

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



SEP

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA **DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

“EVALUACIÓN DEL USO DE VEGETACIÓN ORNAMENTAL Y SUSTRATOS EN
LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE
HUMEDALES INGENIERILES EN ZONAS TROPICALES”

PRESENTA
LUIS CARLOS SANDOVAL HERAZO

DIRECTOR:
DR. ALEJANDRO ALVARADO

CODIRECTOR
DR. JOSÉ LUIS MARÍN MUÑIZ

ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

FEBRERO 2020

“Lo que un hombre piensa de sí mismo,
esto es lo que determina, o más bien
indica, su destino”

Henry David Thoreau

Dedicatoria

A mi madre Belcy,

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor.

A mi padre Luis R,

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha influido siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A mi hermana Maye,

Por ser esa mujer incansable e incondicional y darme ejemplo de luchar por lo que queremos.

A mi hermano Elber,

Por las buenas energías y apoyo en la realización de los esquemas ingenieriles para este documento.

Agradecimientos

A Dios, sin él nunca hubiera podido llegar hasta este momento tan importante en mi vida. A mis padres, a mi hermana Maye, por sus energías, comprensión y apoyo incondicional en los buenos y no tan buenos momentos que se presentaron durante este proceso.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada para realizar los estudios de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.

A Instituto Tecnológico de Orizaba por darme la oportunidad de recibir tan alta formación y permitirme desarrollarme con un potencial investigador de las ciencias e ingeniería del agua.

A mi director de Tesis, el Dr. Alejandro Alvarado Lassman por su entrañable e infatigable apoyo, guía, amistad y confianza; por su entusiasmo, observaciones, aportes al tema e indudable paciencia.

A mi codirector, el Dr. José Luis Marín Muñoz, quien siempre confió en mí aún en los momentos más difíciles de este proceso; sin su apoyo no sería quien soy, gracias por creer en mí y apostar por hacerme un investigador ético y comprometido con la sustentabilidad.

A los honorables miembros de mi comité doctoral, Dr. Alberto Alfonso Aguilar Lasserre, Dr. Juan Manuel Méndez Contreras, Dr. Albino Martínez Sibaja, por sus aportes asertivos al trabajo de investigación.

A el Dr. Mauricio Romero Montoya, coordinadora del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, por todo el apoyo administrativo en este proceso.

A mis estudiantes del Sabatino del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, por su incondicional apoyo en la recolección de sustratos y plantas, sin ustedes esto no sería posible.

A mi equipo de investigación, M.I.I. Graciela Nani, Ing. Saúl Rivera, M.I.I. Jesús Castellanos del Instituto Tecnológico Superior de Misantla.

INDICE

	PAGINA
RESUMEN	7
CAPÍTULO I. GENERALIDADES	9
1.1. Introducción.....	9
1.2. Estructura de la tesis	11
1.3. Planteamiento del problema	15
1.4. Justificación	16
1.5. Objetivos.....	18
1.5.1 El objetivo general	18
1.5.2 Los objetivos	18
1.6. Hipótesis	19
Conclusiones.....	19
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	21
2.1. Disponibilidad y calidad de agua en el mundo.....	21
2.2. Características de aguas residuales domesticas	22
2.3. Contaminación de aguas en méxico	24
2.3.1. Tipos de tratamiento de aguas residuales domesticas	27
2.3.2. Sistemas de tratamiento terciario.	30
2.4. Humedales artificiales /construidos o ingenieriles	32
2.4.1. Tipos de humedales construidos o ingenieriles.....	33
2.4.1.1. Humedales de flujo horizontal superficial y sub-superficial.....	33
2.4.1.2. Humedales de flujo vertical.	34
2.4.2. Componente de un humedal ingenieril	34
2.4.2.1. Sustrato.....	34
2.4.2.2. Microorganismos.....	36
2.4.2.3. Vegetación.....	37
2.5. Eliminación de contaminantes en humedales ingenieriles	40
2.5.1. Criterios de diseño de humedales ingenieriles	41
2.6. Humedales ingenieriles versus sistemas convencionales	42

Conclusiones.....	44
CAPITULO III. ESTADO DEL ARTE	45
3.1. Introducción.....	45
3.2. Contaminación en aguas residuales.....	45
3.3. Tratamiento de aguas residuales con humedales ingenieriles	47
3.3.1 Estado actual de los humedales ingenieriles	48
3.4. Sustratos empleados en humedales ingenieriles de flujo.....	50
3.4.1 Clasificación y selección de sustratos	51
3.4.2 Sustratos convencionales	52
3.4.3 Sustratos emergentes	57
3.5. Vegetación utilizada en humedales ingenieriles.....	58
3.5.1. Resistencia a contaminantes.....	61
3.5.2. Capacidad de remoción	62
3.6. Conocimiento actual sobre el uso de plantas ornamentales en humedales ingenieriles	62
3.6.1 Macrófitas ornamentales en humedales ingenieriles.....	63
3.6.2 Plantas ornamentales terrestres de interés comercial en humedales ingenieriles	63
3.7 Nuevos desarrollos en humedales ingenieriles	65
Conclusiones.....	67
Estructura general de la metodología desarrollada en esta investigación.....	68
CAPÍTULO IV. ESTUDIO DE HUMEDALES INGENIERILES A NIVEL	
MICROCOSMOS CON PLANTAS ORNAMENTALES Y SUSTRATOS	
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS ..	69
4.1. Introducción.....	69
4.2. Materiales y métodos.....	69
4.2.1. Descripción de la zona de estudio	69
4.2.2. Descripción de sistemas a nivel microcosmo.....	70
4.2.2.1 Suministro de agua.....	71
4.2.2.2 Vegetación empleada:	74
4.2.2.3 Suministro de agua al sistema	75
4.2.3. Monitoreo del sistema a nivel microcosmos.....	76

4.2.3.1. Muestreo y análisis.....	76
4.2.3.2. Temperatura ambiente.....	76
4.2.3.3. Intensidad de la luz.....	76
4.2.3.4. Crecimiento de la vegetación.....	76
4.2.3.5. pH - Sólidos Disueltos Totales (STD) – Conectividad electrónica (EC) – Temperatura del agua en el influente y efluente de los sistemas	76
4.2.3.6. Métodos de análisis	77
4.2.4 Análisis de datos	77
4.2.4.1. Diseño experimental y análisis estadístico.....	77
4.3. Resultados y Discusiones	78
4.3.1. Datos ambientales	78
4.3.1.1. Temperatura e intensidad de luz	78
4.3.2. Crecimiento de plantas	79
4.3.3. Producción de flores.....	81
4.3.4. pH en la entrada y salidas del sistema.....	82
4.3.5. Temperatura, conductividad eléctrica y concentraciones de sólidos disueltos totales en la entrada y salida del sistema.....	85
4.3.5.1. Temperatura	85
4.3.5.2. Sólidos disueltos.....	86
4.3.5.3. Conductividad eléctrica.....	86
4.3.6. Concentraciones de contaminantes	87
4.3.6.1. DBO ₅ en la entrada y salida del sistema.....	87
4.3.6.2. P-PO ₄ en la entrada y salida del sistema	90
4.3.6.3. N-NO ₃ en la entrada y salida del sistema	92
4.3.6.4. Coliformes fecales en la entrada y salida del sistema	94
4.3.7. Remoción de contaminantes y patógenos en HI, alimentados con aguas residuales domesticas	96
Conclusiones.....	102

CAPÍTULO V. ESTUDIO DE HUMEDALES DOMICILIARIOS SEMBRADOS CON POLICULTIVOS DE PLANTAS ORNAMENTAS Y

SUSTRATOS DE PET Y PIEDRA POROSA DE RIO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	105
5.1. Introducción.....	105
5.2. Materiales y métodos.....	107
5.2.1. Área de estudio.....	107
5.2.2. Características del sistema de Humedales Construidos (CWs).....	107
5.2.3. Diseño experimental.....	110
5.2.4. Muestreo y análisis.....	110
5.2.5. Análisis estadístico.....	110
5.3 Resultados y discusiones	111
5.3.1 Parámetros de Control.....	111
5.3.1.1. Parámetros de Control.....	111
5.3.2. Crecimiento de plantas y producción de flores	113
5.3.2.1. Alpina purpurata.....	113
5.3.2.2. Ginger shampoo	114
5.3.2.3. Canna hydrids.....	115
5.3.3. Concentración de contaminantes en influente y efluentes en CWs	117
5.3.3.1. DQO, DBO5 y P-PO4 en el influente y efluentes de CWs	117
5.3.3.2. N-NH4, N-NO3 y N-NO2 en el influente y efluentes de CWs.....	119
5.3.4. Remoción de contaminantes en mescosmos CWs	120
5.3.4.1. Demanda Bioquímica del Oxígeno/Demanda química de Oxígeno	120
5.3.4.2. Fosfato (P-PO4)	122
5.3.4.3. Amonio (N-NH4).....	123
5.3.4.4. Nitratos (N-NO3)	124
5.3.4.5. Nitritos (N-NO2).....	124
Conclusiones.....	125
CAPÍTULO VI. ESTUDIO DE HUMEDALES COMUNITARIOS SEMBRADOS CON POLICULTIVOS DE PLANTAS ORNAMENTALES Y SUSTRATO DE PARA EL TRATAMIENTO DEL 100% DE LAS AGUAS	

RESIDUALES DOMÉSTICAS DE PASTORÍAS, ACTOPAN, VERACRUZ

.....	126
6.1 Introducción.....	126
6.2 Materiales y métodos.....	128
6.2.1 Estudios preliminares para el diseño del Humedal Comunitario.....	128
6.2.2 Características específicas del sistema.....	130
6.2.3 Muestreo y análisis físico-químicos.....	134
6.2.4 Temperatura Ambiente - Humedal.....	134
6.2.5 Intensidad de luz.....	134
6.2.6 pH- Sólidos Disueltos Totales (STD) – Conectividad eléctrica (EC).....	135
6.2.7 Análisis de laboratorio.....	135
6.2.8 Diseño experimental y análisis estadístico.....	135
6.3. Resultados de los estudios y análisis.....	136
6.3.1. Datos ambientales temperatura, humedad y intensidad de luz.....	136
6.3.4. pH en la entrada y salida del sistema.....	138
6.3.4.1. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para pH.....	138
6.3.4.2. Análisis de varianza (ANOVA) simple del factor mes.....	139
6.3.4.3. Prueba de Kruskal-Wallis.....	140
6.3.4.4. Prueba de Kruskal-Wallis para pH.....	140
6.3.5. Conductividad eléctrica entrada y salida del sistema.....	141
6.3.5.1. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la conductividad eléctrica (CE).	141
6.3.5.2. Prueba de Tukey.....	142
6.3.6. Sólidos disueltos totales en la entrada y salida del sistema.....	144
6.3.6.1. Análisis de varianza (ANOVA) simple del factor mes.....	144
6.3.6.2. Prueba de Kruskal-Wallis.....	145
6.3.6.3. Análisis de varianza (ANOVA) simple de los tratamientos.....	146
6.3.6.4. Prueba de Tukey.....	146
6.4. Concentraciones de contaminantes.....	148
6.4.1. DQO en la entrada y salida del sistema.....	148
6.4.1.1. Análisis estadístico de la demanda química de oxígeno.....	148

6.4.1.2. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la demanda química de oxígeno (COD).....	148
6.4.1.3. Prueba de Tukey.....	149
6.4.2. DBO ₅ en la entrada y salida del sistema	151
6.4.2.1. Análisis estadístico de la demanda bioquímica de oxígeno	151
6.4.2.2. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	151
6.4.2.3. Prueba de Tukey.....	152
6.4.3. NT en la entrada y salida del sistema	154
6.4.3.1. Análisis estadístico de la concentración de nitrógeno total (tn).....	154
6.4.3.2. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la concentración de nitrógeno total (N).	154
6.4.3.3. Análisis de varianza (ANOVA) simple del factor mes	155
6.4.3.4. Prueba de Tukey.....	155
6.4.4 PT en la entrada y salida del sistema	157
6.4.4.1. Análisis estadístico de la concentración de fosforo total	157
6.4.4.2. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la concentración de fosforo total (TP).	158
6.4.4.3. Análisis de varianza (ANOVA) simple del factor mes	158
6.4.4.4. Prueba de Tukey.....	159
6.4.5. SST en la entrada y salida del sistema	161
6.4.5.1. Análisis estadístico de la concentración de solidos totales suspendidos.....	161
6.4.5.2. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la concentración de solidos totales suspendidos (TSS).....	161
6.4.5.3. Análisis de varianza (ANOVA) simple del factor mes	162
6.4.5.4. Prueba de Tukey.....	162
6.5 Discusiones de eliminación de contaminantes	164
Conclusiones.....	167
CAPÍTULO VII. Viabilidad económica del uso de humedales Ingenieriles con participación comunitaria.	169
7.1 Introducción.....	169

7.2 Materiales y métodos.....	169
7.3 Metodología.....	172
7.4 Resultados.....	173
7.4.1. Inversión inicial	173
7.3.2. Capital de trabajo.....	173
7.3.3. Financiamiento	174
7.3.4. Ingresos, Costos y Gastos.....	174
7.3.5. Depreciaciones y amortizaciones	176
7.3.6. Método de depreciación en línea recta	177
7.3.7. Costos Variables y Costos Fijos	177
7.3.8. Punto de equilibrio	178
7.3.9. Estado de resultados	179
7.3.10. Flujo de efectivo	179
7.3.11. TIR, VAR y PRD	180
7.5 Conclusiones.....	182
CAPITULO VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	184
8.1. Conclusiones y recomendaciones.....	184
Productividad.....	186
BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO I.....	196
BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO II.....	200
BIBLIOGRAFÍA CAPITULO III	207
BIBLIOGRAFÍA CAPITULO IV	229
BIBLIOGRAFÍA CAPITULO V	237
BIBLIOGRAFÍA CAPITULO VI.....	247
BIBLIOGRAFÍA CAPITULO VII.....	251
ANEXOS	254

ÍNDICE DE FIGURAS

	PAGINA
Figura 2.1. Uso del agua dulce	21
Figura 2.2. Estimación de agua sin tratar a 2030.....	22
Figura 2.3 Flujo de agua residual	24
Figura 2.4 Agua Mexicana disponible.....	25
Figura 3.1 Estructura de un HI	47
Figura 3.2. Tipo de vegetación empleada en humedales	58
Figura 4.1 Ubicación geográfica del Municipio de Misantla	69
Figura 4.2 Microcosmos de humedales ingenieriles	70
Figura 4.3 Zonas rugosas de PET.....	71
Figura 4.4 (a) Piedra porosa de río y (b) Grava volcánica roja	71
Figura 4.5. Temperatura ambiental registrada entre 9-10 h y 14-15 h del día durante el período del experimento.	78
Figura 4.6. Intensidad de la luz registrada entre las 9-10 h y las 14-15 h del día durante el período experimental. Las barras verticales representan el error estándar de la media.	79
Figura 4.7 Tasa de crecimiento L (Lavándula sp); SW (S. wallisii), AS (Anturiun sp); ZA (Z. aethiopica) en tres diferentes sustratos.	80
Figura 4.8 pH de influente y efluente en sustrato de GVR	83
Figura 4.9 pH de influente y efluente en sustrato de PPR.....	83
Figura 4.10 pH de influente y efluente en sustrato de PET.....	84
Figura 4.11 Concentraciones de contaminantes DBO ₅ en sustrato GVR.....	88
Figura 4.12 Concentraciones de contaminantes DBO ₅ en sustrato PPR	89
Figura 4.13 Concentraciones de contaminantes DBO ₅ en sustrato PET	90
Figura 4.14 Concentraciones de contaminantes P-PO ₄ en sustrato de GVR.....	91
Figura 4.15 Concentraciones de contaminantes P-PO ₄ en sustrato de PPR	91
Figura 4.16 Concentraciones de contaminantes P-PO ₄ en sustrato de PET	92
Figura 4.17 Concentraciones de contaminantes N-NO ₃ en sustrato de GVR	93
Figura 4.18 Concentraciones de contaminantes N-NO ₃ en sustrato de PPR.....	94
Figura 4.19 Concentraciones de contaminantes N-NO ₃ en sustrato de PET.....	94

Figura 4.20 Concentración de contaminantes en influentes y efluentes CF en sustrato VRG, PPR y PET.....	95
Figura 4.21 Remoción de contaminantes y patógenos en HI. Coliformes fecales (CF), demanda bioquímica de oxígeno (BQO5), fosfato (P-PO4) y Nitratos (N-NO3).....	100
Figura 5.1. Configuración de Mesocosmos de CWs.....	108
Figura 5.2. Crecimiento de plantas en CWs den dos sustratos (PET y PPR).....	115
Figura 5.3. Intesidad de luz durante el estudio en tres horarios	116
Figura 5.4. Concentración de Contaminantes DQO, DBO ₅ y P-PO ₄ en efluente e influente en sustratos de PET y PPR.	118
Figura 5.6. Remcoion de contamiantes en CWs.....	123
Figura 6.1 Esquema del humedal comunitario de flujo subsuperficial horizontal utilizado en el estudio.....	130
Figura 6.2 Arreglo de plantas en humedal comunitario (A) Typha spp, (B) Canna hybrids, (C) Spathiphyllum blandum, (D) Anthurium spp y (E) Policultivos.	133
Figura 6.3. Temperatura ambiental y humedad durante el periodo de estudio	137
Figura 6.4. Intensida de luz a la que se vio expuesto el experimento	137
Figura 6.5 Comportamiento del pH durante el estudio en la entrada y salida de los sistemas.	139
Figura 6.6. Analisis de Medias de pH en en los sistemas	141
Figura 6.8. Diagrama de casa de CE	143
Figura 6.9. Comportamiento de SDT en la entrada y salida del sistema.....	144
Figura 6.9. Gráfico de Caja y Bigotes para TDS en cada uno de los meses.	145
Figura 6.10. Gráfico de Caja y Bigotes para TDS en cada uno de los trataminetos.	147
Figura 6.11. Concentraciones de entrada y salida de DQO en los sistemas.....	149
Figura 6.12. Diagrama de cajas de DQO.....	150
Figura 6.13. Conctraciones en a netrada y slida de DBO ₅	152
Figura 6.14. Analisis de caja de DBO ₅	153
Figura 6.15. Concentración de nitrógeno total (N) (entrada) y exportación (salida) del humedal construido de cada una de las especies estudiadas.	155
Figura 6.16. Analisis de caja de NT	157
Figura 6.17. Concentraciones de PT en la entrada y salidas de los sistemas	158

Figura 6.18. Analisis de caja de PT	160
Figura 6.19. Concentraciones de entrada y saldad de sistemas SST	162
Figura 6.20. Diagram de casajas para SST	164
Figura 7.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio, localidad de Pastorías en el municipio de Actopan en el estado de Veracruz.....	170

ÍNDICE DE TABLAS

	PAGINA
Tabla 1.1. Esquema de la estructura de la tesis y conexiones lógicas entre capítulo	13
Tabla 2.1 Principales constituyentes de aguas residuales domesticas.....	23
Tabla 2.2. Calidad nacional del agua en México.....	26
Tabla 2.3. Sustratos seleccionados comúnmente para el tratamiento de aguas residuales en HI.....	35
Tabla 2.4. Especies y asociaciones dominantes en humedales	38
Tabla 3.1 Tipos de sustratos utilizados y su eficiencia en la elimianición de contaminantes específicos en HI	52
Tabla 3.2 Porosidad de sustratos empleados en humedales	56
Tabla 2.3 Principales funciones de la vegetación en los humedales ingenieriles en el tratamiento de aguas residuales.....	59
Tabla 3.3 Vegetación utilizada en humedales ingenieriles.....	60
Tabla 3.4 Remoción de contaminantes de acuerdo al tipo de vegetación	64
Tabla 4.1 Porcentaje de agua suministrada a los microcosmos.....	75
Tabla 4.2 Técnicas empleadas para los análisis de agua	77
Tabla 4.3 producción de flores	81
Tabla 4.4 Parámetros químicos a la entrada y salida de microcosmos de humedales.....	85
Tabla 4.5 Comparación de medios de soporte de HI y eliminaciones	101
Tabla 5.1. Sembrado y densidad de planta por celdas.....	109
Tabla 5.2. WATER QUALITY PARAMETERS IN INFLUENT AND ENFLUENT AND MEAN REMOVAL PERCENTAGES IN MICROCOSMS	112
Tabla 6.1 Características del agua residual generada.....	129
Tabla 6.2. Parámetros analizados en laboratorio.....	135
Tabla 6.5. ANOVA para para pH por mes.	139
Tabla 6.6. Prueba de Kruskal-Wallis.....	140
Tabla 6.7. Prueba de Kruskal-Wallis para pH.....	140
Tabla 6.8. ANOVA.....	142
Tabla 6.9. Medias de CE y analisis de grupos homegenios.....	143

Tabla 6.10. Diferencias estadísticas entre tratamientos de CE.....	143
Tabla 6.11. ANOVA para TDS por Mes.....	145
Tabla 6.12. Prueba de Kruskal-Wallis.....	145
Tabla 6.13. Prueba de Tukey en SDT por tratamiento.....	146
Tabla 6.14. Medias de CE y análisis de grupos homogéneos.....	147
Tabla 6.15. Resumen de resultados de la prueba de Tukey para SDT.....	147
Tabla 6.16. Prueba de Tukey para DQO.....	149
Tabla 6.17. Diferencias significativas entre tratamientos.....	150
Tabla 6.18. Resultados general de la prueba de Tukey.....	151
Tabla 6.19. Datos de los valores de las variables en el parámetro DBO ₅	152
Tabla 6.20. Diferencias significativas de todo el estudio DBO ₅	153
Tabla 6.21. Prueba de Tukey para datos de DBO ₅	153
Tabla 6.22. ANOVA para N por Mes.....	155
Tabla 6.23. Significancia de medias para DBO ₅	156
Tabla 6.24. Grupos homogéneos para parámetro de NT.....	156
Tabla 6.25. Prueba de Tukey para NT.....	157
Tabla 6.25. ANOVA para TP por Mes.....	158
Tabla 6.26. Diferencias entre medias para PT.....	159
Tabla 6.26. Grupos homogéneos análisis PT.....	160
6.27. Prueba de Dunnett para PT.....	160
Tabla 6.28. ANOVA para TSS por Mes.....	162
Tabla 6.29. Diferencias significativas entre medias para SST.....	163
Tabla 6.30. Grupos homogéneos para tratamientos SST.....	163
Tabla 6.31. Prueba de Tukey para SST.....	164
Tabla 6.32. Concentraciones y eliminación de contaminantes en humedales comunitarios	165
Tabla 7.1 Inversión inicial.....	174
Tabla 7.2 Ingresos.....	175
Tabla 7.3 Costo de materia prima.....	175
Tabla 7.4 Costo de insumos.....	175
Tabla 7.5 Costo de mano de obra.....	176
Tabla 7.6 Costo fijos.....	176

Tabla 7.7 Depreciaciones de los activos.....	176
Tabla 7.8 Costos variables.....	177
Tabla 7.9 Costos fijos	178
Tabla 7.10 Punto de equilibrio	178
Tabla 7.11 Estado de resultados	179
Tabla 7.12 Flujo de efectivo.....	180
Tabla 7.12 Flujo de efectivo.....	181

RESUMEN

El agua es esencial para lograr el desarrollo sustentable de cualquier población. Este recurso es vital, sin embargo, el crecimiento poblacional y su uso desmedido han favorecido su contaminación y desabasto. La calidad de este recurso es una problemática, aún en comunidades rurales; donde la inexistencia de plantas de tratamiento de agua es una de las situaciones que aqueja a las comunidades. Por lo anterior, resulta importante tomar acciones encaminadas a tratar aguas residuales y solventar la falta de recursos económicos para su tratamiento o la implementación de biotecnologías ecológicas y económicamente viables que contribuyan a mejorar las condiciones de vida en sitios rurales con necesidad de agua y de autogeneración de recursos económicos. Por lo tanto, una propuesta aplicable en zonas rurales para mitigar el problema de la falta de tratamiento de aguas residuales encaminadas a su reutilización, es la construcción de un humedal habilitado con sustratos idóneos y plantas ornamentales, lo cual conlleva beneficios múltiples; en primer lugar se favorecerá la remoción de contaminantes en las aguas residuales; segundo, se aprovechará el sistema como zona de cultivos de plantas florales que puedan adaptarse a este tipo de condiciones, y además, se favorecerá la reutilización del agua para el riego de los cultivos de la zona, lo cual disminuirá la demanda de agua de primer uso. La producción de vegetación ornamental podría convertirse en una fuente de ingresos económicos para los encargados del cuidado y mantenimiento del humedal.

Lograr este proyecto involucró previamente estudios a nivel microcosmos que permitieron evaluar diseños experimentales para poder escalar la biotecnología a nivel comunitario en una población rural, este estudio se desarrolló en condiciones ambientales reales en la en dos zonas tropicales en el estado de Veracruz; Misantla (micromosmos) y la comunidad de Pastorías, Actopan, Veracruz (Mesocosmos y Humedales a escala real), población con problemas de contaminación de suelos por falta de un sistema para tratar sus aguas residuales, mismas que se depositan en una fosa séptica.

La metodología experimental involucró tres fases. La fase I realizada a escala piloto, en microcosmos, se utilizaron humedales ingenieriles subsuperficiales de flujo vertical donde se pusieron a prueba monocultivos de cuatro especies de plantas ornamentales, sembradas en tres tipos de sustratos y monitoreadas en diferentes temporadas climáticas. En la fase II se

experimentó con dos tipos de sustratos, PET y piedra porosa de río, en un sistema de humedales ingenieriles subsuperficiales de flujo horizontal, ahora a nivel macrocosmos, con policultivo de plantas ornamentales nativos de la zona de estudio. En la fase III se desarrolló un humedal comunitario a tamaño real con policultivo de plantas ornamentales típicas de la región y empleando PET como sustrato. Se logró tratar el 100 % de las aguas residuales provenientes de la comunidad de estudio.

Finalmente, se evaluó la producción de plantas ornamentales en los sistemas y su posible explotación como fuente económica y se comparó la eficiencia de las plantas de tratamiento convencionales versus la de humedales construidos comunitarios. Esta investigación, aporta nuevos conocimientos en materia de sustratos utilizados en humedales ingenieriles y marca un hito en materia de utilización de polímeros como medio de soporte, adicionalmente amplía el conocimiento básico sobre plantas ornamentales terrestres adaptadas a las condiciones de humedales ingenieriles y su funcionamiento tanto en monocultivos como en policultivos en los dos tipos de humedales.

CAPITULO I. GENERALIDADES

1.1. Introducción

En el mundo, el bienestar poblacional y una buena calidad de vida implican, entre otros factores, una alta producción de alimentos saludables, el desarrollo de avances tecnológicos, progresos científicos y recursos básicos como el agua en cantidades suficientes y de buena calidad (Wang et al., 2017). Sin embargo, el uso inadecuado, excesivo y desmedido de los recursos naturales, como es el agua para satisfacer diversas necesidades, al igual que no contar con sistemas de tratamiento de las mismas antes de ser vertidas a cielos abierto, subsuelo o a otras fuentes de agua como ríos o lagos, tiene como consecuencia la contaminación del ambiente, principalmente en comunidades donde la población crece de forma incontrolada (Ruelas & Martínez, 2013).

Lo anterior resulta ser un problema que día a día se acentúa en proporciones mayores, poniendo en riesgo el hábitat de los seres vivos del planeta. En materia de saneamiento, al año 2016, en México se cuenta con 2,477 plantas de tratamiento para descargas municipales y 2,832 plantas para aguas residuales industriales, las cuales solo tratan el 57 y 32.8%, respectivamente (CONAGUA, 2016). La falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales, se agudiza aún más en comunidades rurales pequeñas a causa de la escasa infraestructura de tratamiento. En México existen 47,233 comunidades rurales, en las cuales habitan menos de 2,500 habitantes y pocas veces son susceptibles de ser consideradas en la implementación de plantas de tratamiento debido a su dispersión geográfica y al alto costo de los sistemas convencionales. La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece en materia de saneamiento, que para el año 2010 todas las comunidades de más de 2,501 habitantes deberán contar con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), esto obliga a estas comunidades al tratamiento de sus aguas residuales (Zurita et al., 2011), dejando de lado a las comunidades de menos de 2,500 habitantes (Romero-Martínez et al., 2017). Tan solo en el estado de Veracruz, en comunidades rurales se encuentran radicados 3, 163,877 habitantes que corresponden al 39% de la población total (INEGI, 2015), los cuales, en su mayoría, no tratan sus aguas residuales.

Otro factor que contribuye a la contaminación por falta de tratamiento de aguas residuales, es la falta de presupuesto en los organismos operadores encargados del manejo de las aguas

residuales municipales, así como de la operación y mantenimiento de las plantas. Sin dejar de considerar el hecho de que el diseño y tipo de plantas formen parte de un paquete tecnológico que generalmente no está acorde a las condiciones climáticas, físicas, económicas y capacidades de las poblaciones que las requieren (Marín-Muñiz, 2017), además estos paquetes traen consigo inversiones que a largo plazo resultan poco eficaces y difíciles de sostener. El desarrollo e implementación de sistemas de tratamiento es una necesidad latente en las comunidades tanto urbanas como rurales que requieren inversiones de capital económico que superan los \$12 millones de pesos por sistema (Carrera, 2016)

Dado el alto déficit de tratamiento de aguas residuales municipales en pequeñas comunidades como las rurales, los sistemas alternativos como son los Humedales Ingenieriles (HI), estos resultan una propuesta viable para resolver la problemática de estas localidades (Duran-Domínguez et al., 2018; Elfanssi et al., 2018). Estos sistemas ingenieriles han sido empleados a nivel mundial para solucionar problemas de calidad del agua. Los HI simulan las funciones de los humedales naturales, los cuales han sido considerados como riñones del planeta por su capacidad de filtración de contaminantes (Mitch & Gosselink, 2015; Marín-Muñiz, 2017), su funcionalidad se debe a la interacción entre agua–substratos–plantas–microorganismos, que mediante procesos bioquímicos depuran contaminantes de las aguas residuales (Zheng et al., 2019; Aylward et al., 2019; Duran-Domínguez et al., 2018). A pesar de las bondades de los humedales Ingenieriles, han sido poco empleados en países en vías de desarrollo y en países intertropicales (García-García et al., 2016; Hernández, 2016; Hernández-Salazar et al., 2017). En cuanto a los componentes principales que integran los HI, los más usados como sustrato o medio de soporte de acuerdo a la revisión realizada por Yang et al. (2018), son grava, arena, arcilla, calcita, mármol, vermiculita, escoria, cenizas volantes, bentonita, dolomita, piedra caliza, concha, zeolita, wollastonita, carbón activado y agregados livianos (Yang et al., 2018) y las plantas más usadas son macrófitas típicas de humedales naturales como: *Phragmites* spp. (Poaceae), *Typha* spp. (Typhaceae), *Scirpus* spp. (Cyperaceae), *Iris* spp. (Iridaceae), *Juncus* spp. (Juncaceae) y *Eleocharis* spp. (Spikerush). Las plantas sumergidas frecuentemente utilizadas son *Hydrilla verticillata*, *Ceratophyllum demersum*, *Vallisneria natans*, *Myriophyllum verticillatum* y *Potamogeton crispus*, las plantas con hojas flotantes son principalmente *Nymphaea tetragona*, *Nymphoides peltata*, *Trapa bispinosa* y *Marsilea quadrifolia*, las plantas de flotación libre son *Eichhornia crassipes*, *Salvinia natans*,

Hydrocharis dubia y *Lemnaminor* (Vincent et al., 2018). En México también se han usado para estudios plantas que son típicas de humedales naturales, a pesar de que se cuenta con una variedad de especies que se desarrollan en zonas tropicales que comprenden plantas con flores de interés comercial y agradables a la vista (Carrera, 2016).

Diversos estudios han comprobado que los HI son una opción viable para el tratamiento de aguas residuales por su bajo costo de implementación, operación y fácil manejo en comunidades donde no existen plantas de tratamiento (Avellán & Gremillion, 2019; Masi et al., 2018), sin embargo, estos aún no contribuyen de manera significativa al tratamiento de aguas residuales (Sandoval-Herazo et al., 2018). Otra causa del escaso uso de HI en el tratamiento de agua es el desconocimiento y la inexistencia de diseños accesibles para los usuarios potenciales “Comunidades Rurales” (Pálffy et al., 2018; Avellán & Gremillon, 2019).

Dado lo anterior, en este estudio se evaluó el proceso de adaptación y remoción de contaminantes en celdas de HI sembrados con diferente tipo de vegetación ornamental y sustratos, con el fin de conocer el funcionamiento de la interacción planta-sustrato-agua, la influencia de los tipos de sustratos como la grava volcánica roja, piedra porosa de río y los residuos rugosos de plástico tereftalato de polietileno (PET, por sus siglas en inglés), en la remoción de contaminantes y usando diferentes plantas ornamentales como *Anthurium* sp, *Zantedeschia aethiopica*, *Lavandula* sp, *Spathiphyllum Wallisii*, *Zingiber Spectabile*, *Canna hybrid*, *Typha* spp y *Alpinia purpurata*. El estudio de tratamiento de aguas residuales domésticas se usó tanto a nivel microcosmos, macrocosmos y comunitario teniendo en cuenta en la experimentación, la temporalidad climática.

La propuesta de tratamiento de aguas residuales en HI se desarrolló como caso de estudio en la comunidad rural de Pastorías, Actopan, Veracruz.

1.2. Estructura de la tesis

La presente investigación nos muestra la evaluación de diferentes sistemas de humedales Ingenieriles, a nivel microcosmo, macrocosmos y comunitario, como procesos ambientales de tratamiento de aguas residuales utilizando plantas ornamentales terrestres y sustratos

típicos de la zona de estudio. Esta tesis está integrada por cinco secciones conformadas por siete capítulos.

La primera sección: Aspectos fundamentales de la investigación, está conformada por Capítulo I: Generalidades. Se plantea de forma general la investigación. Se expone el planteamiento del problema referente a la falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales. La justificación, que muestra la necesidad de abordar el tratamiento de aguas residuales rurales desde una perspectiva económico y ecológicamente viable. El objetivo general y los específicos que se abordaron en la investigación, y finalmente, la hipótesis que se planteó en torno al uso de sustratos, plantas ornamentales terrestres y el efecto de las temporadas climáticas.

La segunda sección de este trabajo de investigación está conformada por los Capítulos II: Marco teórico, Capítulo III: Estado del arte y Capítulo IV: Metodología de la investigación.

Capítulo II: Marco teórico, se explican los elementos conceptuales de humedales Ingenieriles, tratamientos de aguas residuales, entre otros aspectos fundamentales para desarrollar los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante HI.

Capítulo III: Estado del arte, donde se presentan los aportes al conocimiento de las investigaciones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales mediante humedales Ingenieriles, sembrados con plantas ornamentales y sustratos empleados para tal fin, a nivel microcosmo, macrocosmos y comunitario.

Capítulo IV: Metodología de la investigación, se presentan las actividades realizadas en el desarrollo de investigación mediante cuatro fases; Fase I: Microcosmos con monocultivos de plantas ornamentales; Fase II: Macrocosmos con siembra de policultivos de plantas ornamentales; Fase III: Humedal comunitario con humedales sembrados con diferentes especies de plantas ornamentales y Fase IV: Viabilidad económica resultante de la comparación del uso de humedales comunitarios y los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales en las comunidades rurales.

