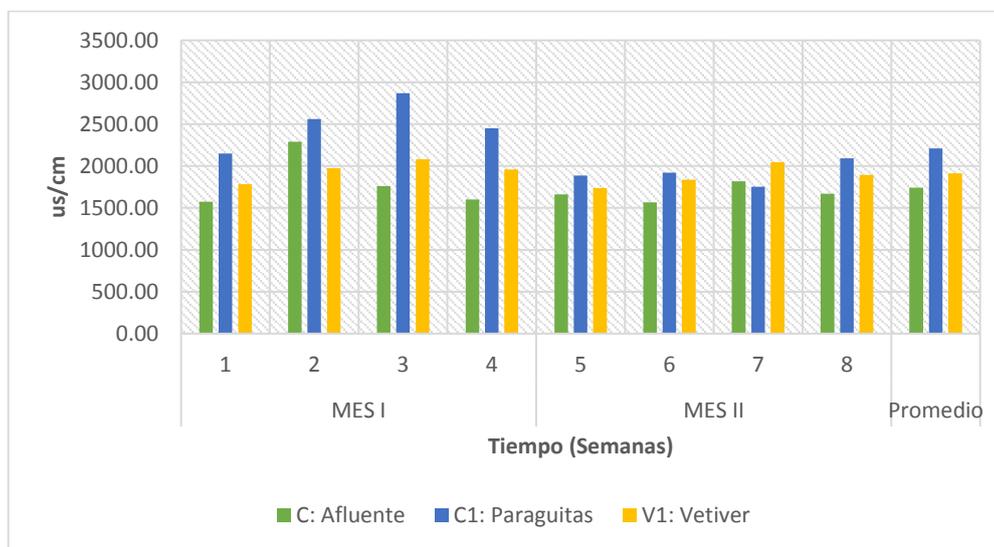


Figura 34: Variación de la conductividad eléctrica durante el periodo de monitoreo

Uno de los factores que influyó en el incremento de la conductividad es la exudación de las raíces de las plantas, porque que estas liberan sales y minerales al interactuar con el sustrato y demás componentes del humedal, este fenómeno es asociado al color, ya que el agua resultante del tratamiento con Paragüitas tiene un color amarillento, mientras que la del Vetiver es transparente. (Ramalho, 2003).

Estadísticamente se observa que hay diferencia significativa de conductividad eléctrica entre el pretratamiento y los tratamientos, pero no existe diferencia significativa entre los tratamientos. (Ver Figura 55-Anexo 6.2)

d. Turbiedad

En la Figura 35 se observan los valores promedios de turbiedad, se observa una eficiente reducción en ambas celdas con porcentajes del orden de 99%.

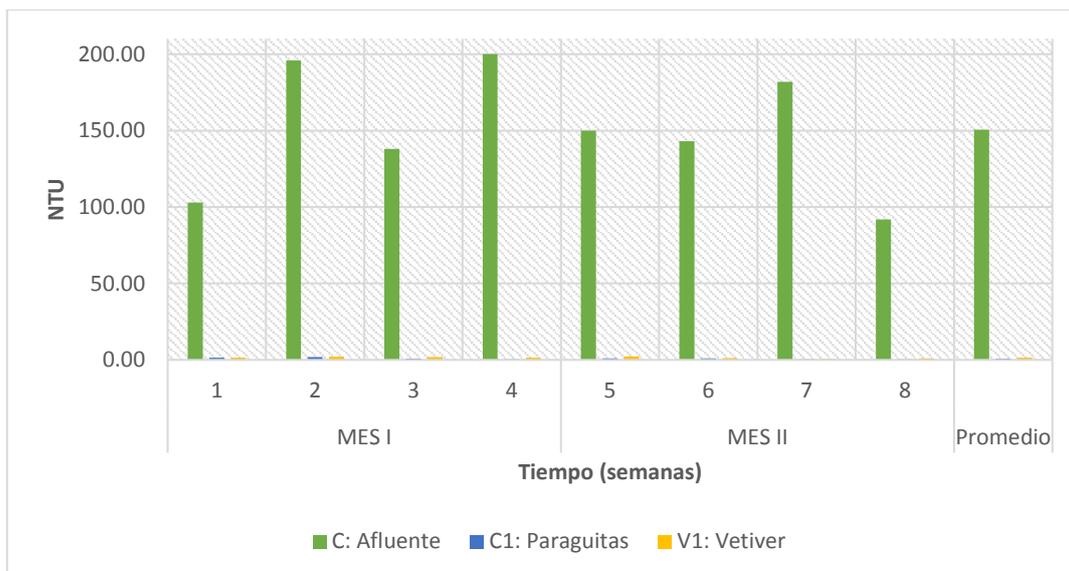


Figura 35: Variación de turbiedad durante el periodo d monitoreo

En la figura 36 se observa el porcentaje de eficiencia para cada humedal, a pesar que hay un mayor porcentaje de remoción en la celda con Paraguaitas, estadísticamente no existen diferencias significativas entre ambos humedales. (Ver Figura 56-Anexo 6.2).

En la Figura 36 se observan los porcentajes de remoción de turbiedad por ambos Humedales.

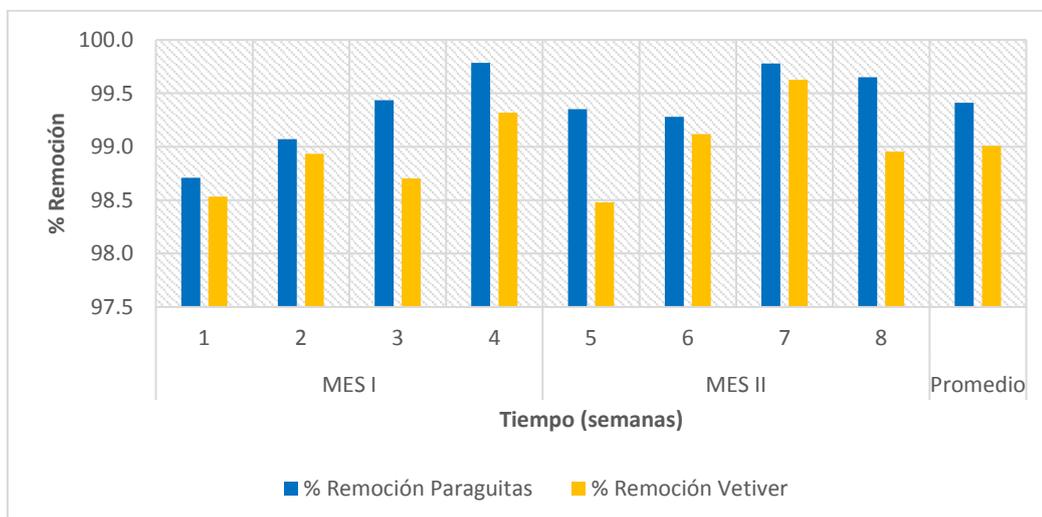


Figura 36: Eficiencia de remoción de la Turbiedad

En términos generales la remoción de la turbiedad es buena, verificándolo con la claridad del agua tratada en ambos humedales. Ver galería fotográfica: Anexo 7.8

5.7.2 PARÁMETROS QUÍMICOS

a. Oxígeno disuelto

En la Figura 37 se observan los valores promedio del parámetro oxígeno disuelto, el afluente ingresa con un valor de 0.68 mg/l y se observa un incremento de los niveles de oxígeno en ambos humedales con promedios de 1.99 mg/l y 1.38 mg/l para Paragüitas y Vetiver respectivamente.

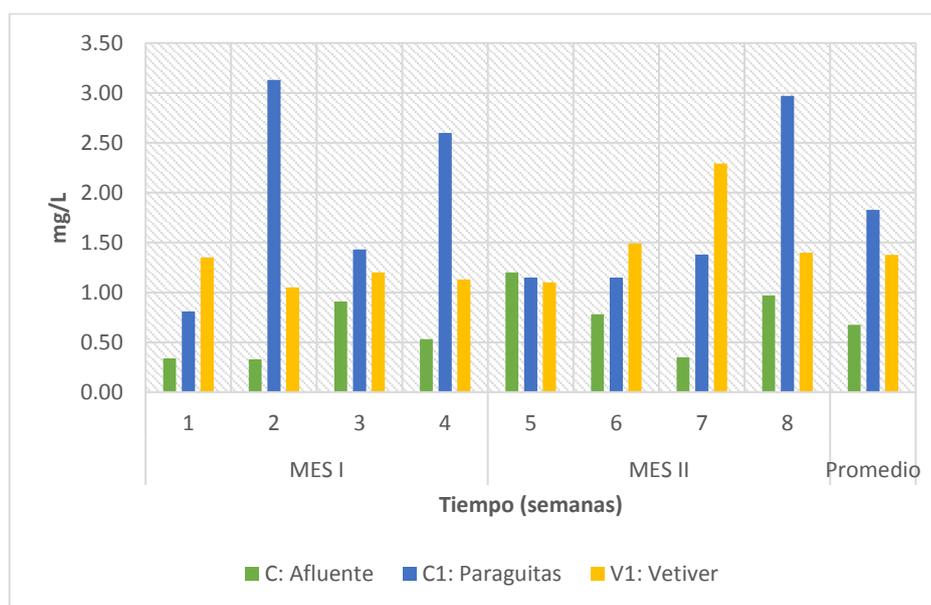


Figura 37: Variación de oxígeno disuelto durante el periodo de monitoreo

El incremento de oxígeno disuelto, es debido al tipo de operación de los humedales por pulsos, con bombeos intermitentes cada 8 horas, lo que permite la oxigenación del lecho.

Estos valores son contrastados por: Pérez (2012), que hizo un ensayo con la planta *Cyperus alternifolius* para tratar aguas residuales, en ella utilizó un afluente con 1.07 mg/l y después de realizado el tratamiento resultó un efluente con 5.45 mg/l. Miglio et al. (2003), que compara la capacidad depuradora de dos plantas (*carrizo* y *cyperus*) comparadas con un sistema en blanco (sin plantas), en el caso del *Cyperus* se obtiene un aumento de 0.45 mg/l a 5.5 mg/l, en el afluente y efluente respectivamente. Ash (2003), que menciona que en un estudio realizado en un sistema híbrido con el Vetiver (sistema hidropónico y estacional), se obtienen buenos niveles de oxígeno disuelto alcanzando valores de 7.6 -9.2 mg/l. Estos

estudios con la presente investigación, coinciden en que tanto el *Cyperus alternifolius* y el Vetiver favorecen el aumento del nivel de oxígeno disuelto en el sistema.

Durante el periodo de poda (MES II) se observó que el valor bajó a 1.15 mg/l, siendo similar a la del agua residual pre-tratada (1.20mg/l), esta anomalía se explica por el transporte de oxígeno que se hace mediante las hojas hacia las raíces y por consiguiente al afluyente.

Según como se observa en la Figura 38 los valores de oxígeno en el humedal que contiene al Paragüitas son mayores, con un promedio global de 1.83 mg/l, frente al de Vetiver que alcanzó 1.38mg/l. Esto se explica por el mayor ancho de las hojas del Paragüitas y mayor área expuesta al sol, por ello al momento de la fotosíntesis la producción de oxígeno es mayor, así mismo la menor densidad de raíces del Paragüitas

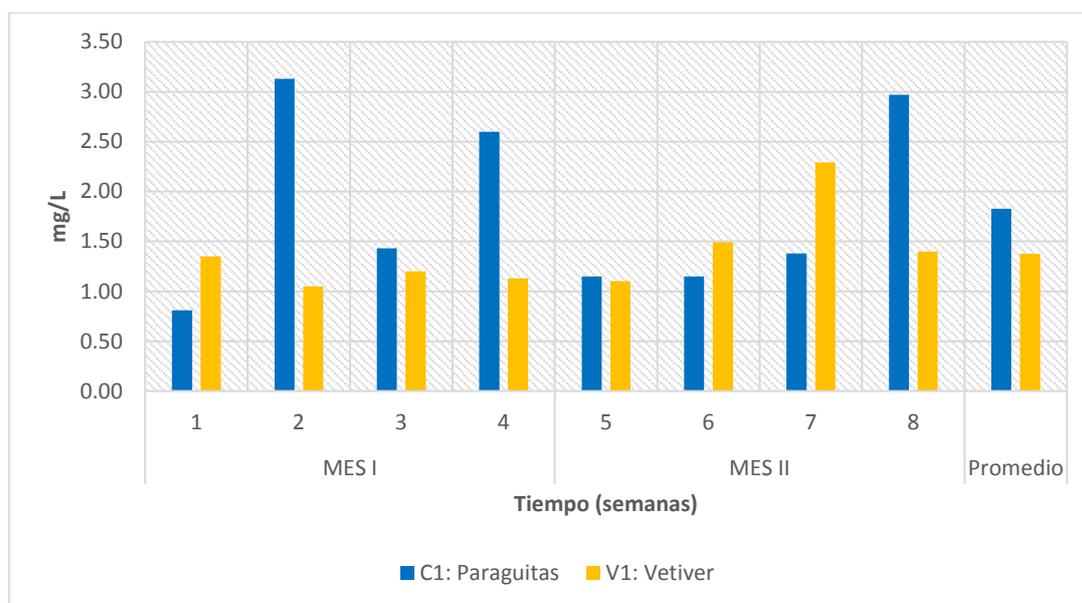


Figura 38: Comparación de niveles de oxígeno disuelto entre humedales

De acuerdo al análisis estadístico no existen diferencias significativas entre ambos humedales. (Ver Figura 57-Anexo 6.2)

b. Nitrógeno amoniacal

En la Figura 39 se observan los valores promedio del parámetro nitrógeno amoniacal. De los valores mostrados, el afluente ingresa con un promedio global de 23.39 mg/l, esto se explica por la edad reciente las aguas residuales con una gran cantidad elevada de nutrientes, las cuales en presencia de oxígeno pasan a oxidarse para luego seguir el ciclo del nitrógeno. El humedal con Paragüitas presentó los niveles más bajos de nitrógeno amoniacal, con un promedio global de 0.42 mg/l, mientras que para el Vetiver fue 1.46 mg/l. El mejor comportamiento del humedal con Paragüitas puede ser explicado por la mayor tasa de transferencia de oxígeno por parte del Paragüitas hacia el sistema y con ello la oxidación del amonio que pasa a nitritos y nitratos, reduciendo la concentración de amonio en el agua.

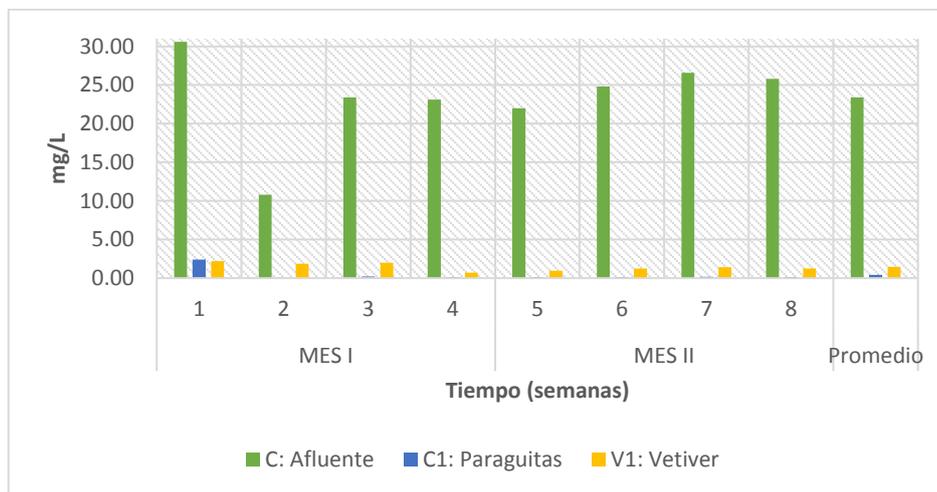


Figura 39: Variación del nitrógeno amoniacal durante el periodo de monitoreo

Por ello es importante la función que cumplen las plantas en los humedales artificiales para formar una descomposición aerobia o anaerobia.

En términos generales si se da un medio anaeróbico en la secuencia de las reacciones suscitadas se libera CO_2 y nitrógeno gas que puede ser volatilizado al medio ambiente, mientras que, en el medio aeróbico, la reacción libera nitrato que dependiendo del potencial de producción de biomasa es extraído por la planta y el nitrato residual es difícilmente eliminado en el caso de los humedales verticales por carecer de medios anóxicos. (Delgadillo et al., 2010).

En la Figura 40, se observa que los porcentajes de remoción, en el humedal con Paragüitas son mayores con un promedio de 98.2%, frente al de Vetiver que obtuvo 93.8%. Esto explica el potencial biomásico y la buena transferencia de oxígeno hacia ambos humedales.