La tercera sección: resultados y discusiones del trabajo de investigación, está conformado por el Capítulo V: Tratamiento de aguas residuales en humedales Ingenieriles sembrados con

plantas ornamentales. En la fase I, los resultados y discusiones de la remoción de contaminantes y adaptación de microcosmos del HI, con sembrado un individuo de plantas ornamentales en tres diferentes sustratos alimentados con aguas residuales. Fase II, muestra los resultados y discusiones de macrocosmos de humedales sembrados con policultivo de plantas ornamentales en diferentes sustratos y con diferente cantidad de vegetación. Fase III se muestran los resultados y discusiones del humedal comunitario construido para el tratamiento del 100% de las aguas residuales domésticas de la comunidad de Pastorías, Actopan. Fase IV los resultados y discusiones de la viabilidad económica de los humedales Ingenieriles en comunidades rurales.

La cuarta sección: está integrada por el Capítulo VI: de conclusiones y recomendaciones que se logran con el desarrollo de la investigación, así como con las principales aportaciones finalizando con las referencias bibliográficas.

La quinta sección: está integrada por el capítulo VII, que a su vez contiene los apartados: Anexos fase I (fotografías, diseños); Anexos fase II (fotografías, diseños); Anexos fase III (diseños, presupuesto Fotografías); Anexos Etapa IV (encuestas, fotografías).

Tabla 1.1. Esquema de la estructura de la tesis y conexiones lógicas entre capítulo

Sección I:	Capítulo I – Generalidades
Aspectos fundamentales de la investigación	Introducción Planteamiento del problema Estructura de la tesis Justificación Objetivos Hipótesis

Sección II:	Capítulo II – Marco teórico
- Fundamento teórico	Capítulo III - Estado del arte
- Estado del arte	
- Descripción de la metodología y integración de resultados.	Estructura General de la Metodología desarrollada en esta investigación
Sección III:	Capítulo IV – Estudio de Humedales Ingenieriles a nivel Microcosmos con plantas ornamentales y diferentes sustratos para el tratamiento de aguas residuales domesticas
- Etapa I: Estudio de Humedales Ingenieriles a nivel Microcosmos con plantas ornamentales y sustratos para el tratamiento de aguas residuales domesticas	
- Etapa II: Macrocosmos de humedales Ingenieriles sembrados con policultivos de plantas ornamentales	Capítulo V – Estudio de humedales domiciliarios sembrados con policultivos de plantas ornamentas y sustratos de PET y piedra porosa de rio para el tratamiento de aguas residuales domesticas
- Etapa III: Estudio de Humedales comunitarios sembrados con policultivos de plantas ornamentales y sustrato de PET para el tratamiento del 100% de las aguas residuales domesticas de Pastorías, Actopan, Veracruz	
- Etapa IV: Vialidad económica del uso de humedales comunitarios en comunidades rurales a comparación con sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales	Capítulo VI – Estudio de Humedales comunitarios sembrados con policultivos de plantas ornamentales y sustrato de PET para el tratamiento del 100% de las aguas residuales domesticas de Pastorías, Actopan, Veracruz
	Capítulo VII – Vialidad económica del uso de humedales comunitarios en comunidades rurales a comparación con sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales
Sección IV:	Capítulo VIII – Conclusiones y recomendaciones
- Conclusiones	Conclusiones
- Recomendaciones	Recomendaciones
- Aportes al conocimiento	Aportes al conocimiento
- Productos derivados de la Tesis	Productos derivados de la Tesis
	Referencias bibliográficas
Sección V:	Anexos
- Anexos	Anexos Capítulo V
- Planos	Anexos Capítulo VI
- Presupuesto	Anexos Capítulo VII

1.3. Planteamiento del problema

México ocupa el décimo lugar de población en el mundo con 119 millones 530 mil 753 habitantes. Presenta una tasa de crecimiento poblacional anual de 1.4%, el 75% de la población del país se encuentra en zonas urbanas y el resto en zonas rurales (Román-Reyes, 2015).

Los pequeños núcleos de población presentan un conjunto de problemáticas específicas, como son la escasez de recursos hídricos en zonas rurales y naturales, en ocasiones por la derivación de los mismos a núcleos de mayor población para abastecimiento de agua, haciéndolos vulnerables con relación al uso del agua en calidad y cantidad. Adicionalmente, presentan fuertes problemas por falta de infraestructura en las redes de alcantarillado, aunado a que no cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales, debido a que estos sistemas son costosos en su construcción e implementación y suelen demandar de personal calificado para atender la operación y el mantenimiento que no es común en zonas rurales. Lo que conlleva a utilizar pozos filtrantes para el vertido de aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento, esto evita se pueda dar un segundo uso que pueda contribuir a atender demandas locales como agua para riego en la agricultura, riego de jardines, entre otros. Por otro lado, contribuye a acentuar la contaminación derivada del vertido directo de aguas residuales sin tratamiento a los cuerpos de agua superficiales, el principal problema radica en la falta de tratamiento de aguas residuales.

El estado de Veracruz cuenta con 118 plantas de tratamiento de aguas residuales, en su mayoría en comunidades urbanas y las comunidades rurales cuentan con un porcentaje de tratamiento de 17% (CONAGUA, 2015), lo que ha conllevado a afectaciones en la salud humana e intensificado las enfermedades epidemiológicas. La localidad de Pastorías, Actopan, Veracruz, es una zona rural aislada de los centros urbanos, donde las aguas residuales no son tratadas lo que contribuye notablemente a la degradación de medio ambiente. La zona se caracteriza por la producción agrícola, pero desafortunadamente existe poca disponibilidad de agua en algunos meses del año, lo que hace a la comunidad vulnerable

y con pocas oportunidades de desarrollo económico. El grado de marginación es de los principales parámetros indicativos de la falta de equidad social, en el estado de Veracruz, 58.1% de sus municipios se clasifican en un grado de marginación alto y muy alto, esto con mayor incidencia en zonas rurales (CONAPO, 2015). La localidad de Pastorías, aunque cuenta con sistema de alcantarillado desde 2013, no cuenta con planta de tratamiento de aguas residuales y éstas son almacenadas en un tanque receptor de aproximadamente 15 m³, lo cual no es suficiente para el volumen de aguas producidas por los 620 habitantes de la comunidad, y ésta se desborda y se vierte en terrenos cercanos a la comunidad. Asimismo, los escurrimientos llegan al río Topiltepec que pasa por la comunidad, el cual es empleado como zona de esparcimiento recreativo, lavado de ropa, suministró para agua de riego, lo que se convierte en una posible amenaza para la salud de los usuarios y comunidad en general” (Marín-Muñiz, 2017). En respuesta a este problema, en este estudio se propone investigar los HI sembrados con plantas ornamentales, en diferentes sustratos (PET, PPR y GVR), a nivel microcosmos (Fase I), macrocosmos (Fase II) y comunitario (Fase III), para conocer de forma efectiva la funcionalidad de estos sistemas en sus interacciones planta-sustrato-microorganismo, sometidas a altas cargas de contaminantes provenientes de aguas residuales domésticas en diferentes temporadas climáticas.

1.4. Justificación

Los humedales naturales se conocen como los mejores receptores de aguas residuales que a su vez cumplen un papel de remoción de contaminantes importantes (García-García et al., 2016). Los HI se han usado con éxito para tratar aguas residuales domésticas e industriales (Verma & Suthar, 2018; Avellán & Gremillon, 2019; Sandoval-Herazo et al., 2018). El uso de estos sistemas se remonta a inicios del siglo XX, tuvo su origen en Alemania a principios de 1950 (Dahl & Allord, 1996). Son una opción viable desde el punto de vista económico y ecológico, para ser usados como sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas (Carrera, 2016; Pedraza, 2015; Marín-Muñiz, 2017; Wang et al., 2017). El tratamiento de las aguas residuales en los humedales construidos o ingenieriles depende en gran medida de los procesos biológicos, y su funcionalidad se ve directamente intervenida por las condiciones climáticas, como es la temperatura y la intensidad de luz solar. Hasta la fecha, la tasa de

adopción de tecnología de humedales para el tratamiento de aguas residuales en regiones subtropicales ha sido lenta, existe relativamente pocos informes publicados sobre aplicaciones de tratamiento de aguas residuales mediante HI en estas regiones y a un más escasos relacionados con el uso de plantas ornamentales terrestre de interés comercial adaptadas a condiciones de que prevalecen en estos sistemas, la mayoría de los trabajos son estudios de la utilización de plantas terrestres ornamentales en HI centrados en evaluar la remoción de contaminantes y salud de las plantas (Hernández, 2016). Es importante mencionar que, existe un vacío del conocimiento sobre las adaptaciones que realizan las plantas ornamentales de interés comercial para sobrevivir bajo condiciones de inundación y concentraciones altas de contaminantes (Hernández, 2016; García-García et al., 2016). Son necesarios estudios encaminados a evaluar el efecto de utilizar plantas ornamentales de interés comercial en las funciones biogeoquímicas y en la interacción, sustrato-microorganismo-planta en HI. Así mismo, estudios sobre aspectos económicos y de comercialización de las flores producidas, que valoren los posibles aportes económicos de cultivar este tipo de plantas en HI (Hernández, 2016). También es necesaria una evaluación intensiva de las diferencias entre las macrófitas típicas de humedales naturales con las ornamentales terrestres usadas HI y las temporadas climáticas, de igual forma los estudios futuros deberían centrarse en la evaluación integral de plantas y sustratos en ensayos de campo bajo condiciones de vida reales “comunitarios”, optimización de parámetros ambientales y operacionales, exploración de nuevas tecnologías de mejora como aumento microbiano e influencia de los diseños de humedales, tipos de aguas, sustrato en el desarrollo de las mismas y estrategias de mantenimiento, por ejemplo cosecha de plantas (Avellán & Gremillion, 2019; Sardana et al., 2019; Urakawa & Bernhard, 2017).

Las razones interinamente expuestas denotan la necesidad de investigar la interacción planta-sustrato-microorganismo, en su interacción bioquímica, usando plantas ornamentales terrestres adaptadas a condiciones de HI, con interés comercial y de fácil adaptación. En México existe gran diversidad de plantas que han probado ser resistentes a contaminantes y eficaces en la remoción, sin embargo, la información al respecto es escasa. En este estudio se evalúan las especies de *Zingiber Spectabile*, *Canna hybrid* y *Alpinia purpurata*, *Anthurium* sp, *Zantedeschia aethiopica*, *Lavandula* sp, *Typha* spp y *Spathiphyllum Wallisii*, esperando comprobar que estas especies son viables para ser implementadas en humedales en la

localidad de Pastorías, Actopan, Veracruz. Así como, sustratos de fácil obtención y disponibles en zonas subtropicales como lo son grava volcánica roja, piedra porosa de río y los residuos rugosos de PET, esto como una estrategia de uso sustentable del mismo bajo diferentes temporadas climáticas.

Cabe mencionar, que en países desarrollados se han realizado este tipo de alternativas de tratamientos en condiciones y características apropiadas al clima y regiones específicas; pero para regiones tropicales y en específico para México y Veracruz; existen escasos estudios que revelen la eficiencia de remoción de plantas de ornato, cuando existe una amplia gama de especies de plantas que pueden tener características fisiológicas dentro de estos sistemas y donde también existen necesidades de implementación de sistemas de tratamiento (Avellán & Gremillion, 2019; Masi & Regelsberger, 2018). He ahí la importancia de investigar en HI, los cuales ayudarían a remover contaminantes; produciendo vegetación ornamental como beneficio a los cuidadores de humedales, y reutilizando el agua tratada.

1.5. Objetivos

Uno de los desafíos importantes para la tecnología de Humedales Ingenieriles sembrados con plantas ornamentales, es optimizar su rendimiento sobre la remoción de grupos específicos de contaminantes, la mayoría de los estudios científicos tienen un enfoque solo en la eliminación de contaminantes y desarrollo vegetal, pocos estudios han prestado atención en encontrar nuevos sustratos, evaluar este tipo de plantas terrestres con posibles aplicaciones en tratamiento de aguas residuales y la influencia de la temporada climática en el sistema.

1.5.1 El objetivo general

Evaluar el proceso de adaptación y remoción de contaminantes en celdas de Humedales Ingenieriles sembrados con diferentes tipos de vegetación ornamental y diferentes sustratos en zonas tropicales

1.5.2 Los objetivos

1. Evaluar el proceso de adaptación y remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas en microcosmos de humedales ingenieriles, con diferentes plantas de ornato (*Anthurium* sp, *Zantedeschia aethiopica*, *Lavandula* sp. y *Spathiphyllum*

Wallisii,) sembradas en distintos tipos de sustrato (piedra volcánica roja, piedra de río y PET).

2. Comparar los efectos de la densidad de policultivos de plantas ornamentales (*Zingiber Spectabile*, *Canna hybrid* y *Alpinia purpurata*) y distancias de sembrado en el proceso de adaptación y remoción de contaminantes, mediante Humedales Ingenieriles a nivel macrocosmo.
3. Diseñar y construir un humedal a nivel comunitario para tratar el 100% de las aguas residuales de Pastorías, Actopan, Veracruz.
4. Evaluar el proceso de remoción de contaminantes en aguas residuales comunitarias mediante Humedales Ingenieriles a gran escala, con monocultivos y policultivos de plantas ornamentales (*Anthurium* sp, *Canna hybrid*, *Typha dominguensis* *Spathiphyllum blandum*) y sembradas en residuos de PET como sustrato.
5. Realizar un análisis costo beneficio del uso de humedales comunitarios como medio de cultivo de plantas ornamentales de interés comercial en comunidades rurales.

1.6. Hipótesis

HO: La remoción de contaminantes mediante humedales ingenieriles se verá favorecida a través de la utilización de Grava volcánica roja, Piedra porosa de río y PET como sustratos, así como, con el uso de plantas ornamentales terrestres de interés comercial como *Anthurium* sp, *Zantedeschia aethiopica*, *Lavandula* sp, *Spathiphyllum Wallisii*, *Zingiber Spectabile*, *Canna hybrid*, *Typha* spp y *Alpinia purpurata*.

HO: El diseño y construcción de un humedal comunitario considerando sustratos locales y de fácil obtención en conjunto con vegetación de ornato, mejorará la calidad del agua y apariencia estética de los sistemas de humedales y puede contribuir al desarrollo económico.

HO: Las plantas ornamentales que se producen en el humedal comunitario pueden convertirse en una fuente de ingreso para los cuidadores y manejadores de este.

Conclusiones

En este capítulo, se muestra que los HI sembrados con distintas plantas ornamentales en diferentes sustratos pueden ser una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, derivado de la falta de alternativas para tratamiento de estas en comunidades rurales, estos se

convierten en una alternativa económica y ecológicamente viable, adicionalmente nos permitiría la creación de soluciones de desarrollo económico en las zonas dónde éstos se implanten; lo cual justifica el diseño de un HI sembrado con plantas ornamentales en diferentes sustratos.

En este sentido, el proyecto propone solucionar el problema de la falta de alternativas de tratamiento de aguas residuales usando materiales típicos de la región y usando producto de desechos domésticos como lo es el PET como nuevo material de sustrato y sembrados con plantas terrestres adaptadas a condiciones de humedales de importancia comercial que contribuyan a la remoción de contaminantes y a la vez se desarrolle como idea de negocios.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Disponibilidad y calidad de agua en el mundo

En la tierra se encuentran disponibles 1.4 billones de metros cúbicos de agua, de los cuales cerca del 97% es agua de mar, alrededor del 3% de agua dulce sin sal permanente, de la cual el 70% es hielo en el Polo Sur y el Polo Norte (Lonergan, 2018), la Figura 2.1 muestra el uso del agua dulce, indicando que la mayor parte de estas son usadas en la agricultura.

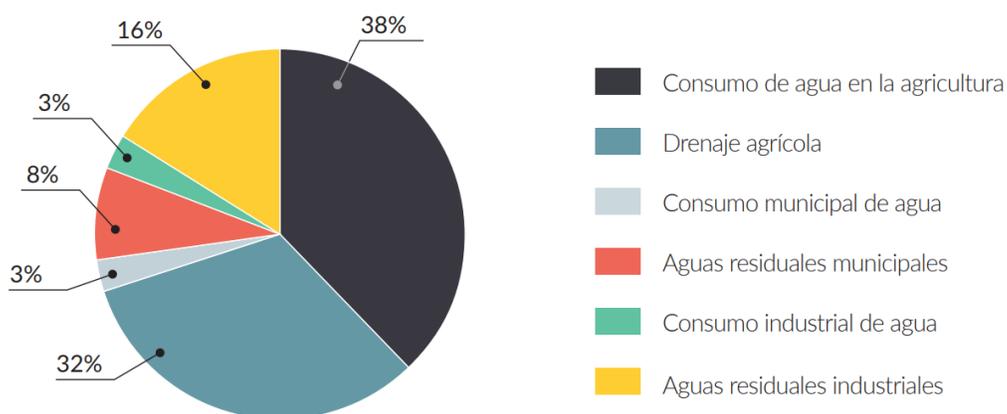


Figura 2.1. Uso del agua dulce
Fuente: WWAP (2017)

Al clasificarlas con más detalle el agua potable es solo el 0.01% del total (Segura et al., 2018). Es solo para esa población mundial 7.600 millones reportada por la ONU (2017). México es el país número 11 en población mundial y el tercero del continente americano, en la Encuesta Inter Censal (2015), realizada por el INEGI, se contaron 119 millones 530 mil 753 habitantes en México. Aunque es un país rico en recursos naturales, los problemas de tratamiento de aguas residuales son aún problemas que lo aquejan, a nivel nacional existen 2,477 plantas de tratamiento municipales y 2,832 plantas de tratamiento industriales, estas solo tratan el 48% y 32% respectivamente de las aguas residuales generadas (CONAGUA, 2016).

De acuerdo a WWAP (2017), la disponibilidad del agua está directamente relacionada como la calidad de la misma, el aumento de los vertidos de aguas residuales sin tratar, junto con las escorrentías de tierras agrícolas y aguas residuales industriales con tratamientos inadecuados, han contribuido notablemente a la contaminación de los cuerpos superficiales y subterráneos

de agua. Si esta situación continúa en un futuro inmediato, en países con bajos recursos económicos y zonas áridas principalmente, se pondrían en riesgo la salud humana y de los ecosistemas. La Figura 2.2 indica una proyección de la contaminación de aguas en países según sus ingresos económicos mostrando que al 2030, tendremos mayores problemas de tratamiento de aguas residuales si estas no son atendidas.

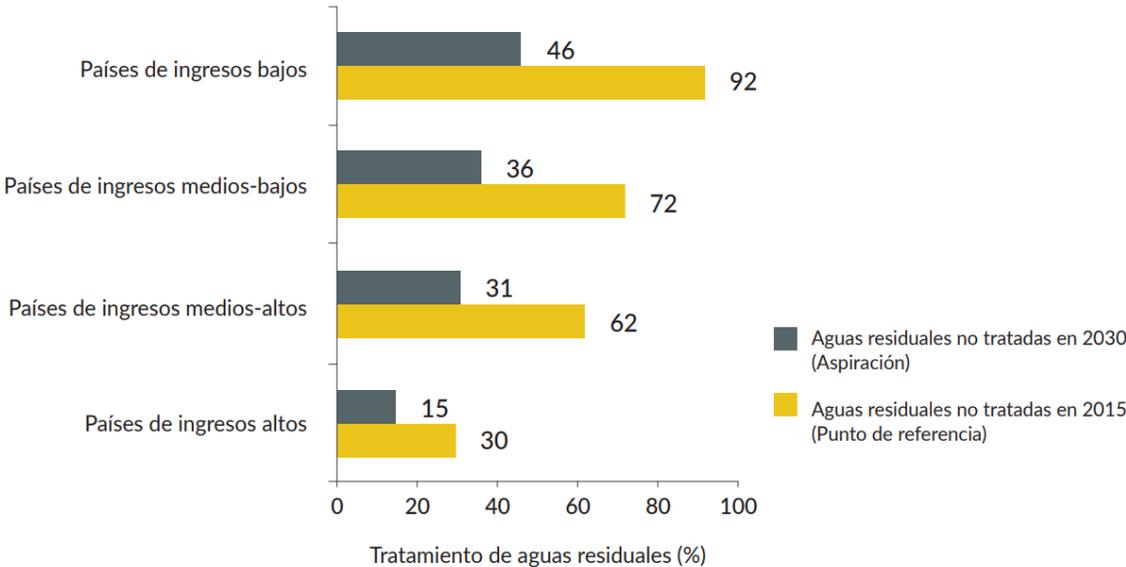


Figura 2.2. Estimación de agua sin tratar a 2030
Fuente: WWAP (2017) en base a Sato et al. (2013)

2.2. Características de aguas residuales domesticas

Las aguas residuales municipales se componen principalmente de líquidos junto con concentraciones relativamente pequeñas de sólidos orgánicos e inorgánicos suspendidos y disueltos. Entre las sustancias orgánicas presentes en las aguas residuales se encuentran los hidratos de carbono, la lignina, las grasas, los jabones, los detergentes sintéticos, las proteínas y sus productos de descomposición, así como diversos productos químicos orgánicos naturales y sintéticos de las industrias de procesos (Jana et al., 2018). La Tabla 2.1 muestra los niveles de los principales constituyentes de aguas residuales domésticas fuertes, medianos y débiles.

Tabla 2.1 Principales constituyentes de aguas residuales domesticas

Constituyente	Fuerte Medio Débiles		
Sólidos totales (mgL ⁻¹)	1200	700	350
Sólidos disueltos (mgL ⁻¹)	850	500	250
Sólidos suspendidos (mgL ⁻¹)	350	200	100
Nitrógeno (mgL ⁻¹)	85	40	20
Fósforo (mgL ⁻¹)	20	10	6
Cloruro	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO ₃)	200	100	50
Grasa	150	100	50
DBO ₅	300	200	100

Fuente: UN-WATER. (2018)

Las aguas residuales municipales también contienen una variedad de sustancias inorgánicas de fuentes domésticas e industriales que incluyen una serie de elementos potencialmente tóxicos como arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, zinc, etc. Incluso si se usan materiales tóxicos, no está presente en concentraciones que puedan afectar a los humanos, podrían estar en niveles fitotóxicos, lo que limitaría su uso agrícola. Sin embargo, desde el punto de vista de la salud, una consideración muy importante en el uso agrícola de las aguas residuales, los contaminantes de mayor preocupación son los micro y macroorganismos patógenos (Pattanaik et al., 2018).

De acuerdo a Ganáis et al. (2018), los virus, bacterias, protozoos y helmintos patógenos pueden estar presentes en las aguas residuales municipales sin procesar y sobrevivirán en el medio ambiente durante largos períodos, las bacterias patógenas estarán presentes en las aguas residuales en niveles mucho más bajos que el grupo de bacterias coliformes, que son mucho más fáciles de identificar y enumerar (como coliformes totales / 100 ml). *Escherichiacoli* es el indicador de contaminación fecal más ampliamente adoptado y también se puede aislar e identificar de forma bastante simple, y su número se suele dar en forma de coliformes fecales (FC) / 100 ml de aguas residuales.

Los diferentes contaminantes que se pueden presentar en aguas residuales pueden abarcar parámetros físicos, químicos y biológicos, pero las formas en como esta puede contaminarse se muestran en la figura 2.3 donde se muestra que la disipación final de toda esta contaminación son cuerpos de aguas superficiales, indicando que pueden causar deterioro ambiental.

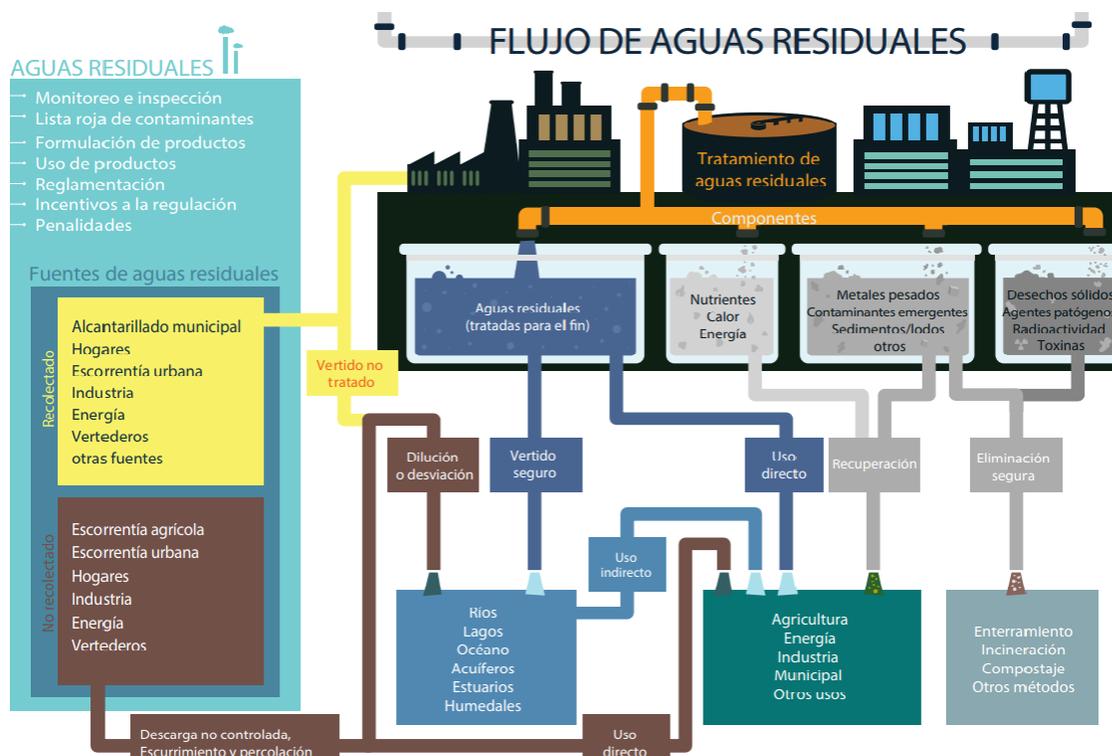


Figura 2.3 Flujo de agua residual
Fuente. WWAP (2017)

2.3. Contaminación de aguas en México

Según la Conagua (2016), México cuenta con 1, 449,471 millones de metros cúbicos de agua, no toda el agua es concentrada en ríos o arroyos (21.2% total).

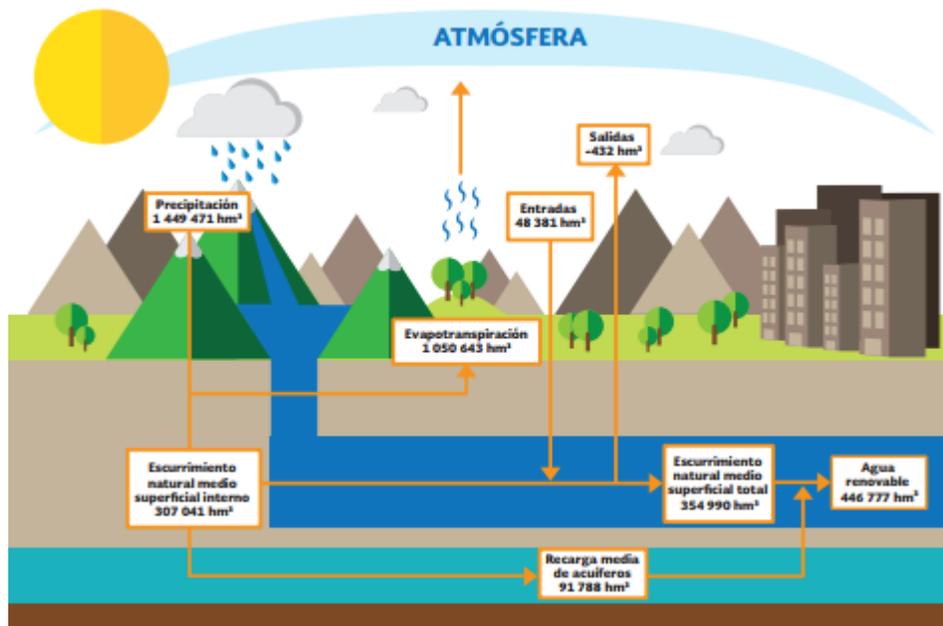


Figura 2.4 Agua Mexicana disponible
Fuente: CONAGUA (2016)

El agua total con la que cuenta México es muy basta, la pregunta es ¿Cuánta agua residual es tratada en México? Según Noyola-Robles et al. (2013) afirmó que solo se trata el 20% de las aguas residuales del país y toda la demás es vertida sin ningún tipo de tratamiento. Estamos hablando de que son cantidades de agua realmente significativas la que se está incorporando a todos los cuerpos de agua del país y generando una contaminación mucho más grande de la que ya había generado una contaminación directa de agua y una contaminación indirecta de suelos en el país.

La calidad del agua en México se ve afectada día con día generando una contaminación significativa en todo el país, ya que como se había mencionado el hecho de que solo el 20 % del agua es tratada nos dice que diariamente el 80% del agua contaminada, deteriora aguas no contaminadas de las cuales la sociedad se provee, esto desata una serie de consecuencias poco tomadas en cuenta como lo son el grave deterioro de la salud humana y la fuerte contaminación que reciben los cultivos mexicanos al ser regados con aguas supuestamente de buena calidad.

Podemos ver una clara evidencia en la tabla 2.2 que de manera cuantitativa refleja la contaminación y la baja calidad del agua en todo el país. Esto según Tobón et al. (2017), no

solo se refiere a la contaminación como tal si no toda la clase de microorganismos dañinos que hace que la calidad del agua se vea fuertemente afectada, cosa que trae consigo no solo afectaciones ambientales como se ve si no una afectación directa al humano como ha sido mencionado, patógenos microbianos y bacterianos en las aguas nacionales son la prueba de que esto puede escalar a estándares aún más graves de lo que se puede dimensionar como sociedad mexicana y científica, también Peláez et al. (2016) menciona que la presencia de virus es un factor que demuestra un desafío para los sistemas de abastecimiento no solo de México sino de cualquier país que se encuentre en un panorama similar o más graves que las que se presentan en este país, la contaminación acuífera genera más contaminación y un deterioro palpable en la salud humana.

Tabla 2.2. Calidad nacional del agua en México

Numero de RHA	Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminadas	Fuertemente contaminadas
I	28.6	19.0	8.3	38.1	6.0
II	42.9	35.7	9.5	9.5	2.4
III	33.2	37.4	18.2	11.2	0.0
IV	12.5	16.1	28.3	30.9	12.2
V	4.2	33.1	48.6	11.3	2.8
VI	33.8	26.1	23.9	15.5	0.7
VII	38.8	24.5	24.5	10.2	2.0
VIII	10.9	9.2	22.5	50.5	7.0
IX	46.6	18.3	14.3	16.7	4.0
X	13.4	16.8	40.5	24.4	5.0

XI	16.5	37.2	34.9	9.2	2.3
XII	7.5	35.8	35.8	18.9	1.9
XIII	1.3	2.7	22.7	37.3	36.0
Nacional	20.5	21.1	26.0	26.6	5.8

Fuente: CONAGUA (2016)

En la tabla anterior nos podemos dar cuenta de la calidad actual del agua a nivel nacional, no tenemos que viajar tan lejos para poder observar el gravísimo daño que se ha hecho a todos los cuerpos de agua, no solo a nivel nacional si no de forma internacional a todos nuestros mares y océanos, generando daños incalculables en los hábitats de las especies afectadas.

2.3.1. Tipos de tratamiento de aguas residuales domesticas

El proceso físico que consiste en la remoción de contaminantes en las aguas se le conoce como tratamiento de aguas residuales, este puede constar de varios pasos y puede tener distintos tipos de metodologías para poder llegar a un mismo fin. Según Lasso et al. (2017), la clasificación de las aguas para su posterior tratamiento puede depender de varios factores como: las características del agua residual (DBO₅, materia en suspensión, pH, productos tóxicos), la calidad requerida del efluente, los costos y la disponibilidad de terreno.

Las técnicas que han sido empleadas en distintas plantas de tratamiento residual suelen ser las más comunes o comerciales para realizar este tipo de procedimiento lo que no dice que sean las mejores técnicas, las más eficientes o más redituables a corto y largo plazo, ya que muchas de estas requieren un mantenimiento muy costoso y gente especializada con el óptimo conocimiento sobre el área, sin hablar de que muchos de estos métodos exigen una demanda muy alta de energía y un abundante personal laborando dentro de estas instalaciones (Jimeno et al., 2017)

La sedimentación primaria; Mamani (2016) dice que el tratamiento primario es uno de los más importantes en el proceso de descontaminación de aguas residuales industriales, el proceso que se lleva a cabo es relativamente sencillo se requiere de un tiempo aproximado

de 0.5 a 3 horas o más, esto hace que del 40 al 65% de los sólidos suspendidos se sedimenten en el fondo del tanque estos se extraen en forma de lodos de forma mecánica.

En este método nos basamos en la gravedad principalmente ya que, por diferencia de densidades vamos a tener a los cuerpos más densos en la parte de abajo y al líquido menos denso en la parte superficial del tanque de sedimentación. Podemos ver esto en muchos casos como el primer paso y el último del tratamiento de aguas residuales industriales en muchos lugares ya que la baja infraestructura en la que se ve inmersa México obliga a las empresas a recortar gastos en muchos aspectos y el tratamiento de aguas ha sido un factor poco primordial para muchas pequeñas y medianas empresas mexicanas. ¿Acaso es esto suficiente? Por supuesto que no lo es, ya que gran parte de los contaminantes quedan aún en los líquidos que se tiran a cualquier tipo de cuerpo de agua, lo que contribuye a una afectación directa a la sociedad (Chávez et al., 2017).

Sistema de Flotación. Este proceso lo que hace es una separación de partículas más pequeñas de sólidos y/o partículas de algunos líquidos, se encarga de los sólidos suspendidos más grandes que se encuentran en las aguas contaminadas. El proceso lo podemos puntualizar de la siguiente forma:

- 1) El primer punto es donde se busca separar aceites o grasas, así como fibras, pero solo enfocado a sólidos con densidades bajas.
- 2) A consecuencia del primer paso, así como en la sedimentación existirá también una generación de lodos.
- 3) Se ocupan algunos floculantes, así como en muchos procesos, lo que se busca es generar coágulos, los cuales pueden precipitarse más fácil para su sustracción.

Según Sánchez et al. (2017), la eficiencia de la separación que tiene es gracias al gas que se inyecta en el líquido que en su mayoría es aire, lo que abarata un poco los costos de este tipo de métodos al no ser un tipo de gas muy caro o difícil de conseguir, este aire contribuye a la separación de líquidos más densos, como habíamos dicho, este tipo de métodos principalmente es destinado a sustancias más grasas, como el aceite que incluso en algunos casos se ha ocupado para remover el petróleo donde las burbujas lo obligan a separarse, y esto sucede gracias a que primero se presuriza el agua con dicho gas para posteriormente

despresurizarlo y generar este tipo de cambio provocando la separación mediante pequeñas burbujas como habíamos mencionado (Sierra et al., 2016).

Sistema de desarenadores. Estos desarenadores son un sistema que está enfocado a la remoción de arenas junto con otras partículas de tamaños minúsculos en las aguas residuales. Dentro de este sistema existen distintos tipos de estructuras y diseños para el tratamiento de aguas residuales. Estructuralmente puede llegar a ser circulares o rectangulares, a su vez estos pueden tener distintas características ya que hay de flujos horizontales o helicoidales, pueden ser aerobios o anaerobios e incluso la limpieza de estos puede llegar a variar entre mecánica y manual. Su función como tal de estos equipos es la de prevenir ciertos incidentes como la abrasión de equipos o la sedimentación de arenas en los conductos de la planta (Muñoz & Rodríguez, 2017). El sistema de desarenado no podemos considerarlo como un método óptimo para la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales ya que solamente es un método de prevención.