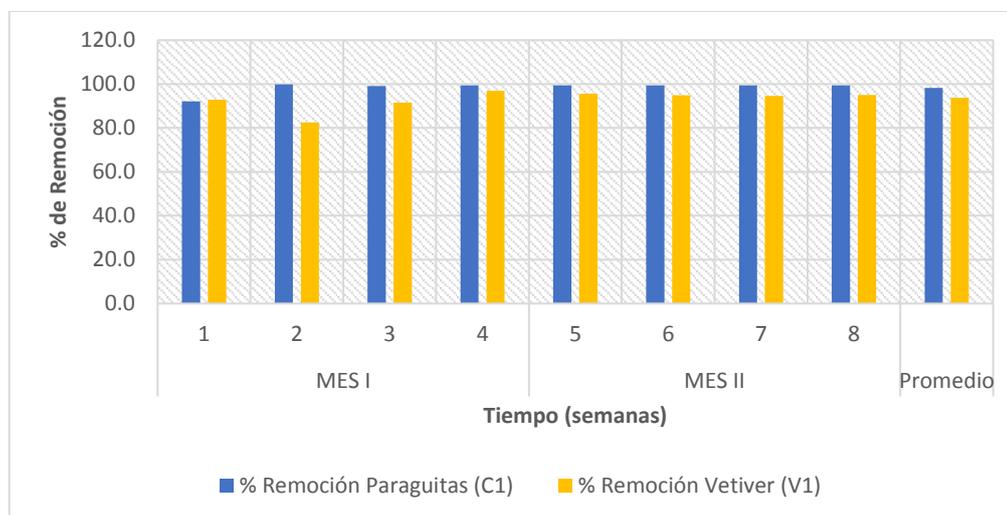


Figura 40: Comparación de eficiencia de remoción de nitrógeno amoniaco entre humedales

Según el análisis estadístico no existe diferencia significativa entre ambos humedales. (Figura 58- Anexo 6.2)

c. Fosforo total

En la Figura 41 se observan los valores promedio del parámetro fósforo total, el afluente ingresa con un valor promedio de 28.64 mg/l y a la salida de cada humedal se obtienen valores promedio de 2.68 mg/l y 3.5 mg/l para Paragüitas y Vetiver respectivamente.

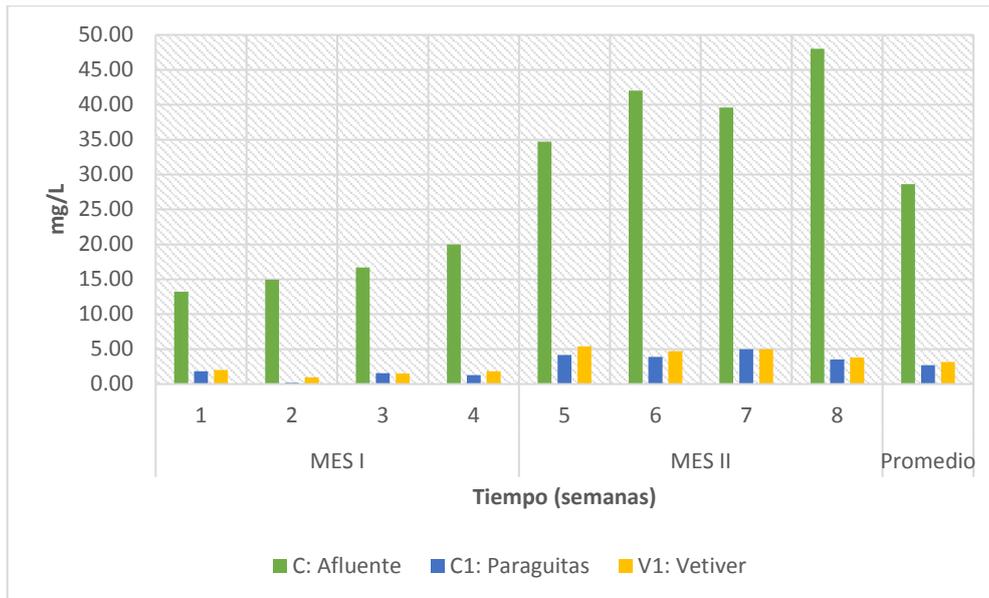


Figura 41: Variación del fósforo total durante el periodo de monitoreo

García y Corzo, (2008), mencionan que en general no se suele eliminar más del 10-20 por ciento de la concentración del fósforo total, Pérez, M, (2012), en sus estudios demuestra que en humedales verticales es posible reducir alrededor de 3.33 mg/l de fósforo total.

En contraste con lo mencionado, en este estudio se removió 25.96 y 25.49 mg/l de fósforo total, con porcentajes de remoción de 91 % y 89%, en el humedal de Paraguitas y Vetiver respectivamente, presentadas en la Figura 42.

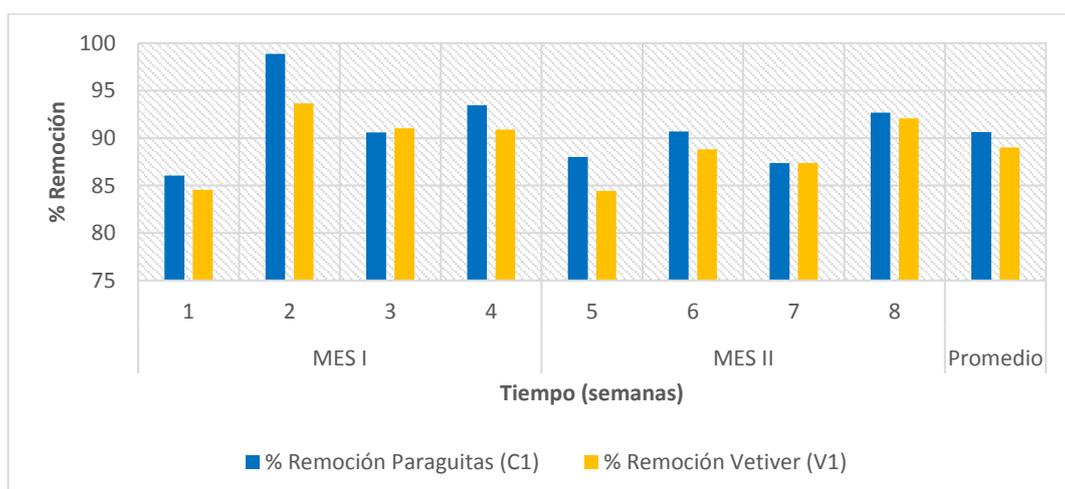


Figura 42: Comparación de eficiencia de remoción de fósforo total entre humedales

Estos valores son contrastados por diferentes investigadores como: Pérez, M. (2012), que obtuvo 76 % de remoción de fósforo total en un humedal vertical con Paragüitas, empleando como sustrato suelo ferralítico rojo; Mellisho (1999), obtuvo 94% de remoción de fósforo total en humedales horizontales usando también el Paragüitas, mientras las remociones con Vetiver según Anon (1997), en una investigación hecha sobre agua de río en China demostró que el Vetiver logró una remoción de 98% en 4 semanas; Ash (2003), demuestra en Australia que empleando un humedal hidropónico en serie con uno estacional se logró una remoción de fosforo total de 84%. Estos valores obtenidos por diferentes investigadores confirman que el tratamiento que se hizo está dentro del rango de eficiencia estándar. A pesar del mayor porcentaje de remoción obtenido con el Paragüitas, estadísticamente no existen diferencias significativas con el Vetiver. (Ver Figura 59 - Anexo 6.2)

d. Nitrógeno total

En la Figura 43 se observan los valores promedio del parámetro Nitrógeno total en el afluente y a la salida de los humedales, el promedio global de ingreso fue 97.25 mg/l, y a la salida de cada celda se presentaron valores promedios de 50.38 mg/l y 56.13 mg/l para Paragüitas y Vetiver respectivamente.

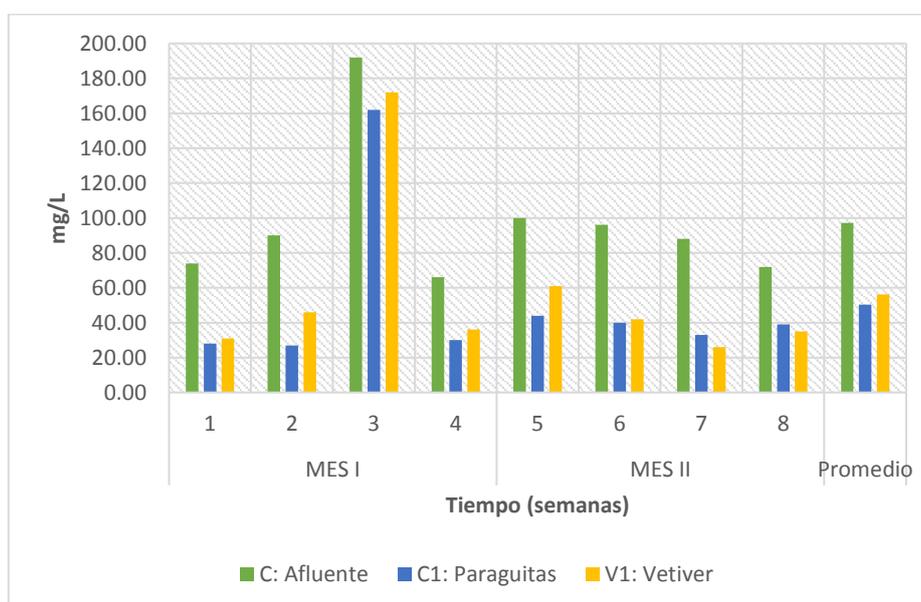


Figura 43: Variación del nitrógeno total durante el periodo de monitoreo

En el Figura 44 se observa que los valores de remoción de nitrógeno total para Paragüitas y Vetiver fueron de 48.2 % y 42.3% respectivamente.

Estos valores son contrastados por diferentes investigadores como: Pérez (2012) que obtuvo 82.7 % de remoción de nitrógeno total en un humedal vertical con Paragüitas, empleando como sustrato suelo *ferralítico rojo* en un tiempo de 12 semanas. Miglio et al (2003), que obtuvo 93.9% de remoción de nitrógeno total usando dos humedales verticales en serie, el primero de flujo descendente y el otro de flujo ascendente, usando también el Paragüitas.

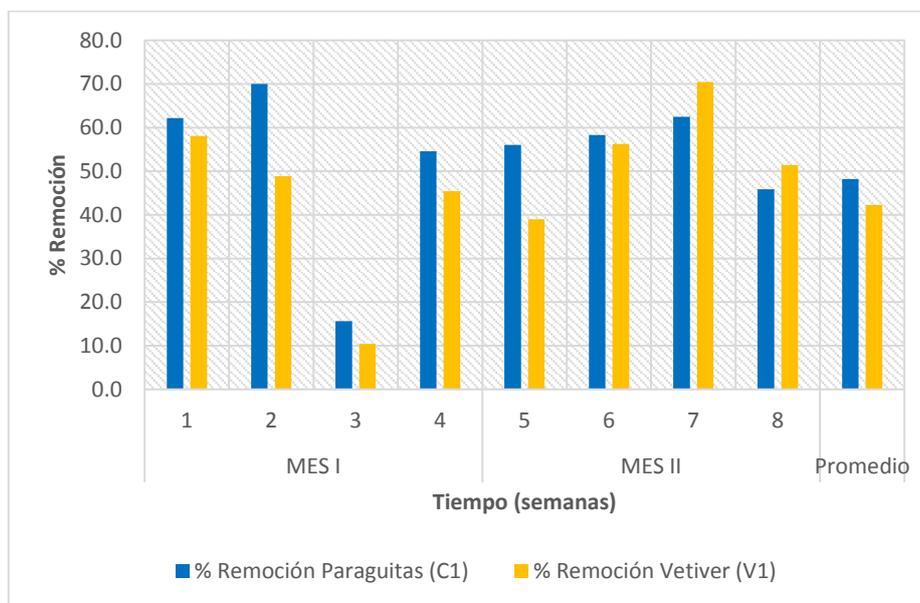


Figura 44: Comparación de eficiencia de remoción de fósforo total entre humedales

Mientras las investigaciones hechas con Vetiver mostraron lo siguiente: En una investigación en Mombas, Kenya se hizo el tratamiento de aguas residuales procedentes de una granja de flores, obteniendo 57.07% en remoción de nitrógeno total (Lishenga, 2015). Ash (2003), demuestra en Australia que, empleando un tanque séptico como pretratamiento y un humedal hidropónico en serie con uno estacional se logró una remoción de nitrógeno total de 91%. De lo reportado por los diferentes investigadores, con respecto al porcentaje de remoción del nitrógeno total, se entiende que en el presente estudio se obtuvo valores relativamente bajos.

A pesar que el tratamiento con Paragüitas presenta mayor porcentaje de remoción que el Vetiver, el análisis estadístico muestra que no existe diferencia significativa entre ambos humedales. (Ver Figura 60 - Anexo 6.2).

e. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

En la Figura 45 se observan los valores promedio del parámetro demanda bioquímica de oxígeno en el afluente y a la salida de los humedales, el promedio global de ingreso fue de 91.61 mg/l y a la salida de cada celda se presentaron valores promedios de 1.30 y 3.31 mg/l para Paragüitas y Vetiver, respectivamente.

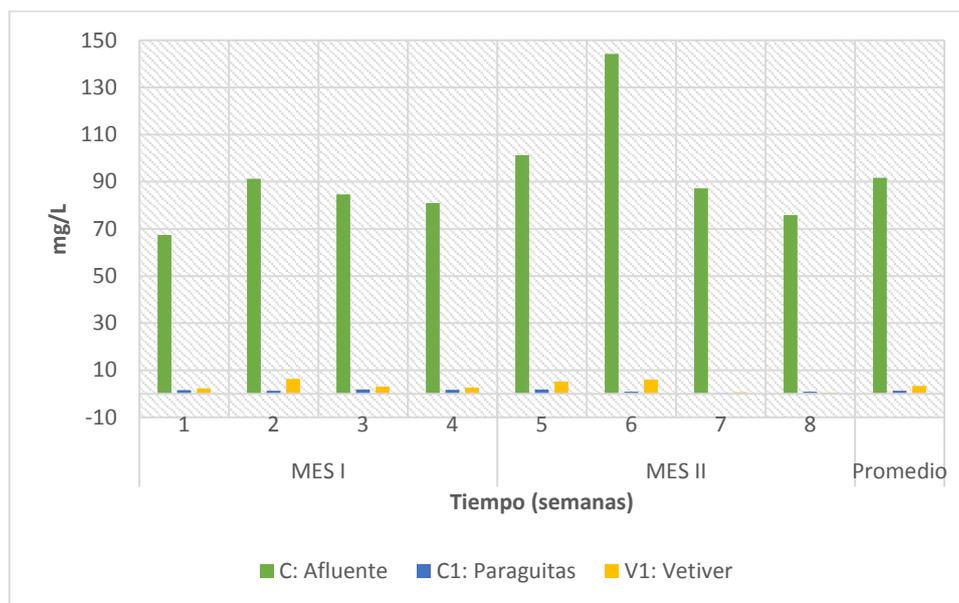


Figura 45: Variación de la Demanda bioquímica durante el periodo de monitoreo

Se observa también que hay un aumento de la remoción que se relaciona con la poda de las plantas a partir de la semana 5, que coincide con la maduración de los humedales y con ello el incremento de la biodegradación por microorganismos.

En Figura 46 se observan los valores de remoción de DBO₅, como se observa los valores de remoción de DBO₅ para humedales con Paragüitas y Vetiver, fueron de 98.6% y 96.4% respectivamente.

Estos valores son contrastados por diferentes investigadores como: Hossein (2013) que obtuvo 73 % de remoción de DBO₅ en un humedal subsuperficial vertical con *Cyperus alternifolius*, luego de 90 muestras tomadas con un tiempo de retención de 4 días. Pérez (2012) que obtuvo 84.9% de remoción de DBO₅ en un humedal subsuperficial con *Cyperus alternifolius* empleando como sustrato suelo *ferralítico rojo* en un tiempo de 12 semanas.

Mellisho, (1999), que obtuvo 88% de remoción de DBO₅ en humedales verticales usando también el *Cyperus alternifolius* con un tiempo de retención de 24hr. Mientras las investigaciones hechas con Vetiver mostraron lo siguiente: Ash (2003), demuestra en Australia que, empleando un tanque séptico como pretratamiento y un humedal hidropónico en serie con uno estacional se logró una remoción de DBO₅ de 95%.

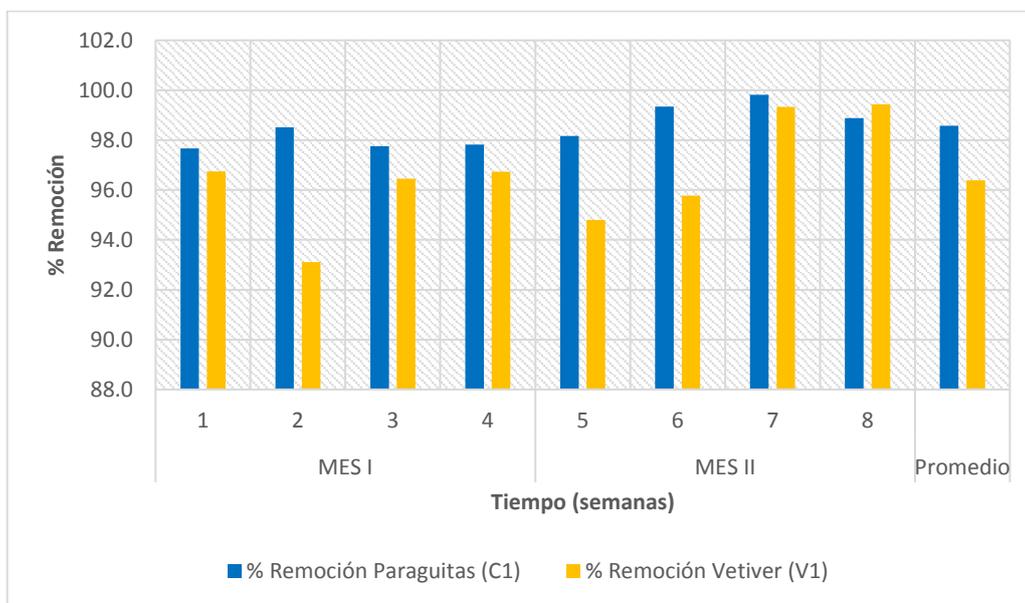


Figura 46: Comparación de eficiencia de remoción de DBO₅ entre humedales

Pero a pesar del mayor porcentaje de remoción obtenido con el Paraguitas, estadísticamente no existen diferencias significativas con el Vetiver. (Ver Figura 61 Anexo 6.2).

f. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En la Figura 47 se observan los valores promedio del parámetro demanda química de oxígeno, el afluente ingresa con un valor promedio de 158.13 mg/l y a la salida de cada humedal se obtienen valores promedios de 11.13 y 15.63 mg/l para Paraguitas y Vetiver, respectivamente.

Una explicación a ello es que durante la recuperación, después de la poda de las plantas, se produce la maduración de los humedales y esto conlleva a la oxidación de elementos químicos gracias al incremento del oxígeno disponible en los humedales por interacción planta-sustrato.

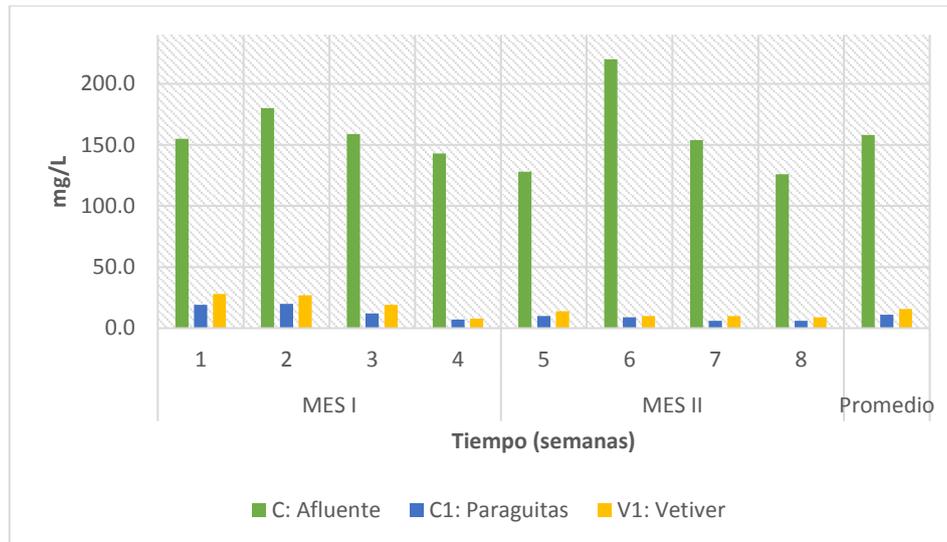


Figura 47: Variación de la Demanda química de oxígeno durante el periodo de monitoreo

En la Figura 48 se observan los valores de remoción de DQO, que fueron de 93.0% y 90.1% respectivamente para humedales con Paragüitas y Vetiver, respectivamente.

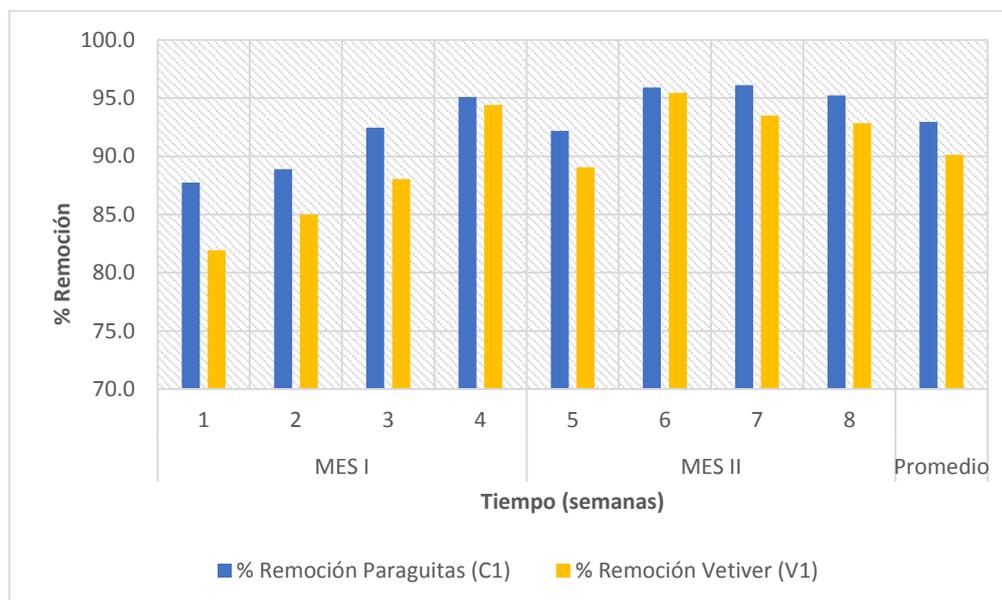


Figura 48: Comparación de eficiencia de remoción de DQO entre humedales

Estos valores son contrastados por diferentes investigadores como: Hossein (2013) que obtuvo 74 % de remoción de DQO en un humedal subsuperficial vertical con *Cyperus alternifolius*, luego de 90 muestras tomadas con un tiempo de retención de 4 días. Pérez (2012) que obtuvo 89.8% de remoción de DQO en un humedal subsuperficial con *Cyperus alternifolius* empleando como sustrato suelo *ferralítico rojo* en un tiempo de 12 semanas.

Miglio et al, (2003), que obtuvo 94.81% de remoción de DQO en humedales verticales, el primero de flujo descendente y el segundo ascendente, usando también el *Cyperus alternifolius*. Mientras las investigaciones hechas con Vetiver mostraron lo siguiente: Truong (2008), en la recopilación de información publicada en “El sistema Vetiver para mejorar la calidad de agua” hace mención a un estudio piloto que trata agua residual con carga de aluminio y metales en Tanger, Marruecos, se aplicó 85L descargados 6 veces al día y diez semanas después se logró una remoción de DQO de 98%. En un estudio similar, Liao (2000) indica que para el tratamiento de agua residual de una granja porcina empleando humedales verticales con Paragüitas y Vetiver, se logró remociones de 66% y 64% con un tiempo de retención de 4 días sin presentar diferencias significativas.

Según el análisis estadístico, existe diferencia significativa entre el pre-tratamiento y el tratamiento, pero no existe diferencia significativa entre los tratamientos de los humedales con Paragüitas y Vetiver. (Ver Figura 62 - Anexo 6.2).

g. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

En Figura 49 se observan los valores promedio del parámetro sólidos suspendidos totales, el afluente ingresa con un valor promedio de 25.53 mg/l y a la salida de cada humedal se obtienen valores promedios de 2.76 y 3.28 mg/l para Paragüitas y Vetiver, respectivamente.

Esta baja concentración de sólidos en el efluente, es a causa de la maduración de los humedales por el incremento de la biodegradación y en particular al efecto del sustrato y las raíces que provocan la disminución de velocidad de filtrado incrementando la eficiencia (García y Corzo, 2008).

García y Corzo (2008) indican que el rendimiento de eliminación de la materia en suspensión tanto en sistemas horizontales como en verticales pueden llegar a tener un 90% de eficiencia de remoción produciendo efluentes con concentraciones menores de 20mg/L de forma sistemática.

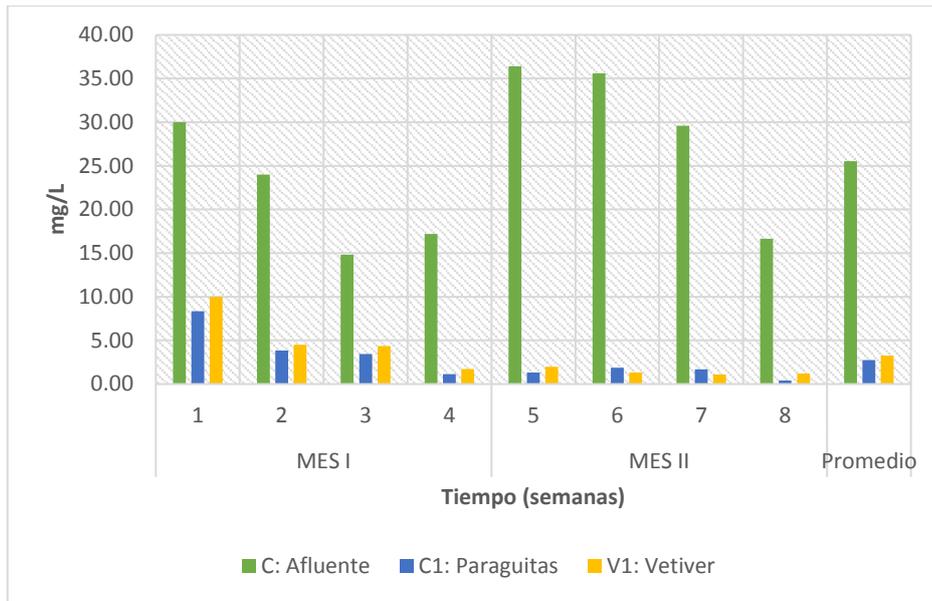


Figura 49: Variación de sólidos suspendidos totales durante el periodo de monitoreo

En el presente estudio se removió 22.7 y 22.25 mg/l en el humedal de Paragüitas y Vetiver, con porcentajes de remoción de 89.1% y 87.17%, presentados en la Figura 50.

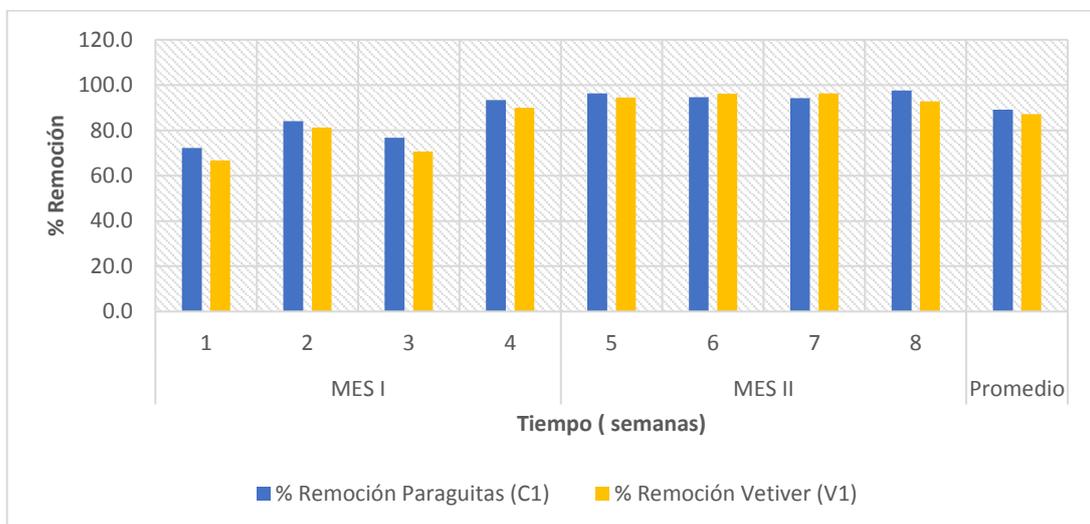


Figura 50: Comparación de eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales entre humedales

Estos valores son contrastados por diferentes investigadores como: Hossein (2013), que obtuvo 84 % de remoción de SST en un humedal subsuperficial vertical con *Cyperus alternifolius*, luego de 90 muestras tomadas con un tiempo de retención de 4 días. Pérez (2012), que obtuvo 98.1% de remoción de SST en un humedal subsuperficial con *Cyperus*

alternifolius empleando como sustrato suelo *ferralítico rojo* en un tiempo de 12 semanas. Mientras las investigaciones hechas con Vetiver mostraron lo siguiente: Ash (2003), demuestra en Australia que, empleando un tanque séptico como pretratamiento y un humedal hidropónico en serie con uno estacional se logró una remoción de SST de 96%. Triana et al. (2013), indicó que en Colombia una planta piloto implementada con Vetiver para tratar grasas, aceites y sólidos suspendidos, obtuvo resultados en el periodo de 32 a 49 días después de la siembra indicando que el Vetiver en la plataforma flotante puede retirar del 29 al 75% de sólidos suspendidos.

Sin embargo, a pesar que el tratamiento con Paragüitas presenta mayor porcentaje de remoción que el Vetiver, estadísticamente no existen diferencias significativas. Siendo ambos tratamientos similares. (Ver Figura 63 - Anexo 6.2).

5.7.3 PARÁMETROS BIOLÓGICOS

a. Coliformes fecales (CFC)

En la Figura 51 se observan los valores promedio del parámetro CFC, el afluente ingresa con un valor promedio de 7 unidades logarítmicas y a la salida de cada humedal se obtienen valores promedios de 4 y 6 unidades logarítmicas para los humedales con Paragüitas y Vetiver, respectivamente.

Guerra (2006), explica que la disminución de coliformes en el efluente es debido a los largos tiempos de retención hidráulica y biofiltración, lo que propicia su sedimentación y muerte natural, a causa de la depredación por invertebrados y otros mecanismos y al ataque por antibióticos excretados por las raíces de las plantas emergentes.

Orozco (2010) reportó también que combinando humedales de flujo horizontal y vertical sembrados ambos con *Cyperus papyrus*, se alcanzaron remociones promedio de 4 y 5 unidades logarítmicas, obteniéndose una capacidad de remoción promedio de 35-40%. En un estudio similar, Lara (1999) indicó que los humedales artificiales que cuentan con un medio de grava fina de río, reducen coliformes fecales de 8×10^4 NMP/100ml a 10/100 ml.

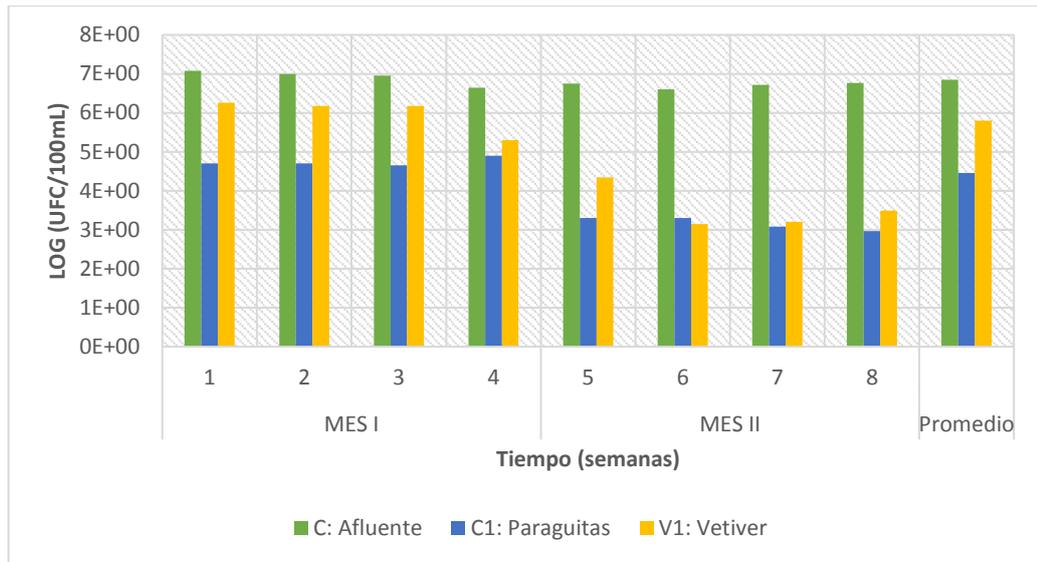


Figura 51: Variación de los coliformes fecales durante el periodo de monitoreo

En el presente estudio se removió 3 y 1 unidad logarítmica en el humedal de Paraguitas y Vetiver, con porcentajes de remoción de 99.5 y 91%, presentados en la Figura 52.

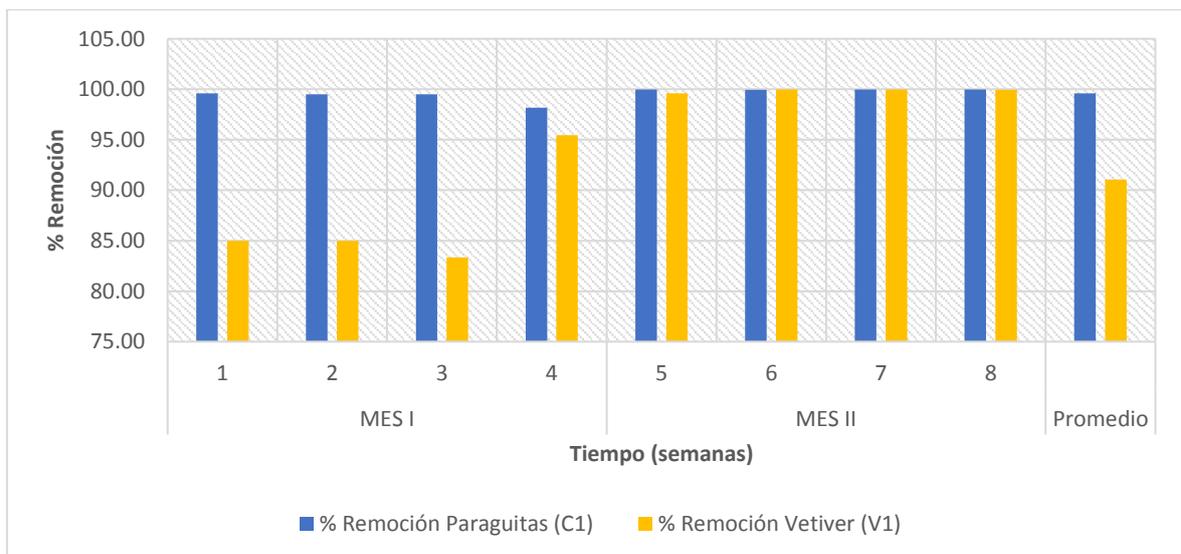


Figura 52: Comparación de la eficiencia de remoción de Coliformes fecales entre humedales.