Los tratamientos secundarios: Bióxido de carbono, metano, nitrógeno amoniacal, nitratos y agua. Estos son los compuestos que regularmente se obtienen en los tratamientos secundarios, esto porque existe una descomposición química la cual ayuda a descomponer los contaminantes en partículas más pequeñas. Aerobios, anaerobios, anóxicos o facultativos, son los principales métodos para el tratamiento secundario de aguas residuales, o los más comerciales (Pérez et al., 2016).

Filtros percoladores: Es un lecho en el que los organismos se adhieren gracias a un medio filtrante, este funciona como una coladera y a través de este se cuelan las aguas residuales. Los medios pueden ser variables como en distintos métodos ya que estos pueden llegar a estar formados por plásticos o por piedras. Su profundidad media de algunos puede llegar a ser de 1.8 m aproximadamente, pero puede llegar a varias entre los 0.9 hasta los 2.5 m de profundidad. Entre las variaciones no hay algo que lo dictamine como una regla, pero puede ser más común encontrarse con que aquellos medios que son de piedra regularmente cuentan con una estructura circular, mientras que aquellos que no son formados por piedras pueden llegar a tener estructuras más variadas e incluso sus profundidades pueden llegar a ser mayores, algunas llegando hasta los 12 m así como en otros métodos estos cuentan con una vida biológica en la que se pueden llegar a encontrar bacterias facultativas, nitrificantes,

aerobias, anaerobias, hongos, algas y protozoos. Este tipo de bacterias puede llegar a variar según los compuestos que presenten las aguas residuales a tratar, así como también los objetivos a cumplir dentro de la planta son factores que pueden influir en la vida biológica que exista dentro de estos equipos. A su vez estos al igual que como en otros equipos la cantidad a tratar también es un factor de decisión ya que existen filtros de cargas bajas, medias, altas y muy altas (Arrechea et al., 2016).

Lagunas aireadas. Este sistema es muy común en algunas empresas grandes, ya que requiere de un amplio terreno para su instalación, este es un sistema en el cual se crean unas lagunas artificiales de dos o tres estanques por lo general, cada una tiene una tarea distinta, en la primera se encuentran dos zonas, una zona aerobia y una anaerobia siendo la de la superficie, la aerobia por el contacto con el entorno, hablamos de que estas llegan a tener una profundidad de 1 a 1.5 m. La segunda laguna generalmente se encarga de oxidar y esta alcanza profundidades de 1 m aproximadamente, por su tarea a realizar esta no debe contar con zonas anaerobias. La diferencia que existe de este método al de algunos otros es la inyección de oxígeno artificial que se le introduce para la remediación del agua residual lo cual logra que las remociones de DBO_5 puedan llegar a ser hasta del 95% y 99% en coliformes lo que le da una gran ventaja sobre muchos otros métodos (Chavarría & Gil, 2016).

Lodos activados: En este proceso existe una necesidad por sobrevivir de parte de los microorganismos encontrados en estos lodos ya que entre más materia orgánica haya ellos competirán por comer y por crecer durante este proceso. Cuando se mezclan con la agitación del aire estos microorganismos que ya crecieron generan una serie de flósculos estos generan una masa activa denominada lodo activo o activado; a la mezcla de dicho lodo con el agua residual se le llama licor mezclado, a través del tanque de aireación fluye para llegar a un clarificador secundario donde el lodo activado se sedimenta. Para mantener una apropiada relación sustrato-microorganismo una parte de estos lodos se tienen que regresar al tanque de aireación y permitir una degradación adecuada de todos los compuestos (Rivas & Gesenia, 2016).

2.3.2. Sistemas de tratamiento terciario.

Este podríamos decir que es el paso o uno de los pasos finales ya que este se encarga principalmente de evitar que otros cuerpos se contaminen y que se mantengan los márgenes de calidad y de reutilización del agua para que posterior a este se ocupe en otras actividades. En este punto los costos de tratamiento adquieren valores muy altos lo que influye a que en muchas ocasiones estos sean omitidos por la falta de presupuesto (Moreno et al., 2016).

Adsorción. Se refiere a la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un punto muy importante es la superficie específica de los sólidos con los que se trabajaran, ya que el compuesto soluble a eliminar está concentrado en la superficie de estos sólidos. Por lo regular este método se utiliza para la eliminación de fenoles, hidrocarburos aromáticos nitrogenados y derivados clorados, también para la eliminación de olores colores y sabores. El carbón activado es uno de los adsorbentes más comunes y por consiguiente más utilizados (Cyclus, 2014).

Intercambio iónico. Se refiere a la separación de sustancias basada en la transferencia de materia fluido-sólido. En este proceso ocurren una serie de reacciones químicas ya que existe un intercambio de iones entre los iones móviles hidratados y los iones de cargas iguales de un fluido. Este proceso consiste en pasar el fluido sobre un intercambiador catiónico y/o aniónico sólido, reemplazando los cationes y/o aniones por el ion hidrógeno (H⁺) y/o el ion hidroxilo (OH⁻), respectivamente. Todo esto se lleva a cabo para poder realizar la separación de los contaminantes presentes que existen (Mora et al., 2017).

Reactores secuenciales por lotes (SBR): este sistema pertenece principalmente a la tecnología de lodos activados, este procesa las aguas residuales por medio de un tratamiento biológico-aeróbico-anóxico, el proceso que lleva se resume a las tres palabras de tratamiento ya que al ser aeróbico sabemos que existirá una incorporación de aire. De una forma general los procesos definidos para esta técnica son: llenado, reacción, decantado, vaciado y tiempo muerto. Este proceso es el que permite la descontaminación parcial de las aguas residuales (Zacarías et al., 2017).

Zanjas de infiltración o de lixiviación capilar Según Jurado (2016), este método consiste en generar un contacto entre el agua residual y un flujo no saturado, esto hace que la comunidad biótica sea muy activa esto sirve esencialmente para degradar la materia orgánica

y oxidarla. En general muchos métodos no tienen una sola aplicación ya que algunos de estos pueden enfocarse al tratamiento de agua pública o doméstica también pueden enfocarse a la remoción de fósforo en el agua y/o nitrógeno. En este método existe una parte muy importante que es la infiltración al suelo por flujo negativo y flujos no saturados, aunque uno pensaría por lo contrario que la parte más primordial es erróneamente la infiltración de agua residual por gravedad. Este se conforma por un canal longitudinal impermeable, elaborado con material plástico de alrededor de 30 cm de ancho y con unas paredes laterales de 15 cm de alto, se llena con arena de río, se instala al fondo de la zanja por debajo de la tubería de condición y por el cual a través de este el agua fluye.

Sistema Doyoo Yookasaoo. Este método es un proceso de medio fijo y suspendido, como tal es un proceso mixto, también algunos lo llegan a considerar como una variante de los lodos activados así como los reactores secuenciales antes mencionados que eran una variante de los mismos, de igual forma este método también es aireado, se incorpora grava y /o empaques de plástico mediante aire inyectado, los microorganismos presentes transforman la materia orgánica contaminante, todo esto sirve para generar efluentes de alta calidad y lodos de desechos con mayor grado de estabilización, al final estos se deshidratan para desecharlos.

Estos suelen instalarse bajo tierra con cubiertas especiales y capas de tierra mejoradas para evitar que los malos olores salgan de estas instalaciones. Esto sirve también para la formación de áreas verdes en donde sea que estos estén instalados lo cual genera algo novedoso y similar a lo que pueden llegar a ser los humedales que a vista de algunas personas podrían parecer jardineras bien organizadas (Sánchez & Javier, 2016).

2.4. Humedales artificiales /construidos o ingenieriles

Los Humedales Ingenieriles (HI) son un sistema de tratamiento económico y ecológicamente viable, estos se componen de tres elementos fundamentales, a. Sustrato, b. Planta y c. Microorganismos, cada uno de estos elementos juega una parte importante dentro del sistema de tratamiento. El sustrato el cual será el medio de soporte para la planta regularmente es de origen pétreo debido a la gran porosidad que este tipo de materiales contiene, ejemplos de estos materiales lo son la zeolita, grava, arenas; las plantas comúnmente utilizadas son

macrófitas típicas de humedales naturales y el agua de diferentes procedencias como pueden ser domésticas, industriales entre otras (Sandoval-Herazo et al. 2018).

2.4.1. Tipos de humedales construidos o ingenieriles

De acuerdo a Hernández (2016), los humedales HI, se pueden clasificar teniendo en cuenta la forma en que el flujo de agua circula en ellos, como se muestran en la Figura 2.5.

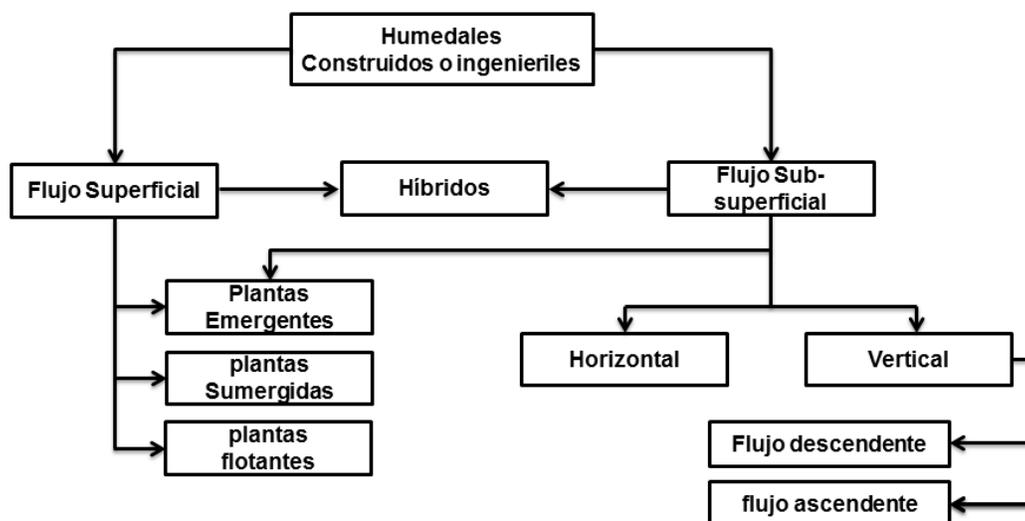


Figura 2.5. Tipos de Humedales Ingenieriles

2.4.1.1. Humedales de flujo horizontal superficial y sub-superficial.

Vymazal & Kröpfelová (2008), indican que en los humedales de flujo horizontal subsuperficial el agua fluye de un extremo del lecho, se infiltra, trasiega en sentido horizontal a través de un medio granular entre las raíces de las plantas. El agua tratada se recoge por medio de tuberías, la profundidad entre 60 a 80 cm y constan de una pequeña pendiente en el fondo para mantener las condiciones hidráulicas de flujo laminar.

HI de flujo superficial, estos imitan los sistemas de lagunas donde el agua fluye libremente sin presencia de sustrato y las profundidades esta comprendidas entre 30 y 60 cm y constan de plantas emergentes que pueden ser manglares (Austin & Yu, 2016).

Estos sistemas de tratamiento de aguas remueven el material orgánico o materia orgánica, oxidando el amonio, reduciendo nitratos y removiendo el fosforo. Los mecanismos son complejos involucrando varios procesos como oxidación por medio de bacterias, filtración, sedimentación, y precipitación química, acción de las plantas, absorción y volatilización. Llegando a remplazar un tratamiento secundario bajo ciertas condiciones (Stearman et al., 2003).

2.4.1.2. Humedales de flujo vertical.

Stefanakis et al. (2014), describe que en estos sistemas el flujo de agua es descendente de arriba hacia abajo lo que permite una mayor oxigenación, por medio de un sistema de tuberías. Las aguas se infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, el agua de los humedales de flujo vertical puede dosificarse de manera continua o intermitente hasta inundar por completo el fondo. Las ventajas que presentan estos sistemas son: reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y mayor ventaja para remover contaminantes de nitrógeno donde el agua es totalmente tratada a niveles que sólo se obtienen en sistemas de tratamiento terciario o secundario.

2.4.2. Componente de un humedal ingenieril

Un humedal construido consta de tres componentes principales los sustratos o medios filtrantes por donde fluye el agua, la vegetación y microorganismos. Estos componentes pueden ser manipulados para obtener un mejor diseño y resultados de depuración en HI (Davis, 1995).

2.4.2.1. Sustrato

Los sustratos en HI, cumplen función de soporte de las plantas y microorganismos que degradan contaminantes en estos sistemas, así como medio de filtro (Sandoval-Herazo et al. 2018), es aquí donde se dan las transformaciones físicas y químicas, mediante la acción bacteriana, al igual que depósito para minerales y nutrientes. La absorción abiótica del

fósforo por el sustrato, ha sido descrita como el mecanismo fundamental de eliminación de dicho contaminante en estos sistemas de tratamiento, encontrándose mayor capacidad de remoción de fósforo y amonio en los que emplean suelo como sustrato (Vacca et al., 2005). Los principales medios de sustratos o medios de soporte empleados en HI han sido la arena, tezontle, y grava, por tener características porosas o rugosas que favorecen el desarrollo de bacterias y funcionan como medio filtrantes (Pérez-Villar et al., 2009). Como se muestra en la tabla 2.3 varios estudios se llevaron a cabo sobre la selección de sustratos de humedales, especialmente para la eliminación de fosforo sostenible de las aguas residuales (Castañeda, 2017).

Tabla 2.3. Sustratos seleccionados comúnmente para el tratamiento de aguas residuales en HI.

Material natural	FUENTE
Arena	Saeed&Sun (2013)
Grava	Calheiros& al (2008)
Arcilla	Calheiros et al (2008)
Calcita	Ann et al (1999)
Marmol	Arias et al (2001)
Vermiculita	Arias et al (2001)
Bentonita	Xu et al (2006)
Dolomita	Ann et al (1999)
Caliza	Tao & Wang (2009)
Cascara	Seo et al (2005)
Esquisto	Saeed&Sunn (2012)
Turba	Saeed&Sunn (2012)
Wollastonita	Brooks et al (2000)
Maerl	Saeed&Sun (2012)

Zeolita Bruch et al (2011)

Subproducto industrial

Escoria	Cui et al (2010)
Las cenizas volantes	Xu et al (2006)
Cenizas de carbón	Ren et al (2007)
Lodos de alumbre	Babatunde et al (2010)
Migas de ladrillo hueco	Ren et al (2007)
Caliza de moleanos	Meteus et al (2012)
Colas de wollastonita	Hill et al (1997)
Cascara de palma aceite productos artificiales	Chong et al (2013)
Carbón activado	Ren et al (2007)
Agregados de peso ligero	Saeed&Sun (2012)
Compost	Saeed&Sun (2012)
Silicato calcico hidratado	Li et al (2011)
ceramita	Li et al (2011)

Otros estudios también proporcionan alguna información sobre la selección de sustrato con el fin de optimizar la eliminación de nitrógeno y los compuestos orgánicos, y los sustratos, tales como lodos de alumbre y cáscara de arroz son introducidos (Babatunde et al., 2010; Saeed y Sun, 2012).

2.4.2.2. *Microorganismos*

Los microbios desempeñan un papel importante en la eliminación de contaminantes, y las plantas podrían mejorar la actividad microbiana pues su abundancia proporcionaría oxígeno y una fuente de carbono del sistema de raíces, este oxígeno se transporta desde la superficie

a través del rizoma y se libera en el suelo, lo que tiene un gran impacto en el potencial redox y la actividad microbiana (Stottmeister et al., 2003; Yang et al., 2016). Se considera que alrededor del 10% - 40% de la producción neta de fotosíntesis se libera como exudados en la raíz, lo que puede estimular el crecimiento microbiano y proporcionar una fuente de carbono para las bacterias, incluidos los desnitrificadores. Por lo tanto, hemos especulado que la recolección de plantas puede afectar a la comunidad microbiana y mejorar aún más el rendimiento de los HI (Yang et al., 2018). Sin embargo, Yang et al. (2016), indican que los estudios encaminados a una identificación y desempeño microbiano son escasos y la mayor parte de la información se desarrolla en técnicas de aislamiento por colorimetría y muy pocos estudios emplean técnicas de biología molecular que permite conocer con mayor precisión el tipo de microorganismos e identificar la función que cumple en la interacción, plantas, sustrato y microorganismo. Existe un vacío entre la interacción microorganismos-sustrato-planta y es necesario investigar debido a que los microorganismos juegan un papel importante en el proceso de remoción y oxigenación, es importante conocer su funcionamiento para maximizar los procesos de remoción e incorporar mejoras en futuros diseños (Vymazal, 2014; Hernández, 2016). Por otra parte, en materia de uso de técnicas de biología molecular estas han sido ampliamente usados para identificar microorganismos en suelos, agua y mayormente en el área de la salud, pero poco empleadas en identificación de microorganismos en Humedales Ingenieriles (Li et al. 2018). Resulta importante conocer e identificar qué tipos de microorganismos contribuyen a los procesos de degradación de nitrógeno y fósforo, puesto que estos son los principales contaminantes presentes en aguas residuales contaminadas (Hamersley et al., 2009).

2.4.2.3. Vegetación

Las plantas juegan un papel importante de los humedales, intervienen en numerosos procesos, beneficiando el desarrollo y equilibrio natural en los ecosistemas donde están presentes (Lot & Novelo, 2004). Las comunidades vegetales acuáticas y subacuáticas a menudo se presentan de forma dispersa y ocupan superficies limitadas dentro de estos sistemas, pero son fundamentales para el desarrollo de procesos bioquímicos en humedales (Heynes-Silerio et al., 2017). Estas plantas que se desarrollan en humedales poseen

adaptaciones morfológicas, fisiológicas y reproductivas que les permiten tolerar el exceso de humedad e inundación constante parcial o total (Tiner, 2012). Las especies van desde especies capaces de tolerar suelos inundados, a especies que pueden desarrollarse tanto en tierra como en agua, hasta plantas adaptadas a vivir completamente sumergidas (Heynes-Silerio et al., 2017). En relación con el grado de dependencia que tienen con el agua es posible clasificarlas como acuáticas estrictas, subacuáticas y tolerantes (Lot et al. 1993). Además, tomando como base la manera en la que las plantas crecen en relación con el agua y el suelo, son categorizadas como emergentes, sumergidas, de hojas flotantes y flotantes (Martínez et al., 2010). La tabla 2.3, muestra las principales especies dominante en humedales.

Tabla 2.4. Especies y asociaciones dominantes en humedales

Tipo de plantas	Forma biológica	Especies y asociaciones dominantes en humedales	Distribución en los humedales.
Acuáticas	Emergentes	<i>Typha domingensis</i>	Comunidades densas, generalmente en los márgenes de los cuerpos de agua.
		<i>T. latifolia</i>	
		<i>Schoenplectus americanus</i> <i>S. californicus</i>	
	Sumergidas	<i>Ceratophyllum demersum</i>	Zonas cercanas a la orilla de los humedales y hacia el interior de estos, en lugares de mayor profundidad.
		<i>Myriophyllum pinnatum</i>	
		<i>M. spicatum</i>	
<i>M. spicatum</i>			
		<i>C. demersum, Najas guadalupensis</i> <i>Zannichelliapalustris</i>	
	Hojas flotantes	<i>Nymphoides fallax</i> <i>Potamogeton nodosus</i>	Sitios poco profundos
	Flotantes	<i>Azolla microphylla</i> <i>ylemna valdiviana</i>	Aguas con poca movilidad.
Subacuáticas	Emergentes	<i>Eleocharis acicularis</i>	Zonas muy poco profundas cercanas a los márgenes de los cuerpos de agua y hacia el exterior de los humedales en el estrato arbóreo.
		<i>E. parichii</i>	
		<i>Juncus ebracteatus</i>	
		<i>J. liebmannii</i>	
		<i>J. tenuis</i> <i>E. parishi</i> con <i>Pericaria mexicana</i> .	
		<i>Salix bonplandiana</i>	

Fuente: Heynes-Silerio et al. (2017)

Las plantas de los humedales tienen varios rasgos y mecanismos para evitar o tolerar la anoxia. Respuesta metabólica de especies tolerantes a las inundaciones a condiciones anaeróbicas se diferencia de plantas menos tolerantes a las inundaciones (Jackson & Colmer, 2005). Las plantas en condiciones de inundación por más de 24 horas son sensibles a daños de anoxia (falta de oxígeno), sin embargo, algunas plantas han desarrollado estrategias para resistir temporalmente la anoxia, acelerando el metabolismo anaeróbico, mientras que otras plantas están bien adaptadas para sobrevivir y crecer durante períodos prolongados en condiciones anaeróbicas (Huang et al., 2018). Las plantas de humedales que son tolerantes contra inundaciones pueden regular a la baja el metabolismo y se han adaptado estructuralmente para crear un ambiente aeróbico dentro de condiciones anóxicas con tejido aerénquima, que tiene espacios llenos de gas, llamados lagunas, las células de separación, proporciona una vía interna de baja resistencia para el intercambio de gases entre las partes de la planta por encima del agua y los tejidos sumergidos (Yang et al., 2018). El oxígeno es transportado a las raíces, y se utiliza ya sea en la respiración o se libera al suelo o matriz de agua que la rodea (Armstrong, 1971). Muchas plantas de humedales previenen la pérdida de oxígeno excesiva de las zonas de raíz basales mediante la formación de raíces con una completa o parcial 'barrera' radial, pérdida de oxígeno en sus epidermis, exodermis o capas subepidérmicas con células lignificadas o suberizadas, la pérdida de oxígeno Root al suelo o de la matriz de agua resultados circundantes en la oxidación y la desintoxicación de sustancias reductoras potencialmente dañinos en la rizosfera beneficiando así las plantas. Las sustancias reducidas son productos del metabolismo anaerobio de los microorganismos. En condiciones de suelo saturado, los microorganismos del suelo anaerobios utilizan receptores terminales de electrones distintos de oxígeno, la reducción de nitrato (NO_3^-), iones de manganeso (Mn^{4+}), iones férricos (Fe^{3+}), sulfato (SO_4^{2-}), y dióxido de carbono (CO_2), la pérdida de oxígeno Root (Mecanismo que realizan las raíces para tener un buen desarrollo) proporciona un aceptor terminal de electrones energéticamente favorable para la respiración microbiana que resulta en la oxidación de carbono orgánico, sulfuro (S^{2-}), y la reducción de hierro y manganeso (Taylor, 2009).

De acuerdo con Tanner (1996) y Zurita (2008), las características que en general se consideran deseables en las plantas a utilizar en los sistemas de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, incluye los siguientes:

- 1) Compatibilidad ecológica; no debe representar riesgos para la integridad ecológica o genética de los ecosistemas naturales circundantes.
- 2) Tolerancia a las condiciones climáticas locales, plagas y enfermedades.
- 3) Tolerancia a los contaminantes y a las condiciones saturadas de agua.
- 4) Rápida propagación, establecimiento y crecimiento.
- 5) Alta capacidad para remover contaminantes, ya sea mediante asimilación directa y almacenamiento o indirectamente al estimular las transformaciones microbianas.

Pero, además, en el momento de seleccionar las plantas a utilizar se debe tomar en cuenta el tipo de humedal y su modo de operación (flujo continuo, en batch o intermitente), la carga hidráulica y las características del agua residual. Puede ser también que haya otros objetivos subyacentes como el económico recreativo, estético o ecológico en la operación del humedal (Tanner, 1996; Zurita, 2008). Por otra parte, las especies nativas o muy adaptadas en los humedales naturales en cada región en particular representan las mejores opciones de especies a utilizar en los humedales artificiales.

El campo de la utilización de especies ornamentales como plantas emergentes en humedales construidos es muy prometedor en los países subdesarrollados (Zurita, 2008). En un estudio realizado a escala piloto por Zurita (2008) se encontró que la presencia de flores ornamentales mejoro la efectividad de los humedales en la misma forma en que lo hacen las micrófitas convencionales como la *Thypha*, *Scirpus* y *Phragmites*, cuya capacidad para suministrar oxígeno al sistema está ampliamente documentado; de modo que la calidad del efluente obtenido del sistema de humedales fue la misma que la obtenida en numerosos estudios con plantas emergentes convencionales. Las especies utilizadas para este estudio fueron: *Z. aethiopica*, *A. andreanum*, *S. reginae* y *A. africanus*.

2.5. Eliminación de contaminantes en humedales ingenieriles

Tanto para las aguas marinas costeras como para el resto de las fuentes de agua superficial, las aguas residuales constituyen la mayor aportación de contaminación a las mismas. Para subsanar esto es necesaria la autopurificación, sin embargo, en muchas de las ocasiones la capacidad de carga del ecosistema ha sobrepasado a la capacidad autopurificadora del ecosistema.

Es debido a esto que actualmente se han optado por innumerables modelos de sistema de tratamiento de aguas residuales, como por ejemplo los HI, que pueden ser utilizados por los gobiernos, así como por las industrias del sector privado, ya sean de bienes y servicios o del sector de transformación, cuyo costo monetario no se compara al costo e impacto final que tiene la omisión de ellos para el tratamiento de sus aguas residuales, cuyos impactos en muchas de las ocasiones son irreversibles para el planeta (Lazcano, 2016; Delgadillo, 2010).

Dentro de los principales objetivos del tratamiento de las aguas residuales podemos mencionar los siguientes:

- ✓ El cumplimiento con la legislación vigente de la región específica en donde se realice el tratamiento, para vertimiento a la red de alcantarillado de aguas residuales no domésticas y el vertimiento a las fuentes de agua.
- ✓ La reducción de la carga orgánica del desagüe en términos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), o la demanda química de oxígeno (DQO).
- ✓ Reducir o remover componentes como N, P, con la finalidad de evitar que estos lleguen al subsuelo y la contaminación tenga un impacto mayor, al contaminar aguas limpias.

En un estudio realizado a escala piloto el tipo de vegetación emergente fue significativo para la remoción de DBO y DQO, y fue superior en los humedales plantados con tres especies debido probablemente a la abundancia de una mayor variedad de comunidades bacterianas anaerobias y aerobias ante la presencia de tres tipos de raíces; de manera tal que la biodegradación de la materia orgánica se realizó a través de una mayor diversidad de reacciones lo que condujo a eficiencias más altas (Zurita et al. 2008).

En el mismo estudio se encontró que el tipo de flujo fue determinante para la eficiencia de remoción de contaminantes. Los humedales de flujo vertical fueron más efectivos que los de flujo horizontal debido a la mayor capacidad de oxigenación por la alimentación del agua residual en forma intermitente. Sin embargo, las eficiencias registradas pueden incrementarse aún más mediante modificaciones en la profundidad del lecho y diámetro promedio del sustrato (Zurita, 2008).

2.5.1. Criterios de diseño de humedales ingenieriles

Se conocen diferentes apuntes literarios que evocan y explican el funcionamiento de los humedales teniendo en cuenta diferentes parámetros de diseño como son lugar de construcción, calidad de agua, selección de plantas, tipos de sustratos (Peña-Guzmán & Lara-Borrero, 2012). En este sentido este apartado se muestra algunos de los principales criterios de diseño de HI, empleados en el tratamiento de aguas con problemas de contaminación.

Lazcano (2010) comenta que para un buen diseño al contemplar la relación del tratamiento biológico DBO/DQO recomienda que sea mayor o igual que 0.4; de lo contrario, se deben identificar los componentes no biodegradables o tóxicos y proceder con un tratamiento químico previo.

Las principales fórmulas para el cálculo de un HI de acuerdo a Yocum (2009) son las siguientes:

Velocidad de reacción:

$$K_r = K_t (1.06^{(T-t)})$$

Tiempo de detección:

$$t = -\ln(C/C_o)/K_r$$

Tasa de carga orgánica:

$$L_{org} = (C)(d_w)(\eta)/t$$

Área:

$$A_s = (Q_{ave})(t)/(\eta)(d_w)$$

Dimensiones del humedal, tratamiento:

$$w = (A_s/R_A)^{1/2}$$

Longitud del humedal construido:

$$l = A_s/W$$

2.6. Humedales ingenieriles versus sistemas convencionales

Históricamente, los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales se han utilizado con éxito para el control de la contaminación del agua en la mayoría de los países (Li et al., 2014), sin embargo, estas tecnologías, tales como proceso de lodos activados, biorreactores de membrana y separación son bastante costosos y no totalmente factibles para su implementación en áreas rurales (Chen et al., 2014; Castañeda 2017). Las consecuencias ambientales comunes en la mayoría de los sistemas convencionales son: (a) el consumo de recursos no renovables que se están agotando con el tiempo, lo que limita su disposición para las áreas de aplicación en las que son realmente insustituibles, (b) la degradación ambiental asociada con la extracción y uso de combustibles fósiles, plásticos, concreto y reactivos químicos, y (c) el destino de grandes cantidades de subproductos resultantes como el lodo generado (Kadlec y knight, 1996 ; kinwaga et al., 2004 ; Zurita, 2008). Por otra parte, la mayoría de los sistemas convencionales de tratamiento no reducen el contenido de patógenos de forma significativa (Parra et al., 1999; Zurita 2008).

Con respecto a los humedales artificiales, estos son apropiados para áreas remotas en donde no existe un suministro regular de energía (Zensia et al., 2003). Otras ventajas de los humedales artificiales, de acuerdo con Price Probert (1997) y Zurita (2008), son las siguientes:

- 1) Son fáciles de construir.
- 2) Son más robustos que los sistemas convencionales, pueden soportar grandes variaciones en las condiciones de operación.
- 3) Ofrecen un diseño flexible, que se adecua a las necesidades de los usuarios y a los parámetros del sitio.
- 4) Pueden tratar el efluente *in situ*, reduciendo los costos relativamente altos de la conexión a las plantas de tratamiento centralizadas
- 5) El efluente tratado puede reincorporarse al ambiente sin necesidad de transportarse a otras áreas
- 6) Una vez establecidos se mantienen, prácticamente, por si solos (la supervisión puede ser mínima)
- 7) Amortiguan las variaciones en la calidad del agua
- 8) Proporcionan subproductos útiles, tales como un hábitat natural y la amenidad visual.

Sin embargo, los requerimientos de tierra para HI pueden ser el factor más limitante para su aplicación más amplia, especialmente en algunas regiones, donde los recursos de la tierra son escasos y la densidad de población es alta (Castañeda, 2017).

Conclusiones

Los diferentes conflictos causados por la contaminación de cuerpos superficiales y subterráneos de aguas se han convertido en un reto por superar en el mundo actual principalmente en países en vía de desarrollo, con limitaciones de recursos y disponibilidad.

Por otra parte, el crecimiento poblacional e industrial es una situación que ha atenuado los problemas en materia de contaminación de aguas, lo que recae en una necesidad de tratarlas con mecanismos eficientes y económicos, al alcance de los gobiernos locales con pocos recursos económicos para atender problemas de esta índole.

Los Humedales Artificiales, Construidos o Ingenieriles han demostrado ser muy eficientes para el control de contaminantes de aguas residuales domésticas e industriales, lo cual los muestra como una alternativa barata para controlar problemas de contaminación de aguas en zonas urbanas, peri-urbanas y rurales.

CAPITULO III. ESTADO DEL ARTE

3.1. Introducción

Durante los últimos años se han desarrollado diferentes investigaciones con el fin de crear alternativas de tratamiento de aguas residuales de forma sustentable, algunas de estas van encaminadas a los tratamientos con HI. Para esta investigación se seleccionaron todas aquellas que tienen importancia, similitud y relación con el presente trabajo de tesis doctoral. De igual manera en este capítulo se habla de las evoluciones que han presentado los diseños de los HI, pasando desde los sistemas a nivel microcosmos hasta humedales a tamaño real, así mismo, se analizan los diferentes medios de soporte o sustratos y la vegetación que se ha empleado en estos sistemas, además de las barreras socioeconómicas presentes en la implementación.

El conocimiento que se ha publicado en revistas y libros internacionales sobre la optimización del rendimiento del sistema se ha incrementado drásticamente en los últimos años, lo que presenta a los HI para el tratamiento de aguas como una opción ampliamente reconocida. Esta ecotecnología se basa en los procesos de los Humedales Naturales para remoción de contaminantes, pero en condiciones más controladas en comparación con los ecosistemas naturales (Kadlec & Wallace 2009; Mitsch & Gosselink 2015; Marín-Muñiz 2018). En estos sistemas hay tres componentes importantes que se deben considerar (tipo de vegetación, sustratos y microorganismos) al momento de implementar este sistema.

3.2. Contaminación en aguas residuales

Actualmente el porcentaje de aguas residuales municipales que se tratan en Mexico es apenas del 34% (INEGI, 2017) pues solo 34 de cada 100 municipios cuentan con este servicio. Existe evidencia de que el tratamiento de aguas residuales data de 3500-2500 a.C. en Babilonia. Sin embargo, en años recientes comenzó a cobrar importancia debido a las implicaciones económicas, ambientales y de salud que se tienen por no tratar las aguas servidas (Henze et al., 2008). Desde entonces, las tendencias en el tratamiento del agua residual han evolucionado de tal forma que actualmente la remoción de carga orgánica y patógenos ya no es suficiente, sino que además se busca la remoción de nutrientes y fármacos, así como el aprovechamiento energético en los sistemas de tratamiento (Sharma et al. 2012).

En gran parte de los cuerpos receptores de descargas de agua residuales se observan distintos tipos y niveles de contaminación debido al aumento de las descargas hacia dichos cuerpos (Ramírez-Carrillo et al., 2009; Oves et al., 2018). En México en el Diario Oficial de la Federación se publicaron las normas que regulan las concentraciones de los contaminantes que cohabitan en el agua para distintos fines (NOM-001-ECOL-1996), dichas normas regulan las descargas vertidas en cuerpos de agua, aunque gran cantidad de estas no se encuentran dentro de la calidad requerida (Jofre-Meléndez et al., 2015). Adicionalmente, en México existen muy pocos sistemas de tratamiento de aguas residuales, se encuentra en operación 2,477 plantas municipales y 2,832 plantas para el sector industrial, las cuales solo tratan entre el 30 - 40% y 31%, respectivamente (Conagua, 2016; Hernández, 2016; Hernández-Salazar et al., 2017). El resto de las descargas no reciben ningún tipo de tratamiento y contribuyen notablemente a la continuación de cuerpos de agua o sitios de descarga como puede ser el suelo. Lo anterior debido principalmente a la falta de fondos económicos para la implementación, operación y mantenimiento de las plantas tratadoras, situación más recurrente en poblaciones rurales o con bajas concentraciones de población, como se da en el estado de Veracruz, donde una importante cantidad de su población (22%) radica en asentamientos rurales.

El término contaminación hace referencia a la presencia de sustancias en un ambiente al cual no pertenecen, o en su caso se encuentran en concentraciones mayores de lo que deberían de ser (Viraraghavan & Srinivasan, 2011). El agua es considerada como un recurso natural primordial para la vida, por lo que constituye una necesidad para la salud (Yan et al., 2018).

Las aguas residuales son aguas contaminadas básicamente con nitrógeno, fósforo, materia fecal y orina de seres humanos o de animales, además de otras sustancias provenientes del hogar, industrias, comercios y agua de lluvia (Von Sperling, 2017). Estas aguas contaminadas afectan la calidad de los cuerpos receptores, haciéndolos incluso inaceptables para su uso posterior (WWAP, 2017).

Cuando el agua residual no es tratada puede ocasionar problemas de salud debido a la presencia de patógenos, así como impactos adversos al ambiente debido a su contenido en nutrientes y sustancias tóxicas (Redmond et al., 2014). La Organización Mundial de la Salud (2016) manifiesta que alrededor de todo el mundo existen por lo menos 1,800 millones de

personas que se abastecen de una fuente de agua potable contaminada, además se calcula que unas 842,000 personas mueren cada año como consecuencia de la insalubridad del agua.