Estos valores son contrastados por el investigador Hossein (2013) que obtuvo el 38 % de remoción de coliformes fecales en un humedal subsuperficial vertical empleando *Cyperus alternifolius*, con un tiempo de retención de 4 días. Mientras que aún no se han reportado casos de investigaciones hechas con Vetiver para la remoción de coliformes fecales.

El Paragüitas presenta mayor porcentaje de remoción que el Vetiver. Sin embargo, estadísticamente no existen diferencias significativas. Siendo ambos tratamientos similares. (Ver Figura 64- Anexo 6.2).

VI. CONCLUSIONES

- Las especies, Paragüitas y Vetiver, se adaptaron en un periodo de dos meses durante la temporada cálida (enero y febrero), y continuaron su desarrollo (junio-agosto) alcanzando alturas máximas de 2.38 y 2.40m respectivamente, la segunda especie mostró un mejor desarrollo después del corte de mantenimiento, ya que las ramas podadas siguen creciendo, mientras que en el Paragüitas tienden a secarse. Así mismo ambas plantas tienen una producción de biomasa, en peso seco, similar.
- Con respecto al comportamiento de los parámetros de operación de los humedales, estos son condicionados por el caudal de operación real, que fue menor en 11% con respecto al teórico, reduciendo el valor de la carga hidráulica y orgánica; la carga hidráulica superficial mostró valores que están dentro de lo establecido para climas cálidos, mientras que la carga orgánica, para humedales con Paragüitas y Vetiver, representó el 50% de la capacidad permitida para climas cálidos en humedales verticales, siendo posible aumentar el caudal de operación en 10 y 25% respectivamente, para estar cerca al rango de valores recomendados, sin afectar la carga hidráulica; con el incremento mencionado, también es posible acercarse al valor recomendado del parámetro área por persona equivalente (Área/Hab.Eq). El tiempo de retención fue el adecuado, pudiendo mejorar aumentando la densidad de plantas por m².
- El resultado de las mediciones de temperatura y pH son valores aceptables para el desarrollo de microorganismos y tolerables para el crecimiento de ambas plantas. Así mismo ambos humedales demostraron buena eficiencia de remoción de parámetros fisicoquímicos con relación a los reportes citados en la revisión bibliográfica, tales como Turbiedad (99.4-99.0%); Nitrógeno amoniacal (98-93%), Fósforo total (91-89%); Demanda bioquímica de oxígeno (98-96%); Demanda química de oxígeno (92-90%); Sólidos suspendidos totales (88-85%); Coliformes

fecales (99-91%); no obstante en Nitrógeno total fue 48-56%, representando una baja eficiencia, para humedales con *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides* respectivamente.

- Los resultados de la caracterización del agua tratada por ambos humedales verticales demostraron que pueden ser vertidas en cuerpos de agua, con restricción en el parámetro microbiológico, coliformes fecales, vertido por el humedal con Vetiver que no cumple lo dictado por la legislación nacional establecida en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.
- Según los resultados del análisis estadístico no existen diferencias significativas en el tratamiento hecho por ambas plantas, concluyendo una eficiencia una eficiencia similar para las condiciones estudiadas. Sin embargo desde el punto de vista del mantenimiento, el Vetiver ofrece mayores ventajas, ya que luego de la poda la planta permanece en constante crecimiento, mientras que el Paragüitas requiere de nuevos brotes.
- Como conclusión final, los humedales artificiales, empleados como sistemas semi-descentralizados en áreas peri-urbanas facilitan el tratamiento de las aguas residuales, ya que existe mayor uniformidad en ellas, por lo tanto es de fácil tratamiento existiendo mayor potencial de recuperación y reutilización local, mejorando el balance hídrico y la preservación del recurso hídrico. Así mismo los humedales artificiales tienen la bondad de mejorar el paisaje, siendo una alternativa para su empleabilidad en áreas verdes.

VII. RECOMENDACIONES

- Realizar el mantenimiento preventivo al sistema, tanto a la bomba como a las celdas de los humedales, ya que dicho mantenimiento evitará que se dañen partes del sistema y disminuya su eficiencia de tratamiento actual.
- Se recomienda retirar plantas invasoras como también plantas del humedal que mueran o se sequen, ya que si entran en putrefacción aumentará la carga orgánica en el humedal.
- Evaluar los nutrientes presentes en las plantas y el sustrato después de cada poda para poder tener un balance más específico de remoción entre los componentes del sistema.
- Medir otros parámetros como nitritos, detergentes, con la finalidad de evaluar en mayor grado el comportamiento antes y después del agua residual a través del paso por un humedal artificial de flujo vertical.
- Debido a que la planta en operación es a escala piloto, se recomienda continuar con la investigación probando la combinación de ambas plantas en un solo humedal, el Vetiver al inicio, para un incrementar el tiempo de retención y el Paragüitas a continuación para una mejor depuración de nutrientes y componentes microbiológicos.
- Se recomienda investigar la combinación en serie de humedales artificiales verticales, seguidos de horizontales ya que según trabajos de investigación reportados en el extranjero han dado excelentes resultados.
- Compartir las experiencias de la planta a escala piloto ya que representa una opción de tratamiento amigable con el medio ambiente mediante la descentralización de sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales domésticas.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANON, A. (1997). A consideration and preliminary test of using Vetiver for water eutrophication control in Taihu Lake in China. Proc. International Vetiver Workshop, Fuzhou, China.
- ARIAS, O. (2004). Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima y Ambiental. Tesina. Barcelona.
- AROCHAS, A., VOLKER, K. y FONCECA R. (2010). Application of Vetiver grass for mine sites rehabilitation in Chile. Latin American Vetiver Conference, Santiago, Chile, oct. 2010.
- ASH R. and TRUONG P. (2003). The use of Vetiver grass wetlands for sewerage treatment in Australia. The Third International Conference on Vetiver, Guangzhou, China, 6-9 October.
- ASH R., T. P. (2003). The use of Vetiver grass wetlands for sewerage treatment in Australia. . The Third International Conference on Vetiver, Guangzhou, China, 6-9 October.
- ASTM (American Society for Testing and Material, US). 1984. ASTM Standard D1762-84 Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal (Reapproved 2007).
- BRIX, H. (1994). Función de los humedales en el control de la contaminación en zonas rurales. Diseño y uso de humedales artificiales.

- CHEN FY, LI F, and CHENG H. (1991). A study on itroduccion test of Vetiver grass. Bulletin of Soil and Water Conservation, 11(3): 60-64. Pekin.
- CRITES R. (2000). “Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en núcleos urbanos (wetlands). Lima: Sección de postgrado, facultad de Arquitectura, Urbanismo y Arte Universidad Nacional de Ingeniería de Lima.
- DANH L., PHONG L., DUNG L. y TRUONG P. (2006). Wastewater treatment at a seafood processing factory in the Mekong delta, Vietnam. The Fourth International Conference on Vetiver, Caracas, Venezuela.
- DAVOD, H. (2013). Comparing the efficiency of *Cyperus alternifolius* and *Phragmites australis* in municipal wastewater treatment by subsurface constructed wetland Pakistan. Journal of Biological Sciences: PJBS 2013 April 15, 16 (8):, 379-84. Obtenido de <http://docsdrive.com/pdfs/ansinet/pjbs/2013/379-384.pdf>
- DETRINIDAD, R. y CARBALLO, R. (2003). Efecto del tiempo de inmersión en agua en el desarrollo radical y foliar de la gramínea Vetiver. Trabajo de Diploma.1 (1): 4-15. Consultado 10 de oct.2016. Obtenido de <http://repositorio.una.edu.ni/1868/1/tnf02d483.pdf>
- EPA, (1998). Desing Manual, Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatmet.
- ESPIGARES, M. (1985). Aspectos sanitarios de los estudios de las aguas. Granada.
- ESPINOZA, R. (2002). Evaluación del comportamiento de un sistema de pantanos artificiales para el tratamieto de aguas residuales en la granja de porcinos de la U.N.A.L.M. Lima.
- GARCÍA, J., & CORZO, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Cataluña.

- GARCIA, Z. (2012). Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Lima.
- HENGCHAOVANICH, D. (1998). Vetiver grass for slope stabilization and erosion control, with particular reference to engineering applications. Pacific Rim Vetiver Network Technical , Bulletin 2.
- HEREDIA G. (2013). Tratamiento semi-descentralizado de aguas residuales como estrategia para ciudades en rápido crecimiento. Cochabamba, Bolivia.
- HERNANDEZ, A. (1992). Depuración de Aguas Residuales. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- HODGSON, J. (1979). Nomenclature and definitions in grazing studies. Grass Forage Sci, (34):11-18.
- HOFFMANN, H., PLATZER, C., WINKER, M, y VON MUENCH, E. 2011. Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment pp25.
- HUERTO, A Y GARCÍA, A. (2004). Evaluación y análisis ecológico de la vegetación acuática del lago de Pátzcuaro. Michoacán: Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México. Recuperado el 20 de Diciembre de 2016, de https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/basic-html/page44.html
- KADLECK, R., KNIGHT, V., H. BRIX, P. y HABERL. R. (2000). Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design and operation, IWA Specialist Group on use of MAcrophytes in Water Pollution Control.

- LAHORA, A. (1995). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales la EDAR de los gallardos. Almeria.
- LARA, J. (1999). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Tesina, Barcelona.
- LAVANIA, S. (2003). Vetiver Root System: Search for the Ideotype. The Third International Conference on Vetiver, Guangzhou, China, 6-9 October 2003. S/p.
- LIAO, XD., LUO, SM. y WU, XB. (2003). Studies on the abilities of *Vetiveria zizanioides* and *Cyperus alternifolius* for pig farm wastewater treatment. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. Guangzhou, China.
- LIAO, X. (2000). Studies on plant ecology and system mechanisms of constructed wetland for pig farm in South China. China: Ph.D Thesis, South China Agricultural University, Guangzhou, Guandong, China.
- LIAO, XD. WANG, ZS. y LI, QQ. (1995). The application of effluent purification on constructed wetlands in pig farm. Transactions of the CSAE, 11(4): 96-100.
- LISHENGA, I. (2015). Efficacy of Hydroponic and Soil-Based Vetiver Systems in the Treatment of Domestic Wastewater. Int. J. Pure Appl. Sci. Technol., 26(2) pp. 53-63. Obtenido de http://www.ijopaasat.in/yahoo_site_admin/assets/docs/1_IJPAST-676-V26N2.85235318.pdf
- PÉREZ, M. (2012). Vertical subsurface wetlands for wastewater purification. Procedia-Engineering, 42; 1960-1968. Obtenido de http://ac.els-cdn.com/S1877705812029992/1-s2.0-S1877705812029992-main.pdf?_tid=66871c74-97fc-11e6-898f-00000aacb35f&acdnat=1477102279_de4c1c638d813878c30f13d9946e9def

- GERBA, C. y KAR-PISCAK. (1999). Optimization of artificial microorganism for removal of removal of indicator microorganisms and hatogenic protozoa. *Wat.Sci.Tech.*
- MCLAUGHLIN, H; ANDERSON, P (2009). All Biochars are not Created Equal and How to Tell them Apart, in: 2. Presented at the North America Biochar Conference, Boulder, Colorado, p. 36.
- MELLISHO, M. (1999). Evaluación de la capacidad depuradora de tres macrofitas. Lima. Perú.: Tesis. UNALM.
- METCALF-EDDY. (1999). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Labor, S.A.
- MIGLIO, R. y ESPINOZA, R. (2003). Evaluación del comportamiento de un sistema de pantanos artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la granja de porcinos de la UNALM. *Anales Científicos*, 85-99.
- MIGLIO, R. (2003). "Sistemas de tratamiento de aguas residuales con el uso de plantas acuáticas". Tesis para optar el grado de Magister Scientae. Especialidad de Ingeniería Agrícola. Escuela de Post Grado. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- OROZCO, M. (2010). Efectividad en la Remoción de Organismos Patógenos de Aguas Residuales Domésticas Utilizando Humedales Construidos con Diferente Tipos de Flujos. Pereira, Colombia: Tesis (Ing. Q.) Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, Química Industrial. 63 p. Consultado 10 set. 2015. Obtenido de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1687/628162074.pdf?sequence=1>
- PAUL, T. y LUU, T. (2015). The Vetiver for improving water quality, prevention and treatment of contaminated water and land, Second edition. Queensland, Australia: The Vetiver Network International.

- POLPRASERT, C. y VEENSTRA, S. (2000). Sustainable wastewater treatment 1: Natural treatment systems. IHE Delf. Netherlands.
- PROCHASKA, C. y ZOUBOULIS, A. (2006). Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. *Ecol Eng*, 26:293-303.
- RAMALHO, R. (2003). *Introduction to Wastewater Treatment Processes*, Second Edition. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- RAMSAR, GLAND. (2006). *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*. Suiza: 4ta.edición. Gland (Suiza): Secretaría de la Convención de Ramsar, 2006.
- RODRÍGUEZ, J. (2008). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades*. Tesis (Ingeniero Químico especialidad en Ingeniería de procesos). Universidad e Sonora. División de Ingeniería Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia.
- RODRIGUEZ, M. y BRISSON, J. (2002). *Plant diversity effect on horizontal subsurface-flow constructed wetlands (HSSF CWs)*. Quebec: Institut de Recherche en Biologie Végétale, Université de Montréal. 4101 East, Sherbrooke St, Montreal, Canadá.
- RODRÍGUEZ, P., DÍAZ M., GUERRA L. y HERNÁNDEZ, J. (2008). *Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas*. Centro de Investigaciones Hidráulicas. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01280e08.pdf>
- RODRÍGUEZ, P. (1997). *Vetiver una planta para el control de la erosión y la protección ambiental*. Segunda edición. El Limón, Maracay, Venezuela.: Editorial Sociedad Conservacionista Aragua. P.2-12.

- RODRÍGUEZ, T. y OSPINA, I. (2005). Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del río Bogotá. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Consultado 20 set. 2016. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2332403.pdf>
- ROJAS, K., VERA, I. y VIDAL, G. (2013). Influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus* en la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas durante la operación de puesta en marcha de humedales horizontales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 69, 289-299.
- ROLIM, S. (2000). Sistemas de Lagunas de estabilización. Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío. McGraw Hill, Institute Of Technology, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- SANZ, M., DANA, E. y SOBRINO, E. (2004). Atlas de las plantas alóctonas invasoras en España. Madrid, España: Ed: Dirección General para la Biodiversidad. 147 p.
- SEOANEZ, M. (1995). Aguas residuales urbanas, tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento. Madrid: Mundi-prensa.
- SHIMING, L. (2002). Studies on the Abilities of *Vetiveria zizanoides* and *Cyperus alternifolius* for Pig Farm Wastewater Treatment. Guangzhou.
- SICILIANO, S. y GERMIDA, J. (1998). Degradation of chlorinated benzoic acid mixtures by plant bacteria associations. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 17 (4): 728-733.
- SILVA, J. (2005). Humedales Construidos. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente.

- TRIANA R., BURGOS J. y ZÚÑIGA J. (2013). Piloto de tratamiento no convencional para aguas empleando humedal artificial con pasto Vetiver. The Second Latin American Vetiver Conference, Medellin, Colombia.
- TRUONG, P and BAKER, D. (1998). Vetiver Grass System for Enviromental Protection. Pacif im Vetiver Network Office of the Royal Development Projects Bangkok, Thailand, Technical Bulletin No. 1998/1.
- TRUONG, P. and BAKER, D. (1995). Effects of some adverse soil conditions on the growth of *Vetiveria zizanioides* L. International Conference of Vetiver A Miracle Grass, 18p.
- VAN, T. y TRUONG, P. (2008). Results on unique contributors of Vetiver applicable for its use in disaster mitigation purposes in Vietnam. The First Indian National Vetiver Workshop, Cochin, India, 21-23 February 2008, s/p.
- VERA, I., ARAYA, F., ANDRÉS, E., SÁEZ, K., y VIDAL, G. (2014). Enhanced Phosphorus Removal from Sewage in Mesocosm-Scale Constructed Wetland Using Zeolite as Medium and Artificial Aeration. *Environmental Technology*, 35(13), 1639-1649.
- VERA, I., GARCÍA, J., SÁEZ, K., MORAGAS, L., y VIDAL, G. (2011). Performance Evaluation of Eight Years of Experience of Constructed Wetland Systems in Catalonia as Alternative Treatment for small Communities. *Ecological Engineering*, 37(2), 364-371.
- VIDAL, G., LÓPEZ, D., VERA, I., CHAMORRO, S., y BAEZA, C. (2013). Control de la contaminación de aguas servidas en áreas rurales de alta sensibilidad sísmica a través de humedales construidos. *Revista Seguridad y Medio Ambiente, Fundación Mapfre.*, 33(131), 52-60.
- WIESMANN, U. (1994). Biological nitrogen removal from wastewater. *Advances in biochemical engineering/biotechnology*. Berlin- Heidelberg: A. Fiechter.