3.3. Tratamiento de aguas residuales con humedales ingenieriles

Las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales se basan en la integración de procesos físicos, químicos y biológicos que requieren de equipamiento mecánico y eléctrico, por lo que demandan una gran cantidad de energía para ejecutar los procesos, lo cual encarece su construcción e implementación (Muga & Mihelcic, 2008). Esta combinación de factores implica la necesidad de que se desarrollen alternativas económicamente viables para el tratamiento de aguas residuales que atiendan las necesidades de saneamiento, como lo son los HI (Sandoval-Herazo et al., 2016), estos sistemas están inspirados en las funciones de los humedales naturales.

Su estructura consiste en canales en batería rellenos con sustrato donde se siembran plantas y por donde el agua fluye (figura 3.1), y a través de procesos biológicos y físicos los contaminantes son removidos del agua (Hernández et al., 2013) mediante un tratamiento sin requerimiento de alguna fuente de energía (Hickey et al., 2018). Los humedales son percibidos como ecosistemas de auto-descontaminación con resultados de altas productividades, el término humedales ingenieriles es relativamente nuevo, su concepto no lo es, en el antiguo Egipto y en China se usaban humedales naturales para tratar aguas residuales de forma empírica (Mitsch & Gosselink, 2015).

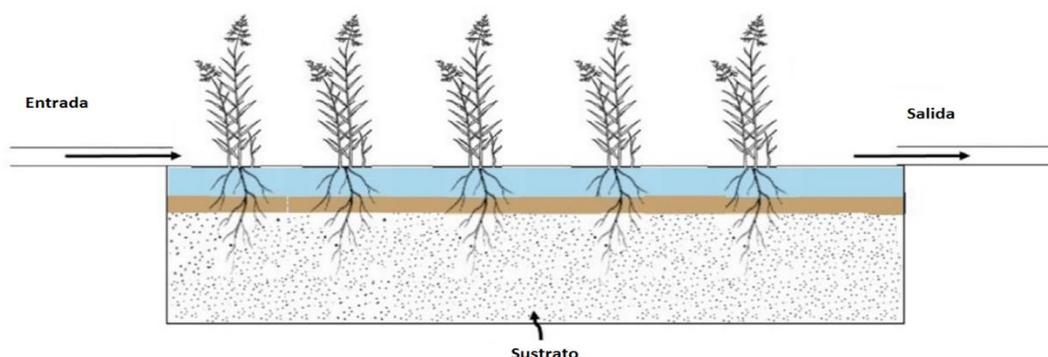


Figura 3.1 Estructura de un HI
Fuente: Bakhsoodeh et al. (2020)

Seidel (1951), realizó en Alemania el primer reporte científico referente a las ventajas que se pueden presentar al utilizar plantas emergentes en el tratamiento de aguas residuales, en su investigación trabaja con *Schoenoplectuslacustris* en humedales, a favor de remover contaminantes inorgánicos y bacterias.

En los años 70, a nivel de laboratorio esta misma autora analizó el efecto de las plantas sobre la remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas e industriales. Seidel diseñó un sistema donde se combinaron humedales de flujo vertical y horizontal denominado *Proceso del Instituto Max Planck* (Espinosa-Ortiz, 2014).

Por otra parte, el desarrollo de humedales en el continente americano fue influenciado por los resultados obtenidos en Europa e inspirado en el funcionamiento de humedales naturales. Como mecanismos de tratamiento de aguas residuales se impulsaron a finales de los 90 y se inician como potencial de saneamiento en los 2000, mediante los HI plantados con *Phragmitesaustralis* (Commonreed), especies del género *Typha* (latifolia, angustifolia, domingensis, orientalis and glauca), *Scirpus* spp (lacustris, validus, californicus and acutus), y especies de *C. PapyrusThyfa*, en su mayoría plantas nativas de humedales naturales (Mitsch & Gosselink, 2007; Marín-Muñíz, 2017; Li et al., 2018). Fue tan importante el desarrollo de humedales que la NASA implementó sus propios sistemas de tratamiento, denominados híbridos de tratamiento integrado por microorganismos anaerobios y plantas emergentes “*Phragmitescommunis*” (Caballero-Peluffo et al., 2016).

3.3.1 Estado actual de los humedales ingenieriles

Los humedales ingenieriles han aparecido como una tecnología prometedora que puede utilizarse para resolver un problema ambiental, como la contaminación del agua, debido a sus eficiencias en la remoción de contaminantes, bajos costos de implementación y mantenimiento, así como fácil operación y manejo, por lo que se consideran la alternativa más sustentable para el manejo descentralizado de aguas residuales (Kadlec & Wallace, 2008; Mitsch & Gosselink, 2000).

La remoción de contaminantes en los HI depende de diferentes variables entre las que se incluyen: tasa de aplicación de aguas residuales, velocidad de carga orgánica, régimen hidrológico, tiempo de retención hidráulica (HRT), el modo operativo, y el tipo de vegetación

(Kadlec y Wallace, 2008), las condiciones hidráulicas e hidrológicas pueden influir significativamente en la composición de las comunidades microbianas, interacciones bioquímicas y destino final de los contaminantes en el HI (Hernández et al., 2017). Lo que indica que la remoción de contaminantes en gran parte se logra manipulando las condiciones hidráulicas e hidrológicas del sistema, con la adecuada selección de sustratos y de la vegetación al momento de su aplicación (Vymazal, 2007; Wang et al., 2018). Sin embargo, el impacto adverso en la eficiencia del tratamiento se puede esperar con bajas temperaturas (especialmente la inhibición de la N-extracción), con flujos máximos (lavado de sólidos), y con la obstrucción de los sistemas de flujos subsuperficial.

Los países en desarrollo se localizan en su mayoría en zonas tropicales, por lo que tienen climas cálidos tropicales y subtropicales, como es el caso de México, sus condiciones medioambientales son diferentes, por lo tanto, el potencial de aplicación de tratamientos con HI es muy grande, debido a que se verían favorecidos muchos subprocesos determinantes en el proceso bioquímico final (Wang et al., 2017). Otros autores también reconocen que los HI son más adecuados para el tratamiento de aguas residuales en regiones tropicales que en las regiones templadas (Denny, 1997; Kivaisi, 2001; Hernández-Salazar, 2017). En este tipo de humedales se presenta un constante y relativo flujo de energía solar, así como altas temperaturas y humedad durante todas las temporadas climáticas del año. Este contraste hace las principales diferencias entre humedales de zonas templadas y cálidas, en éstas últimas se tienen efectos positivos en el tratamiento de aguas residuales (Casierra-Martínez et al., 2017). Como casi todos los procesos biológicos son dependientes de que la temperatura y la humedad aumenten, en un clima cálido se favorece el crecimiento de las plantas durante todo el año y aumenta la actividad biológica, lo que en general tiene un efecto positivo en la eficiencia del tratamiento (Zhang et al., 2012; Kadlec et al., 2017). Por lo anterior, las zonas tropicales favorecen la biodegradación de la materia orgánica y la nitrificación/desnitrificación, entre otros procesos bioquímicos que ocurren en humedales.

Truu et al. (2009) indicaron que las condiciones ambientales en regiones tropicales pueden mejorar la eliminación de contaminantes y el desarrollo de microorganismos que coexisten en HI alcanzando su actividad óptima en temperaturas calidas (15 - 25°C). Por otra parte, Vymazal (1995) informó que la temperatura óptima en los suelos para la nitrificación en

cultivos puros está en rangos de 25 a 35°C y de 30 a 40°C. La temperatura también tiene un fuerte efecto en las eficiencias de eliminación de nitrógeno y amonio totales. La eliminación de nitrógeno es mejor a temperaturas del agua mayor a los 15°C, con resultados significativamente más altos que las observadas a temperaturas bajas (Saeed & Sun, 2012), la volatilización de amoniaco aumenta entre 1.3 – 3.5 veces con cada aumento de 10°C si la temperatura oscila de 0 a 30°C, asimismo, las tasas de desnitrificación aumentan casi el doble (1.5 - 2.0) con cada incremento de 10°C (Ng & Gunaratne, 2011). A pesar de que aproximadamente la mitad de la zona húmeda del mundo (450 millones ha.) se encuentran en los trópicos, la tasa de implementación de los Humedales como tecnología para el tratamiento de las aguas residuales en estas regiones ha sido lenta (Kivaisi, 2001; Zurita et al., 2011; Hernández, 2016). Por otra parte, hay relativamente pocos informes publicados sobre las aplicaciones de HI en condiciones tropicales y subtropicales (Konnerup et al., 2011; Zhang et al., 2015; Casierra-Martínez et al., 2017; Marín-Muñiz et al., 2018). Lo que hace importante evaluar estos sistemas tanto en sus propiedades bioquímicas, como medios de soportes y plantas que favorezcan el tratamiento de aguas residuales e industriales en estos sistemas.

3.4. Sustratos empleados en humedales ingenieriles de flujo

Los sustratos cumplen diferentes funciones importantes dentro de los HI, ya que juega un papel integral de funciones físicas, funciones químicas y funciones biológicas (filtro, trampa, adsorción, degradación) para eliminar los contaminantes (Yang et al., 2018). Inicialmente se pensaba que los sustratos solo cumplían la función de soporte de las plantas, que si bien, es una de sus funciones, no es la única (Korboulewsky et al., 2012), la forma en que estos HI trabajan tiene similitud con los procesos biológicos que se dan en la naturaleza y en los filtros utilizados en las plantas de tratamiento convencionales (Chafloque, 2006). Los sustratos funcionan integrados al sistema Agua-Planta, creando condiciones que propician la eliminación de contaminantes presentes en las diferentes aguas a tratar (Beavers & Tully, 2005; Mitsch & Gosselink, 2015; Cao et al., 2016).

Los sustratos son un componente importante dentro de los HI, ya que proporciona un medio de cultivo adecuado para la planta y también permiten el movimiento exitoso de las aguas residuales (Kadlec & Wallace, 2009; Castañeda, 2017).

Actualmente se conoce muy poca información sobre los procesos bioquímicos que se dan en los humedales (Faulwetter et al., 2009; Hernández, 2016; Martínez, 2016), los estudios de revisión y científicos sobre el tema tratan fundamentalmente acerca de las funciones de depuración de contaminantes, desarrollo de plantas, condiciones bioclimáticas, funcionalidad de diferentes tipos de HI, gases de efecto invernadero, entre otros temas que no profundizan en la importancia de los sustratos (Bassi et al., 2014; Berberidou et al., 2017; Hernández-Crespo et al., 2017; Maucieri et al., 2017; Pavlineri et al., 2017; Runting et al., 2017), y menos en la identificación de nuevos materiales que disminuyan los costos de construcción de los sistemas en zonas marginadas, donde no cuentan con recursos económicos suficientes para conseguir materiales pétreos, mismos que han sido los más empleados para este fin. Lo que convierte a la implementación de sustratos en un avance en materia del conocimiento del funcionamiento microbiano en los sistemas (Tanner y Headley, 2011; Sandoval-Herazo et al. 2016).

3.4.1 Clasificación y selección de sustratos

Las categorías en las que tradicionalmente se clasifican los sustratos son material natural, subproductos industriales y productos artificiales (Tsihrintzis, 2017; Vohla et al., 2011; Wu et al., 2015). De acuerdo a la función que desempeñen en la eliminación de contaminantes se pueden clasificar como sustratos de intercambio iónico, sustratos p-sorción y sustratos donantes de electrones. (Yang et al., 2018). Así, los sustratos con alto contenido en Ca, óxidos de Mg, Al o Fe tienen alta capacidad de eliminación de P, tales como lodos de alumbre, lodos de drenaje ácido de minas, escoria, y piedra caliza (Sibrell et al., 2009; Ballantine y Tanner, 2010; García et al., 2010; Vohla et al., 2011; Yang et al., 2018). Los sustratos con alta capacidad de intercambio de iones como LECA (arcilla expandida) y zeolita tienen alta capacidad de eliminación de amonio (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012; Wu et al., 2014). Los sustratos con actividad biótica que pueden ser utilizados por los microbios como donantes de electrones, son paja de arroz (Cao et al., 2016) y azufre (Bezbaruah & Zhang, 2003; Yang et al., 2018) los cuales tienen altas eficiencias de eliminación de nitratos.

La elección de sustratos empleados en los HI radica en características como es el tamaño granular que puede ser entre 0.1 a 5 cm, dependiendo del tamaño del humedal, ya que afecta

directamente al flujo hidráulico y al caudal generado por el agua residual contaminada (Ziqiang et al., 2017).

Una selección adecuada de los sustratos puede repercutir significativamente en la eficiencia de los HI. La disponibilidad en el lugar y el costo son factores que determinan su selección, para una selección más específica se deben considerar factores físicos (tamaño de partícula, porosidad, conductividad hidráulica y eléctrica, áreas específicas de superficie y resistencia mecánica), químicos (superficie de carga, toxicidad y estabilidad química) y biológicos (capacidad para donar/ aceptar electrones) (Yang et al., 2018).

3.4.2 Sustratos convencionales

De un análisis de los sustratos usados en diferentes estudios, se encontró que a nivel mundial la mayoría son de origen pétreo. Los sustratos empleados en su mayoría son: suelo, arena y grava (Yang et al., 2018), aunque existen otros materiales que pueden ser utilizados, la Tabla 3.1 muestra una revisión de otros sustratos empleados comúnmente en HI, los cuales generan la eliminación de contaminantes mediante procesos físico-químicos.

Tabla 3.1 Tipos de sustratos utilizados y su eficiencia en la eliminación de contaminantes específicos en HI

Humedal	Escala	Especie de planta	Sustrato (s)	Tamaño S	% Remoción	Agua	País	Autor
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Phragmites australis</i> ,	Grava triturada	0.952 a 2.54 cm	DBO5=86 %, NT=64 %, PT=68 %, G y A=60 %, DBO5, DQO, SST, NT, PT(81.10 % y 95.44 %)	Domésticas	Colombia	Agudelo et al. 2010
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Pontederia cordata</i> , <i>Cyperus Papyrus</i>	Grava triturada	1 a 5 cm	DBO5, DQO, SST, NT, PT(34-72 %)	Domésticas	México	Acosta et al. 2016
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Phragmites</i>	Grava triturada	0,5 a 1 cm	84% de DQO	Sintéticas	Colombia	González et al. 2016
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Penicillium</i> sp, <i>Stipa ichu</i>	Arena	0.005 - 0.2 cm	DBO5 del 93.89% y de la DQO del 84.98%	Domésticas	Colombia	

Subsuperficial	Microcosmo	<i>Typhaaustifolia</i>	Grava triturada, arena	2 cm; 0.2 cm	75.49% for DBO5, 83.51% for PO4, 88.48 % for NO3	Domésticas	Estados Unidos	Arivoli et al. 2013
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Heliconia rostrata y Heliconia caribaea</i>	Grava triturada	2.0 cm	9,1% (COD), 56,5% (NTK), 61,7% (NH x), 64,3% (TP) y 55,0% (K).	Porcinas	Brasil	Sarmiento et al. 2013
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Gossypium herbaceum</i>	Piedra pómez y grava triturada	0.2 cm ; 2 a 4 cm	DQO fue de 81%	Domésticas	México	Reyes, 2013
Superficial	Microcosmo	<i>Cyperus spp, Lemnaminor</i>	Grava	1.5 cm	0%, 65% y 72% para SS; 65%, 64% y 62% para DBO5; 50%, 45% y 1947% para COD; 29%, 34% y 37% para TOC	Domésticas	Turquía	Ayaz, 2008
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Vetiveria zizanioides</i>	Grava triturada	1.0 a 1.5 cm	33,33, 85,71, y 92,48% de nitrato / nitrito; 53,51, 46,45, y 88,78% de sulfato; y 98,34, 99,72, y 99,6% de TSS	Domésticas	Nigeria	Badejo et al. 2017
Subsuperficial	Mesocosmo	<i>Cyperus alternifolius</i>	oyster shell, zeolite, medical stone and ceramic	0.75 cm; 0.55 cm; 0.4 cm; 0.3 cm	Antibióticos 17.9 a 98.5 %; ARGs 50.0 a 85.8 %	Domésticas	China	Chen et al. 2016
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Canna y Strelitzia reginae</i>	Tezontle	2.0 a 2.5 cm	DQO 84,2%; HRT1, 85,6%; HRT2 81,7%	Domésticas	México	Merino-Solís et al. 2015

Subsuperficial	Microcosmo	<i>Pseudomonas spp</i>	Grava triturada	0.63 a 0.32 cm	Ph 6.5-7.2, CTL 99,7%	Sintéticas	Colombia	Rios-Montes, 2015
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Eleocharisma crostachya</i> y <i>Schoenoplectus americanus</i>	Arena limosa	0.00025 a 0.005 cm	Arsénico 92-81%	Domésticas	México	Valles-Aragon, 2014
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Phragmites australis</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> o <i>Juncus articulatus</i>	Grava triturada, perlita	0.5 a 1 cm	Cu 99%, Cu 90%	Domesticas	Inglaterra	Marchand et al. 2014
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Typhasp</i>	Grava triturada	1.2 a 4.0 cm	P-PO4 63-93%	Doméstica	México	Hernández et al. 2013
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Lolium perenne</i> L. <i>Daytona</i>	Grava triturada	2 a 5 cm	COD: 85; TN: 45.3-57.9; NH4: 86.5-92.7	Sintéticas	China	Chen et al. 2013
Subsuperficial	Mesocosmo	<i>Ipomoea aquatica</i>	Piedra de río	2 a 7 cm	TN: 66.4-76.5; NH4: 58.7-68.9; TP: 45.7-61.7	Lago	China	Li et al. 2010
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Festuca arundinacea</i>	Piedra de río	2 a 7 cm	TN: 66.4-76.5; NH4: 58.7-68.9; TP: 45.7-61.7	Río	China	Zhao et al. 2013
Subsuperficial	Mesocosmo	<i>Festuca arundinacea</i> , <i>Canna flaccida</i> , <i>Juncus effusus</i>	Piedra de río	2 a 7 cm	TN: 90.1; NH4: 86.3; TP: 72.1	Lago	China	White et al. 2013
Subsuperficial	Mesocosmo	<i>Canna sp.</i>	Piedra de río	2 a 7 cm	TN: 50.4; NH4: 100	Río	China	Sun et al. 2009
Subsuperficial	Mesocosmo	<i>Canna sp.</i> , <i>Calamus sp.</i>	Plástico	2.5 cm	TN: 76.94; NH4: 93.50 (removal rates for batch experiment and rice straw substratum)	Sintética	China	Cao, 2014
Subsuperficial	Mesocosmo	<i>Ipomoea aquatica</i>	Piedra de río	2 a 7 cm	TN: 30.7; TP: 38.2	Lago	China	

Subsuperficial	Mesocosmo	<i>Oenanthejavonica</i>	Piedra de río	2 a 7 cm	TN: 90.8; NH4: 96.7; TP: 76.5	Río	China	Zhou et al. 2010
Subsuperficial	Mesocosmo	<i>Oenanthejavonica</i>	Piedra de río	2 a 7 cm	TN: 91.3; NH4: 94.6; TP: 58	Río	China	Xie, et al. 2012
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Oenanthe javanica D.C and Nasturtium officinale</i>	Piedra de río	2 a 7 cm	DBO5: 83	Piscina	China	Hu et al. 2010
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Canna generalis, Scirpusvalidus, Alternanthera philoxeroides, Thaliaeniculata, Cyperusalternifolius</i>	Plástico	0.6 a 0.7 cm	COD: 58.2; DBO5: 33.2; TN: 76.3; NH4: 83.8; TP: 81.4 COD: 56.2; DBO5: 32; TN: 90.5; NH4: 75.8; TP: 80.8 COD: 69.7; DBO5: 39.7; TN: 86; NH4: 82.3; TP: 85.7 COD: 54.1; DBO5: 30.8; TN: 54.5; NH4: 84.3; TP: 78.9 COD: 40.5; DBO5: 23.1; TN: 72.7; NH4: 89.5; TP: 82.3	Sintética	China	Zhang et al., 2014
Subsuperficial	Microcosmo	<i>Typhaorientalis, Phragmitesaustralis, Scirpusvalidus, Iris pseudacorus</i>	Arena	0.2 cm	TN: 64; NH4: 90.3; TP: 61	Sintética	China	Wu et al. 2014
Subsuperficial	Mesocosmo	<i>Thailand angustifoliata cultivar</i>	Semillas de espinaca	0.6 a 0.7 cm	NH4: 86–99 NH4: 83–88 NH4: 81–90	Fertilizante	China	Li et al. 2007

*Jiangxi big
leafage
cultivar
Pantengnativ
e cultivar*

La implementación de materiales pétreos como sustratos en HI, se debe a la porosidad del material, siendo este un factor importante para la formación de biopelículas bacterianas (Maza-Márquez et al. 2017; Xue et al. 1999), ya que permiten el paso de agua, como es el caso de los residuos rugosos de PET (Ziqiang et al. 2017). Los sustratos porosos y/o rugosos donde se desarrollan comunidades bacterianas en los HI, son los principales agentes que contribuyen a remover contaminantes en aguas contaminadas como se puede observar en la tabla 3.2 donde se presentan diferentes sustratos asociados a su porosidad, la cual se determinó por medio del procedimiento estándar de la ciencia del suelo basado en estimaciones de la densidad aparente y la densidad de las partículas (Klute, 1986).

Tabla 3.2 Porosidad de sustratos empleados en humedales

Sustrato	Porosidad 0-1	Autor
Piedra volcánica	0.53 a 0.75	Pérez et al. 2013
Piedra de río	0.36 a 0.50	Esbert et al. 1989
Granito	0.1 a 0.25	Lemaire., et al. 2003
Tepezil	0.8 a 0.85	Lemaire., et al. 2003
Tezontle	0.67 a 0.68	Trejo-Téllez et al. 2013
Piedra pómez	0.45 a 0.5	Cabrera et al. 1999
Sustrato orgánico	0.5 a 0.54	Barbaro et al. 2011
Zeolita	0.4	Peña et al. 2014
Cerámica	0.30 a 0.37	Paleo et al. 2006
Acero	0.01	Vicario, 2017

La porosidad favorece el desarrollo de microorganismos y la eliminación de contaminantes (Long et al., 2016), misma que realizan por medio de la depuración de las aguas residuales

mediante procesos bioquímicos; los principales microorganismos que se encuentran presentes en la formación de biopelículas bacterianas en los humedales ingenieriles son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana permite el consumo de carbono y nutrientes, la función que tiene es la transformación de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación (Charlesworth, 2016; Calheiros et al., 2017). Por consiguiente, gracias a los procesos bioquímicos muchos de los contaminantes encontrados en las aguas residuales se convierten en gases que son liberados a la atmósfera (Ziqiang et al., 2017).

3.4.3 Sustratos emergentes

En la actualidad se han implementado materiales alternativos como el ladrillo y la concha de ostra como innovación en el diseño de HI (Huang et al., 2017). Consiguiendo de manera indirecta, la eliminación de contaminantes por medio del soporte de la vegetación y de los microorganismos, que llevan a cabo la degradación de contaminantes de aguas residuales (Ziqiang et al. 2017). Otros materiales que han surgido recientemente son los trozos de neumático, residuos de construcción, LECA, etc., los cuales también han sido investigados (Yang et al., 2018). El material de desecho como cáscara de palma de aceite (Chong et al., 2013) se ha evaluado como sustratos potenciales en HI para adsorber metales tóxicos como el cobre y el plomo. El uso de anillos de bambú se ha comparado con la grava utilizada como sustrato en HI para un post-tratamiento de efluentes domésticos anaeróbicos (Zanella et al., 2010; Yang et al., 2018). También se ha analizado la capacidad de adsorción de otro tipo de sustratos como: migas de ladrillo hueco, de ceniza de carbón y gránulos de carbón activado en HI para el tratamiento de aguas residuales domésticas, y los experimentos estáticos y dinámicos demostraron que la capacidad de adsorción de los sustratos en combinación fue mayor que la de sustratos únicos (Ren et al., 2007; Castañeda, 2017).

El costo de los materiales usados como sustrato o medio de soporte, es una limitante que presentan los sistemas al momento de ser implementados a tamaño real, para solucionar problemas de contaminación en comunidades donde se requiera. Adicionalmente su costo es variable y no solo tiene utilidad en HI, sino también en procesos de construcción de infraestructura, lo que hace que incremente su valor comercial y en ocasiones no se conviertan en una alternativa para uso en mesocosmos de HI.

En este sentido es importante evaluar nuevos materiales de fácil acceso en zonas cercanas a las zonas donde se pretende implementar los sistemas ingenieriles de tratamiento (Yang et al. 2018; Hernández-Salazar et al., 2017).

3.5. Vegetación utilizada en humedales ingenieriles

La vegetación es uno de los componentes más importantes en los HI (Mitsch & GonsseLink, 2015). Miles de plantas se han adaptado a vivir en agua o humedales, una gran porción de éstas solo se desarrollan en humedales y superficies de agua (Vymazal, 2013). La principal característica anatómica de las plantas utilizadas en humedales es la presencia o desarrollo de espacios de aire en diferentes partes de las hojas, tallos, rizomas y raíces (Cronk & Fennessy, 2016; Brix, 1997; Tiner, 1999). El tipo de vegetación que se puede sembrar son plantas emergentes, plantas flotantes o plantas sumergidas (Fig. 3.2) (Vymazal, 2016; Hernández, 2016; Calheiros et al., 2017).

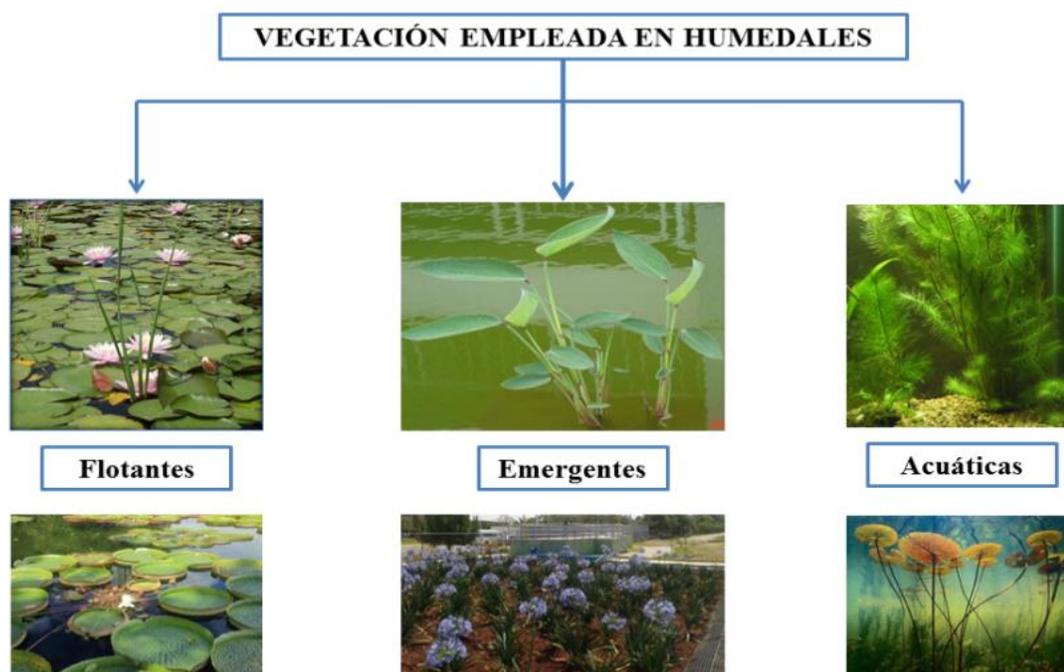


Figura 3.2. Tipo de vegetación empleada en humedales

A pesar de que más de 50 especies de micrófitos se han utilizado en HI a nivel mundial, solo un número limitado de estas son utilizadas en HI (Castañeda, 2017; Vymazal, 2013). La principal función de la vegetación es proporcionar oxígeno al sistema para que llegue aire a

la zona radical y crear escenarios para el desarrollo de comunidades bacterianas y absorción de contaminantes presentes en el agua (Tabla 3.3) (Latune et al., 2017). Sin embargo; se sabe relativamente poco acerca de sus efectos sobre los procesos de aguas residuales y microbianos o respuestas de temporada a la temperatura. Una mayor comprensión de las influencias estacionales en la vegetación podría permitir a los diseñadores manipular otra variable para aumentar la eficiencia de tratamiento de las aguas residuales (Vymazal, 2011; Martínez, 2016).

Tabla 2.3 Principales funciones de la vegetación en los humedales ingenieriles en el tratamiento de aguas residuales.

Tejidos	Papel en el tratamiento
Tejido vegetal aéreo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Atenuación de la luz - reducción del crecimiento de fotosíntesis ✓ Influencia del microclima - aislamiento durante invierno ✓ Velocidad del viento reducida - riesgo reducido de re-suspensión ✓ Estética apariencia agradable del sistema.
Tejido vegetal en agua	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Almacenamiento de nutrientes ✓ Efecto de filtrado - filtra residuos grandes ✓ Velocidad de corriente reducida: aumento de la velocidad de sedimentación, riesgo reducido de re-suspensión ✓ Excreción de oxígeno fotosintético - aumentado degradación aeróbica ✓ Consumo de nutrientes ✓ Suministro de superficie para fijación de perifiton
Raíces y rizomas en el sedimento	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Estabilizando la superficie del sedimento - menos erosión ✓ Prevención de la obstrucción del medio en sistemas de flujo vertical ✓ Suministro de superficie para el crecimiento bacteriano ✓ La liberación de oxígeno aumenta la degradación (y nitrificación) ✓ Consumo de nutrientes ✓ Liberación de antibióticos, fitoquímicos y fitoquelatinas

Fuente: Vymazal (2013)

Marín-Muñiz (2017), reporta que la principal vegetación utilizada en la región tropical y subtropical en humedales ingenieriles son especies características de humedales naturales como *Phragmites australis* (Commonreed), especies del género *Typha* (latifolia, angustifolia, domingensis, orientalis and glauca), *Scirpus* (lacustris, validus, californicus and acutus) spp., y especies de *C. papyrus*, la Tabla 3.4 muestra estudios de las plantas empleadas en HI, se aprecia que una de las especies mayormente evaluadas es la *Typhaspp* y los sistemas del subsuelo utilizado *Scirpus*spp. Las evaluaciones realizadas han sido sobre el efecto positivo

en la eficacia del tratamiento de nutrientes y compuestos orgánicos en todo el mundo (Vymazal, 2011, Vymazal, 2013, Mburu et al., 2014).

Tabla 3.3 Vegetación utilizada en humedales ingenieriles

Tipo De Vegetación	Tipo de Agua Residual	Remoción	Sustrato	País	Referencia
<i>Vetiveriazizanioides</i>	Domésticas	NT: 47%, PT: 33%, DQO: 67%	Granito	USA	Badejo et al. (2017)
<i>Phragmites</i> sp	Sintéticas	COD: 35, TN: 45.6	Grava	México	González et al. (2016)
<i>Gyneriumsagittatum</i> , <i>Colocasia esculenta</i> y <i>Psittacorum heliconia</i>	Sintéticas	COD: 92, N-NH ₄ : 85, P-PO ₄ : 80	Grava	Salamanca	Madera-Parra et al. (2015)
<i>Zantedeschia aethiopica</i> , <i>Strelitzia reginae</i> , <i>Anturium mandreanum</i> y <i>Agapanthus africanus</i>	Domésticas	TSS: 62, COD: 80, DBO: 82, TP: >50, TN: >49	Tezontle	México	Zurita et al. (2009)
<i>Canna flaccida</i> , <i>Zantedeschia aethiopica</i> , <i>Canna indica</i> , <i>Agapanthus africanus</i> y <i>Watsoniaborbonica</i>	Industriales	DBO, COD, P-PO ₄ , NH ₄ and total coliform bacteria (all up to 84)	Arcilla	Portugal	Calheiros et al. (2015)
<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Municipal	COD: 35, TN: 45.6	Grava	México	Belmont y Metcalfe (2003)
<i>Eleocharismacrostachya</i> y <i>Schoenoplectus americanus</i>	Domésticas	COD: 75, TN: 18, TP: 2, TSS: 88.	Arena limosa	México	Valles-Aragón (2014)
<i>Bacopa Monnieri</i> , <i>Nephrolepis exaltata</i> , <i>Tradescantia zebrina</i>	Domésticas	Coliformes: 66 – 99%	Tezontle, grava y arena	México	Dominínguez et al. (2012)
<i>Typhaspp</i>	Aguas domésticas	COD: 88, N-NH ₄ : 95, P-PO ₄ : 85	Tepezil, piedra porosa de río	México	Marín-Muníz, 2016
<i>Typha augustifolia</i>	Aguas domésticas	DBO, COD, P-PO ₄ , NH ₄ and total coliform bacteria (all up to 84)	Grava, arena	Estados Unidos	Arivoli, et al. 2013

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno total (TN), Fósforo (TP), Amonio (NH₄-N), Nitratos (NO₃-N), Coliformes y algunos metales (Cu, Zn, Ni y Al).

Estudios que compararon la química de entrada y salida en HI con o sin plantas han revelado resultados contradictorios. Algunas publicaciones coinciden en que las plantas tienen poco impacto directo en el tratamiento de aguas residuales (Zhang et al., 2018; Guerra et al., 2018), mientras que otros estudios han encontrado un mejor tratamiento con plantas presentes (Lou et al., 2018; Liang et al., 2017; Marín-Muñiz et al., 2018). Estas contradicciones pueden reflejar diferencias entre las plantas seleccionadas contra humedales sin plantar o la temporada en que fueron realizados los estudios. Además de determinar si la presencia de plantas en el tratamiento es mejor con respecto a los humedales no plantados, algunos estudios han documentado los efectos específicos de la especie de plantas, sin embargo, el ranking de rendimiento entre las especies fue diferente. (Gersberg et al., 1986; Allen et al., 2002). Fraser et al. (2004) y Stein y Hook (2005), Gebremariam & Beutel, 2008, Zhang et

al., 2012, encontraron que *Scirpus*spp. y *Carex* spp, tienen una mayor eliminación de nutrientes que *Typha* spp., mientras que Akratos y Tsihrintzis (2007) encontraron que *Typha* spp., ha tenido la mayor eliminación. No se tomaron medidas directas para determinar los mecanismos que subyacen a las influencias de estas especies en los estudios, pero los investigadores conjeturaron que las diferencias se deben a la pérdida de oxígeno o bien a la raíz o a la captación directa de la planta.

En un estudio reciente, Hernández et al. (2018) compara el uso de plantas en HI de alta densidad (32 plantas m²) y baja densidad (16 plantas m²), la eliminación de compuestos de nitrógeno en HI de alta densidad fue el doble que la de HI utilizando una baja densidad de plantas, que es una fuerte evidencia de la importancia de las plantas en tales sistemas.

Las plantas pueden mejorar el tratamiento a través de la absorción directa de nutrientes, pero la cantidad de contaminantes que logran absorber las plantas no logra la eliminación de nutrientes en su totalidad (Vymazal, 2013; Bhomia et al., 2018). Más bien, la influencia de la planta sobre la actividad microbiana incluye proporcionar sitios de unión y liberación de exudados de carbono y oxígeno, se cree que son sus funciones principales en humedales de tratamiento (Huang et al., 2010, Brix 1997, Tanner 2011; Singh et al., 2010).