- XIA, H. (2000). Uptake efficiency of *Vetiveria zizanioides* and *Althernanthera philoxeroides* to N, P, and Cl in Garbage Leachates. *Acta Phytoecologica Sinica*, 24(5): 613-616.
- YAO, S. (2011). A comparative study on the potential of oxygen release by roots of selected wetland plants. *Phys Chem Earth*, 36:475-478.
- ZHENG, T. (1997). Preliminary study on purification of eutrophic water with Vetiver. *Proc. International Vetiver Workshop*, Fuzhou China.

IX. ANEXOS

ANEXO 1 : Evaluación del crecimiento y rendimiento biomásico de las plantas

Anexo 1.1 Resultados de mediciones de alturas de las plantas

Periodo	Fecha	Paragüitas (cm)	Vetiver (cm)
Periodo I	3/05/2016	65	63
	17/05/2016	79	77
	24/05/2016	81	84
	7/06/2016	85	97
	7/07/2016	87	131
	31/07/2016	214	158
	18/08/2016	240	179
Periodo II	24/08/2016	53	63
	7/09/2016	71	92
	14/09/2016	84	139
	21/09/2016	100	149
	25/10/2016	120	180
	3/11/2016	141	221
	7/12/2016	184	238

Anexo 1.2 Resultados de evaluación de biomasa del Paragüitas

Área del humedal: 15 m ²					
Porcentaje de humedad: 73.89%					
Filas	N° Parcela	W Húmedo (Kg)	W Seco (kg)	Rendimiento Tn.ha/año (Peso Húmedo)	Rendimiento Tn.ha/año (Peso Seco)
I	1	1	0.3	1.3	0.3
	2	7	1.8	9.3	2.4
	3	0.5	0.1	0.7	0.2
I	4	10.5	2.7	13.9	3.6
	5	8	2.1	10.6	2.8
	6	15	3.9	19.8	5.2
III	7	1.5	0.4	2.0	0.5
	8	8	2.1	10.6	2.8

IV	10	1.25	0.3	1.7	
	11	12	3.1	15.9	
	12	1.5	0.4	2.0	
V	13	5.5	1.4	7.3	
	14	6.5	1.7	8.6	
	15	11.5	3.0	15.2	
Total		90.75	23.7	120.0	
	9	1	0.3	1.3	0.3

Anexo 1.3 Resultados de evaluación de biomasa del Vetiver

Área del humedal: 15 m2					
Porcentaje de humedad: 70.55%					
Filas	Nº Parcela	W Húmedo (Kg)	W Seco (kg)	Rendimiento Tn.ha/año (Peso Húmedo)	Rendimiento Tn.ha/año (Peso Seco)
I	1	5.0	1.5	6.6	1.9
	2	7.0	2.1	9.3	2.7
	3	3.0	0.9	4.0	1.2
II	4	4.0	1.2	5.3	1.6
	5	6.5	1.9	8.6	2.5
	6	4.0	1.2	5.3	1.6
III	7	3.0	0.9	4.0	1.2
	8	8.0	2.4	10.6	3.1
	9	4.0	1.2	5.3	1.6
IV	10	3.0	0.9	4.0	1.2
	11	10.5	3.1	13.9	4.1
	12	5.0	1.5	6.6	1.9
V	13	5.0	1.5	6.6	1.9
	14	8.0	2.4	10.6	3.1
	15	4.0	1.2	5.3	1.6
Total		80.0	23.6	105.80	31.15

ANEXO 2: Mediciones y datos de temperatura

Anexo 2.1 Resultados de temperatura registrados por el multiparámetro de campo.

Temperatura (°C)					
Periodo	Fecha	Semana	Afluente	Paragüitas	Vetiver
MES I	2/06/2016	1	23.50	22.10	21.60
	9/06/2016	2	23.60	21.90	21.30
	16/06/2016	3	22.80	21.80	20.40
	30/06/2016	4	20.90	19.50	19.40

MES II	2/08/2016	5	21.30
	9/08/2016	6	21.30
	15/08/2016	7	20.70
	22/08/2016	8	21.70
Promedio			21.98
CV%			4.94

Anexo 2.2 Resultados de temperatura registrados por la estación Von Humboldt durante el periodo de monitoreo de las plantas.

Fechas	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máximo	Mínimo
3/04/2016	23.1	27.6	17.6
17/04/2016	21.5	24.8	16
24/05/2016	21.3	25.8	17
7/05/2016	18.2	19.8	17.2
7/06/2016	16.9	20.8	15.4
31/06/2016	17.2	22.8	12.2
18/07/2016	17.3	22	14.2
24/08/2016	17.2	19.8	14.9
7/08/2016	17.8	21.8	14.8
14/09/2016	18.4	22.7	14.5
21/09/2016	17.8	20.8	15.2
25/10/2016	18.5	22.2	15.6
3/10/2016	19.8	27.3	12
7/11/2016	21.6	27.4	16.6

Anexo 2.3 Resultados de temperatura registrados por la estación Von Humboldt de la UNALM durante el periodo de monitoreo de las aguas residuales.

Fechas	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máximo	Mínimo
2/06/2016	20	22.9	18
9/06/2016	19.1	21.4	15.4
16/06/2016	18.2	20.2	16.6
30/06/2016	17.8	19.3	17.1
02/08/2016	17.2	19.8	14.9
09/08/2016	17.8	21.8	14.8
15/08/2016	18.4	22.7	14.5
22/08/2016	17.8	20.8	15.2

**Anexo 2.4 Datos de Temperatura por día de la estación Von Humboldt de la
Universidad Agraria La Molina**

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
OBSERVATORIO METEOROLOGICO A.VON HUMBOLDT
Lat: 12°45' s Long: 76°57' w Alt: 243.7 msnm

MIGUEL GOMEZ

DIA	ENE			FEB			MAR			ABR		
	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxima (°C)	Temp. Minima (°C)	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxima (°C)	Temp. Minima (°C)	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxima (°C)	Temp. Minima (°C)	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxima (°C)	Temp. Minima (°C)
1	21.7	26.2	18.0	20.9	28.1	20.5	25.8	29.4	21.2	28.7	30.9	22.0
2	24.1	28.4	16.4	25.4	29.4	22.0	27.4	30.6	22.2	25.5	29.2	20.5
3	24.2	28.4	17.3	26.2	29.9	22.9	28.0	29.7	20.9	25.0	29.9	20.5
4	24.0	28.1	19.0	26.6	30.4	22.1	26.7	29.8	21.0	26.5	30.1	20.3
5	25.3	28.7	20.2	26.9	31.3	20.5	28.8	30.3	22.0	26.1	31.0	19.9
6	25.4	29.2	19.7	26.5	30.2	20.9	27.0	30.9	21.4	25.5	28.9	20.9
7	22.6	24.9	21.0	26.4	30.5	20.5	26.4	30.7	22.0	23.6	28.6	19.0
8	22.5	26.2	19.1	23.9	28.8	22.0	27.6	32.3	21.9	23.9	27.5	19.2
9	23.4	27.0	19.9	25.6	28.8	21.9	26.6	31.4	21.4	23.8	28.2	20.1
10	24.0	27.9	18.6	25.5	26.2	22.0	26.7	30.4	21.0	22.7	27.8	19.9
11	24.6	28.0	21.0	25.6	29.3	22.2	27.0	31.2	22.0	23.8	28.0	19.0
12	24.5	28.3	20.4	25.3	28.0	22.0	26.5	30.6	20.8	23.9	28.2	18.2
13	23.7	26.9	19.0	27.1	31.0	23.1	28.0	31.0	21.6	24.9	29.7	18.0
14	22.4	24.9	20.2	26.3	30.6	20.8	26.9	31.6	20.3	25.4	29.8	18.2
15	23.6	27.0	21.0	25.5	29.3	21.0	26.0	29.3	21.8	23.9	28.5	19.1
16	24.7	28.6	18.6	25.3	29.3	21.0	25.1	29.2	20.0	23.9	25.5	19.2
17	25.0	29.4	19.4	23.0	30.3	21.8	25.6	29.8	20.0	24.2	27.7	19.8
18	25.7	29.6	19.8	27.7	30.8	22.2	26.1	29.6	20.4	23.8	26.4	18.5
19	24.2	27.2	19.2	26.3	30.4	22.0	25.9	29.7	19.9	23.3	27.9	19.2
20	24.5	28.4	19.0	26.3	30.0	21.9	26.7	30.8	20.2	22.5	26.4	18.5
21	24.5	28.0	22.0	26.7	30.6	21.8	27.1	31.4	19.2	22.6	27.4	17.9
22	24.5	29.6	20.2	26.9	30.3	21.2	27.0	32.2	20.8	22.0	26.3	17.8
23	24.3	28.3	21.3	27.3	31.7	22.2	28.0	29.4	21.1	22.2	25.5	17.3
24	22.9	25.0	20.9	26.7	30.5	22.9	26.7	31.2	21.0	22.5	28.0	17.2
25	24.3	28.2	19.6	26.0	29.8	22.9	25.5	30.0	20.2	24.1	29.4	17.9
26	25.6	29.4	20.0	26.7	29.5	23.4	26.4	30.0	20.2	24.1	29.0	17.9
27	26.2	30.0	21.8	28.2	31.9	21.9	26.6	30.8	20.3	22.9	26.6	17.5
28	25.0	28.4	21.2	28.5	32.9	21.0	26.7	30.7	20.2	22.8	26.5	17.8
29	26.5	30.4	22.1	26.0	29.7	22.1	27.3	31.1	21.0	24.4	28.8	17.6
30	25.3	29.2	21.8				27.7	32.6	21.0	19.9	21.8	17.2
31	26.8	30.2	22.4				26.2	30.4	21.0			



[Handwritten Signature]
M.Sc. Wilfredo Baldeon
Jefe del observatorio

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

OBSERVATORIO METEOROLOGICO A.VON HUMBOLDT

Lat: 12°05' S Long: 76°57' W Alt: 243.7 msnm

MIGUEL GOMEZ

DIA	MAY			JUN			JUL			AGO		
	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxima (°C)	Temp. Minima (°C)	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxima (°C)	Temp. Minima (°C)	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxima (°C)	Temp. Minima (°C)	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxima (°C)	Temp. Minima (°C)
1	24.0	28.9	16.6	20.5	23.3	17.8	17.8	21.5	15.1	17.3	21.5	13.2
2	23.7	28.8	17.5	20.0	22.9	18.0	19.0	22.7	15.6	15.9	18.6	13.7
3	23.1	27.6	17.6	19.6	21.5	18.2	17.8	20.8	14.5	16.7	19.0	14.3
4	19.5	28.9	17.0	18.7	19.8	17.8	17.8	20.4	14.8	16.0	18.5	13.8
5	23.5	28.2	16.7	19.3	22.1	17.3	17.0	18.8	16.2	16.9	20.0	14.8
6	22.4	26.8	16.3	19.0	21.2	16.8	16.4	18.4	15.1	16.3	18.9	14.6
7	22.0	26.4	15.8	18.2	19.8	17.2	16.9	20.8	15.4	15.7	18.8	14.8
8	22.2	26.8	16.1	17.5	19.7	17.0	16.2	17.4	14.0	16.3	18.7	14.4
9	22.3	27.5	16.3	19.1	21.4	15.4	17.1	19.2	14.8	16.9	20.6	14.2
10	22.8	26.8	16.2	18.3	19.8	17.6	17.5	19.5	15.4	16.6	20.4	13.1
11	23.9	28.8	16.0	18.4	20.2	16.9	18.0	21.0	15.8	16.6	19.6	12.0
12	22.4	26.3	16.2	17.4	18.7	16.6	17.1	19.4	15.5	16.2	19.1	14.2
13	21.5	27.0	16.0	18.2	20.1	16.4	17.7	20.9	15.1	17.3	20.5	15.1
14	19.0	21	15.8	19.0	23.5	16.3	16.8	18.1	15.4	17.3	20.6	14.4
15	19.8	23.6	14.7	19.2	22.3	17.0	16.3	18.1	15.2	15.7	17.3	14.6
16	20.2	24.4	18.0	18.2	20.2	16.6	16.5	18.9	14.8	16.4	19.0	13.5
17	21.5	24.8	16.0	18.7	20.2	16.8	17.1	20.2	15.0	17.3	21.0	14.8
18	21.0	26.3	16.8	20.0	23.6	17.3	16.0	17.4	14.8	17.3	22.0	14.2
19	20.6	24.8	16.0	19.5	21.2	18.2	16.4	19.2	14.2	15.6	17.0	14.7
20	20.0	23.6	16.2	20.2	22.8	18.3	16.6	19.2	14.4	15.2	16.0	14.3
21	20.0	23	16.8	19.4	21.9	18.1	16.3	18.2	14.9	17.3	21.8	13.4
22	18.9	23.8	15.6	20.2	23.3	17.2	16.1	18.8	14.7	18.3	22.3	13.6
23	19.9	23.4	16.3	19.7	23.3	17.3	16.2	19.1	14.4	17.0	19.8	15.2
24	21.3	25.8	17.0	20.0	23.0	15.2	17.0	19.8	14.5	17.2	19.8	14.9
25	21.0	25.5	15.6	19.0	20.8	17.3	17.1	20.3	14.1	18.3	21.6	15.2
26	18.7	22.4	15.0	19.8	23.0	17.1	16.2	18.3	14.2	16.5	19.5	14.6
27	19.1	23.6	15.6	19.0	22.3	16.7	17.8	21.8	14.8	16.2	20.5	13.6
28	18.8	24.0	13.6	18.7	21.9	13.1	16.8	20.8	14.8	18.2	23.6	12.4
29	19.9	24.0	14.0	17.9	19.2	16.9	17.0	21.3	13.3	17.3	21.6	12.6
30	18.5	25.2	13.9	17.8	19.3	17.1	17.7	20.9	14.1	15.5	16.6	14.6
31	18.7	23.8	14.0				17.2	22.8	12.2	16.1	19.6	14.5



[Handwritten Signature]
 MSc. Wilfredo Baldeon
 Jefe del observatorio

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

OBSERVATORIO METEOROLÓGICO A.VON HUMBOLDT

Lat: 12°45' s Long: 76°57'w Alt:243.7mssn

MIGUEL GOMEZ

DIA	SET			OCT			NOV			DIC		
	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxi (ma)(°C)	Temp. Mini (ma)(°C)	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxima(°C)	Temp. Minimal(°C)	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxi (ma)(°C)	Temp. Mini (ma)(°C)	Temperatura Prom. (°C)	Temp. Maxima(°C)	Temp. Minimal(°C)
1	15.9	17.8	14.4	18.2	21.4	15.2	20.0	22.8	13.1	20.8	26.1	15.8
2	17.1	22.0	14.3	18.8	22.4	15.6	19.5	23.4	11.6	21.5	25.5	16.0
3	17.1	21.4	14.5	18.6	21.4	15.7	19.8	27.3	12.0	23.2	27.0	17.8
4	16.5	18.6	14.7	17.9	20.6	15.3	20.2	24.9	13.6	23.0	27.3	16.9
5	16.7	20	14.6	17.1	19.7	14.7	19.4	23.2	15.0	23.5	28.3	16.1
6	19.7	20.4	14.1	18.8	22.3	15.4	18.1	20.4	15.9	21.8	26.7	17.0
7	17.8	21.8	14.8	19.2	22.9	13.2	21.5	25.5	15.0	21.6	27.4	16.6
8	16.5	20.1	14.2	18.5	22.1	13.6	21.8	25.3	13.5	22.3	26.4	17.3
9	17.4	21.2	14.4	19.2	23.4	15.6	21.0	25.7	14.9	23.6	27.4	18.0
10	18.5	22.4	14.8	19.4	24.8	14.2	21.3	25.8	15.2	22.9	27.2	17.2
11	18.0	22.7	14.9	19.6	23.2	15.3	20.5	24.6	16.7	22.8	27.4	17.3
12	15.9	17.4	14.0	19.4	23.8	15.2	22.1	25.6	14.6	22.1	26.6	15.5
13	17.3	21.3	14.8	18.7	22.8	16.1	21.4	25.0	14.5	21.5	24.8	18.2
14	18.4	22.7	14.5	20.1	23.8	14.1	21.9	26.2	17.7	22.7	27.2	15.2
15	17.2	19.5	14.2	17.8	20.3	13.2	21.1	24.0	18.1	20.4	23.7	17.6
16	16.8	20.8	15.1	19.5	23	15.4	21.3	25.2	15.0	22.7	27.1	16.1
17	18.9	24	15.3	19.0	23.6	13.6	22.0	26.3	13.7	23.4	27.6	17.5
18	20.0	24.6	12.8	19.9	24.5	16.1	21.3	26.4	14.2	23.2	27.2	18.7
19	19.8	24.8	15.2	20.0	24.2	16.2	21.6	25.4	13.9	23.5	27.2	19.0
20	18.6	22.3	15.0	20.2	25.4	15.0	21.3	24.8	15.4	23.8	27.2	17.0
21	17.8	20.8	15.2	18.6	22.3	16.0	22.9	26.5	14.9	22.3	27.2	17.0
22	19.0	22.3	15.3	19.5	22.9	14.9	22.2	25.8	14.2	23.3	26.8	18.0
23	18.0	21.3	15.9	17.1	19.9	15.7	22.1	26.2	14.2	24.6	28.4	18.0
24	18.9	23.3	15.3	18.7	22.8	15.4	21.4	25.4	13.4	24.3	28.3	18.2
25	16.6	18.0	15.5	18.5	22.2	15.6	22.4	25.8	15.5	24.2	27.9	18.0
26	18.6	23.0	15.0	19.0	23.3	15.2	22.7	26.2	16.0	23.5	28.6	18.2
27	18.3	21.8	14.9	17.2	21	14.7	21.9	26.1	16.2	24.4	28.6	19.2
28	18.6	23.4	15.4	18.9	22.6	15.6	22.3	26.2	15.7	24.0	29.3	18.6
29	17.6	19.2	15.4	18.7	23	15.5	22.3	27.0	15.2	23.9	29.2	18.8
30	17.8	20.4	15.0	19.8	23.4	16.2	22.8	26.5	15.6	25.3	29.3	18.6
31				19.14	23.8	16.4				24.9	29.4	18.9



MSc. Wilfredo Baldeon
 Jefe del observatorio

ANEXO 3: Resultados de caudales de entrada y salida

Anexo 3.1 Resultados de las mediciones del caudal instantáneo de entrada

HUMEDALES	FECHA	VOLUMEN Litros	TIEMPO 01	TIEMPO 02	TIEMPO 03	TIEMPO 04	TIEMPO PROMEDIO	# HUECOS	CAUDAL (L/s)	CAUDAL TOTAL (L/s)	Q PROMEDIO (L/s)
VETIVER	9/06/2016	4	46.1	50.2	48.7		48.33	12	0.08	0.99	1.07
	16/06/2016	2	26.2	27.4	24.8	24.2	25.65	12	0.08	0.94	
	30/06/2016	2	27.8	28.3	22.4	22	25.13	12	0.08	0.96	
	24/08/2016	2	23.5	23	23.8	20.6	22.73	12	0.09	1.06	
	29/08/2016	2	23.5	22.7	22.3	22.3	22.70	12	0.09	1.06	
	7/09/2016	2	20.3	18.5	19.3	23.5	20.40	12	0.10	1.18	
	14/09/2016	2	21.22	20.29	21.44	21.58	21.13	12	0.09	1.14	
	21/09/2016	2	23.05	27.81	21.64	21.84	23.59	12	0.08	1.02	
CYPERUS	9/06/2016	4	56.5	51.7	60.02		56.07	12	0.07	0.86	0.91
	16/06/2016	2	29.7	29.9	27.4	25.3	28.08	12	0.07	0.85	
	30/06/2016	2	29.1	28.8	24.6	26.1	27.15	12	0.07	0.88	
	24/08/2016	2	29.5	32.1	31.4	32.3	31.33	12	0.06	0.77	
	29/08/2016	2	26.1	25.5	24.8	23.8	25.05	12	0.08	0.96	
	7/09/2016	2	28.4		30	24.1	27.50	12	0.07	0.87	
	14/09/2016	2	29.41	26.45	28.82	26.53	27.80	12	0.07	0.86	
	21/09/2016	2	28.03	29.54	30.62	29	29.30	12	0.07	0.82	

Anexo 3.2 Resultados de las mediciones del caudal de salida

HUMEDALES	FECHA	VOLUMEN L/s	TIEMPO 01	TIEMPO 02	TIEMPO 03	TIEMPO 04	CAUDAL (L/S)	TIEMPO PROMEDIO	CAUDAL (L/S)	Q PROMEDIO(l/s)
VETIVER	9/06/2016	2	6.2	7.1	6.4	6.6	0.30	6.575	0.30	0.307
	16/06/2016	2	9.6	8.6	8.7	8.6	0.23	8.875	0.23	
	30/06/2016	2	6.81	5.83	6.76	6.83	0.30	6.5575	0.30	
	24/08/2016	2	6.89	6.79	6.76	6.6	0.30	6.76	0.30	
	29/09/2016	2	6.5	6.6	6.7	6	0.31	6.45	0.31	
	7/09/2016	2	6.42	6.39	6.41	6.4	0.31	6.405	0.31	
CYPERUS	9/06/2016	2	4.6	5	4.6	4.7	0.42	4.725	0.42	0.241
	16/06/2016	2	12.2	11.9	11.9	11.8	0.17	11.95		
	30/06/2016	2	10.02	9.67	9.58	9.37	0.21	9.66	0.21	
	24/08/2016	2	4.64	4.75	4.42	4.68	0.43	4.6225	0.43	
	29/09/2016	2	7.5	7.6	7.4	7.39	0.27	7.4725	0.27	
	7/09/2016	2	8.2	8.3	8.22	8.25	0.24	8.2425	0.24	

ANEXO 4: Resultados de evaluación de parámetros in situ

Anexo 4.1 Resultados de pH

pH					
Periodo	Fecha	Semana	Afluente	Paragüitas	Vetiver
MES I	2/06/2016	1	7.30	6.75	6.61
	9/06/2016	2	7.46	6.93	6.73
	16/06/2016	3	7.43	6.91	6.80
	30/06/2016	4	7.13	6.70	6.77
MES II	2/08/2016	5	7.20	6.74	6.83

	9/08/2016	6	7.36	6.75	6.78
	15/08/2016	7	7.48	6.89	7.05
	22/08/2016	8	7.43	7.04	7.13
Promedio			7.35	6.84	6.84
CV%			1.63	1.65	2.33

Anexo 4.2 Resultados de Conductividad eléctrica

Conductividad Eléctrica (us/cm)					
Periodo	Fecha	Semana	Afluyente	Paragüitas	Vetiver
MES I	2/06/2016	1	1575.00	2150.00	1782.00
	9/06/2016	2	2290.00	2560.00	1972.00
	16/06/2016	3	1759.00	2870.00	2080.00
	30/06/2016	4	1602.00	2450.00	1960.00
MES II	2/08/2016	5	1660.00	1885.00	1739.00
	9/09/2016	6	1567.00	1922.00	1837.00
	15/09/2016	7	1816.66	1754.33	2047.00
	22/09/2016	8	1670.00	2091.00	1893.00
Promedio			1742.46	2210.29	1913.75
CV%			12.77	16.23	5.99

Anexo 4.3 Resultados de Oxígeno disuelto

Oxígeno disuelto (mg/l)					
Periodo	Fecha	Semana	Afluyente	Paragüitas	Vetiver
MES I	2/06/2016	1	0.34	0.81	1.35
	9/06/2016	2	0.33	3.13	1.05
	16/06/2016	3	0.91	1.43	1.20
	30/06/2016	4	0.53	2.60	1.13
MES II	2/08/2016	5	1.20	1.15	1.10
	9/08/2016	6	0.78	1.15	1.49
	15/08/2016	7	0.35	1.38	2.29
	22/08/2016	8	0.97	2.97	1.40
Promedio			0.68	1.83	1.38
CV%			46.37	47.03	27.23

ANEXO 5: Resultados de Evaluación del sistema -Mediciones en laboratorio

Anexo 5.1 Resultados de Turbiedad

Turbiedad (NTU)							
Periodo	Fecha	Semana	Afluente	Paragüitas (P)	Vetiver (V)	% Remoción Paragüitas	% Remoción Vetiver
MES I	2/06/2016	1	103.00	1.33	1.51	98.7	98.5
	9/06/2016	2	196.00	1.82	2.09	99.1	98.9
	16/06/2016	3	138.00	0.78	1.79	99.4	98.7
	30/06/2016	4	200.00	0.43	1.36	99.8	99.3
MES II	2/08/2016	5	150.00	0.97	2.28	99.4	98.5
	9/08/2016	6	143.00	1.03	1.26	99.3	99.1
	15/08/2016	7	182.00	0.40	0.68	99.8	99.6
	22/08/2016	8	91.80	0.32	0.96	99.7	99.0
Promedio			150.48	0.89	1.49	99.4	99.0
CV%			25.12	54.67	34.20		

Anexo 5.2 Resultados de Nitrógeno amoniacal

Nitrógeno Amoniacal (mg/l)							
Periodo	Fecha	Semana	Afluente	Paragüitas(P)	Vetiver(V)	% Remoción Paragüitas	% Remoción Vetiver
MES I	2/06/2016	1	30.60	2.39	2.19	92.8	92.2
	9/06/2016	2	10.80	0.01	1.89	82.5	99.9
	16/06/2016	3	23.40	0.21	1.99	91.5	99.1
	30/06/2016	4	23.10	0.13	0.71	96.9	99.4
MES II	2/08/2016	5	22.00	0.13	0.96	95.6	99.4
	9/08/2016	6	24.80	0.15	1.25	95.0	99.4
	15/08/2016	7	26.60	0.17	1.43	94.6	99.4
	22/08/2016	8	25.8	0.14	1.27	95.1	99.5
Promedio			23.39	0.42	1.46	93.8	98.2
CV%			22.96	179.68	33.28		

Anexo 5.3 Resultados de Fósforo Total

Fósforo Total (mg/l)							
Periodo	Fecha	Semana	Afluente	Paragüitas(P)	Vetiver(V)	% Remoción Paragüitas	% Remoción Vetiver
MES I	2/06/2016	1	13.20	1.84	2.04	86.1	84.5

	9/06/2016	2	14.95	0.17	0.95	98.9	93.6
	16/06/2016	3	16.70	1.57	1.50	90.6	91.0
	30/06/2016	4	20.00	1.31	1.82	93.5	90.9
MES II	2/08/2016	5	34.70	4.16	5.40	88.0	84.4
	9/08/2016	6	42.00	3.91	4.70	90.7	88.8
	15/08/2016	7	39.60	5.50	5.50	86.1	86.1
	22/08/2016	8	55.00	3.51	3.80	93.6	93.1
Promedio			29.52	2.75	3.21	90.7	89.1
CV%			48.90	60.96	53.83		

Anexo 5.4 Resultados de Nitrógeno Total

Nitrógeno Total (mg/l)							
Periodo	Fecha	Semana	Afluente	Paragüitas(P)	Vetiver(V)	% Remoción Paragüitas	% Remoción Vetiver
MES I	2/06/2016	1	74.00	28.00	31.00	62.2	58.1
	9/06/2016	2	90.00	27.00	46.00	70.0	48.9
	16/06/2016	3	192.00	162.00	172.00	15.6	10.4
	30/06/2016	4	66.00	30.00	36.00	54.5	45.5
MES II	2/08/2016	5	100.00	44.00	61.00	56.0	39.0
	9/08/2016	6	96.00	40.00	42.00	58.3	56.3
	15/08/2016	7	88.00	33.00	26.00	62.5	70.5
	22/08/2016	8	72.00	39.00	35.00	45.8	51.4
Promedio			97.25	50.38	56.13	48.2	42.3
CV%			38.61	84.52	80.04		

Anexo 5.5 Resultados de Demanda bioquímica de oxígeno

DBO5 (mg/l)							
Periodo	Fecha	Semana	Afluente	Paragüitas(P)	Vetiver(V)	% Remoción Paragüitas	% Remoción Vetiver
MES I	2/06/2016	1	67.39	1.57	28.0	97.7	58.5
	9/06/2016	2	91.26	1.36	27.0	98.5	70.4
	16/06/2016	3	84.66	1.9035	19.0	97.8	77.6
	30/06/2016	4	81	1.77	8.0	97.8	90.1
MES II	2/08/2016	5	101.23	1.85	14.0	98.2	86.2
	9/08/2016	6	144.29	0.952	10.0	99.3	93.1
	15/08/2016	7	87.25	0.15	10.0	99.8	88.5
	22/08/2016	8	75.83	0.85	9.0	98.9	88.1
Promedio			91.61	1.30	15.63	98.6	82.9
CV%			24.05	43.78	48.63		

Anexo 5.6 Resultados de Demanda química de oxígeno

DQO (mg/l)							
Periodo	Fecha	Semana	Afluente	Paragüitas (P)	Vetiver (V)	% Remoción Paragüitas	% Remoción Vetiver
MES I	2/06/2016	1	155.0	19.0	28.0	87.7	81.9
	9/06/2016	2	180.0	20.0	27.0	88.9	85.0
	16/06/2016	3	159.0	12.0	19.0	92.5	88.1
	30/06/2016	4	143.0	7.0	8.0	95.1	94.4
MES II	2/08/2016	5	128.0	10.0	14.0	92.2	89.1
	9/08/2016	6	220.0	9.0	10.0	95.9	95.5
	15/08/2016	7	154.0	6.0	10.0	96.1	93.5
	22/08/2016	8	126.0	6.0	9.0	95.2	92.9
Promedio			158.13	11.13	15.63	93.0	90.1
CV%			18.03	46.80	48.63		

Anexo 5.7 Resultados de Sólidos suspendidos totales

SST (mg/l)							
Periodo	Fecha	Semana	Afluente	Paragüitas (P)	Vetiver (V)	% Remoción Paragüitas	% Remoción Vetiver
MES I	2/06/2016	1	30.00	8.33	10.00	72.2	66.7
	9/06/2016	2	24.00	3.83	4.50	84.0	81.3
	16/06/2016	3	14.83	3.44	4.35	76.8	70.7
	30/06/2016	4	17.20	1.14	1.71	93.4	90.0
MES II	2/08/2016	5	36.40	1.33	2.00	96.3	94.5
	9/08/2016	6	35.60	1.89	1.33	94.7	96.3
	15/08/2016	7	29.60	1.70	1.10	94.3	96.3
	22/08/2016	8	16.64	0.40	1.20	97.6	92.8
Promedio			25.53	2.76	3.28	89.2	87.2
CV%			31.61	85.74	86.87		

Anexo 5.8 Resultados de Coliformes fecales

CFC (UFC/100ml)							
Periodo	Fecha	Semana	Afluente	Paragüitas(P)	Vetiver(V)	% Remoción Paragüitas	% Remoción Vetiver
MES I	2/06/2016	1	1.20E+07	5.00E+04	1.80E+06	99.6	85.0
	9/06/2016	2	1.00E+07	5.00E+04	1.50E+06	99.5	85.0
	16/06/2016	3	9.00E+06	4.50E+04	1.50E+06	99.5	83.3
	30/06/2016	4	4.40E+06	8.00E+04	2.00E+05	98.2	95.5

MES II	2/08/2016	5	5.60E+06	2.00E+03	2.20E+04	100.0	99.6
	9/08/2016	6	4.00E+06	2.00E+03	1.40E+03	100.0	100.0
	15/08/2016	7	5.24E+06	1.20E+03	1.60E+03	100.0	100.0
	22/08/2016	8	5.90E+06	9.33E+02	3.10E+03	100.0	99.9
Promedio			7.02E+06	2.89E+04	6.29E+05	99.6	91.0
CV%			39.03	100.59	120.91		

ANEXO 6: Análisis Estadístico

Anexo 6.1: Análisis estadístico de Varianza (ANOVA)

Se analizaron como celdas el Pretratamiento(C), humedal con Paragüitas C1 y Humedal con Vetiver (V1) y periodos I y II.

Análisis ANOVA celdas y periodo			
Celda	Hipótesis Ho	C = C1 = V1	Pr(>F) > 0.05
	Hipótesis H1	Al menos 1 es diferente	Pr(>F) ≤ 0.05
Periodo	Hipótesis Ho	I = II	Pr(>F) > 0.05
	Hipótesis H1	I ≠ II	Pr(>F) ≤ 0.05

Parámetros físicos

Temperatura

Analysis of Variance Table

Response: T

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	13.6608	6.8304	9.5475	0.001228 **
PERIODO	1	9.2504	9.2504	12.9301	0.001806 **
Residuals	20	14.3083	0.7154		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

pH

Analysis of Variance Table

Response: pH

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	1.39061	0.69530	38.2184	1.472e-07 ***
PERIODO	1	0.05607	0.05607	3.0818	0.09448 .
Residuals	20	0.36386	0.01819		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Conductividad eléctrica

Analysis of Variance Table

Response: CE

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	896390	448195	8.0551	0.002716 **
PERIODO	1	418179	418179	7.5157	0.012580 *
Residuals	20	1112817	55641		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Turbiedad

Analysis of Variance Table

Response: NTU

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	118863	59432	106.0630	2.255e-11 ***
PERIODO	1	225	225	0.4007	0.5339
Residuals	20	11207	560		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Parametros Químicos

Oxígeno disuelto

Analysis of Variance Table

Response: OD

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	5.3840	2.69200	6.9592	0.005081 **
PERIODO	1	0.0840	0.08402	0.2172	0.646221
Residuals	20	7.7365	0.38683		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Nitrógeno amoniacal

Analysis of Variance Table

Response: Amonio

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	2692.08	1346.04	114.6700	1.103e-11 ***
PERIODO	1	2.21	2.21	0.1881	0.6691
Residuals	20	234.77	11.74		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Fósforo total

Analysis of Variance Table

Response: Fosforo

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	3757.2	1878.58	37.937	1.56e-07 ***
PERIODO	1	723.0	723.03	14.601	0.001068 **
Residuals	20	990.4	49.52		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Nitrógeno total

Analysis of Variance Table

Response: Nitrogeno

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	14186.6	7093.3	5.5040	0.01246 *
PERIODO	1	1134.4	1134.4	0.8802	0.35934
Residuals	20	25775.0	1288.8		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Demanda bioquímica de oxígeno

Analysis of Variance Table

Response: DBO5

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	42553	21276	116.2906	9.689e-12 ***
PERIODO	1	265	265	1.4486	0.2428
Residuals	20	3659	183		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Demanda química de oxígeno

Analysis of Variance Table

Response: DQO

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	111828	55914	160.9673	4.687e-13 ***
PERIODO	1	234	234	0.6747	0.4211
Residuals	20	6947	347		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Sólidos suspendidos totales

Analysis of Variance Table

Response: SST

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	2705.11	1352.56	42.9787	5.741e-08 ***
PERIODO	1	1.42	1.42	0.0452	0.8338
Residuals	20	629.41	31.47		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Parámetros Biológicos