Algunas características que deben presentar las plantas utilizadas en HI se mencionan a continuación:

3.5.1. Resistencia a contaminantes

Las plantas usadas en los HI probablemente sufran algún tipo de estrés ambiental cuando se trata de eliminar diversos contaminantes en las aguas residuales, por lo que la tolerancia de las plantas a los contaminantes presentes en las aguas residuales es una característica importante; numerosos estudios se han realizado para evaluar la capacidad y tolerancia de las plantas a diferentes niveles de contaminantes presentes en aguas residuales (Castañeda, 2017). En un estudio realizado se observó que *T. latifolia* se destacó por concentraciones de amoníaco que promediaron 160-170 mg/L, mientras *S. validum* toleró las condiciones extremas (Castañeda, 2017; Surrency, 1993). Li et al. (2011) evaluó el efecto del aumento de la concentración de amoníaco (hasta 400 mg/L) en tres plantas de humedales e indicaron que hay grandes diferencias en la tolerancia de amoníaco entre estas especies y *latifolia* Zornia

tuvo la mayor tolerancia a amoníaco. En otro estudio se evaluó las respuestas fisiológicas de *P. australis* a las aguas residuales con diferente DQO, y se encontró que los altos niveles de COD (PAG 200 mg/L) podría interrumpir el metabolismo normal de la planta (Xu et al., 2010). Liu et al. (2013) evaluó el efecto potencial de los antibióticos (concentraciones de 0-1000 g/L) en las plantas de los humedales y mostro que *P. australis* podría tolerar y retirar las concentraciones de antibióticos presentes en aguas residuales.

3.5.2. Capacidad de remoción

Otra característica primordial al seleccionar el tipo de vegetación es la capacidad que tienen las plantas en la eliminación de contaminantes. La capacidad de absorción varía de acuerdo a la configuración del sistema, tiempos de retención, tasa de carga, tipos de agua residual y condiciones climáticas (Castañeda, 2017; Saeed & Sun, 2012). En un estudio se evaluó la capacidad de absorción neta de cuatro plantas de humedales emergentes fueron 6.50 a 26.57 g N /m² y 0.27- 1.48 g P/m² en el tratamiento de agua de río contaminado (Wu et al., 2013). Para eliminación de metales pesados, se estudió la capacidad de acumulación de *Eleocharis acicularis* en diferentes concentraciones de In, Ag, Pb, Cu, Cd y Zn, y los resultados mostraron que *E. acicularis* tenía excelente capacidad de acumular metales presentes en el agua (Castañeda, 2017; Ha et al., 2011).

3.6. Conocimiento actual sobre el uso de plantas ornamentales en humedales

ingenieriles

Mitsch & Gosselink (2015) indican que la vegetación es determinante en un sistema de HI, es común el uso de plantas nativas de humedales naturales (Macrófitas). En la última década en China, Tailandia, Portugal, Italia y México, que son países tropicales e intertropicales donde las características de climatología son de mayor intensidad de luz y temperaturas elevadas, pueden favorecer el desarrollo vegetal y consigo la remoción de contaminantes (Zhang et al., 2014, Calheiros et al., 2015). De acuerdo a Hernández (2016) el uso de plantas ornamentales en humedales se deriva en dos estrategias:

1. Los usos de plantas acuáticas que producen flores (Macrófitas), son visualmente muy atractivas y permiten el embellecimiento del paisaje.

2. El uso de plantas terrestres ornamentales bajo condiciones de inundación pero que no necesariamente son plantas acuáticas nativas de humedales.

A continuación, se detallan estas dos estrategias.

3.6.1 Macrófitas ornamentales en humedales ingenieriles

El uso de especies de plantas macrófitas que producen flores, de inicio tiene un enfoque de tratamiento de aguas contaminadas y otro de mejorar la estética del humedal, se conoce muy poca información sobre la vida de las flores producidas por plantas acuáticas, estas no se han podido explotar con fines de comercialización (Li et al., 2009, Hernández, 2016). Estas plantas que producen flores y grandes follajes reportan buenos resultados en materias de remoción de contaminantes (Merino-Solís et al., 2015). Li et al. (2009) investigaron el uso de *Iris pseudacorus L.* *Acorus gramineus* como vegetación a nivel microcosmo y con arena como sustrato, en aguas residuales industriales y rurales de China, con buenos resultados en la remoción de contaminantes. Polomsky et al. (2007), utilizaron *empleo Canna generalis*, *Colocasia esculenta*, *Eleocharis dulcis*, *Iris Peltandra virginica* y *Pontederia cordata* en Estados Unidos a nivel microcosmos usaron grava para tratar aguas sintéticas ricas en nitrógeno y fósforo, establecieron que éstas acumulan un 20 y 35% de nitrógeno. Lo anterior nos permite deducir que los estudios encaminados al tratamiento de aguas residuales de origen industrial o doméstico usando macrófitas típicas de humedales es limitado, es necesario investigar más a fondo en qué medida el uso de estas macrófitas ornamentales pueden contribuir a la adopción de la ecotecnología en sistemas a tamaño real.

3.6.2 Plantas ornamentales terrestres de interés comercial en humedales ingenieriles

El uso de plantas ornamentales terrestres tiene doble interés; uno de tratamiento de aguas residuales y otro comercial (mismo que es escaso), surge en México con Belmont (2004) y se despertó el interés de nuevos investigadores en el tema como fue con Calheiros et al. (2015) y Marín-Muñoz et al. (2018), quienes evalúan las eficiencias de plantas ornamentales terrestres con fines de eliminación de contaminantes de aguas residuales y comercialización de las flores producidas en estos sistemas. Se reporta que los géneros más empleados en HI son plantas típicas de regiones tropicales y subtropicales, como es la *Canna* spp empleada en diferentes regiones del mundo. *Heliconia* spp en Brasil, India y México (Paulo et al., 2013; Saumya et al., 2015; Orozco et al., 2006; Zurita et al., 2006; Garzón et al., 2016) y

Zantedeschia spp (Belmont, 2003; Zurita et al., 2009; Marín-Muñiz et al., 2018), encontraron que estas se lograron adaptar en HI y son eficientes en la remoción de contaminantes como demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (TSS), nitrógeno total (TN), fósforo (TP), amonio (NH₄-N), nitratos (NO₃-N), coliformes y algunos metales (Cu, Zn, Ni y Al), ver Tabla 3.5.

Tabla 3.4 Remoción de contaminantes de acuerdo al tipo de vegetación

Vegetación	Remoción de contaminantes	Tipo de agua	País	Referencia
Brazil				
<i>Alpinia purpurata</i> <i>Arundinabambusifolia</i> <i>Canna</i> sp. <i>Heliconia psittacorum</i> L.F. <i>Canna indica</i> mixed with other species		Domestic		Paulo et al. (2013)
<i>Canna indica</i> Linn <i>Canna indica</i>		Domestic Municipal		Yang et al. (2017) Zhang et al. (2007a)
<i>Canna indica</i> mixed with other natural wetland plants		Wastewater from a student dormitory (University)		Qiu et al. (2011)
<i>Canna indica</i> and <i>Hedychium coronarium</i>		Domestic		Wen et al. (2011)
<i>Iris pseudacorus</i> mixed with other natural wetland plants <i>Iris pseudacorus</i> , mixed with other plants of natural wetlands <i>Iris sibirica</i>		Polluted river Sewage Simulated polluted river water		Wu et al. (2011) Xie et al. (2012) Gao et al. (2014)
<i>Canna</i> sp <i>Iris sibirica</i>		Synthetic Simulated polluted river water		Gao et al. (2015)
<i>Canna indica</i> L. <i>Canna indica</i> L.		Synthetic Synthetic (hydroponic sol.)		Hu et al. (2016) Wang et al. (2016)
México				
<i>Zantedeschia aethiopica</i> and <i>Canna flaccida</i> <i>Heliconia psittacorum</i> <i>Strelitzia reginae</i> , <i>Zantedeschia aethiopica</i> , <i>Canna hybrids</i> , <i>Anthurium andreanum</i> , <i>Hemerocallis Dumortieri</i>		Domestic Coffee processing Domestic		Belmont et al. (2004) Orozco et al. (2006) Zurita et al. (2006)
<i>Zantedeschia aethiopica</i> <i>Strelitzia reginae</i> , <i>Anthurium andreanum</i>		Domestic Municipal		Zurita et al. (2008) Zurita et al. (2009)
<i>Zantedeschia aethiopica</i> and <i>Anemopsis californica</i> <i>Zantedeschia aethiopica</i> and <i>Canna indica</i>		As-contaminated groundwater Mixture of gray water (from a cafeteria and research laboratories)		Zurita et al. (2012) Zurita and White (2014)
<i>Zantedeschia aethiopica</i> <i>Heliconia stricta</i> , <i>Heliconia psittacorum</i> and <i>Alpinia purpurata</i>		Domestic Domestic		Hallack et al. (2015) Méndez-Mendoza et al. (2015)
<i>Canna hybrids</i> and <i>Strelitzia reginae</i> <i>Zantedeschia aethiopica</i> , <i>Lilium</i> sp, <i>Anthurium</i> sp and <i>Hedychium coronarium</i>		Municipal Community		Merino-Solís et al. (2015) Hernández (2016)
<i>Canna indica</i>		Stillage Treatment		López-Rivera et al. (2016)

Los datos mostrados en estos reportes nos permiten afirmar que las plantas ornamentales de interés que producen flores y que pueden ser comercializadas, empleándolas en humedales ingenieriles pueden ser tan eficientes como las *Thyhasp* tan ampliamente evaluadas, se reportan porcentajes de remoción entre 60 a 89% para DQO, 48 a 62% N-NO₃ (Marín-Muñiz, 2017). Por lo anterior se demuestra que las plantas ornamentales son una alternativa más atractiva para usarlas en HI, ya que dan un valor paisajístico a los sistemas, facilitan su adopción y remueven contaminantes de forma eficiente.

Por otra parte, podemos observar que la mayor parte de los estudios que emplean plantas ornamentales terrestres en HI se han enfocado en evaluar el crecimiento de las plantas, remoción de contaminantes (bajas cargas) y salida de las mismas. Muy pocos de los estudios evalúan la contribución de las plantas ornamentales a la remoción con altas cargas de contaminantes, es decir, los contaminantes que se quedan en los tejidos vegetales y bajo condiciones de inundación. Por otra parte, hasta la fecha no se conoce información de la interacción de los procesos bioquímicos que realizan las plantas ornamentales terrestres en los HI, si bien estas logran adaptarse a condiciones de inundación, no desarrollan las mismas adaptaciones que las plantas macrófitas, por lo que se espera que tengan cierto efecto en los gradientes de óxido-reducción (Hernández, (2016); Ly et al., 2018).

Casierra-Martínez et al. (2017), indican que muchas plantas ornamentales en zonas tropicales e intertropicales tienen características para adaptarse a condiciones de humedales y no han sido evaluadas, aun cuando estas zonas son un área donde se pueden desarrollar de mejor forma por las condiciones climatológicas que se presenta en estas regiones (mayores temperaturas e intensidad de luz), que según Vymazal (2014) favorecerían la absorción de contaminantes por los tejidos vegetales.

3.7 Nuevos desarrollos en humedales ingenieriles

Carvalho et al. (2017) enuncian que en los últimos 3 años, las tendencias en materias de desarrollos en humedales son las siguientes:

- Se están explorando diferentes técnicas de intensificación y modos operativos que van más allá del primer sistema de aireación forzada (Wallace, 2001). Más grupos de investigación están trabajando con aireación de sustratos en HI, explorando la aireación intermitente o combinándola con flujos de marea o variaciones de llenado y drenaje de los sistemas.
- Se espera que los contaminantes emergentes (PPCP, pesticidas, nanopartículas, etc.) continúen siendo "temas candentes" en los próximos años. Aunque existen investigaciones sobre PPCP y pesticidas realizadas durante los últimos 10 años, sigue siendo un área desafiante. Hay varias familias de compuestos que apenas se han abordado (drogas ilícitas, retardantes de llama y plastificantes, entre otros). En la actualidad se está iniciando la investigación sobre los efectos de las nanopartículas y su destino en HI.
- Se ha comenzado a abordar la reutilización del agua y el reciclaje de nutrientes y energía como los nuevos paradigmas en la comunidad de HI, lo que refleja las principales tendencias en el sector del agua en general y complementa la investigación existente sobre los servicios del ecosistema. La investigación sobre la reutilización del agua ahora analiza la combinación de procesos avanzados de oxidación combinados con HI para garantizar el cumplimiento de la legislación requerida de los estándares de descarga-reutilización.
- La integración de los conceptos de células de combustible microbianas en los diseños de HI comienza a ser visible. El uso de sistemas bioelectroquímicos y la celda de electrólisis microbiana relacionada, donde la corriente eléctrica se utiliza para lograr una mejor degradación de contaminantes, es una línea de investigación nueva y muy próspera.

Sin embargo, identificamos algunos desafíos:

- Los sistemas híbridos deberán volverse más complejos y diversos para incorporar diferentes necesidades geográficas y de mercado, así como nuevos desarrollos tecnológicos.
- La investigación emergente sobre contaminantes está limitada por los costos y el acceso a equipos analíticos de última generación. Además, dependerá de los avances

paralelos en la elucidación de los productos de transformación y la toxicología de los productos originales y de transformación.

- El desarrollo de la reutilización del agua deberá vincularse con la investigación sobre eliminación de patógenos y contaminación fecal, así como con la eliminación de microcontaminantes, especialmente en las áreas críticas de antibióticos y resistencia a los antibióticos.
- Comprender la comunidad microbiana y las interacciones planta-microbio-sustrato, aunque facilitadas por una tecnología de análisis ómicos más asequible y de fácil acceso, también ha resultado en la generación de grandes cantidades de conjuntos de datos complejos que requieren experimentos microbiólogos y la integración de la bioingeniería.
- En zonas tropicales y subtropicales se están desarrollando nuevas tendencias de investigaciones, el uso de plantas terrestres que producen flores en HI, con dos fines, uno estético y otro como idea de producir flores para su comercialización (Hernández, 2016; Marín–Muñiz, 2017).
- Investigaciones que tienden al uso de nuevos materiales como medio de soporte en HI que permitan la disminución de costos son otra tendencia clara que es enmarca en este entorno (Hernández-Salazar et al. 2017).

Conclusiones

En la actualidad el uso de plantas ornamentales terrestres empleadas en humedales ingenieriles es muy limitado, y su eficiencia de remoción de contaminantes y valor agregado que imparte a estos sistemas es muy alto. En zonas tropicales e intertropicales existen un gran número de plantas ornamentales que no han sido evaluadas para su uso en HI, se requieren investigaciones encaminadas a este tipo de estudios, así como evaluar los efectos en la interacción bioquímica del uso de plantas ornamentales terrestres en HI y su interacción sustrato-microorganismo-planta, así mismo, evaluar policultivos a escala macrocosmos y mesocosmos para tener el panorama completo del funcionamiento de las mismas y ser implementadas en futuros diseños de estos sistemas, con finalidades de establecer la factibilidad económica de la comercialización de las flores producidas en estos sistemas, que puedan cumplir funciones de remoción de contaminante, estética e idea de negocio.

Estructura general de la metodología desarrollada en esta investigación

El desarrollo metodológico de esta investigación, se implementó en IV etapas, descritas a continuación:

- Etapa I: Estudio de Humedales Ingenieriles a nivel Microcosmos con plantas ornamentales y sustratos para el tratamiento de aguas residuales domesticas.
- Etapa II: Macrocosmos de humedales Ingenieriles sembrados con policultivos de plantas ornamentales.
- Etapa III: Estudio de Humedales comunitarios sembrados con policultivos de plantas ornamentales y sustrato de PET para el tratamiento del 100% de las aguas residuales domesticas de Pastorías, Actopan, Veracruz.
- Etapa IV: Viabilidad económica del uso de humedales comunitarios en comunidades rurales a comparación con sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales.

En cada una de las etapas se desarrollo un análisis de la literatura en torno al tema abordado, denominada en el documento introducción, una sección de materiales y métodos, que describe los procedimientos realizados para el desarrollo de cada etapa, así como los análisis y técnicas estadísticas empleadas para este fin. Una sección de resultados y discusiones donde se muestran los principales resultados obtenidos durante el desarrollo de cada etapa del proyecto, con sus respectivas discusiones y finalmente una conclusión de cada etapa.

verano (17%); presentándose temperaturas más altas en el mes de junio y más bajas en el mes de enero, con una temperatura ambiente varía generalmente entre los 15 y 30 °C. La altitud del área es entre 309 y 400 msnm, la precipitación promedio anual se registra entre 1,900–2,100 mm (INEGI, 2014). Estas características climatológicas de la localidad son similares a las de Pastorías, Actopan, Veracruz.

4.2.2. Descripción de sistemas a nivel microcosmo

El experimento a escala se realizó con 30 microcosmos (Fig. 4.2) consistentes en unidades cilíndricas o celdas plásticas de 29 cm de diámetro y 36 cm de altura, simulando sistemas de HC con flujo vertical continuo. En las unidades experimentales de 5 cm del fondo hacia arriba el efluente sube mediante una tubería de PVC (1/2") aludiendo al principio de Bernoulli y sale para después coincidir con el agua tratada de todas las unidades.

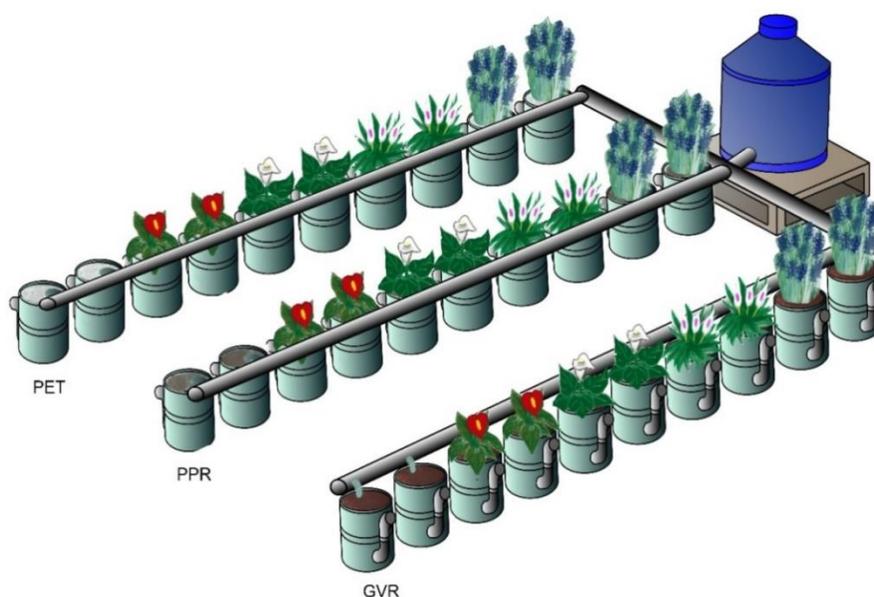


Figura 4.2 Microcosmos de humedales ingenieriles
Grava volcánica roja (GVR), Piedra porosa de río (PPR) y polyethyleneterephthalate (PET)

De las unidades experimentales 10 se rellenaron con PET como sustrato, se tomaron secciones rugosas y con dobleces, las botellas fueron recicladas, mismas que se habían usado para envasar agua y gaseosas, las cuales tenían un diámetro entre 3 a 5 cm y con un espacio disponible del flujo de agua de 0.50 (Fig. 4.3), con la finalidad de favorecer el desarrollo de comunidades bacterianas. El resto de las unidades experimentales se llenaron desde el fondo

hasta una altura de 26 cm con los otros respectivos sustratos empleados (PPR y GVR). En el caso de las unidades rellenas con PET, se agregó una capa de GVR (10 cm) sobre el nivel de salida del agua de las unidades experimentales, por lo tanto, no tuvo ningún papel en el tratamiento, solo evitar que flotara el PET y evitar el desarrollo de vectores.

El PET se obtuvo de botellas recicladas de aguas y refresco de una cafetería escolar fueron cortadas como se muestra en la figura 4.3, con un diámetro entre de 2.5 a 5 cm.



Figura 4.3 Zonas rugosas de PET

En las 10 unidades rellenas con piedra porosa de río (PPR), se utilizó material recolectado en el río Misantla con diámetro de 2.5 cm (Fig. 4.4 a), lo que permitió obtener una superficie poco homogénea con una porosidad de 0.5. Las 10 unidades restantes se llenaron con grava volcánica roja con diámetro de 1.5 cm (Fig. 4.4 b), material de superficie porosa (0.79), de baja dureza y baja densidad (Zurita et al., 2011), recolectado en un banco de material dentro del municipio de Misantla.



Figura 4.4 (a) Piedra porosa de río y (b) Grava volcánica roja

4.2.2.1 *Suministro de agua*

El suministro de agua en los microcosmos de humedales fue calculado con la ecuación de flujo hidráulico (FH) (Mitsch y Gosselink, 2015):

$$FH = \frac{V * d}{TRH} \quad (4.1)$$

Dónde:

V = Volumen de la celda (L)

d = Porosidad o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal (porcentaje expresado como decimal)

TRH = Tiempo de retención hidráulica (días)

V de la unidad experimental:

$$V \text{ Exp} = (\pi) (r^2) (H) \quad (4.2)$$

$$V \text{ Exp} = (\pi) (0.145\text{m})^2 (0.26\text{m}) = 0.01717 \text{ m}^3$$

$$V \text{ Exp} = 17.174 \text{ L}$$

Donde:

V= volumen de la celda

r= radio (0.145 m)

H= altura (0.26 m)

Además, para el cálculo del volumen real se incluyó la porosidad del sustrato. Zurita et al. (2008) se obtuvo que para la grava volcánica roja es de 0.79 para un diámetro promedio de 1.5 cm.

$$V \text{ real GVR} = V \text{ Empleado} \times \text{porosidad o espacio de circulación del agua}$$

$$V \text{ real GVR} = (17.174 \text{ L}) (0.79) = 13.396 \text{ L}$$

Para el V real PPR= Volumen ocupado por la piedra porosa de río con diámetro promedio de 2.5 cm.

$$V \text{ real PPR} = V \text{ Exp} \times \text{porosidad o espacio de circulación del agua}$$

$$V \text{ real PPR} = (17.174 \text{ L}) (0.5) = 8.587 \text{ L}$$

Y para el V real PET= Volumen ocupado por la piedra porosa de río con diámetro promedio de 2.5 cm.

$$V \text{ real PET} = V \text{ Exp} \times \text{porosidad o espacio de circulación del agua}$$

$$V \text{ real PET} = (17.174 \text{ L}) (0.5) = 8.587 \text{ L}$$

Obteniendo un flujo para los microcosmos PPR. Para calcular el caudal se despejó la siguiente formula:

$$V \text{ real} = \text{TRH} \times Q \quad (5.3)$$

$$Q = V \text{ real} / \text{TRH} \quad (5.4)$$

Dónde:

V= Volumen real (L)

TRH = Tiempo de retención hidráulico (días) (3 días)

Q = Flujo volumétrico (ml/ min o L/d)

Flujo Hidráulico GVR

$$Q = V \text{ real} / \text{TRH} = (13.396 \text{ L}) / (3 \text{ días}) = 4.465 \text{ L/ día}$$

$$(4.465 \text{ L/ día}) (1000 \text{ ml} / 1,440 \text{ min})$$

$$Q = 3.1 \text{ ml} / \text{min}$$

Flujo Hidráulico PPR

$$Q = V \text{ real} / \text{TRH} = (8.587 \text{ L}) / (3 \text{ días}) = 2.86 \text{ L/ día}$$

$$(2.86 \text{ L/ día}) (1000 \text{ ml} / 1440 \text{ min})$$

$$Q = 1.986 \text{ ml} / \text{min}$$

Flujo Hidráulico PET

$$Q = V \text{ real} / \text{TRH} = (8.587 \text{ L}) / (3 \text{ días}) = 2.86 \text{ L/ día}$$

$$(2.86 \text{ L/ día}) (1,000 \text{ ml} / 1,440 \text{ min})$$

$$Q = 1.986 \text{ ml / min}$$

Llenado del tanque con TRH 3 días

$$\begin{aligned}\sum V &= V \text{ real GVR} + V \text{ real PPR} + V \text{ real PET} \\ &= (13.396 \text{ L}) (10) + (8.587 \text{ L}) (10) + (8.587 \text{ L}) (10)\end{aligned}$$

$$\sum V = 305.7 \text{ L}$$

\sum Flujos volumen requerido por día = Flujo GVR + Flujo PPR + Flujo PET

$$\begin{aligned}&= (13.396 \text{ L/día}) (10) + (2.86 \text{ L/día}) (10) + (2.86 \text{ L/día}) (10) \\ &= 196.8 \text{ L / día}\end{aligned}$$

Por regla de tres se determina que si tenemos un tanque 1,100 L y requerimos 196.8 L/día, el tanque se debe de llenar cada 5.6 días.

El valor de tiempo de retención hidráulico (TRH) fue de 3 días en los 30 microcosmos, la entrada de agua es controlada con un equipo de venóclisis insertado en la tubería de PVC donde se regula el flujo de agua a través de un sistema de control.

4.2.2.2 Vegetación empleada:

Se usaron cuatro especies de plantas ornamentales diferentes: *Anthurium* sp, *Lavandula* sp, *Spathiphyllum wallisii* y *Zantedeschia aethiopica* (12 a 19 cm de altura). Se sembraron 24 individuos en duplicados de acuerdo al arreglo presentado en la Figura 4.2, para la selección de la vegetación utilizada se tuvo en cuenta que las plantas fueran de fácil adaptación, y en su mayoría resistentes a agentes del intemperismo, adicionalmente que fueran de interés comercial y puedan aprovecharse estos sistemas como medios de cultivo (Zurita et al., 2006; Zurita et al., 2008; Ramírez-Carrillo et al., 2009; Hernández, 2016; Sandoval-Herazo et al., 2016; Marín-Muñiz et al., 2017). Las plantas ornamentales usadas fueron adquiridas de dos formas: *Spathiphyllum wallisii* y *Zantedeschia aethiopica*, se recolectaron de áreas cercanas a los sitios de estudio (Gómez-Pompa, 1966) y *Anthurium* sp y *Lavandula* sp fue adquirida en un vivero local. Como elementos de control se utilizaron duplicados de las unidades

experimentales rellenas con cada sustrato, pero sin vegetación, mismas que se colocaron al final.

4.2.2.3 Suministro de agua al sistema

Los primeros 30 días después de la siembra de vegetación, los HI fueron alimentados con agua potable, a partir del día 31 del estudio, y durante los 30 días posteriores, las proporciones de agua fueron las que se indican en la tabla 4.1. Con el fin de adaptar la vegetación a las nuevas condiciones de calidad de agua, a partir del día 61, los humedales fueron alimentados al 100% con agua residual que se almacenó en un tanque de 1,500 L (alimentados cada dos días con una bomba eléctrica para agua periférica truper de ½ HP), el cual en su interior tenía instalado un motor con hélices que mantenían en constante movimiento el agua residual, lo que pudo tener efecto sobre la remoción de contaminantes, ya que se tienen condiciones similares a un tanque de ventilación. El estudio se realizó a temperatura ambiente, bajo sombra (con malla sombra de polietileno y porcentaje de sombra del 35%) durante 270 días.

Tabla 4.1 Porcentaje de agua suministrada a los microcosmos

Tiempo (días)	% Agua residual	% Agua potable
31 a 33	10	90
34 a 39	20	80
40 a 43	40	60
44 a 47	60	40
48 a 51	80	20
52 a 60	90	10
61 a 270	100	0

4.2.3. Monitoreo del sistema a nivel microcosmos

4.2.3.1. Muestreo y análisis

A partir del día en que el tanque fue alimentado con 100% de agua residual, quincenalmente se tomaron muestras del influente y del afluente del HI, durante el periodo del 30 junio de 2016 a 12 de marzo 2017, se analizaron en el laboratorio de agua del ITSM.

4.2.3.2. Temperatura ambiente

La temperatura ambiente fue medida quincenalmente en los horarios de 9:00 a 10:00 am y de 14:00 a 15:00 horas, mediante la estación meteorológica Davis 6250, que se encuentra en las instalaciones ITSM.

4.2.3.3. Intensidad de la luz

La intensidad de luz a la que estuvieron expuestas las unidades experimentales fue medida quincenalmente con un luxómetro, los horarios de lectura fueron de 9:00 a 10:00 a.m. y de 14:00 a 15:00 horas, mediante un luxómetro digital medidor de luminosidad hasta 50,000 lux.

4.2.3.4. Crecimiento de la vegetación

El crecimiento de la vegetación se monitoreó cada 30 días durante toda la investigación, se empleó una cinta métrica y se tomó como referencia para la altura un punto a dos centímetros por encima del sustrato, (Lamphar y Antonio, 2006). Adicionalmente se evaluó la sobrevivencia de cada especie de plantas ornamental en diferentes sustratos.

4.2.3.5. pH - Sólidos Disueltos Totales (STD) – Conectividad electrónica (EC) – Temperatura del agua en el influente y efluente de los sistemas

El pH, STD, CE y temperatura del agua, tanto en influente como en el efluente, se midieron quincenalmente durante toda la investigación empleando el COMBO Tester pH/CE/TDS/Temp (CE rango alto - HI98130), en horario de 9:00 a 11:00 a.m.

4.2.3.6. Métodos de análisis

Los métodos mostrados en la tabla 4.2, están referenciados en los Métodos Estándar para el análisis de agua potable y agua residuales (APHA, AWWA, WEF, 2005).

Tabla 4.2 Técnicas empleadas para los análisis de agua

Parámetro	Medición	Equipo	Referente
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Cada 15 días	Digestor HACH modelo 45600, Espectrofotómetro HACH modelo DR/2400	NMX-AA-028-SCFI-2001
Nitratos (N-NO ₃), Fosfatos (P-PO ₄)	Cada 15 días	Espectrofotómetro HACH modelo DR/2400	NMX-AA-099-SCFI-2006/ NMX-AA-029-SCFI-2001
Coliformes fecales (FC)	Cada 15 días	Filtración a través de membrana	NMX-210-SSA1-2014

4.2.4 Análisis de datos

4.2.4.1. Diseño experimental y análisis estadístico

Los datos de crecimiento de vegetación fueron comparados estadísticamente con respecto al sustrato y al tipo de vegetación mediante un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías. Se empleó un diseño de dos factores completamente al azar, el factor uno se definió con el tipo de sustrato: PET, PPR y RVG y el factor dos se definió con la especie de planta ornamental: *Anthurium* sp., *Lavandula* sp., *Spathiphyllum wallisii* y *Zantedeschia aethiopica* con sus respectivos controles. Las variables de respuesta fueron los valores medidos de DBO₅, N-NO₃, P-PO₄, CF, pH, Sólidos Disueltos Totales (STD), Conectividad eléctrica (CE) y temperatura del agua y en cuanto a la adaptación de las diferentes variedades, se midió el crecimiento de la planta.

Para el análisis estadístico de los resultados de la remoción entre los diferentes tratamientos, se usó un análisis de varianza (ANOVA) de efectos fijos a un nivel de confianza del 95%, así como ANOVA de dos factores. Además, se realizó la comparación de medias con la prueba de Tukey a un nivel de significancia de $P=0.05$. Para el proceso de la información se usó el paquete estadístico Minitab versión 16.1.0.

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.3.1. Datos ambientales

4.3.1.1. Temperatura e intensidad de luz

La temperatura ambiental (Figura 4.5) varió entre 15 °C y 33 °C, la temperatura máxima se registró durante el mes de julio con 33 °C. De agosto a noviembre, la temperatura promedio fue de 23° C. Estas condiciones se consideran adecuadas para un buen desarrollo de las plantas, ya que fueron consistentes con las informadas por (Sacoto, 2010), quien menciona que los rangos óptimos de temperatura en climas subtropicales para un buen desarrollo de estas especies están entre 12 a 25 ° C.

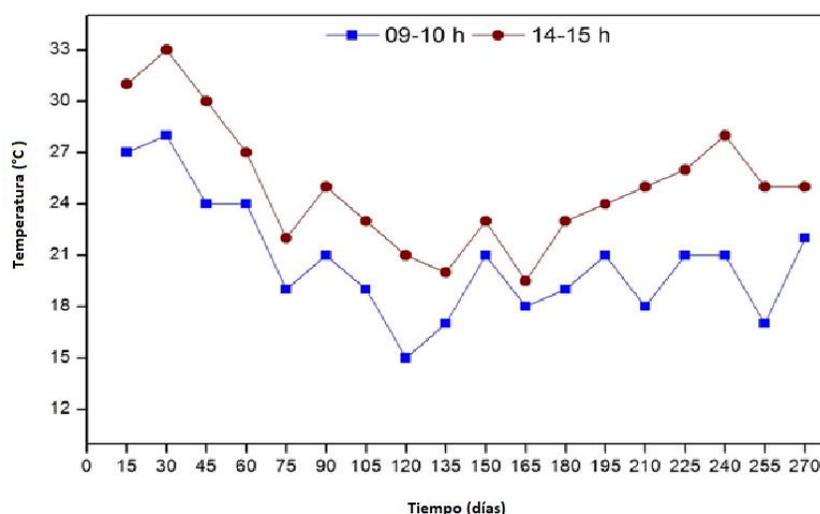


Figura 4.5. Temperatura ambiental registrada entre 9-10 h y 14-15 h del día durante el período del experimento.

La intensidad lumínica promedio fue de $43,000 \pm 890$ lux (Figura 4.6), lo que indica que estaba en el rango óptimo (40,000 a 60,000 lux) para el cultivo de plantas ornamentales tal como lo mencionan Guzmán & Palenius (2017). El promedio de la intensidad de luz fue de 799.71 ± 89.12 mmol m⁻²s, lo que indica que se encuentra en el rango óptimo (700 a 900 mmol m⁻²s) para cultivo de plantas ornamentales de acuerdo por lo reportado por (Guzmán & Palenius, 2017). Esta información es relevante ya que mientras más rápida sea la velocidad de la fotosíntesis, más rápido crecerá la planta y absorberá mayores nutrientes.

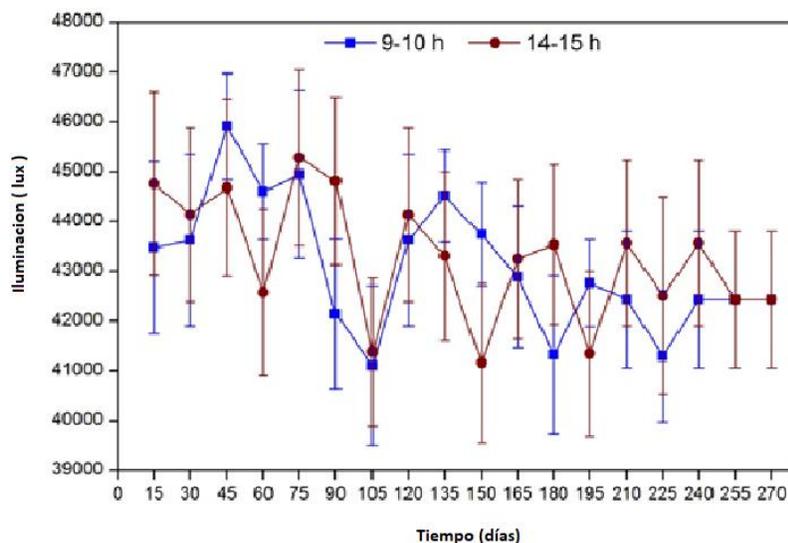


Figura 4.6. Intensidad de la luz registrada entre las 9-10 h y las 14-15 h del día durante el período experimental. Las barras verticales representan el error estándar de la media.