Coliformes fecales

Analysis of Variance Table

Response: CFT

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Celda	2	2.4005e+14	1.2003e+14	49.7688	1.719e-08 ***
PERIODO	1	1.6419e+13	1.6419e+13	6.8081	0.01679 *
Residuals	20	4.8233e+13	2.4117e+12		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Anexo 6.2: Análisis estadístico Tukey

Se analizaron como celdas el Pretratamiento(C), humedal con Paragüitas C1 y humedal con Vetiver (V1) y periodos I y II

Análisis TUKEY celdas y periodos			
Celda	Hipótesis Ho	C = C1	Pr(>F) > 0.05
	Hipótesis H1	C ≠ C1	Pr(>F) ≤ 0.05
Periodo	Hipótesis Ho	I = II	Pr(>F) > 0.05
	Hipótesis H1	I ≠ II	Pr(>F) ≤ 0.05

Parámetros físicos

Temperatura

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	-1.7875	-2.8574585	-0.7175415	0.0011535
V1-C	-1.3000	-2.3699585	-0.2300415	0.0157916
V1-C1	0.4875	-0.5824585	1.5574585	0.4940743

\$PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	-1.241667	-1.961962	-0.5213714	0.0018057

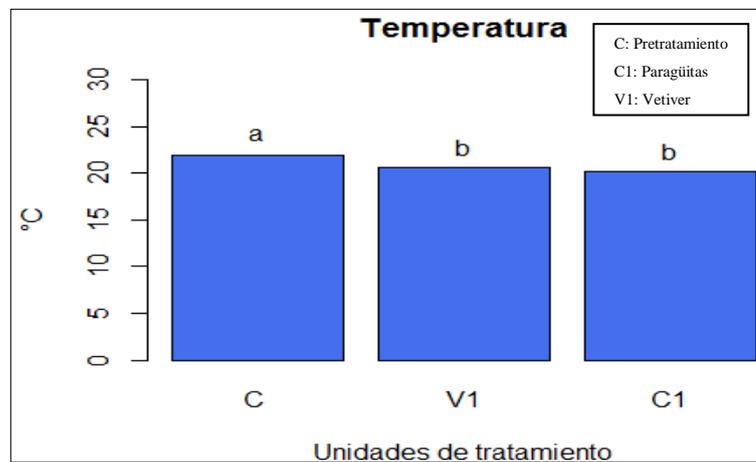


Figura 53: Análisis de significancia de Temperatura

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas ($P < 0.05$)

pH

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	-0.51000	-0.6806234	-0.3393766	0.0000008
V1-C	-0.51125	-0.6818734	-0.3406266	0.0000008
V1-C1	-0.00125	-0.1718734	0.1693734	0.9998106

\$PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	0.09666667	-0.01819688	0.2115302	0.0944794

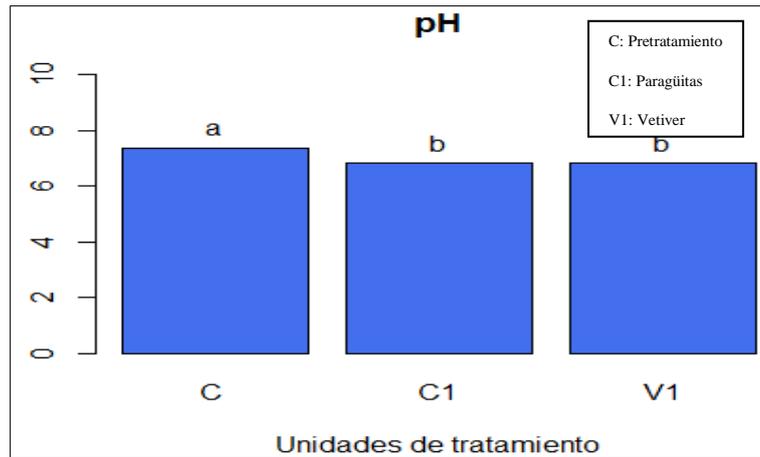


Figura 54: Análisis de significancia de pH

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas (P<0.05)

Conductividad eléctrica

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	467.8337	169.4438	766.22373	0.0021004
V1-C	171.2925	-127.0975	469.68248	0.3343105
V1-C1	-296.5412	-594.9312	1.84873	0.0516157

PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	-264.0008	-464.8768	-63.12491	0.01258

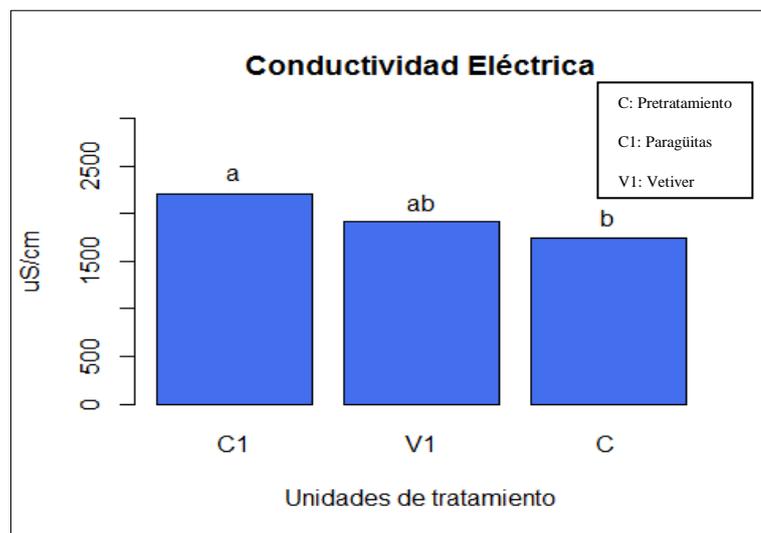


Figura 55: Análisis de significancia de la conductividad eléctrica

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas (P<0.05)

Turbiedad

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	-149.59000	-179.53430	-119.64570	0.0000000
V1-C	-148.98375	-178.92805	-119.03945	0.0000000
V1-C1	0.60625	-29.33805	30.55055	0.9985547

PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	-6.1175	-26.27598	14.04098	0.5338874

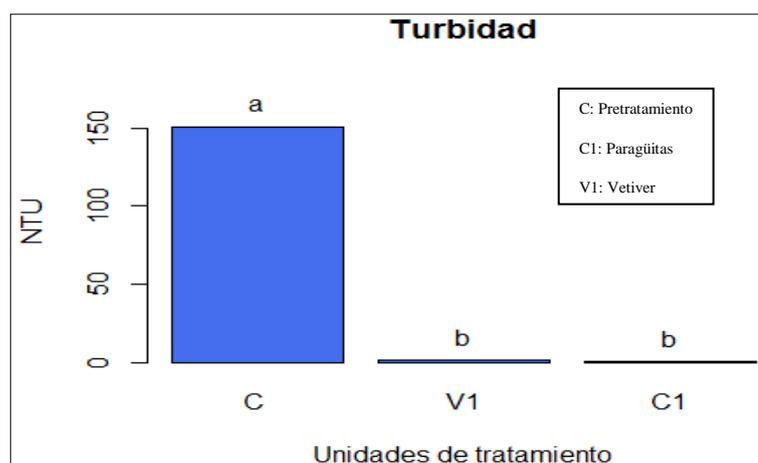


Figura 56. Análisis de significancia de la turbiedad

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas ($P < 0.05$)

Parámetros químicos

Oxígeno disuelto

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	1.15125	0.36448523	1.9380148	0.0038542
V1-C	0.70000	-0.08676477	1.4867648	0.0867621
V1-C1	-0.45125	-1.23801477	0.3355148	0.3349184

PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	0.1183333	-0.4113161	0.6479828	0.646221

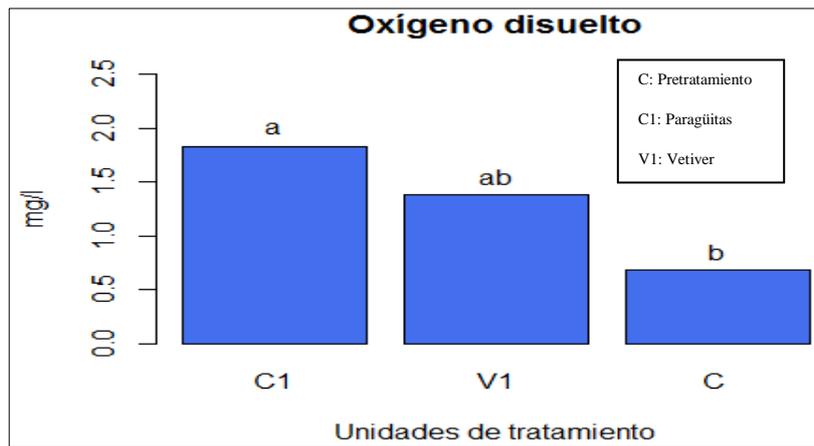


Figura 57. Análisis de significancia de niveles de oxígeno disuelto

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas ($P < 0.05$)

Nitrógeno amoniacal

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	-22.97125	-27.305277	-18.637223	0.0000000
V1-C	-21.92625	-26.260277	-17.592223	0.0000000
V1-C1	1.04500	-3.289027	5.379027	0.8163474

PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	0.6066667	-2.310997	3.524331	0.6691255

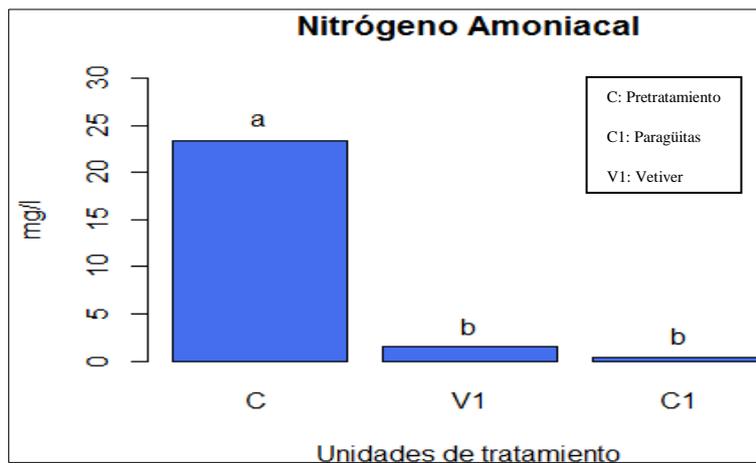


Figura 58. Análisis de significancia de niveles Nitrógeno amoniacal

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas ($P < 0.05$)

Fósforo total

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	-26.7725	-35.674126	-17.870874	0.0000007
V1-C	-26.3050	-35.206626	-17.403374	0.0000009
V1-C1	0.4675	-8.434126	9.369126	0.9903188

PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	10.9775	4.984932	16.97007	0.0010684

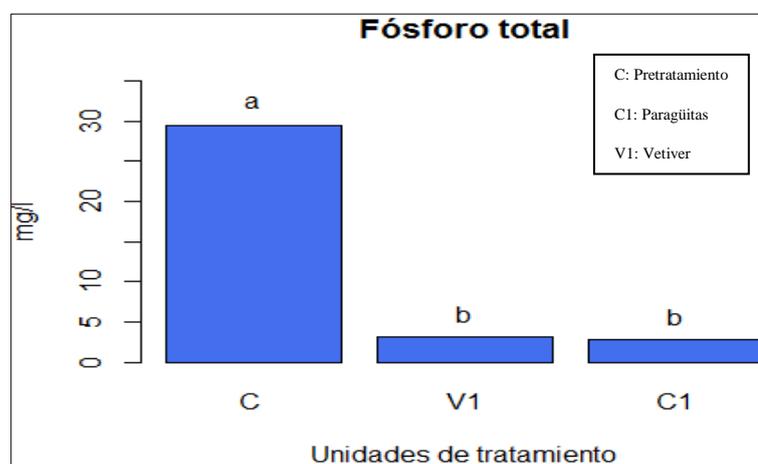


Figura 59. Análisis de significancia de niveles Fósforo total

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas ($P < 0.05$)

Nitrógeno total

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	-46.875	-92.28712	-1.462884	0.0423179
V1-C	-55.250	-100.66212	-9.837884	0.0156491
V1-C1	-8.375	-53.78712	37.037116	0.8875847

PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	-13.75	-44.3214	16.8214	0.3593361

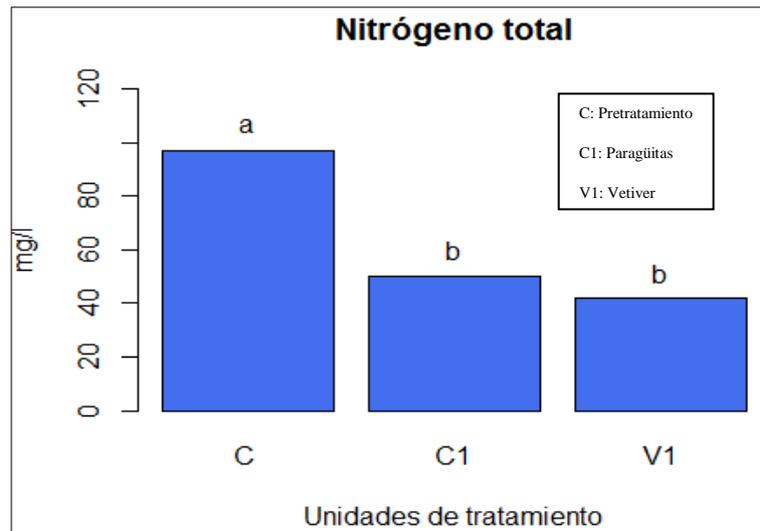


Figura 60. Análisis de significancia de niveles nitrógeno total

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas (P<0.05)

Demanda Bioquímica de oxígeno

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	-90.311825	-107.42233	-73.20132	0.0000000
V1-C	-88.300302	-105.41081	-71.18979	0.0000000
V1-C1	2.011523	-15.09899	19.12203	0.9525207

PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	6.646207	-4.872576	18.16499	0.2428061

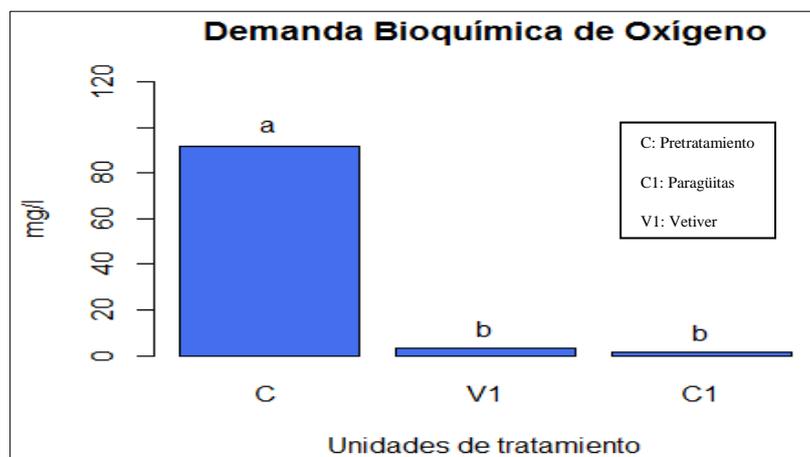


Figura 61. Análisis de significancia de niveles Demanda bioquímica de oxígeno

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas (P<0.05)

Demanda química de oxígeno

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	-147.0	-170.57647	-123.42353	0.0000000
V1-C	-142.5	-166.07647	-118.92353	0.0000000
V1-C1	4.5	-19.07647	28.07647	0.8801394

PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	-6.25	-22.12167	9.621666	0.4210926

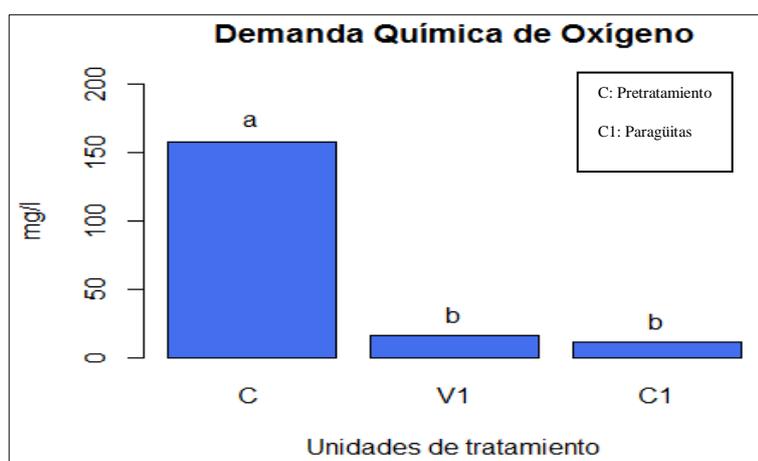


Figura 62. Análisis de significancia de niveles Demanda química de oxígeno

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas (P<0.05)

Sólidos suspendidos totales

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	-22.7746429	-29.871048	-15.678238	0.0000003
V1-C	-22.2590966	-29.355501	-15.162692	0.0000004
V1-C1	0.5155462	-6.580859	7.611951	0.9815655

PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	0.4867523	-4.290542	5.264047	0.8338401

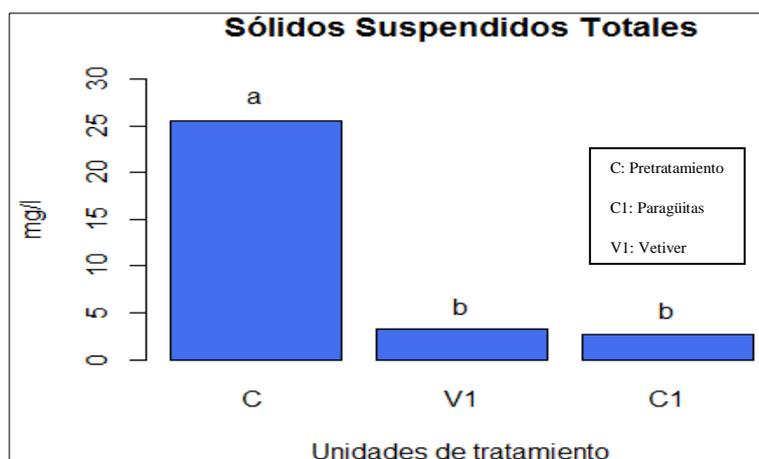


Figura 63. Análisis de significancia de niveles sólidos suspendidos totales

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas (P<0.05)

Parámetro biológico

Coliformes fecales

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Celda

	diff	lwr	upr	p adj
C1-C	-6988608.3	-8953081	-5024136	0.0000001
V1-C	-6388987.5	-8353460	-4424515	0.0000002
V1-C1	599620.8	-1364852	2564093	0.7239243

PERIODO

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	-1654231	-2976712	-331749.1	0.0167881

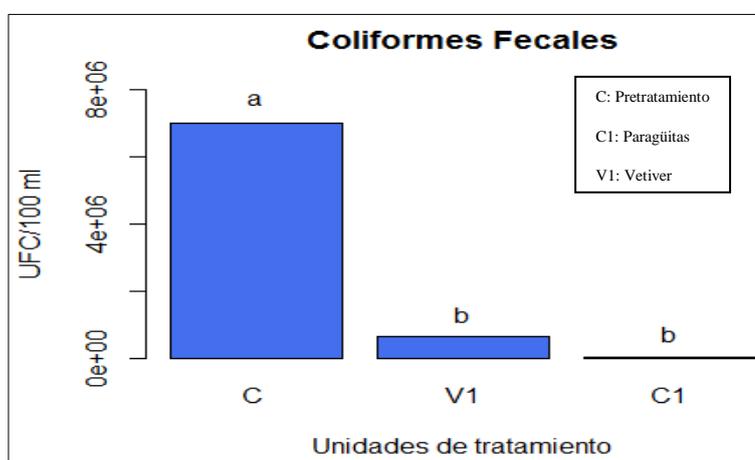


Figura 64. Análisis de significancia de niveles coliformes fecales

Valores con diferentes letras indicaron diferencias estadísticas (P<0.05)

ANEXO 7: Galería fotográfica



Anexo 7.1 Puesta en marcha de la planta



Anexo 7.2 Plantación de Paragüitas y Vetiver



Anexo 7.3 Vista del sistema pretratamiento y humedales artificiales



Anexo 7.4 Vertimiento del trazador en cisterna con agua residual pretratada



Anexo 7.5 Bombeo del trazador en los humedales



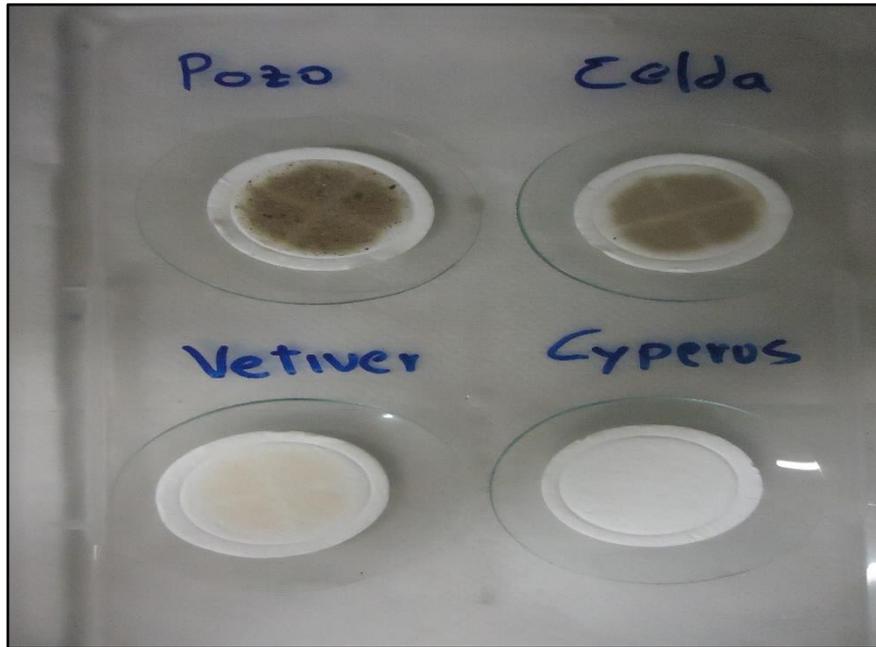
Anexo 7.6 Salida del trazador de los humedales



Anexo 7.7 Medición de parámetros de campo



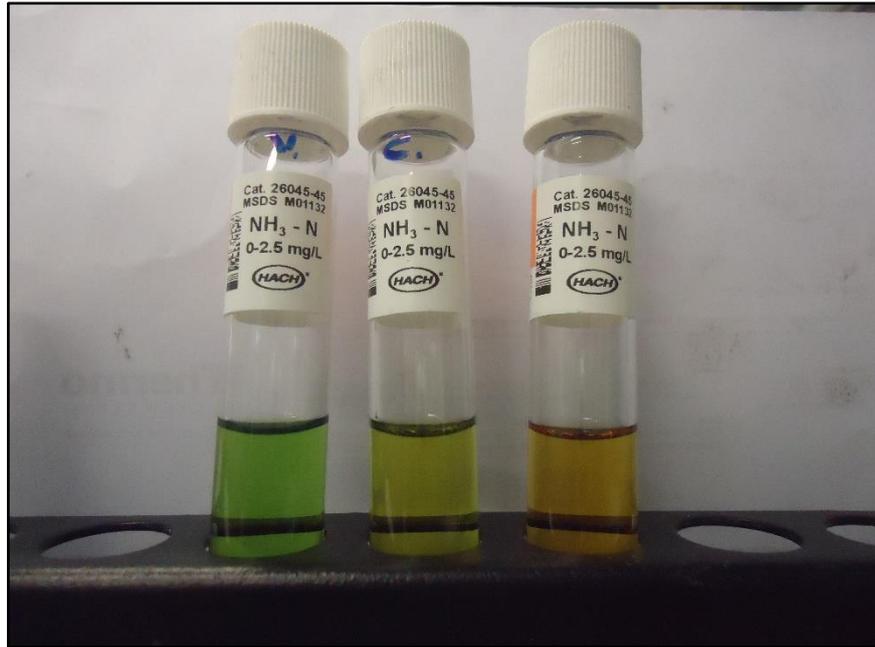
Anexo 7.8 Vista de Turbidez de muestras recolectadas



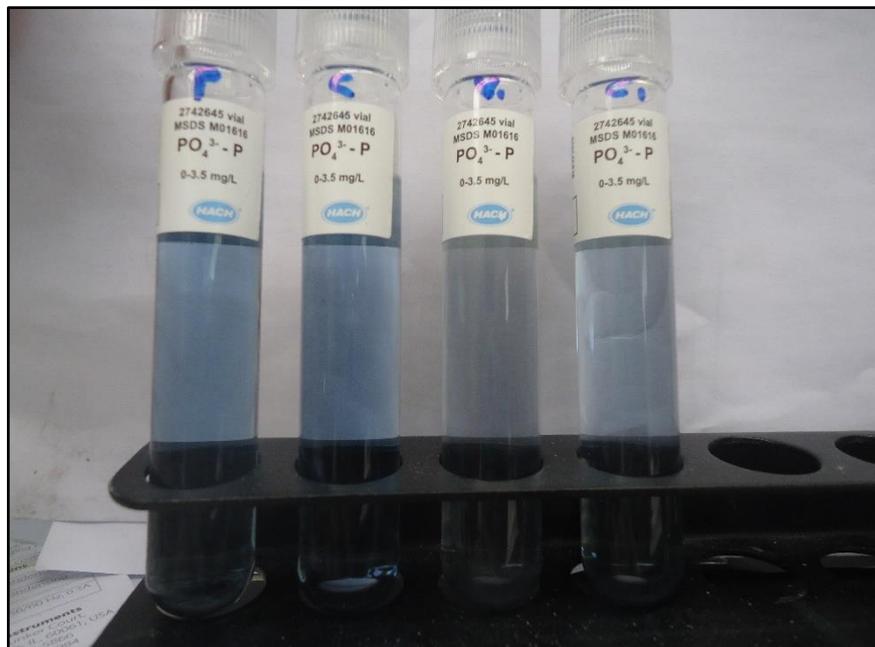
Anexo 7.9 Medición de Sólidos totales disueltos



Anexo 7.10 Medición de nitrógeno total



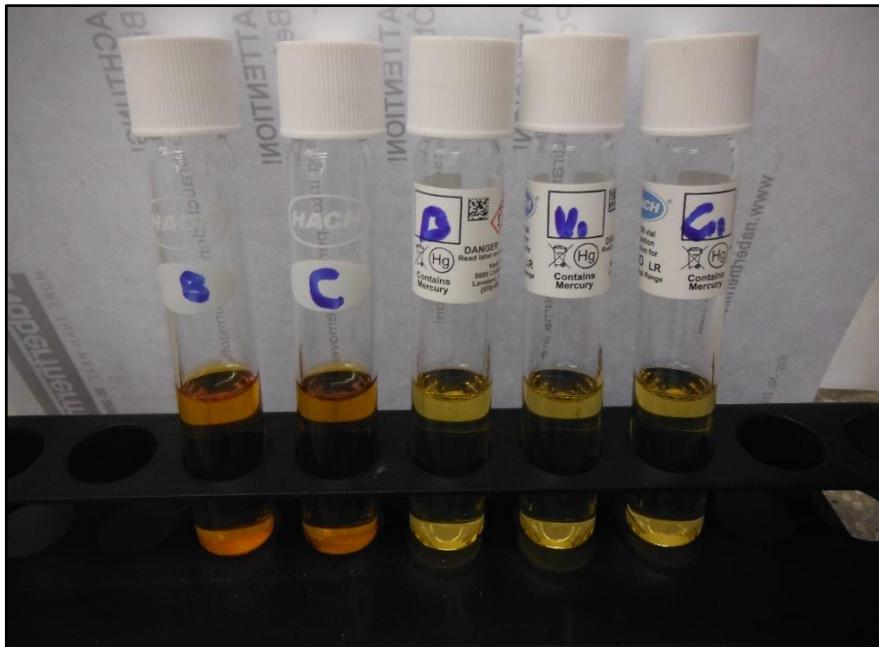
Anexo 7.11 Medición de Nitrógeno amoniacal



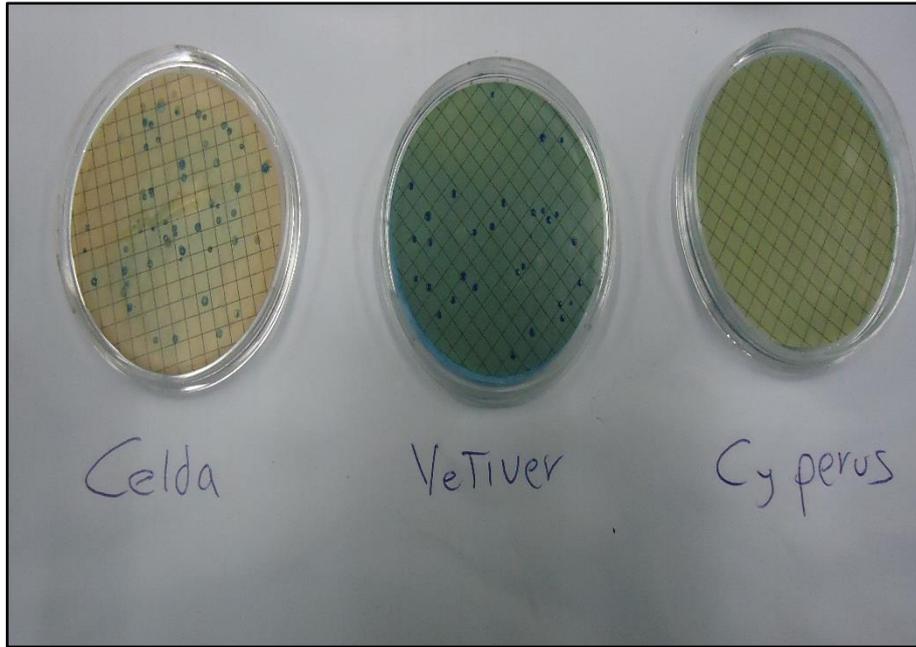
Anexo 7.12 Medición de Fósforo total



Anexo 7.13 Medición de DBO



Anexo 7.14 Medición de DQO



Anexo 7.15 Resultados de Coliformes fecales



Anexo 7.16 Vista de tallo, flor y hoja del Paragiitas



Anexo 7.17 Vista de tallo, flor y hoja del Vetiver

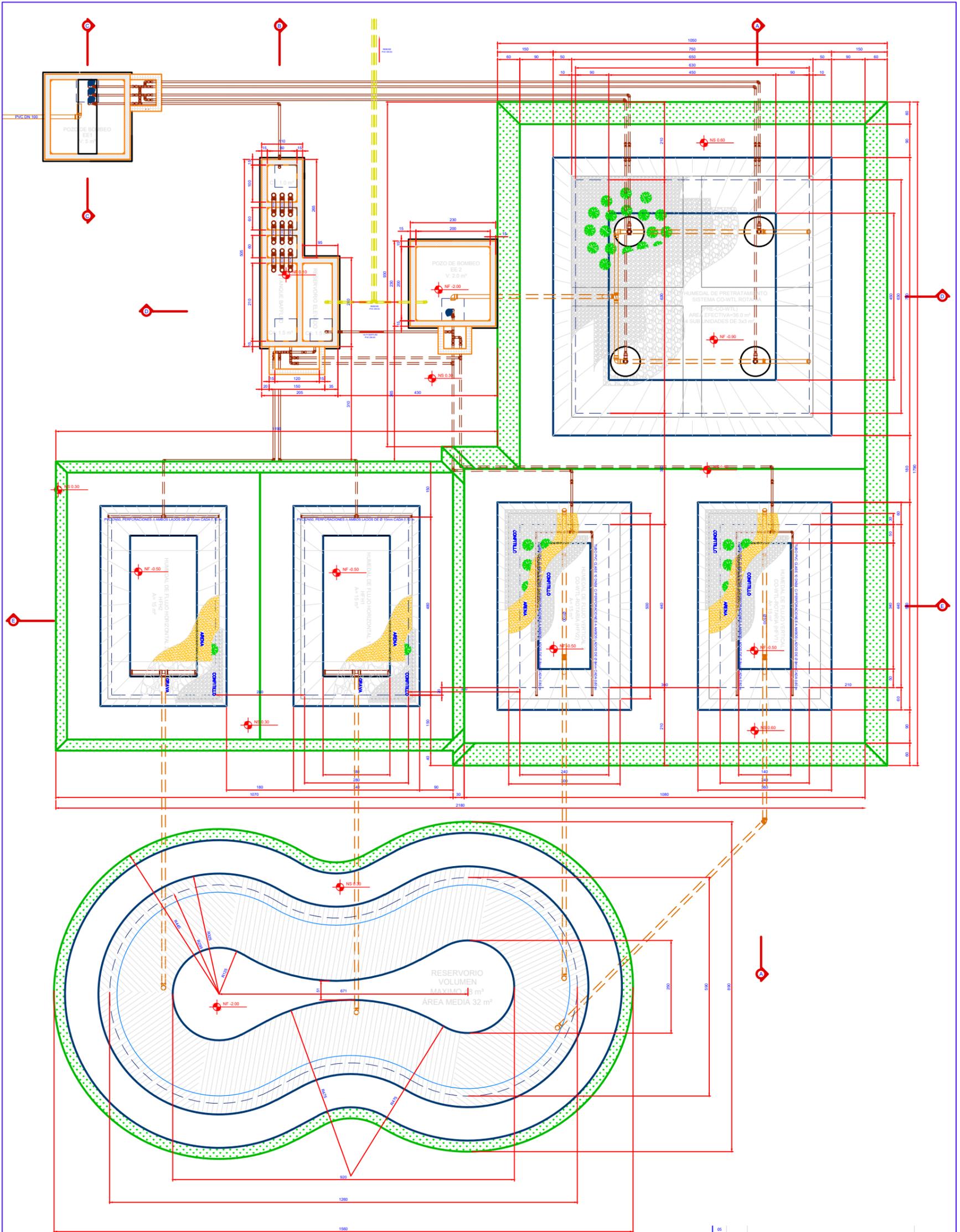


Anexo 7.18 Corte para el análisis de rendimiento de biomasa



Anexo7.19 Desarrollo de las plantas después del corte de mantenimiento

**ANEXO 8: Planos de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la
UNALM**



1 VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:50

05			
04			
03			
02			
01			
Nº	FECHA	TITULO/DESCRIPCION	RESPONSABLES
REVISIONES			
ELABORADO POR: [Signature] REVISADO POR: [Signature]			
ROTARIA DEL PERU			
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA			
CENTRAR			
HUNDEJO	LA MOLINA	PROYECTO	PLANTAS DE TRATAMIENTO PARA INVESTIGACION
ESCALA	INDICADA	TITULO	SISTEMA 1: CO-WTL ROTARIA
SERVIO	BUR	SISTEMA 2:	TANQUE BAFLEADO SIGUIENDO DE HUMEDAL DE FLUJO HORIZONTAL
			VISTA DE PLANTA
FECHA	DEC 2011	HORA	01/03