4.3.2. Crecimiento de plantas

Durante los nueve meses que duró el estudio, se midió el crecimiento de cuatro plantas en tres diferentes sustratos (GVR, PET y PPR). Para *Zantedeschia aethiopica* la altura máxima registrada se observó en sustrato GVR con una altura de 95 cm, mientras que para los sustratos PPR y PET como medio de soporte se reportó una altura máxima de 65,1 cm y 60,3 cm, respectivamente. Para *Spathiphyllum wallisii*, se observaron crecimientos de 40,1 cm y 27,8 cm en PPR y PET, el crecimiento en sustrato GVR para esta planta fue 31% más baja que *Zantedeschia aethiopica*. El porcentaje de crecimiento más bajo fue mostrado por *Anthurium sp.*, que alcanzó una altura máxima de 18,5 cm y 17,8 cm en PPR y PET, respectivamente. *Lavandula sp.*, aunque se consideró adaptada a diferentes condiciones

climáticas, como la sequía y las heladas, (Lopez et al., 1997) no sobrevivió en ninguno de los sustratos. El pH del agua se encontró entre los límites permisibles de desarrollo para *Lavandula* sp en rangos entre 6,5 y 7,5, tanto en GVR como en PET los valores de pH estuvieron entre 7 – 7.4, lo que indica que *Lavandula* sp no murió por estas condiciones, y que a pesar de contar con un tejido aerenquimoso con características similares a las de plantas de humedales, no fue suficiente para su adaptación a los HI. Por lo que se recomienda estudiar qué factor influyó para que no sobreviviera en ninguno de los sustratos.

La Figura 4.7 muestra la tasa de crecimiento de las diferentes plantas en los tres medios de soporte utilizados (RVG PET y PPR), donde se observa que *Zantedeschia aethiopica* en sustrato GVR tuvo mejor desarrollo, teniendo una tasa de crecimiento promedio del 20.36 %, seguida por *Anthurium* sp, con 14.1% y *Spathiphyllum wallisii* con 11.22%. En cuanto al comportamiento de crecimiento mostrado en medio de soporte PET, *Zantedeschia aethiopica* mostró mejor tasa de crecimiento con 16.67%, le sigue *Anthurium* sp con 13.75% y *Spathiphyllum wallisii* con 9.60%. Al igual que en los otros sustratos *Zantedeschia aethiopica* tuvo la mejor tasa de crecimiento promedio en sustrato PPR con el 19.09 %, seguido de *Anthurium* sp con 16.42% y *Spathiphyllum wallisii* con 14.46%.

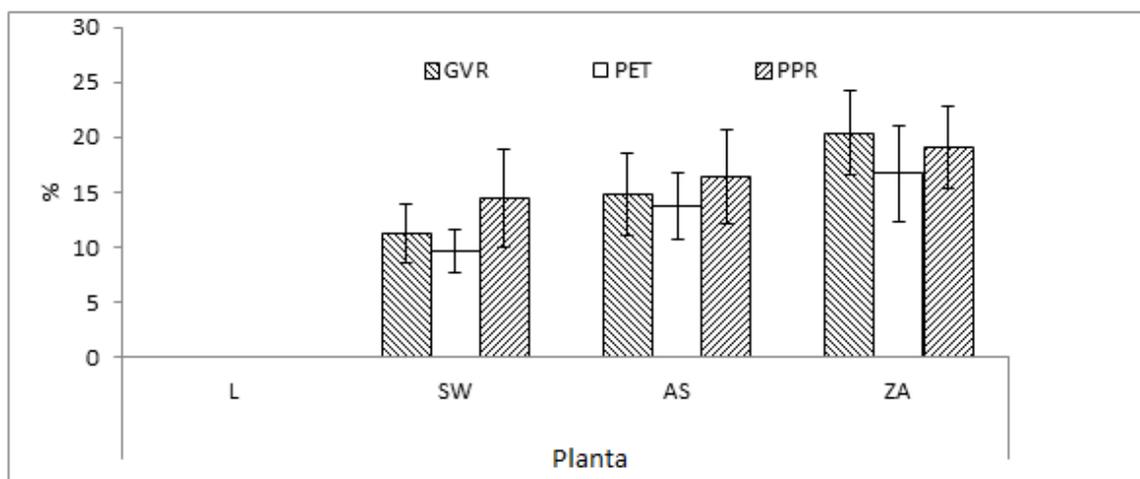


Figura 4.7 Tasa de crecimiento L (Lavándula sp); SW (S. wallisii), AS (Anturiun sp); ZA (Z. aethiopica) en tres diferentes sustratos.

En todos los sustratos la planta *Zantedeschia aethiopica* tuvo la mejor tasa de crecimiento, siendo el sustrato GVR donde mostró la tasa más alta con el 20.36%. No hubo diferencia significativa entre sustratos ($P > 0.05$) pero sí entre plantas ($P < 0.05$).

El análisis de ANOVA (ANEXO I) nos muestra que existe diferencia significativa entre variedades que es el primer factor con 4 niveles, encontrándose que el mejor resultado en el crecimiento de la planta de acuerdo a la prueba de Tukey, es el número cuatro que corresponde a la variedad *Zantedechia aethiopica*, quedando en segundo plano la variedad *Spathiphyllum wallisii*.

4.3.3. Producción de flores

Durante el estudio también se evaluó el número total de flores producidas a lo largo del periodo experimental, la cantidad promedio más alta se obtuvo de las especies *Spathiphyllum wallisii* y *Zantedechia aethiopica* en los tres diferentes sustratos, dentro de estos tres sustratos la mayor producción se presentó en GVR (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 producción de flores

	Flores Totales			
	L	SW	AS	ZA
GVR	0	12	2	10
PET	0	7	2	9
PPR	0	9	2	7

L (*lavándulas*) SW (*S. wallisii*), AS(*Anturium*sp); ZA (*Z. aethiopica*)

De acuerdo a la Tabla 4.3 las especies que produjeron mayor número de flores fueron *Spathiphyllum wallisii*, con un promedio de siete flores en PET, nueve en PPR y doce en sustrato GVR, seguido por *Zantedeschia aethiopica*, que produjo en promedio nueve flores en PET, siete en PPR y diez flores en GVR. La producción de flores para *Anthurium* sp solo fue de dos flores a lo largo de todo el estudio, tanto en PET, PPR y GVR. Aunque *S. wallisii* presentó menor tasa de crecimiento en PET, tuvo una mayor producción de flores, lo cual es un beneficio importante de esta especie; pues a pesar de que el PET no favorece el crecimiento de las especies, favorece una mayor floración. Para las otras dos especies, el crecimiento y el florecimiento tuvieron un comportamiento similar, para GVR hubo una producción mayor pero irregular de flores, con un máximo de dos flores durante los meses

de septiembre, diciembre y marzo por unidad experimental. *Zantedeschia aethiopica* produjo flores a partir de julio, obteniendo su mejor producción (dos flores por mes) en los meses de agosto, septiembre y octubre, y siguió floreciendo durante el resto del período experimental. Estos resultados están de acuerdo con el período de floración de estos tipos de plantas, que pueden ser durante todo el año. Además, las condiciones de luz y temperatura presentadas durante el período experimental fueron óptimas, como se informó en estudios similares para estas especies (Zhang et al., 2007, Hernández et al., 2017). En el estudio hubo diferencia significativa en la producción de flores por tipo de sustrato ($P < 0.05$), sin embargo, no hubo diferencia del número de flores por planta ($P > 0.05$)

4.3.4. pH en la entrada y salidas del sistema

El intervalo adecuado de pH para la existencia de vida dentro de estos sistemas es de 5 a 9, en este sentido, los valores que se encuentren menores a 5 y mayores a 9 son complicados de tratar por medios biológicos (Ho y Ho, 2012). En el estudio realizado se observó que no existe diferencia estadística significativa en los valores de pH ($p > 0.5$) en el sustrato PET, pero si en GVR y PPR.

En la Figura 4.8 se presenta el comportamiento del pH en sustrato GVR, al realizar la medición de los efluentes tratados se encontraron valores de pH superiores a los valores del influente en microcosmos sembrados con plantas de *Zantedeschia aethiopica* con 8.1 aproximadamente, lo que se puede asociar a la fotosíntesis de la planta, debido al consumo de CO_2 durante el día, lo que se traduce en aumento del pH en los sistemas sembrados (Vinasco y Solís, 2011), el cual se presentó entre los 135 y 150 días del estudio. Los valores de pH más bajos fueron para *Lavandula* sp con un valor de 7.13.

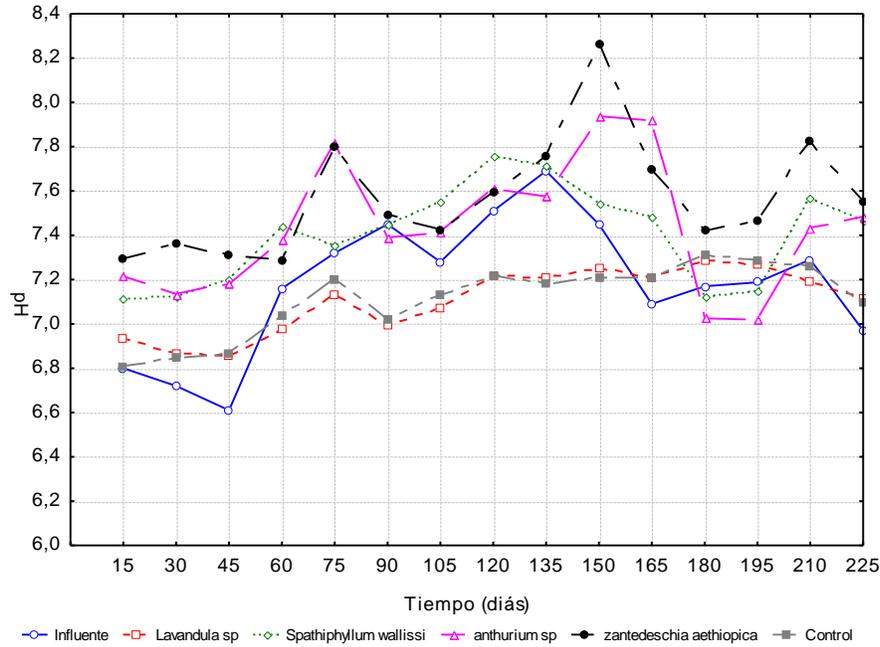


Figura 4.8 pH de influente y efluente en sustrato de GVR

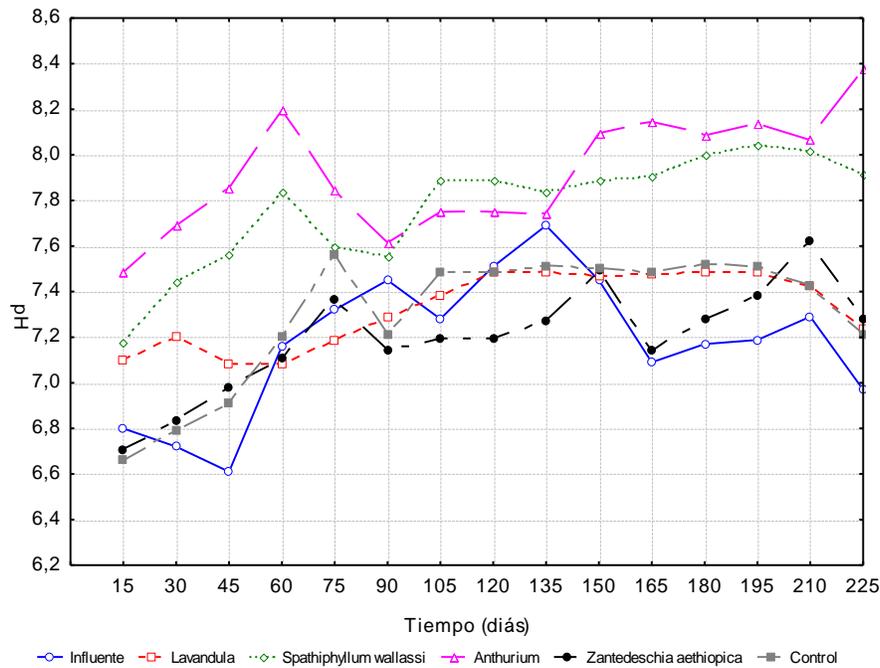


Figura 4.9 pH de influente y efluente en sustrato de PPR

En la Figura 4.9 se muestran los valores de pH de los afluentes tratados utilizando como sustrato PPR, se encontró que los valores más altos se presentaron en los efluentes tratados con *Anthurium* sp con un valor de 8.2 aproximadamente en el día 60 del experimento. Por el contrario el valor más bajo en este sistema se presentó con *Lavandula* sp igual a 7.10,

encontrándose dentro de valores típicos de un agua residual doméstica (Fumasoli et al., 2017).

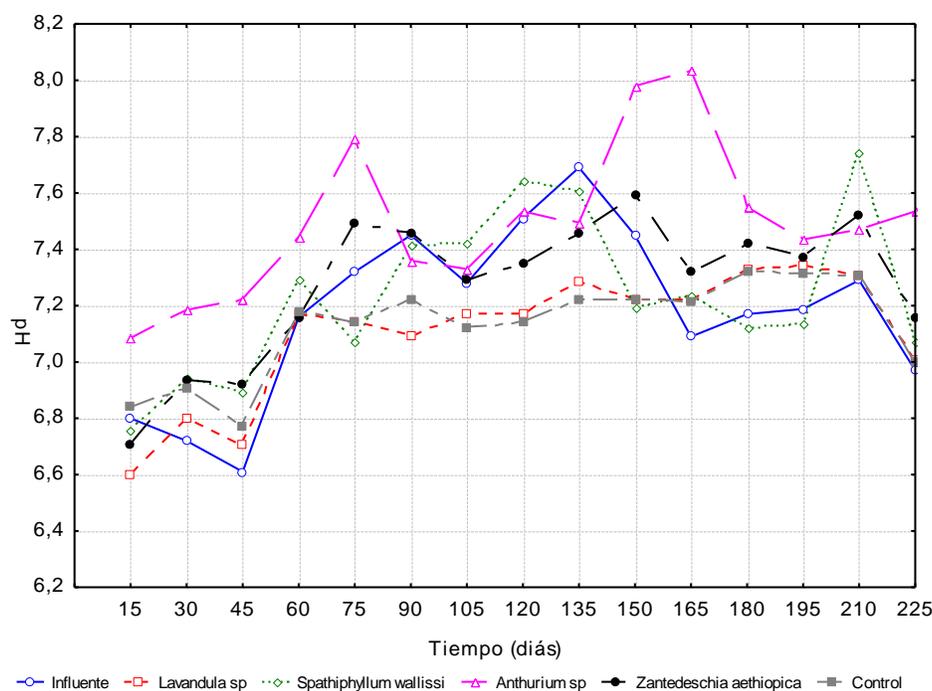


Figura 4.10 pH de influente y efluente en sustrato de PET

Para los efluentes tratados utilizando como medio de soporte PET se encontraron valores entre 6.6 y 7.8 (figura 4.10), los valores superiores se encontraron en los microcosmos sembrados con *Anthurium sp*, entre los 150 y 165 días de experimento. El valor más bajo fue de 6.6 en microcosmos sembrados con *Lavandula sp*, posiblemente debido a la presencia de materia orgánica de las raíces de la lavanda que pudo modificar las características químicas del agua en los microcosmos o probablemente por oxidación de sulfuro (Rahman et al., 2011).

En general se tuvieron valores cercanos a los neutros durante los 270 días de operación. Los tres tratamientos con sustratos muestran alcalinidad, los promedios de pH que mostraron mayor consistencia se obtuvieron en las plantas usando PPR como sustrato. Las disminuciones del pH de algunos datos se sustentan en la remoción de nitrógeno que se da en estos sistemas, que causa reducción de alcalinidad (Casierra-Martínez et al., 2017).

4.3.5. Temperatura, conductividad eléctrica y concentraciones de sólidos disueltos totales en la entrada y salida del sistema.

En la Tabla 4.4 se pueden observar los valores obtenidos para los parámetros químicos a la entrada y salida del sistema para los tres diferentes sustratos.

Tabla 4.4 Parámetros químicos a la entrada y salida de microcosmos de humedales

Sustrato	Planta	Temperatura de las Muestras (°C)	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)
GVR	Influente	23.34±0.70	1306.45±52.07	267.59±5.94
	L	17.44±0.15	1047.23±41.63	177.90±3.05
	SW	16.94±0.19	907.86±47.47	162.77±2.32
	ASP	17.14±0.19	1012.89±32.86	156.25±2.70
	ZA	17.41±0.13	997.13±28.75	138.60±1.96
	Control	17.61±0.16	1050.20±43.51	190.43±3.46
PET	Influente	23.34±0.70	1306.45±52.07	267.59±5.94
	L	17.27±0.17	1124.691±33.24	201.60±2.22
	SW	16.99±0.21	1167.94±28.75	183.71±1.67
	ASP	17.18±0.19	1116.98±36.01	178.82±2.00
	ZA	17.44±0.19	1118.48±29.22	168.50±2.18
	Control	17.48±0.19	1146.22±39.48	212.99±2.70
PPR	Influente	23.34±0.70	1306.45±52.07	267.59±5.94
	L	17.25±0.18	1038.83±30.08	189.82±2.40
	SW	16.67±0.19	1080.12±26.08	174.86±1.54
	ASP	17.14±0.20	1019.78±26.88	169.55±1.28
	ZA	17.43±0.19	1032.80±27.60	158.25±2.35
	control	17.49±0.16	1042.26±31.18	198.94±2.92

Los valores se dan como el promedio ± error estándar (n = 32); CE, conductividad eléctrica; RVG, grava volcánica roja; PET, tereftalato de polietileno; PPR, piedra porosa de río.

4.3.5.1. Temperatura

La temperatura del agua (tabla 4.4) afecta directamente el desarrollo de microorganismos (Yalcuk y Ugurlu, 2009). La temperatura del influente dentro del sistema fue de 23.34 ± 0.70 °C, mientras que en microcosmos con vegetación en sustrato GVR se encontró entre 16.75 y 17.54 °C, en los sustratos de PET fue en rangos de 16.78 a 17.63 °C y para PPR los valores fueron entre 16.86 y 17.62; estos valores son congruentes a los reportados

por(Akratos y Tsihrintzis, 2007) que indican que los valores de temperatura idóneos para la remoción de contaminantes se encuentran entre los 16°C y 32°C.

4.3.5.2. Sólidos disueltos

Los valores promedio de sólidos disueltos totales (SDT) encontrados en el influente fueron de $267.59 \pm 5.94 \text{ mg L}^{-1}$. En los efluentes de microcosmos con vegetación sin importar que tipo de sustrato contenían, los valores oscilaron de 138.71 mg L^{-1} a 178.82 mg L^{-1} , y en los microcosmos sin vegetación se encontraron valores mayores que en los HI con vegetación, con valores que oscilaron de 186.97 mg L^{-1} a 215.69 mg L^{-1} . Dicha medida puede ser alterada por procesos biológicos; sin embargo, los factores que más influyen en sus valores son los procesos físicos de dilución y evaporación (Tejeda et al., 2015).

La tabla de ANOVA (ANEXO II) muestra que existe diferencia significativa entre variedades que es el primer factor con 5 niveles, encontrando que el mejor resultado para la remoción de sólidos disueltos de acuerdo a la prueba de Tukey, es el número cuatro que corresponde a la variedad *Zantedeschia aethiopica*, quedando en segundo plano la variedad *Spathiphyllum wallisii*.

4.3.5.3. Conductividad eléctrica

En relación a la CE se observó que el valor de los efluentes bajó con relación al del influente, tanto en los microcosmos con vegetación como en los microcosmos sin vegetación en $240.75 \pm 28.37 \mu\text{S cm}^{-1}$. Esto se puede deber a la absorción de iones, micro y macro elementos en las raíces y demás tejidos en las plantas, además del uso de PET y GVR, como sustrato, posiblemente por su capacidad física de adsorción de SDT (Kyambadde et al., 2005).

La tabla de ANOVA (ANEXO III) indican que existe diferencia estadística significativa, y muestra que quien presenta menor conductividad es la variedad 4 que corresponde a la variedad *Zantedeschia aethiopica* y la interacción que genera menor conductividad eléctrica

es la compuesta por la variedad *Spathiphyllum wallisiy* el sustrato 1 que se identifica como PPR.

4.3.6. Concentraciones de contaminantes

4.3.6.1. *DBO₅ en la entrada y salida del sistema*

En HI, la eliminación de DBO_5 , se presenta por la interacción de varias condiciones como; la absorción, sedimentación, y el metabolismo microbiano (Karathanasis et al., 2003). Los humedales con vegetación favorecen la bioremediación mediante la liberación de exudados, enzimas que estimulan el desarrollo de microorganismos y actividad bioquímica en la rizósfera (Chávez et al. 2015). Además, en el sistema de humedales con vegetación, la liberación constante de oxígeno por medio de las raíces favorece la reducción de DBO_5 .

Concentraciones de DBO_5 . En este estudio la concentración promedio de DBO_5 en el influente fue $115.96 \pm 23.1 \text{ mg L}^{-1}$ independientemente del sustrato, los datos presentados del día 15 al 45 en GVR con vegetación fueron de $74.5 \pm 12.4 \text{ mg L}^{-1}$ aproximadamente mientras que en las unidades experimentales sin vegetación fueron de $94.5 \pm 0.5 \text{ mg L}^{-1}$. A partir de la muestra tomada del día 60 al 225, las concentraciones registradas del sistema en GVR con vegetación fueron de $23.3 \pm 4.6 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que en las unidades sin vegetación fueron $27.2 \pm 8.1 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 4.11).

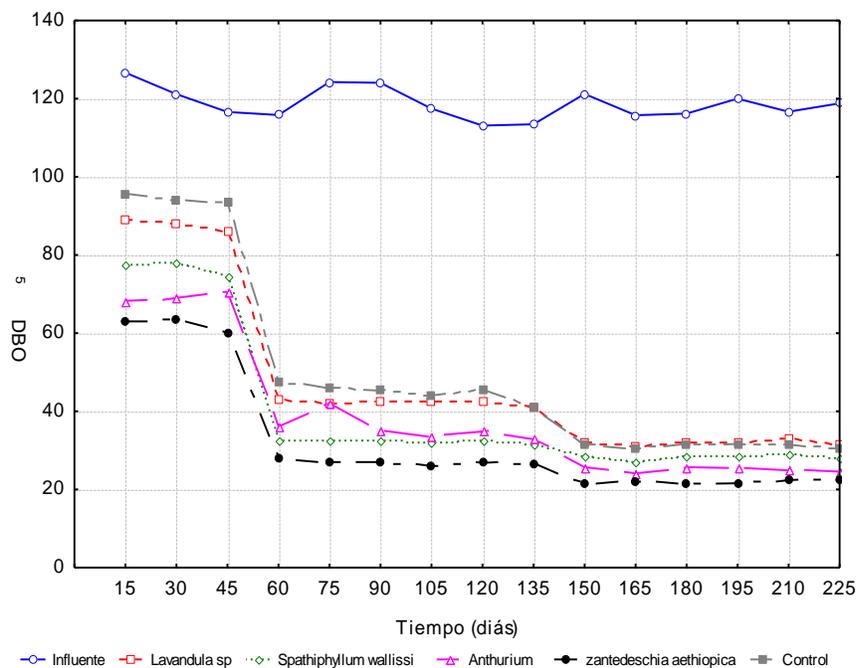


Figura 4.11 Concentraciones de contaminantes DBO₅ en sustrato GVR

La concentración promedio de DBO₅ en el influente que utilizó como medio de soporte PPR fue el mismo que en los otros dos sustratos ($115.96 \pm 23.1 \text{ mg L}^{-1}$), en los día 15 al 45 no se observa ninguna disminución, en cambio en los días 45 a 60 se presenta una ligera disminución, para los días 135 a 150 los valores presentados iban de $35.21 \pm 1.56 \text{ mg L}^{-1}$ a $48.31 \pm 2.14 \text{ mg L}^{-1}$ aproximadamente, mientras que en las unidades experimentales sin vegetación los valores que se presentaron fueron $51.12 \pm 2.20 \text{ mg L}^{-1}$ aproximadamente (Fig. 4.12).

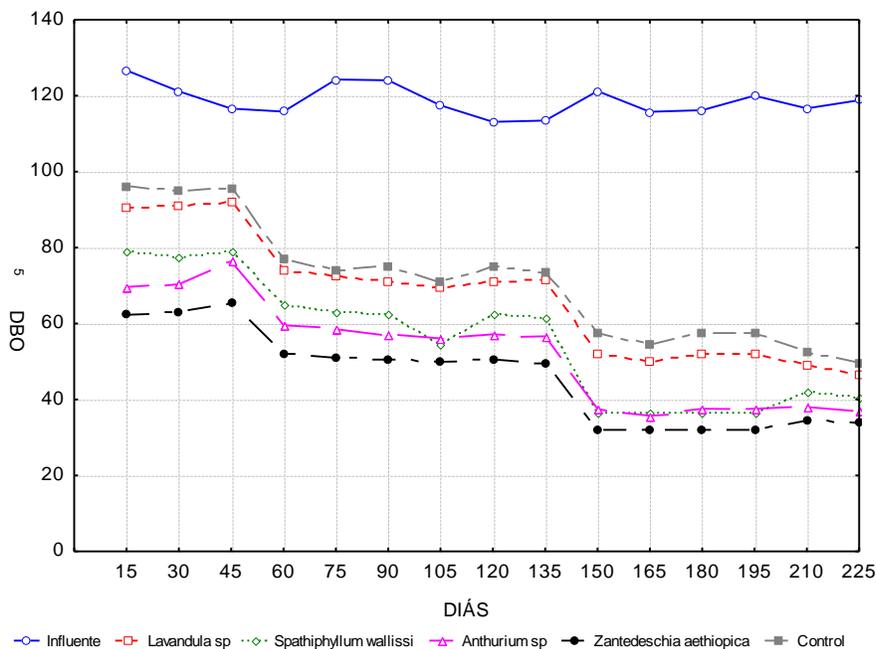


Figura 4.12 Concentraciones de contaminantes DBO₅ en sustrato PPR

Para los sistemas con vegetación en PET la concentración promedio de contaminante DBO₅ fue de $77.4 \pm 13.5 \text{ mg L}^{-1}$ aproximadamente en microcosmos con vegetación y $95.4 \pm 0.3 \text{ mg L}^{-1}$ sin vegetación (Figura 4.13). A partir de las muestras tomadas del día 150 a 225, las concentraciones registradas en el sistema con vegetación fueron $36.9 \pm 6.4 \text{ mg L}^{-1}$, y $45.2 \pm 14.4 \text{ mg L}^{-1}$ sin utilizar vegetación (Fig. 4.13).

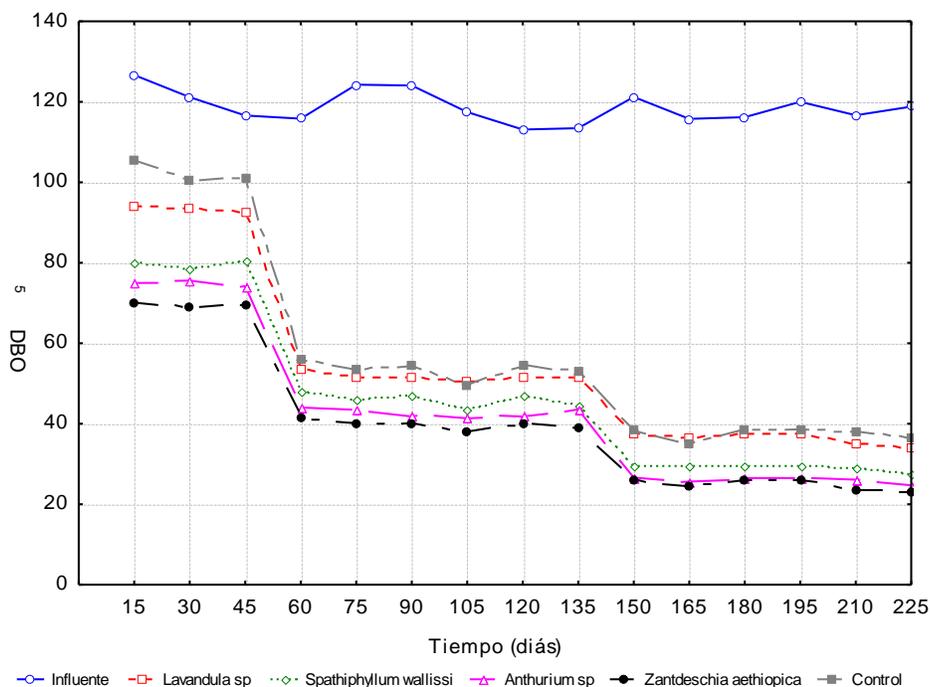


Figura 4.13 Concentraciones de contaminantes DBO₅ en sustrato PET

Los valores encontrados son relativamente altos con relación a los encontrados en Marín-Muñiz (2016), para DBO₅ entre 10 y 40mg L⁻¹ en HI con vegetación 20 y 80 mg L⁻¹ en la unidades sin vegetación; considerando que los microcosmos eran nuevos y se necesita un tiempo prudente para el desarrollo de colonias bacterianas que son fundamentales en el proceso de remoción, esto puede explicar los bajos resultados de remoción de DBO₅ presentados del día 15 al 45 en los tres sustratos(Olguín et al., 2008; Hayder et al., 2017).

4.3.6.2. P-PO₄ en la entrada y salida del sistema

Concentraciones de P-PO₄. Las concentraciones de P-PO₄ en el influente independientemente del sustrato utilizado fueron de 11.75 ± 4.9 de fósforo en forma de fosfato (P-PO₄). Después del tratamiento, para el sustrato GVR se encontró que la concentración del contaminante en los sistemas con vegetación fue de 7.36 ± 0.74 mg L⁻¹. Para el caso de los microcosmos sin vegetación, la concentración se encontró en 8.63 ± 2.49 mg L⁻¹ (Figura 4.14), esto se puede atribuir a que el fósforo presente pudo ser absorbido por las plantas o en su defecto también pudo ser removido mediante las acciones bacterianas.

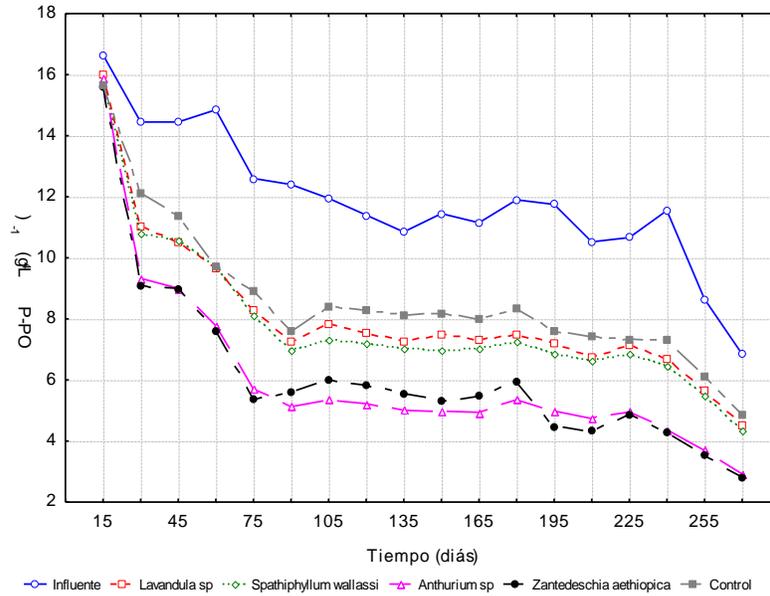


Figura 4.14 Concentraciones de contaminantes P-PO4 en sustrato de GVR

En los humedales plantados en medios PPR las concentraciones mínimas identificadas del contaminante P-PO₄ en el sistema fueron de $10,51 \pm 0,26 \text{ mgL}^{-1}$ aproximadamente para microcosmos con vegetación y $11,40 \pm 2,42 \text{ mg L}^{-1}$ en los sistemas que no utilizaron vegetación (Fig. 4.15).

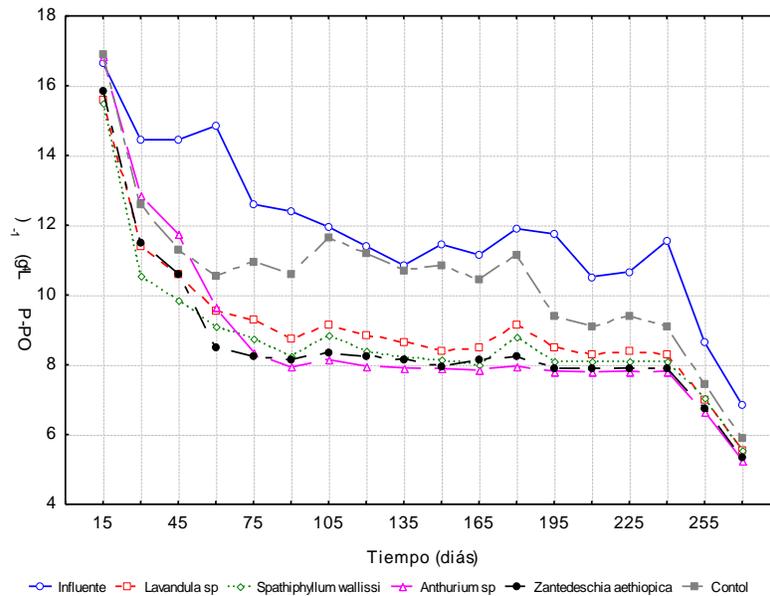


Figura 4.15 Concentraciones de contaminantes P-PO4 en sustrato de PPR

En cuanto a las concentraciones encontradas de P-PO₄ para sistemas en donde se utilizó PET como sustrato los valores encontrados fueron de aproximadamente $5.8 \pm 0.2 \text{ mg L}^{-1}$ para microcosmos con vegetación y $8.2 \pm 2.42 \text{ mg L}^{-1}$ en los sistemas que no utilizaron vegetación (Fig. 4.16).

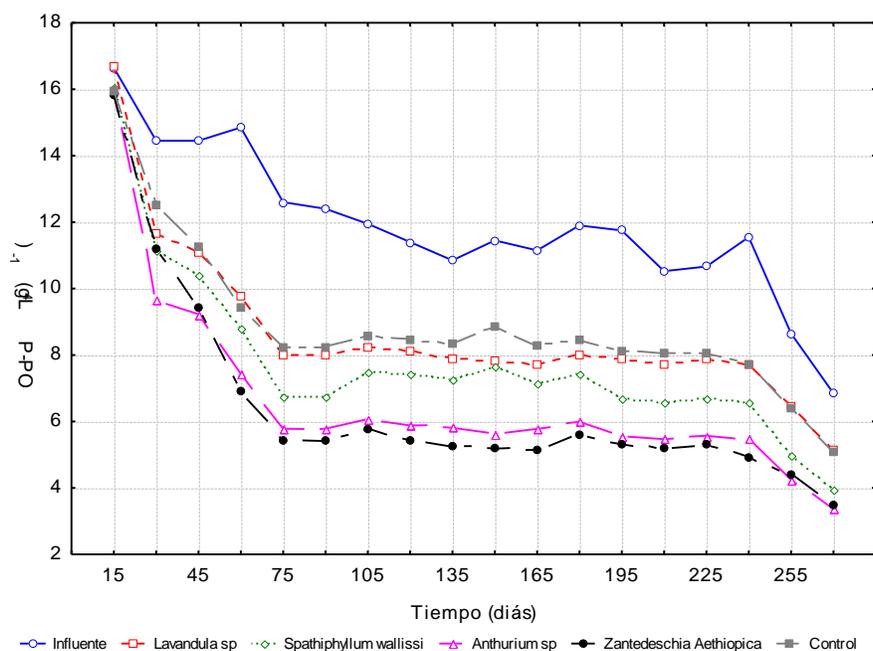


Figura 4.16 Concentraciones de contaminantes P-PO₄ en sustrato de PET

Los resultados de la tabla de ANOVA (ANEXO V) nos indican que existe diferencia significativa entre variedades, encontrándose que la mejor respuesta para la remoción del contaminante P-PO₄ de acuerdo a la prueba de Tukey, es el número cuatro que corresponde a la variedad *Zantedechia aethiopica*, así como con el segundo factor considerado en el experimento como sustrato, el análisis estadístico indica que el mejor resultado es el 1 que corresponde a la grava volcánica roja, y en cuanto al sustrato que dio en segundo lugar mejor respuesta fue el PET.

4.3.6.3. N-NO₃ en la entrada y salida del sistema

Concentraciones de N-NO₃. La concentración de nitrógeno en el influente fue de $11.95 \pm 3.65 \text{ mg L}^{-1}$ y bajó en los microcosmos con vegetación, los valores oscilaron de 5.82 ± 1.64

mg L⁻¹ a 8.10 mg L⁻¹ para sistemas con vegetación GVR; mientras que los sistemas sin vegetación estuvieron en 8.55 ± 3.85 mg L⁻¹ (Fig. 4.17).

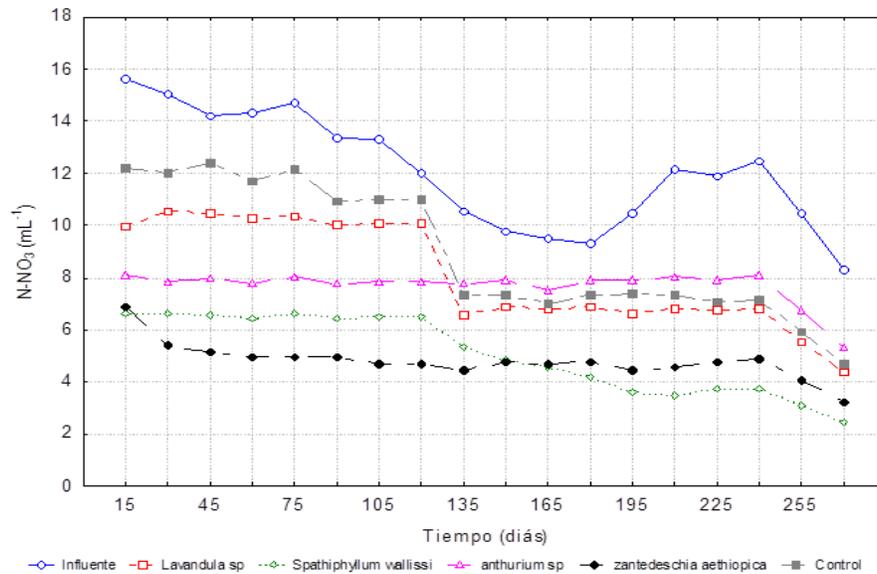


Figura 4.17 Concentraciones de contaminantes N-NO₃ en sustrato de GVR

Las concentraciones del contaminante N-NO₃ identificados en los sistemas que utilizaron como medio de soporte PPR fueron de aproximadamente 7.69 ± 0.14 mg L⁻¹ en los microcosmos que utilizaron vegetación y 10.59 ± 0.12 mg L⁻¹ en los que fueron tratados sin vegetación (Fig. 4.18), lo que nos indica un efecto de fitorremediación.

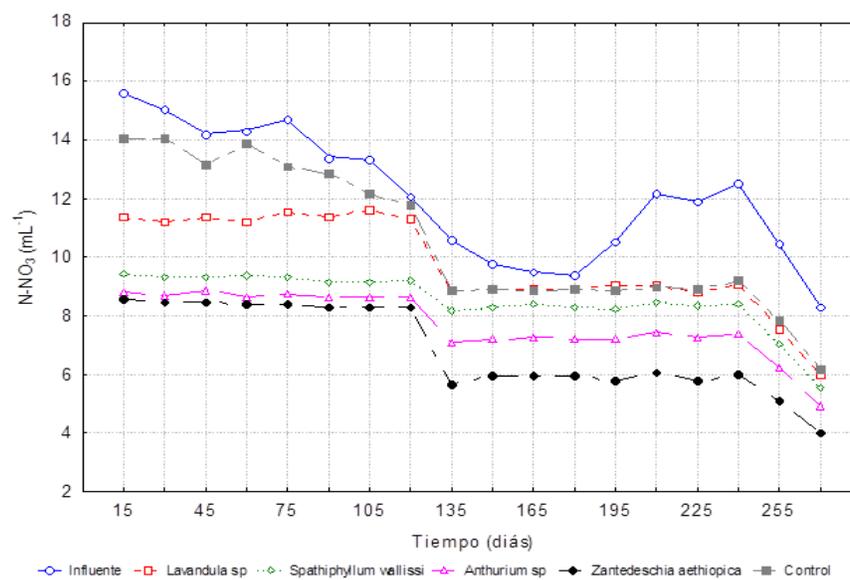


Figura 4.18 Concentraciones de contaminantes N-NO₃ en sustrato de PPR

Las concentraciones del contaminante N-NO₃ encontradas en los sistemas que utilizaron como medio de soporte PET fueron de $7.53 \pm 1.26 \text{ mg L}^{-1}$ en los microcosmos que utilizaron vegetación y $10.12 \pm 3.94 \text{ mg L}^{-1}$ en los que fueron tratados sin vegetación (Figura 4.19), lo que también nos comprueba el efecto de remoción que se obtiene al utilizar plantas para tratar los influentes.

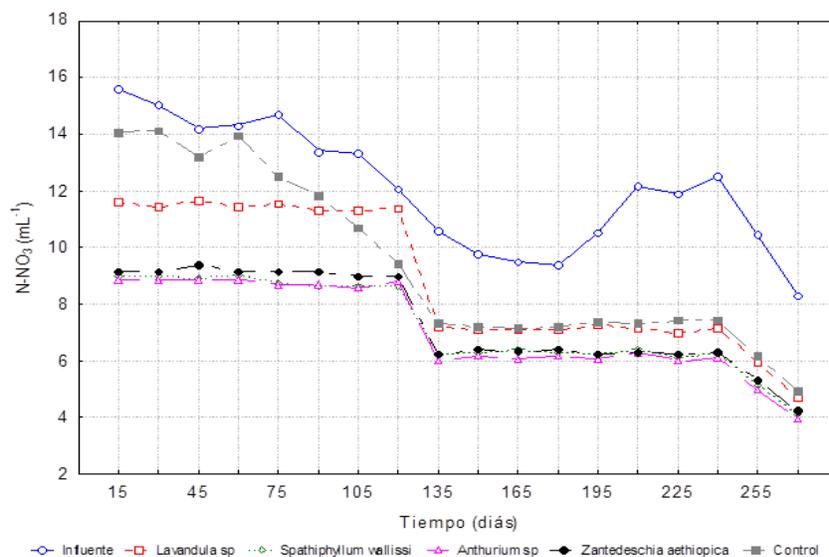


Figura 4.19 Concentraciones de contaminantes N-NO₃ en sustrato de PET

La Figura 4.19 indica que existe diferencia significativa entre variedades, así como en la evaluación del segundo factor considerado en el experimento como sustrato, indica que el mejor es el 1 que corresponde a la grava volcánica roja, y el segundo que mayor remoción realiza es el PET.

4.3.6.4. Coliformes fecales en la entrada y salida del sistema

Las concentraciones de Coliformes fecales en el agua residual fueron en promedio de $3,319.31 \pm 64.4 \text{ NMP } 100\text{mL}^{-1}$, después de pasar por los sistemas con vegetación, esta concentración bajó a rangos promedio en GVR y los valores fueron $1,211.49 \pm 77.42 \text{ NMP } 100\text{mL}^{-1}$, para los HI con vegetación en sustrato de PET los resultados presentados fueron $1,386.97 \pm 54.01 \text{ NMP mL}^{-1}$ (Figura 4.20).

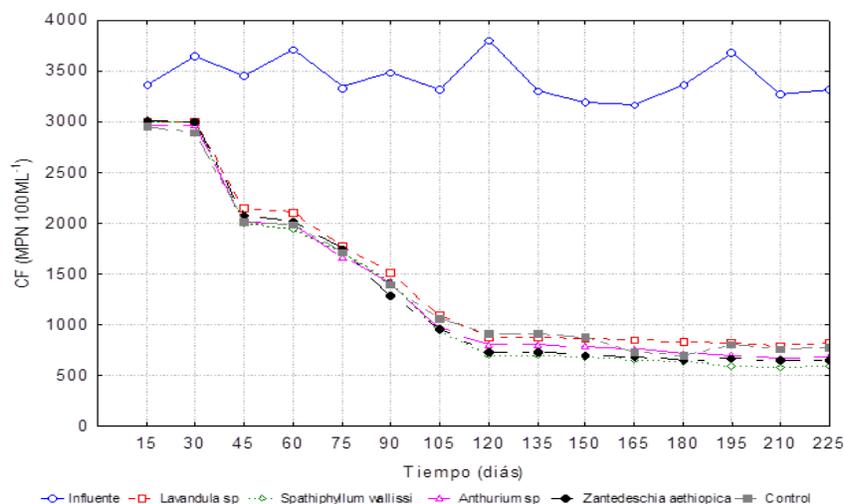


Figura 4.20 Concentración de contaminantes en influentes y efluentes CF en sustrato VRG, PPR y PET.

En relación a los microcosmos sin vegetación en ambos sustratos no se encuentran diferencias significativas ($P > 0.05$), en promedio se remueve 65% en GVR y 62% en sustrato de PET (Figura 4.20). Los resultados son acordes a los obtenidos por Headley et al. (2013), quienes no encontraron diferencias significativas entre los resultados de HI de flujo vertical con vegetación y sin vegetación, lo que indica que la vegetación no cumple un papel importante en la eliminación de CF, estos están relacionados con que los CF no pueden sobrevivir por intervalos de tiempo determinado, influyendo directamente el TRH (Avelar et al., 2014; Wu et al., 2016). Por lo que se recomienda evaluar la eliminación de CF incrementando los TRH para favorecer más remociones (García et al., 2009). También se puede atribuir a la liberación de antibióticos (como *phytometallophores* y *phytochelatins*) por las raíces de las plantas (Vymazal, 2011), la cobertura vegetal, el asentamiento de microorganismos, la exposición a condiciones abióticas de estrés tales como el pH, la temperatura y la concentración de oxígeno puede jugar papeles importantes en la reducción de coliformes (Weerakoon et al., 2016; Hinds et al., 2004). Además, muchos de estos factores están interrelacionados (Smith et al., 2005; Mesquita et al., 2008).

No hay diferencia significativa utilizando RVG y PET sin usar vegetación ($p = 0.639$), así también no se observaron diferencias significativas en ambos sustratos empleando vegetación ($p = 0.873$). No existe diferencia significativa en las medias de Coliformes fecales utilizando plantas diferentes en RVG ($P = 0.943$), aunque *Spathiphyllum wallisii* tuvo mejor

media de remoción media NMP (1143.1 mg L^{-1}), como tampoco existe diferencia estadísticamente significativa utilizando plantas diferentes con PET ($p= 0.901$), incluso con este sustrato se observó que el control sin vegetación presenta un promedio ligeramente mayor (8%) que con planta de *Lavandula* sp y *Spathiphyllum wallisii*, sin embargo, *Zantedeschia aethiopica* fue en promedio de $\text{NMP } 1267.1 \pm 814.23 \text{ mg L}^{-1}$.

4.3.7. Remoción de contaminantes y patógenos en HI, alimentados con aguas residuales domesticas

DBO₅. Las remociones de DBO₅ para los microcosmos con vegetación en sustratos GVR se encontraron entre 62.32 y 74.46%, en PET los datos oscilaron entre 57.11 y 68.59% y para sustrato PPR los porcentajes de remoción fueron de 58-70% en microcosmos con vegetación, en el caso de los microcosmos sin vegetación, las remociones fueron de 60.99 y 54.89% para GVR y PET, respectivamente, mientras que para sustrato PPR el porcentaje fue de 55.5% (Figura 4.21), sin observarse diferencias significativas con respecto al sustrato ($p=0.391$). En relación a los microcosmos con vegetación y sin vegetación, la diferencia en los valores obtenidos fue del 7.8%, lo que indica que la remoción se dio más por acción microbiana y por adsorción en los sustratos que por efectos de fitorremediación (Marín-Muñiz, 2016). Estos resultados presentes son congruentes con los reportados por Zurita et al. (2008) usando plantas de *Zantedeschia aethiopica* y sustrato de tezontle, donde se obtuvo remociones que oscilaron entre 78 y 83 % en humedales de flujo vertical con un TRH de 4 días. Los valores de calidad de las aguas después del tratamiento cumplen con los parámetros aceptados de la normativa de la agencia de protección ambiental (EE. UU) reportadas por Veliz-Lorenzo et al. (2009) y pueden ser empleados para riego de: árboles, pastos para producción agrícola, cultivos industriales y parques, usos comunes para aguas tratadas mediante HI (Marín-Muñiz et al., 2018).

En cuanto al tipo de vegetación en los diferentes sustratos, si se observaron diferencias significativas en las remociones de DBO₅ ($p=0.006$), se encontró que *Zantedeschia aethiopica* plantadas en sustrato GVR remueve en promedio de $29.61 \pm 9.34 \text{ mg L}^{-1}$ y en presencia de vegetación con PET de $36.41 \pm 9.62 \text{ mg L}^{-1}$ presentando diferencias significativas entre los dos sustratos con vegetación ($p<0.05$); mientras que en estos sustratos (RVG y PET) sin vegetación no se observaron diferencias estadísticas en la remoción de

contaminantes ($p=0.101$), el resultado promedio muestra una media de $45.23 \pm 13.34 \text{ mg L}^{-1}$ y $52.31 \pm 15.21 \text{ mg L}^{-1}$ para RVG y PET, respectivamente, sin utilizar vegetación.

P-PO4. La remoción de P-PO4 que se encontró en los HI con vegetación (*Spathiphyllum wallisi* y *Zantedeschia aethiopica*) fue de 34 y 48 % en sustrato GVR y de 35 y 45% para los HI con vegetación en PET con la misma vegetación, los porcentajes de remoción para HI con medio de soporte PPR fueron de 35 a 46% aproximadamente, valores que posiblemente se deban a procesos de absorción por la vegetación (Vymazal, 2010). Se ha reportado que la absorción de fosfatos por acción de las plantas es mucho mayor en zonas tropicales y además que las gravas tienen baja capacidad de remoción de fosfatos (García, 2009). Esta Información es congruente con los resultados presentados en estudios donde se han usado plantas tropicales (Tabla 4.5). En cuanto a los HI sin vegetación se obtuvieron porcentajes de remociones en sustratos de GVR y PET de 27 y 25% respectivamente y para PPR 25% (figura 4.21); los resultados obtenidos son congruentes con los reportados por Rousseau et al. 2008. Diferentes investigaciones reportan que la absorción en las plantas no es un mecanismo sustentable de eliminación de P-PO4 (Gill et al., 2011), en cambio el principal mecanismo es la adsorción de este compuesto en los sustratos (Ghosh y Gopal, 2010). En este sentido es importante evaluar combinación de medios de soporte utilizados en este estudio (GVR y PET) con otros que tengan mayor capacidad de remoción de P-PO4 (Calheiros et al., 2015), como pueden ser la zeolita (Huang et al., 2017), materiales que contienen magnesio (Lan et al., 2018) y concha de coco.

No hay diferencia significativa utilizando RVG y PET sin usar vegetación ($p=0.747$), en contraste, sí existe diferencia significativa en las medias de P-PO4 mg L^{-1} ($p=0.0001$), en ambos sustratos con vegetación, utilizando plantas diferentes en RVG, siendo *Zantedeschia aethiopica* la que mejor remueve de las dos que sobrevivieron con promedio de $6.15 \pm 2.87 \text{ mg L}^{-1}$; como también existe diferencia estadísticamente significativa utilizando plantas diferentes con PET ($p= 0.024$) donde también se mostró que *Zantedeschia aethiopica* es mejor con una promedio $5.36 \pm 2.94 \text{ mg L}^{-1}$. Se reitera que se obtienen mejores resultados cuando se emplean plantas, la segunda planta que remueve mejor es *Spathiphyllum wallisii* en promedio $7.77 \pm 2.64 \text{ mg L}^{-1}$.

N-NO₃. Los datos para remoción de N-NO₃ se justifican por el papel que cumplen las plantas como oxigenación en los HI y también por la absorción de nutrientes en sus tejidos según lo reportado por Vymazal (2011). Con respecto al tipo de sustrato, sí se observaron diferencias significativas entre los sustratos empleando vegetación ($p=0.001$). Las remociones obtenidas (Figura 4.21), fueron mayores en los microcosmos con vegetación en GVR y sembrados con *Spathiphyllum wallisi* y *Zantedeschia aethiopica* donde se obtuvieron valores de 58 y 59 %, respectivamente. En el caso de los HI con vegetación en PET las remociones en las plantas que sobrevivieron fueron de 40 % en *Spathiphyllum wallisii* y 41% *Zantedeschia aethiopica*. Para el caso de los HI sembrados en medios PPR las remociones más altas fueron presentadas por *Zantedeschia aethiopica* y *Anthurium* sp con 43% y 38% respectivamente; mientras que en los microcosmos sin vegetación empleados como controles con RVG los valores fueron de 26%, en PET de 39 % y PPR 13%. Diferentes estudios han comprobado que la acción microbiana y la desnitrificación, son los principales procesos para eliminar nitrógeno en CW (Kadlec, 2009; He et al., 2018). Pero en este estudio se muestra que las plantas jugaron un papel importante en el proceso de remoción de tal contaminante, como se observó en el crecimiento, es decir, hubo un proceso de fitorremediación (en promedio, 17% se favoreció por la presencia de vegetación), se puede justificar que este pudo haber sido empleado para desarrollo y crecimiento de las plantas, como se describió previamente. Los resultados obtenidos en este estudio se encuentran dentro de los rangos de remoción de contaminantes encontrados en otros estudios como los que se muestran en la tabla 4.5, en los que se usan sustratos de origen pétreo (Akratos y Tsihrintzis, 2007; García et al., 2010), indicando que los sustratos usados en este estudio son una opción más para utilizar como filtros en humedales, pero además, considerando que los sustratos aquí utilizados son más económicos, más fáciles de obtener y se solventan otros problemas a la vez, como el de saturación de basura por PET.

Se reitera que se obtienen mejores resultados cuando se emplean plantas, las plantas que presentan mejor capacidad de remoción son *Spathiphyllum wallisi* y *Zantedeschia aethiopica*. Por otra parte, aunque la planta de *Lavandula* sp murió, se continuaron midiendo las concentraciones de contaminantes en la salida de estas unidades experimentales, por si la raíz generaba nuevos brotes, sin embargo, la especie no soportó las condiciones de humedales.

COLIFORMES FECALES (CF). En promedio, la reducción de coliformes fue del 65% en GVR, 62% en sustratos de PET y 62% en PPR (Figura 4.21). Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Headley et al. (2017), quienes no encontraron diferencias significativas entre los resultados del flujo vertical de HI con vegetación y sin vegetación. Estos resultados indican que la vegetación no juega un papel importante en la eliminación de la CF (coliformes fecales). Se relacionan con el hecho de que la CF no puede sobrevivir por intervalos de tiempo, lo que influye directamente en el tiempo de retención hidráulica (THR) (Avelar et al., 2014; Wu et al., 2016). Por lo tanto, se recomienda evaluar la eliminación de la CF aumentando la THR para favorecer más eliminaciones (García et al., 2009). La liberación de antibióticos (como fitometalóforos y fitoquitlatinas) por las raíces de las plantas (Vymazal, 2011) la cobertura vegetal, el asentamiento de microorganismos, la exposición a condiciones de estrés abiótico como el pH, la temperatura y la concentración de oxígeno pueden desempeñar un papel importante en la reducción de coliformes. (Weerakoon et al., 2016; Hinds et al., 2004) Además, muchos de estos factores están relacionados entre sí (Smith et al., 2005; Mesquita et al., 2008; Marin-Muñiz, 2018)

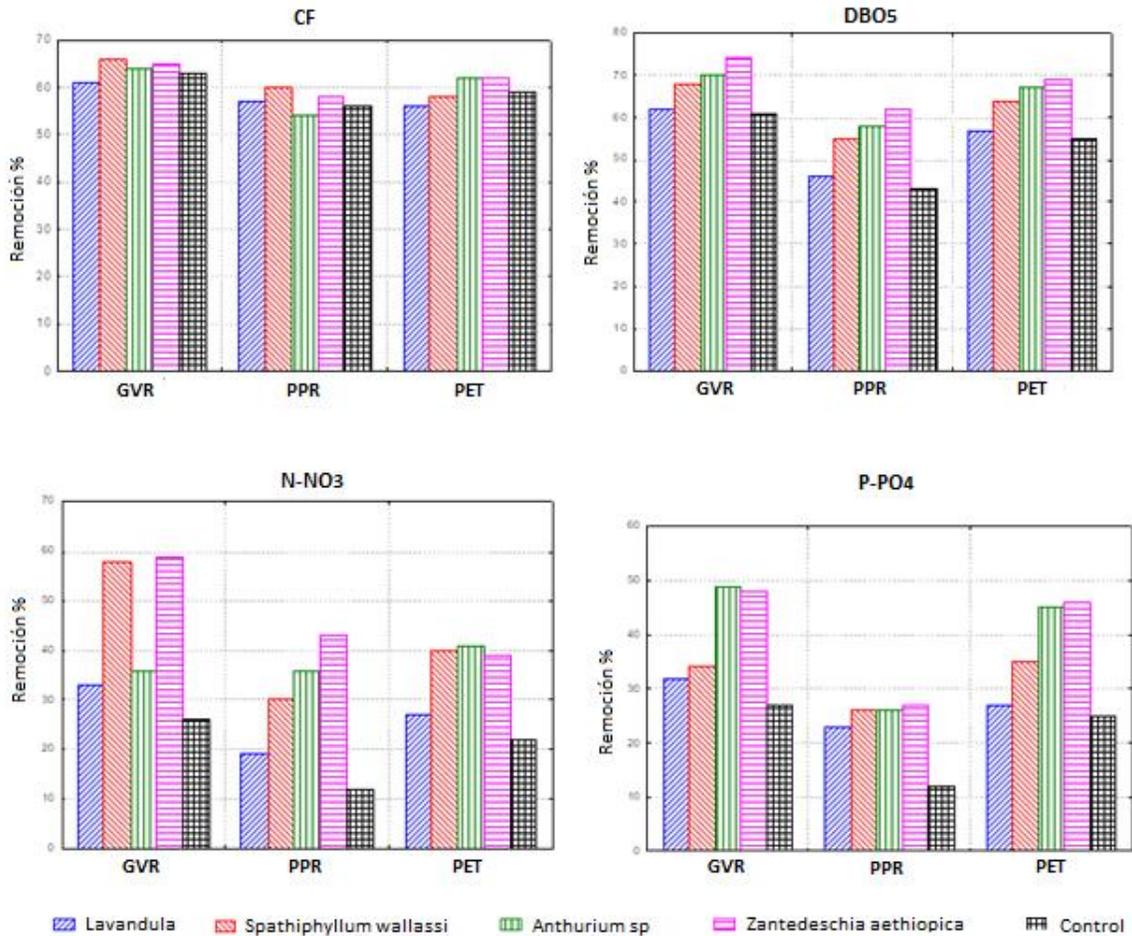


Figura 4.21 Remoción de contaminantes y patógenos en HI. Coliformes fecales (CF), demanda bioquímica de oxígeno (BQO5), fosfato (P-PO4) y Nitratos (N-NO3)

Por otra parte, es importante mencionar que en la literatura se encuentran pocos registros sobre el uso de plantas ornamentales como *Spathiphyllum Wallisii*, sobre su adaptación y la remoción de contaminantes en CW (tabla 4.5). Lo que hace importante su evaluación en policultivos en HI a nivel mesocosmo, para conocer el panorama completo del cultivo y sus interacciones bioquímicas en este tipo de sistemas. Por otra parte, usar policultivos de plantas ornamentales que producen flores en HI, favorecería la aceptación de estos sistemas en comunidades donde sea necesario implementarlos para solucionar problemas de contaminación de aguas residuales. Con relación a la *lavándula* sp, los valores obtenidos tanto en concentración como en remoción fueron similares a los observados en controles sin vegetación y no se encuentran diferencias significativas ($P > 0.05$), porque esta murió en todos los sustratos (VGR, PET y PPR).

Tabla 4.5 Comparación de medios de soporte de HI y eliminaciones

Sustrato	Vegetación	Tipo de cultivo	Tipo de agua residual	Remoción	País	Autor
Tezontle	<i>Canna spp. and Iris spp</i>	Policultivo	Aguas residuales	DBO: 82, TN: 53, TP: 60.	Chile	Morales et al. (2013)
Grava	<i>Canna indica</i>	Policultivo	Sintética	N: 65-67, P: 63-74, Zn and Cu: 98-99, Carbamazepine: 25-51, LAS: 60-72	Italy	Macci et al. (2015)
Tezontle	<i>Strelitzia reginae, Canna hybrids, Anthurium andreanum,</i>	Policultivo	Doméstica	COD: >75, P: >66, Coliforms: 99	México	Zurita et al. (2006)
Tezontle and Red volcanic gravel	<i>Strelitzia reginae, Anthurium africanus y Agapanthus africanus</i>	Policultivo	Doméstica	TSS: 62, COD: 80, DBO: 82, TP: >50, TN: >49	México	Zurita et al. (2009)
Tezontle	<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Monocultivo	Doméstica	DBO: 79, TN: 55, PT: 50	México	Zurita et al. (2008)
Grava roja volcánica	<i>Lilium sp, Anthurium sp. y Hedychium coronarium</i>	Policultivo	Municipal	NT: 47%, PT: 33%, DQO: 67%	México	Hernández (2016)
Tezontle	<i>Strelitzia reginae</i>	Policultivo	Municipal	COD: 75, TN: 18, TP: 2, TSS: 88.	México	Zurita and Carreón-Álvarez (2015)
Arcilla expandida	<i>Canna x generalis Bailey, and Iris pseudacorus L</i>	Policultivo	stormwater runoff	N and P <i>Canna</i> (>90), <i>Iris</i> (>30)	USA	Chen et al. (2009)
Arcilla	<i>Canna flaccida, Canna indica, Agapanthus africanus and Watsoniaborbonica</i>	Policultivo	Comunidad	DBO, COD, P-PO ₄ , NH ₄ and total coliform bacteria (all up to 84)	Portugal	Calheiros et al. (2015)
Suelo	<i>Crinum asiaticum, Spathiphyllum clevelandii Schott</i>	Policultivo	Doméstica	PO ₄ -P: ~20	Thailand	Torit et al. (2012)
Grava	<i>Spathiphyllum wallisii, Zantedeschia aethiopica, Iris japonica, Hedychium coronarium, Alocasia sp,</i>	Policultivo	Doméstica	N-NH ₄ : 64-93 DBO: 22-96 COD: 25-64	México	Garzón et al. (2008)

*Heliconia sp. y
Strelitzia reginae.*

Tabachin				PT: 73.2%, DQO:		Garzón-
Wood	<i>Spathiphyllum wallisii</i>	Policultivo	Doméstica	98%, N-N-NO4:		Zúñiga
				73.2%, SST: 99.5%	México	(2016)

Conclusiones

En este capítulo se presenta el diseño de cuatro metodologías que contribuyen al desarrollo y evaluación de los sistemas de Humedales Ingenieriles y la valoración económica del uso de humedales comunitarios en localidades rurales en relación con otros sistemas convencionales. La primera metodología está enfocada a microcosmos de HI, para identificación de las plantas (monocultivos de plantas ornamentales terrestres) y sustratos propuestos para determinar cuáles son idóneos para ser empleados en sistemas a nivel macrocosmos. La segunda metodología está enfocada a evaluar dos medios de soporte dando mejores resultados en la fase I de este estudio la PPR y PET, de igual forma para policultivos de plantas ornamentales terrestres a diferentes distancias de sembrado, para identificar como trabajan en conjunto y en cuál es la distancia de sembrado es adecuada para maximizar la remoción de contaminantes y favorecer el desarrollo vegetal. La tercera plantea el diseño y construcción de un humedal a nivel comunitario para tratar el 100% de las aguas residuales producidas en la comunidad rural de Pastorías, Actopan, Veracruz con policultivos de plantas ornamentales y empleando PET como medio de soporte. La cuarta parte es una valoración económica del uso de humedales comunitarios en el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales, comparando sus beneficios, con los generados con plantas de tratamiento convencionales.

Los tres primeros diseños metodológicos nos permitirán evaluar la capacidad que tiene las plantas ornamentales terrestres usadas en este estudio para ser empleadas en humedales ingenieriles, así como los medios de soportes que permiten tener economías en los costos al momento de implementación de los humedales a nivel comunitario, sin comprometer la eficiencia de los humedales, como es el caso del PET, mismo que puede encontrarse en

cantidades suficientes y se adquiere de forma accesible. Todo lo anterior permitiría favorecer la aceptación de estos sistemas en comunidades donde sean necesarios.

Los principales hallazgos identificados en este estudio revelan que los residuos de PET como medio de apoyo en las PCA favorecieron la eliminación de contaminantes y el desarrollo adecuado de las plantas, de manera similar el sustrato PPR un material comúnmente usado en HI. El uso de GVR mostró resultados favorables con respecto a la reducción de contaminantes (nitrato, fosfatos, demanda bioquímica de oxígeno y coliformes fecales). El uso de estos sustratos combinado con otros de origen de piedra se podría considerar en estudios futuros para tener una visión general completa de su eficiencia de eliminación y para el desarrollo de plantas, tanto a nivel de microcosmos y macrocosmos, como en estudios de diferentes especies de plantas que pueden adaptarse a estos sistemas utilizando PET como medio de soporte. Las plantas ornamentales juegan tres papeles importantes en los sistemas de tratamiento: 1. Aumentan la eficiencia de eliminación de los sistemas hasta un 30% en los principales parámetros valorados; 2. Proporcionan un valor estético a los sistemas, lo que permite su inserción en los paisajes en una forma estética; y 3. La producción de flores registrada en este estudio permite utilizar HI en futuros estudios a gran escala como los medios de comunicación para las flores que darían un valor añadido a estos sistemas de cultivo. En la eliminación de contaminantes, las plantas ornamentales *S. wallisii* y *Z. aethiopica* pudieron adaptarse a las condiciones de las armas biológicas y utilizar los contaminantes para su crecimiento. Por lo tanto, se recomienda el uso de estas plantas ornamentales en macrocosmos y mesocosmos de humedales para tratar aguas residuales en comunidades rurales con problemas de tratamiento de aguas residuales. Además, la producción de flores indica que estas plantas pueden convertirse en una fuente de ingresos económicos para los cuidadores de los humedales y puede contribuir a que estas ecotecnologías sean aceptadas con un mayor impacto paisajístico en las sociedades donde se requiere este tipo de solución. *Lavandula* sp. no se puede adaptar a los sistemas de humedales, por lo que no se recomienda su uso para HI.

El uso de especies ornamentales como Anthuriumsp, Zantedeschia aethiopica, y Spathiphyllum waillisii permite un segundo uso de las aguas residuales tratadas. Pueden ser utilizados para espacios verdes y la agricultura, ya que cumplen los parámetros de calidad

aceptados para ser empleado para estos fines. Aunque este estudio pone de relieve el potencial de las tres plantas ornamentales para eliminar contaminantes del agua residual doméstica, se sugiere estudiar la misma especie en cultivo mixto con el objetivo de adquirir conocimientos generales acerca de cómo trabajar en un grupo o en combinación.

CAPÍTULO V. ESTUDIO DE HUMEDALES DOMICILIARIOS SEMBRADOS CON POLICULTIVOS DE PLANTAS ORNAMENTAS Y SUSTRATOS DE PET Y PIEDRA POROSA DE RIO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

5.1. Introducción

La contaminación del agua y baja inversión en materia de tratamiento de aguas residuales en países en vía de desarrollo, resulta en un alto riesgo para la salud humana y los ecosistemas, debido a la carga de contaminantes y grandes volúmenes generados por este tipo de aguas que se arrojan sin tratar a cuerpos superficiales y subterráneos de aguas (Villalobos & Díaz, 2018; Zhindón et al., 2018), esta situación genera la obligación de encontrar alternativas, económicas y ecológicamente acordes a las necesidades de estas regiones mayormente ubicadas en zonas tropicales e inter tropicales (Zhang et al., 2015; Sandoval et al., 2019a; Guven et al., 2019). Una alternativa económica y ecológica para tratar aguas residuales en comunidades con menos de 2,500 habitantes, son los humedales construidos, estos son sistemas ingenieriles capaces de imitar la operación de un humedal natural en su función de Fitoremediación (Leiva et al., 2018). El papel de las plantas y medios de soporte o sustratos en Humedales Construidos (CWs), es fundamental en el proceso de Fitoremediación, los sustratos funcionan como filtros, medio de soporte para revegetación y como espacio óptimo para el crecimiento de microorganismos capaces de desarrollarse en este sistema (Wang et al., 2017; Zhang et al., 2018). Convencionalmente el uso de tezontle, arena y gravas es muy común en los CWs como sustrato o material de relleno (Wu et al., 2015; Lu et al., 2016), sin embargo, estos suelen ser los materiales más costosos durante la construcción de CWs, por sus usos comerciales, en la industria de la construcción (Sandoval-Herazo et al., 2018). A pesar de que los CWs son una ecotecnología económica y funcional para limpiar el agua comparada con sistemas convencionales, los valores comerciales de dichos materiales suelen ser una limitante para construir tales sistemas en comunidades rurales, donde no cuentan con recursos económicos suficientes (Marín-Muñiz, 2017; Wu et al., 2011). En este sentido materiales con misma o mejor funcionalidad de un menor costo comercial han sido evaluados en CWs, como una alternativa para abaratar los costos de construcción e implementación de estos sistemas a escala real (Tong et al., 2017; Yang et al., 2018). De acuerdo a Sandoval-Herazo et al., (2018), el estudio de nuevos materiales de fácil obtención y bajo costo es un

desafío que enfrentan actualmente los sistemas ecológicos de tratamiento como los son los CWs, que además de usar medios de soporte que ocupan el 80% de la superficie de los sistemas, algunos de estos nuevos materiales ha sido el producto de desechos como, escorias de acero, concha de ostra, astillas de madera, residuos de construcción, fibras sintéticas (Wang et al., 2019), esta indica una tendencia reciente de reuso de materiales de desecho uno de estos y recientemente evaluados son los residuos de PET, que causan grandes afectaciones al medio ambiente pero son funcionales como sustrato en CWs (Sandoval-Herazo et al., 2018) También se emplean plantas, comúnmente denominadas macrófitas (como *Phragmites australis*, especies del género *Typha* spp., *Scirpus* spp. y *C. papyrus*), estas proporcionan a los sistemas oxígeno en los sustratos, favoreciendo el crecimiento de comunidades bacterianas aerobias, también contribuyen a la remoción de contaminantes con la absorción de elementos del agua residual utilizados para su desarrollo (Marín-Muñiz et al., 2018; Vymazal, 2011; Vacca et al., 2005), si bien estas plantas son útiles en su función depuradora (absorben del 15 al 25% de contaminantes presentes en agua residuales a tratar), su apariencia estética no es llamativa y dificultan su inserción y adopción en comunidades con necesidad de tratar aguas residuales contaminadas y con limitaciones en materia de recursos económicos para la construcción de CWs a gran escala (Hernández, 2016). En este sentido se han gestado investigaciones encaminadas a evaluar nuevas especies de plantas que favorecen los aspectos estéticos del paisaje en CWs, además de ser eficientes en la eliminación de contaminantes, como son las plantas de ornato terrestres que producen flores como: *Anthurium* spp., *Canna* spp., *Heliconiaceae* spp., *Spathiphyllum wallisii*, y *Zantedeschia aethiopica* (Zurita et al., 2006; Zhang et al., 2007; Konnerup et al., 2009; Zurita et al., 2009; Sandoval-Herazo et al., 2018; Sandoval et al., 2019b). Remociones de materia orgánica y coliformes superiores al 80% se han reportado para CWs (de la Vega et al., 2020), así como remociones entre 45 y 65% de componentes de nitrógeno y fósforo (Vymazal, 2007). Con la intención de aumentar tales remociones tanto de contaminantes típicos de aguas residuales comunitarias como industriales, algunos estudios han realizado nuevos diseños o cambios de especies, generalmente en monocultivos (Arteaga-Cortez et al., 2019), Sin embargo, la información reportada sobre los efectos de mejora en la calidad del agua dependiente de densidad de plantas ornamentales en CWs, es escasa, se conocen especies que se han adaptado y se recomienda su uso en estudios a nivel microcosmos como los

reportados por Marín-Muñiz et al (2018), empleando *Typha* spp., y *Zantedeschia aethiopica*, en donde indican que lograron sobrevivir y crecer de forma saludable. Por otra parte, Sandoval-Herazo et al (2018) y Sandoval et al. (2019b), reportan el desarrollo de plantas ornamentales terrestres en diferentes medios de soporte y con variedad de plantas (*Zantedeschia aethiopica*, *Anturiun*, *Spathiphyllum wallisii*), presentando datos de su crecimiento, salud y producción de flores, pero no se reporta información en cuanto a los efectos de la densidad de ella en estos sistemas a nivel mesocosmo y mucho menos a tamaño real. El uso de especies con densidad de vegetación variable podría dar un panorama más claro de la densidad de vegetación que puede ser empleada en CWs, por metro cuadrado para maximizar la eliminación de contaminantes que realizan la vegetación en esto sistemas de tratamiento. Por lo anterior, en este estudio se propuso como objetivo principal evaluar el efecto en la eliminación de contaminantes como DBO₅, DQO, P-PO₄, N-NH₄, N-NO₃, y N-NO₂ respecto a la densidad en densidades de 1:1; 2:2 y 3:3 en 0.3 m² de superficie de plantas ornamentales terrestres (*Alpinia purpurata*, *Canna hydrids* y *Hedychium coronarium*) en policultivos a nivel mesocosmos plantados en dos diferentes sustratos (PET y PPR), así como el desarrollo vegetal en las diferentes condiciones de densidad de siembra .

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Área de estudio

Este estudio se realizó en la comunidad de Pastorías, Actopan entre junio de 2016 a mayo 2017, dicha comunidad localizada en la zona centro-norte montañosa del Estado de Veracruz, México (-96° 57' 08" y 19° 55' 83" S). El clima en la zona se clasifica como semicálido húmedo con lluvias todo el año (45%), cálido húmedo con lluvias todo el año (38%) y cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (17%), presentándose temperaturas más altas en el mes de junio y más bajas en el mes de enero, a una altitud de 1,900 metros sobre el nivel del mar. La precipitación promedio anual es de 947.1 mm y la temperatura promedio anual entre 20 – 26°C, condiciones típicas de las zonas subtropicales de américa (Zamora-Castro et al., 2019).

5.2.2. Características del sistema de Humedales Construidos (CWs)

Los sistemas de CWs utilizados fueron celdas de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH), se implementaron 14 mesocosmos (Figura. 1), como unidades experimentales de cemento y ladrillo, las dimensiones de cada unidad son de 0.70 m de alto, 1.5 m de largo y 0.24 m de ancho. Fueron instalados en una vivienda rural de tres personas, y fueron empleados como sistema de tratamiento de aguas residuales domiciliarias, el agua antes de ingresar a los mesocosmos tuvo un pretratamiento en un sedimentador con filtro, en un tanque de 1500L.

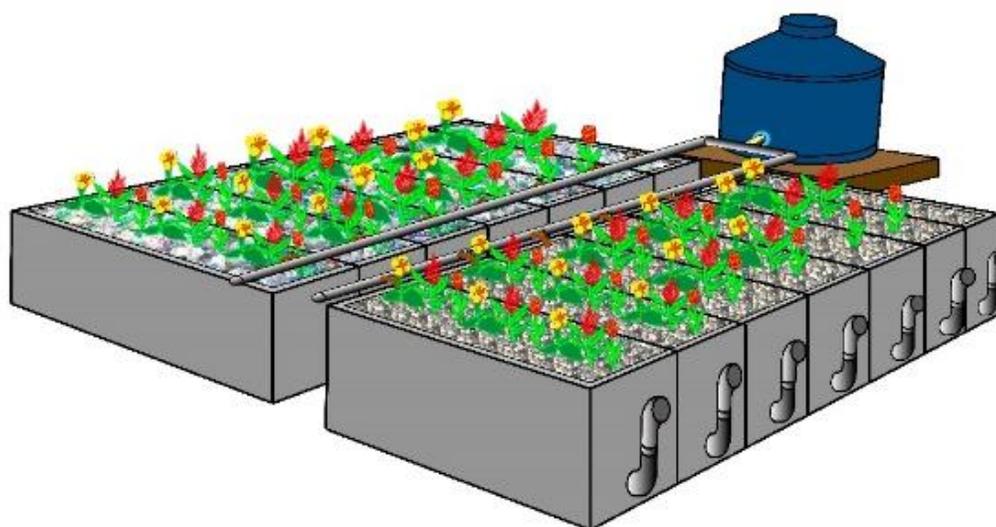


Figura 5.1. Configuración de Mesocosmos de CWs.

El experimento se implementó en un espacio abierto bajo sombra (poli sombra 50%). Se empleó como sustrato piedra porosa de río (PPR), siete unidades se rellenaron con este medio, proveniente del río Actopan con un diámetro de 2.5 a 3.5 cm, y de superficie poco homogénea con porosidad promedio de 0.4 y siete se llenaron con residuos de tereftalato de polietileno (PET), se tomaron secciones rugosas y con dobleces de botellas recicladas que se habían usado para envasar agua y gaseosas, con diámetros entre 2.5 a 3.5 cm, con la finalidad de proporcionar una superficie favorable para el desarrollo de comunidades bacterianas, con una porosidad de 0.5% (Sandoval et al., 2019a). Todas las unidades experimentales (14 unidades; Figura 1) se llenaron desde el fondo hasta una altura de 10 cm con piedra porosa de río de 8 a 15 cm de diámetro; a continuación siete unidades se rellenaron con PPR y siete

con PET, 50 cm del el sustrato empleado en estas después de los 10 cm de PPR gruesa, en el caso de los mesocosmos rellenos con PET, se agregó una capa de 10 cm de PPR, para evitar que flotara, por encima de la salida de agua, esta última fracción no interfiere en el sistema de tratamiento (Saraiva et al., 2018), 12 celdas fueron sembradas con policultivos de plantas ornamentales, *Alpinia purpurata*, *Canna hybrids* y *Hedychium coronarium* (10 a 20 cm de altura), en duplicados de cada arreglo como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 5.1. Sembrado y densidad de planta por celdas

Sustrato	Tipo de plantas y Densidad de plantas	Número de celdas
PPR	<i>Alpinia purpurata</i> (1 individuo), <i>Canna hybrids</i> (1 individuo) y <i>Hedychium coronarium</i> (1 individuo).	2
PET	<i>Alpinia purpurata</i> (1 individuo), <i>Canna hybrids</i> (1 individuo) y <i>Hedychium coronarium</i> (1 individuo).	2
PPR	<i>Alpinia purpurata</i> (2 individuos), <i>Canna hybrids</i> (2 individuos) y <i>Hedychium coronarium</i> (2 individuos).	2
PET	<i>Alpinia purpurata</i> (2 individuos), <i>Canna hybrids</i> (2 individuos) y <i>Hedychium coronarium</i> (2 individuos).	2
PPR	<i>Alpinia purpurata</i> (3 individuos), <i>Canna hybrids</i> (3 individuos) y <i>Hedychium coronarium</i> (3 individuos).	2

PET	<i>Alpinia purpurata</i> (3 individuos), <i>Canna hybrids</i> (3 individuos) y <i>Hedychium coronarium</i> (3 individuos).	2
-----	--	---

2 unidades experimentales rellenas una de PPR y otras 2 de PET, fungieron como controles sin vegetación, todos los mesocosmos operaron con un tiempo de retención hidráulica de 4 días. Para la selección de la vegetación utilizada se tuvo en cuenta que las plantas fueran de fácil adaptación, y en su mayoría resistentes a agentes del intemperismo (viento, lluvias); adicionalmente que fueran de interés comercial y pudieran aprovecharse estos sistemas como medios de cultivo (Sandoval et al., 2019a). Las plantas ornamentales se recolectaron de áreas cercanas a los sitios de estudio para favorecer su adaptación a las nuevas condiciones de inundación a las que se encontraron expuestas.

5.2.3. Diseño experimental

Los CWs se evaluaron con un diseño experimental de dos factores, el factor uno fue el número de especie de planta y el factor dos fue el tipo de sustrato.

5.2.4. Muestreo y análisis

Desde el día en que el tanque se alimentó con agua residual al 100% y durante el período del junio de 2016 a mayo 2017, cada 15 días se tomó una muestra del afluente y el efluente de cada CWs. Se analizaron las concentraciones de DBO₅, DQO, P-PO₄, N-NH₄, N-NO₃ y N-NO₂, en duplicados por métodos estándar (Vymazal, 2007). Los sólidos disueltos totales (TDS), la conductividad eléctrica (EC), el pH, oxígeno disuelto (OD) y la temperatura del agua se midieron con un medidor multiparamétrico Hanna H198194, en el afluente y el efluente de los mesocosmos. Además de estos datos, cada 15 días la temperatura ambiental y la intensidad de la luz se midieron con un hidrómetro gcm-131 (Veanic) y un luxómetro HIELEC-MS8233-2000 (STEREN), respectivamente, cada 30 minutos entre las 9:00, 14:00 y 17:00 h. El promedio de cada medición fue estimado y registrado. La altura de la planta fue medida con una cinta métrica, y el número de las flores se registró cada 30 días.

5.2.5. Análisis estadístico

Las variables de respuesta fueron la DBO₅, DQO, PPO₄, PT, N-NO₃, N-NO₂, y NT, así como la altura de la planta y el número de flores. Las diferencias estadísticas entre tratamientos se estimaron mediante un ANOVA de dos vías con especies y sustratos como factores, seguidas por pruebas de diferencias menos significativas (LSD), con un nivel de significación del 5%. Todos los análisis estadísticos se realizaron con la versión 16.1.0 de Minitab.

5.3 Resultados y discusiones

5.3.1 Parámetros de Control

5.3.1.1. Parámetros de Control

La Tabla 1, muestra los resultados de los parámetros de control monitoreados durante el periodo de estudio. La temperatura del agua después de pasar por los sistemas se redujo en promedio 2 ° C, a pesar de esto se encontró en rangos idóneos para favorecer los procesos de remoción de contaminantes en CWs (entre 16.5 y 32 °C), mostrando rangos adecuados, ya que, el incremento de actividad bacteriana se propicia en temperatura > 20° C (Morvannou et al., 2013), y los resultados encontrados en este estudio se encuentran en estos rangos (Tabla II). En cuanto al pH adecuado en CWs, para propiciar la mayor parte de las reacciones biológicas se da en rangos 6 a 8 (Metcalf & Eddy, 1991). El influente se encontró en promedio de 6.8, luego de pasar los tratamientos se mostró un incremento significativo ($p < 0.05$), con relación a los efluentes (Tabla II), en los sistemas con presencia de vegetación el promedio de pH en promedio fue de 7.7, mientras que en los sistemas sin vegetación de 7.8, estos rangos encontrados son adecuados para propicias reacciones bilógicas en CWs, por otra parte, la disminución del pH se pudo deber a la baja presencia de oxígeno en los sistemas (tabla II), que pudieron favorecer el incremento del pH (Pech et al., 2014). En relación a la conductividad eléctrica (EC), esta se redujo significativamente ($p > 0.05$) tanto en sistemas con vegetación como sin vegetación (Tabla II) en relación al influente, aunque se esperaría un aumento en EC en lo efluentes CWs, después del tratamiento, se reporta en la literatura que en tiempo de retención hidráulica menor a 3 días, no es frecuente este comportamiento (Díaz et al., 2012), estos resultados pudieron deberse a la captación de micro y

macroelementos de iones por las plantas y eliminados a través de la absorción radical y partículas suspendidas sedimentadas (Zurita & White, 2014).

Tabla 5.2. WATER QUALITY PARAMETERS IN INFLUENT AND ENFLUENT AND MEAN REMOVAL PERCENTAGES IN MICROCOSMS

Parámetros	WETLAMD PLAMTS IN DIFFERENT SUBSTRATES							Control <i>PET</i>	Control <i>PPR</i>
	3 PLANTAS <i>PET</i>	6 PLANTAS <i>PET</i>	9 PLANTAS <i>PET</i>	3 PLANTAS <i>PPR</i>	6 PLANTAS <i>PPR</i>	9 PLANTAS <i>PPR</i>			
Temperatura									
influyente									
concentración									
(°C)	26.45±0.29	26.45±0.29	26.45±0.29	26.45±0.29	26.45±0.29	26.45±0.29	26.45±0.29	26.45±0.29	
efluente									
encontrado									
(°C)	24.62±0.22	25.13±0.20	24.83±0.21	24.92±0.21	25.105±0.22	25.01±0.23	24.88±0.27	24.70±0.24	
pH									
influyente									
concentración	6.80±0.47	6.80±0.47	6.80±0.47	6.80±0.47	6.80±0.47	6.80±0.47	6.80±0.47	6.80±0.47	
efluente									
encontrado	7.72±0.43	7.70±0.37	7.65±0.41	7.69±0.35	7.60±0.42	7.63±0.36	7.89±0.32	7.76±0.38	
EC									
influyente									
concentración									
(µS/cm)	1601.33±291.15	1601.33±291.15	1601.33±291.15	1601.33±291.15	1601.33±291.15	1601.33±291.15	1601.33±291.15	1601.33±291.15	
efluente									
encontrado									
(µS/cm)	1116.63±41.39	1128.71±38.66	1028.23±47.33	1079.62±45.18	1014.46±40.32	1190.70±178.96	1041.62±58.85	1064.25±56.67	
OD en la salida del sistema									
influyente									
concentración									
(mg/L)	1.7±0.42	1.7±0.42	1.7±0.42	1.7±0.42	1.7±0.42	1.7±0.42	1.7±0.42	1.7±0.42	
efluente									
encontrado									
(mg/L)	3.6±0.51	3.9±0.26	6.7±0.13	3.4±0.60	4.1±0.34	5.8±0.72	2.4±0.54	2.1±0.21	
SDT									
influyente									
concentración									
(mg/L)	670.96±14.79	670.96±14.79	670.96±14.79	670.96±14.79	670.96±14.79	670.96±14.79	670.96±14.79	670.96±14.79	
efluente									
encontrado									
(mg/L)	529.08±15.13	507.77±16.39	505.11±19.59	480.61±18.66	496.01±20.23	458.71±18.13	585.01±13.89	595.63±11.75	

Values are given as the average +- standard error (n= 48); different letters indicate significant differences between the columns at the 50% significance level. GVR, red volcanic gravel; PET, polyethylene terephthalate

El oxígeno disuelto (OD), se muestra en la tabla II, este incrementó considerablemente en los sistemas con vegetación ($P > 0.05$), mientras que en los sistemas sin vegetación el incremento no fue significativo ($p > 0.05$) en relación al influente, la presencia de OD en los sistemas indica el tipo de condiciones que se encuentran en los sistemas: aeróbicas, anaeróbicas/anóxicas, para los procesos biológicos (He et al., 2016), por ende la presencia de oxígeno en sistemas con vegetación mayor que en sistemas no plantados se pudo deber a la liberación de este en la zona radical (Sandoval-Herazo et al., 2018). En relación a los sólidos disueltos totales (TDS), estos miden principalmente las sales y residuos orgánicos, en cuanto a su disminución en sistemas de tratamiento es un indicador de la efectividad de estos (Lazcano, 2016), en este estudio se encontró una disminución significativa ($P > 0.05$), con relación al valor del influente (Tabla II), estos valores encontrados en este estudio después del tratamiento en CWs, se encuentran en los límites permisibles por la USEPA, (2000), que indica que 500 mgL^{-1} , es un rango adecuado para descargas a cuerpos superficiales y son congruentes con los reportados por otros estudios en condiciones similares empleando CWs, donde se han encontrado valores reducidos después del tratamiento en estos sistemas (Sandoval et al., 2019a).

5.3.2. Crecimiento de plantas y producción de flores

5.3.2.1. *Alpina purpurata*

Alpina purpurata es una hierba ornamental catalogada como un escape de cultivo en el compendio global de malezas (Randall, 2012), se ha cultivado en zonas tropicales como planta ornamental, capaz de sobrevivir en suelos total o parcialmente inundados (Govaerts, 2013), razones por las cuales se empleó como planta emergente en CWs subsuperficiales de flujo horizontal. Los datos de desarrollo vegetal de la *A. purpurata*, se muestran en la Figura 2, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) en el desarrollo de la especie en los dos medios de cultivo (PET y PPR), las condiciones tropicales donde se desarrolló el estudio favorecieron su adaptación en CWs, indicando que las condiciones ambientales fueron adecuadas para el desarrollo de estas especies (Kress et al., 2005). Durante el estudio se encontró que esta planta sembrada en densidades un individuo en policultivos de tres plantas

(*Alpinia purpurata* (1 individuo)), *Canna hybrids* (1 individuo) y *Hedychium coronarium* (1 individuo), por celda, logró generar en promedio 10 hijuelos en ambos sustratos, durante los 12 meses de estudio, mientras que en sistema con policultivos de 6 plántulas, dos de *A. purpurata*, por cada CWs, solo logró generar seis hijuelos en promedio por medio de soporte (PET y PPR), en policultivos de nueve individuos de los cuales tres fueron de *A. purpurata*, el número de hijuelos que se desarrollaron fueron 4 por plántula, lo anterior pudo deberse a la presencia de mayor número de plantas en la misma área (0.36 m²), dado que en los sistemas se pudo generar mayor competencia por los nutrientes presentes en aguas residuales y dificultando el crecimiento de hijuelos de esta especie. Cabe resaltar que esta especie no es de común uso en CWs, en este sentido estos datos son uno de los primeros reportes de su desarrollo en este tipo de sistema, encontrándose que la distancia de sembrado y el volumen de plántulas influyen notablemente en el desarrollo de la misma, en cuanto a la distancia adecuada para mejorar su desarrollo en este estudio fue 50 cm y en un individuo de cada especie para caso de policultivos (Figura 1). En relación a la producción de flores, no se produjeron flores durante el periodo de estudio, esto se pudo deber a que el periodo de floración de esta planta se alcanza 1.5 a 2 m de altura en un periodo aproximadamente de 8 meses, cuando la planta se encuentran en el suelo (Ovando-Medina et al., 2007), en este estudio se sembraron hijuelos muy pequeños (10 a 25 cm) que no mostraron el mismo comportamiento de crecimiento que en su estado natural dado las nuevas condiciones a las cuales se encontraron expuestos para su desarrollo. Estudios en mayor periodo de evaluación son necesarios para poder conocer el índice de floración de esta especie en CWs, y fomentar su uso ornamental en futuros diseños.

5.3.2.2. Ginger shampoo

La floricultura tropical es aún insipiente en México, pero muestra un gran potencial en diversa áreas tropicales húmedas del país, para el cultivo de Ginger shampoo esta es una planta herbácea que se desarrolló en temperaturas superiores 10 °C (Baltazar-Bernal & Zavala-Ruíz, 2012), como las condiciones de temperatura ambiente que se presentaron en la zona de estudio (20 – 26 °C), así como la intensidad de luz (Figura 2) mostró rangos que pudieron favorecer el desarrollo adecuado de Ginger shampoo. Estas pueden alcanzar hasta

3 metros de altura en su estado natural, en este estudio empleando dos medios como sustratos PET y PPR, en diferentes distancias de sembrados a las cuales se encontró esta planta (Tabla I), difieren en gran medida de las recomendadas para su cultivo (1 a 1.5 m de distancia entre ellas), lo que pudo indicar por que la plantas no lograron las alturas que debían presentar (2 a 2.5m de altura) en 12 meses de estudio. En la figura 2, se muestra sin importar el sustrato, que en promedio las plantas crecieron hasta 1.5 m de altura sin diferencias significativas entre sustratos, ni distancia de sembrado ($P>0.05$), pero no lograron producir flores, aunque su periodo de floración son 7 a 8 meses después del sembrado (Loges et al., 2005), esto pudo ser por las condiciones de saturación constante a las que se encontraron expuestas las vegetación, calidad del agua o el reducido espacio donde se desarrollaron. Se requieren nuevos estudios donde se use esta planta como vegetación emergente, pero en sistemas a gran escala que permitan un mejor desarrollo de la misma, distancias de sembrado más acordes a las recomendadas para su cultivo y en mayor tiempo para evaluar su capacidad de producción de flores en CWs y se pueda analizar la posibilidad de emplear estos sistemas como medios de cultivo de la misma.

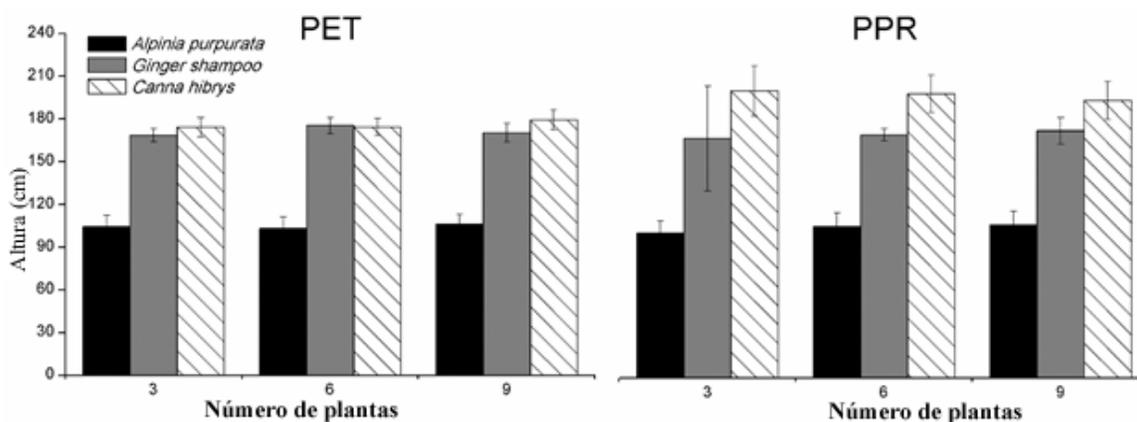


Figura 5.2. Crecimiento de plantas en CWs den dos sustratos (PET y PPR)

5.3.2.3. *Canna hydrids*

La *Canna hydrids* es una planta tropical de fácil cultivo y muy difícil de que muera en diferentes condiciones hasta de altos concentraciones de contaminación en suelos o aguas con que son irrigadas, se reproducen rápidamente y su floración es durante todo

el año, es considerada una planta invasiva en zonas donde su cultivo no es controlado (Prince, 2010). Las características ambientales jugaron un papel importante en el desarrollo de esta especie de planta, las condiciones de intensidad de luz (Figura 3) encontradas en este estudio, muestran rangos inferiores a los reportados como óptimos para cultivo de plantas ornamentales en zonas tropicales comprendida entre 40,000 a 60,000 Lux (Guzmán & Palenius, 2017), sin embargo, no dificultaron el desarrollo de *Canna hybrids*.

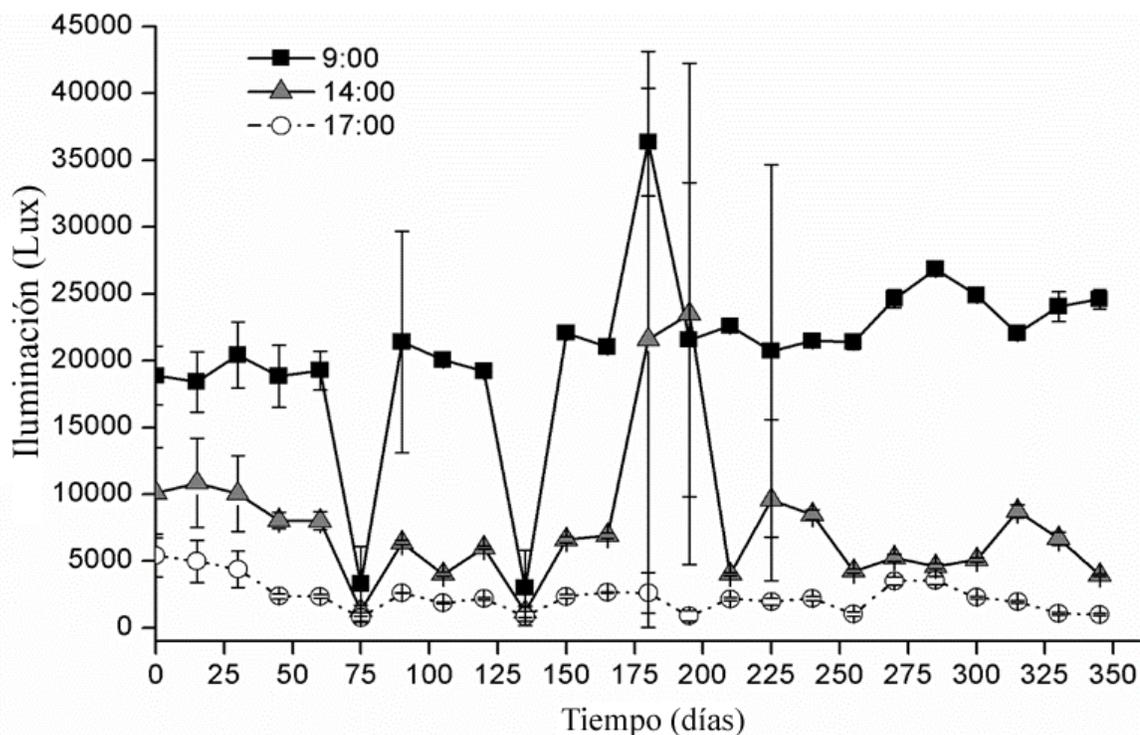


Figura 5.3. Intesidad de luz durante el estudio en tres horarios

Se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre la vegetación plantada en sustrato PET y PPR (Figura 2), las plantas presentaron en promedio 30 cm de altura más en sustrato PPR, que en sustrato de PET, aunque el crecimiento se encuentra entre los promedios reportados en la literatura de crecimiento de la plantas (1 a 3 metros) (Sandoval et al., 2019a), todas crecieron saludables y lograron producir en promedio por planta en sustrato PET 95 flores y en PPR 98 sin encontrar diferencias significativas entre la producción de flores entre sustratos ($P > 0.05$), aunque el uso de PET como sustrato en CWs no es común, las plantas lograron adaptarse y crecer saludables como en cualquier otro medio más común como el PPR, de acuerdo las condiciones de crecimiento que se muestran en estado natural de estas

plantas generan alrededor de 60 flores por plántula en 12 meses (Gupta et al., 2013). Sin embargo; en este estudio, se incrementó la floración hasta en un 40%, en comparación cuando la esta es cultivada en suelo, lo anterior pudo ser por la disponibilidad de nutrientes presentes en las aguas residuales constante.

5.3.3. Concentración de contaminantes en influente y efluentes en CWs

5.3.3.1. DQO, DBO5 y P-PO4 en el influente y efluentes de CWs

La demanda química de oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar el carbono orgánico completamente a CO₂, H₂O y amonio, la DQO no diferencia entre materia orgánica biológicamente oxidable y la biológicamente inerte (Lazcano, 2016), las concentraciones de influente de DQO en promedio fueron 353.96 ± 9.21 mg/L después del tratamiento con CWs, en ambos sustratos se encontraron que en CWs con vegetación en PET fue de 78.57 ± 2.64 mg/L y 76.23 ± 6.98 mg/L con PPR (Figura 4). Los CWs sin vegetación presentaron promedios de concentraciones de 142.55 ± 1.93 mg/L y 138.54 ± 5.29 mg/L en sustratos de PET y PPR respectivamente (Figura 4), estos resultados se pueden deber a la mayor presencia de oxígeno (Tabla II) en sistemas con vegetación, donde se presentaron las mayores reducciones del DQO en los CWs después del tratamiento (Chen et al., 2018). La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) es la cantidad de O₂, consumido por los microorganismos, para oxidar la materia orgánica carbonácea e inorgánica, mediante organismos vivos (Lazcano, 2016), en este estudio las concentraciones en promedio de DBO₅ en el influente fue de 230.06 ± 5.98 mg/L y en unidades con presencia de vegetación en PET fue de 51.07 ± 1.71 mg/L y en PPR 49.55 ± 4.51 mg/L, mientras que en las unidades sin vegetación con PET fue de 92.66 ± 1.26 mg/L y con PPR fue de 90.05 ± 3.44 mg/L (Figura 4), se muestra que la vegetación jugó un papel importante en la reducción de DBO₅, en este estudio, está demostrado que los CWs, con presencia de vegetación emergente favorecen la disminución de contaminantes, mediante la liberación de oxígeno radical que favorece el desarrollo de microorganismos aerobios y la actividad bioquímica en las zonas cercanas a los rizomas de la raíces (Chávez et al., 2015).

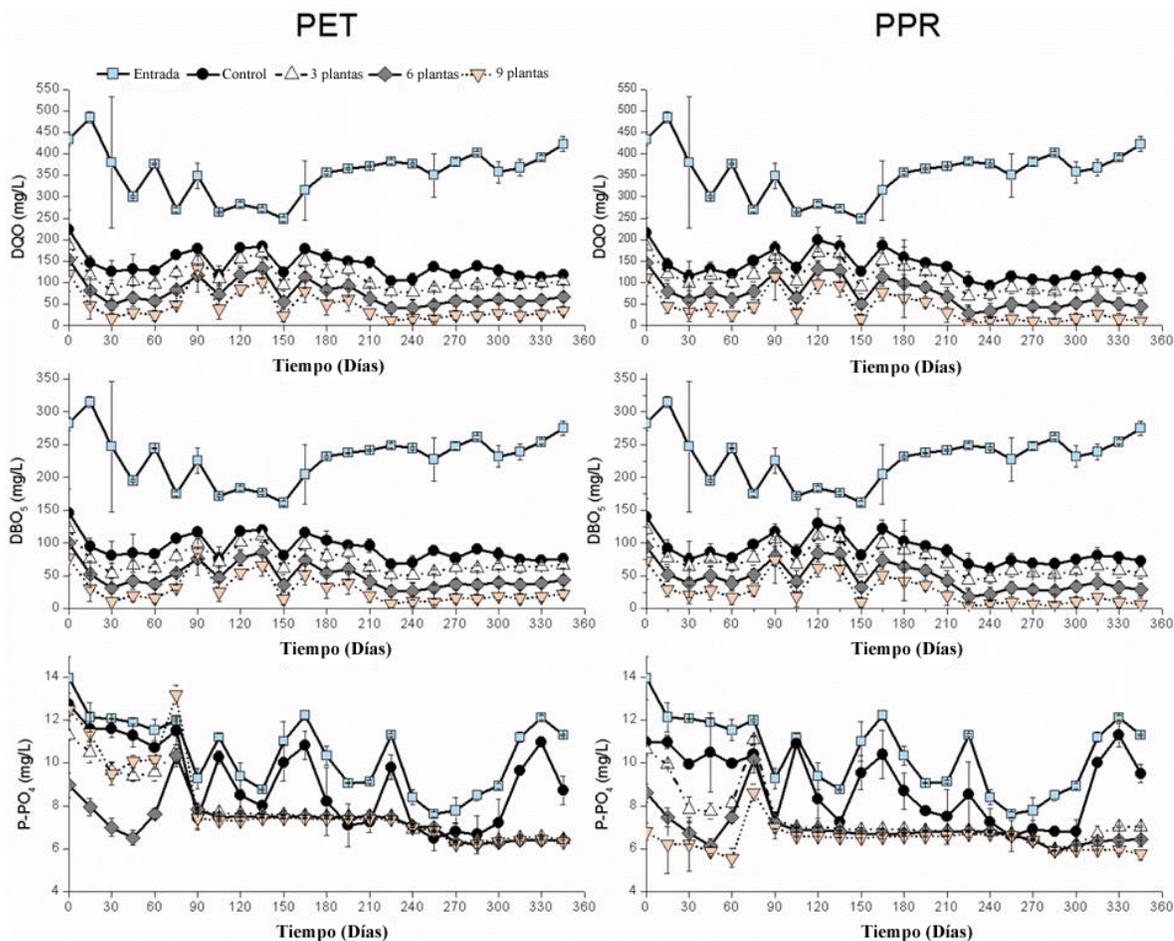


Figura 5.4. Concentración de Contaminantes DQO, DBO₅ y P-PO₄ en efluente e influente en sustratos de PET y PPR.

La relación de DBO₅/DQO permite determinar qué cantidad de materia orgánica e inorgánica contenido en el agua (DQO) e susceptible a ser depurada por los microorganismos en cinco días (BQO₅). De acuerdo con la Figura 4, la relación en este estudio es 0.65 en los efluentes, y se clasifica como poco biodegradable (cuando la relación DBO₅/DQO es menor a 0.3, el vertimiento es no biodegradable, valores entre 0.3 y 0.7 lo hacen poco biodegradable, mientras que valores superiores a 0.7 favorecen las condiciones de recuperación por métodos biológicos) (Bedoya-Pérez et al., 2014). Lo anterior indica que este la mayor parte DQO presente en este influente se puede biodegradar, lo que justifica las reducciones que se presenta después del tratamiento en CWs (Figura 4).

En cuanto, a la concentración de fosfatos (P-PO₄), en el influente fue de 10.46±0.25 mg/L Este valor disminuyó en los CWs con vegetación 7.74±0.11mg/L y 6.69±0.15 mg/L en PET y PPR respectivamente (Figura 4). Mientras que en los sistemas sin vegetación fueron

9.18±0.12 mg/L en PET y 8.92±0.25 mg/L, lo anterior puede deberse a la absorción de nutrientes por la planta para su crecimiento (Casierra-Martínez et al., 2017; Sandoval-Herazo et al., 2018) como se muestra en la Figura 2. Este comportamiento es explicable dado los principales mecanismos de eliminación del fósforo en humedales (por adsorción por sustratos y asimilación por las plantas) (Lan et al., 2018).

5.3.3.2. N-NH₄, N-NO₃ y N-NO₂ en el influente y efluentes de CWs

El amonio se reduce precisamente en CWs, mediante acción de microorganismos aerobios y anaerobios, teniendo en cuenta que en condiciones anaerobias las reducciones son más lentas (Bojorges et al., 2017), lo que puede explicar el comportamiento de este en este estudio, las concentraciones de amonio (figura 5) en el influente oscilaron 18.88±0.51 mg/L, estas se redujeron significativamente ($P > 0.05$) tanto en sistema con vegetación como sin vegetación, en promedio 2.81±0.24 en sistemas con presencia de vegetación para ambos sustratos, mientras que en las unidades sin vegetación se encontró 7.42±mg/L. Los N-NO₃ se reducen mayormente bajo condiciones aerobias por las Nitrosomonas y Nitrobacteres el mecanismo principal que lo reduce y por asimilación de las plantas para su desarrollo por las raíces (Correa-Torres et al., 2015). Las concentraciones N-NO₃ (Figura 5), el influente se encontró 4.22±0.18 mg/L, y después del tratamiento se disminuyeron significativamente ($P > 0.05$) en sistemas con vegetación 3.65±0.83 mg/L y 2.81±0.18 mg/L en PET y PPR respectivamente, pero no en los sistemas sin vegetación 2.97±0.10 mg/L en PET y 2.91±0.18 en sustrato de PPR.

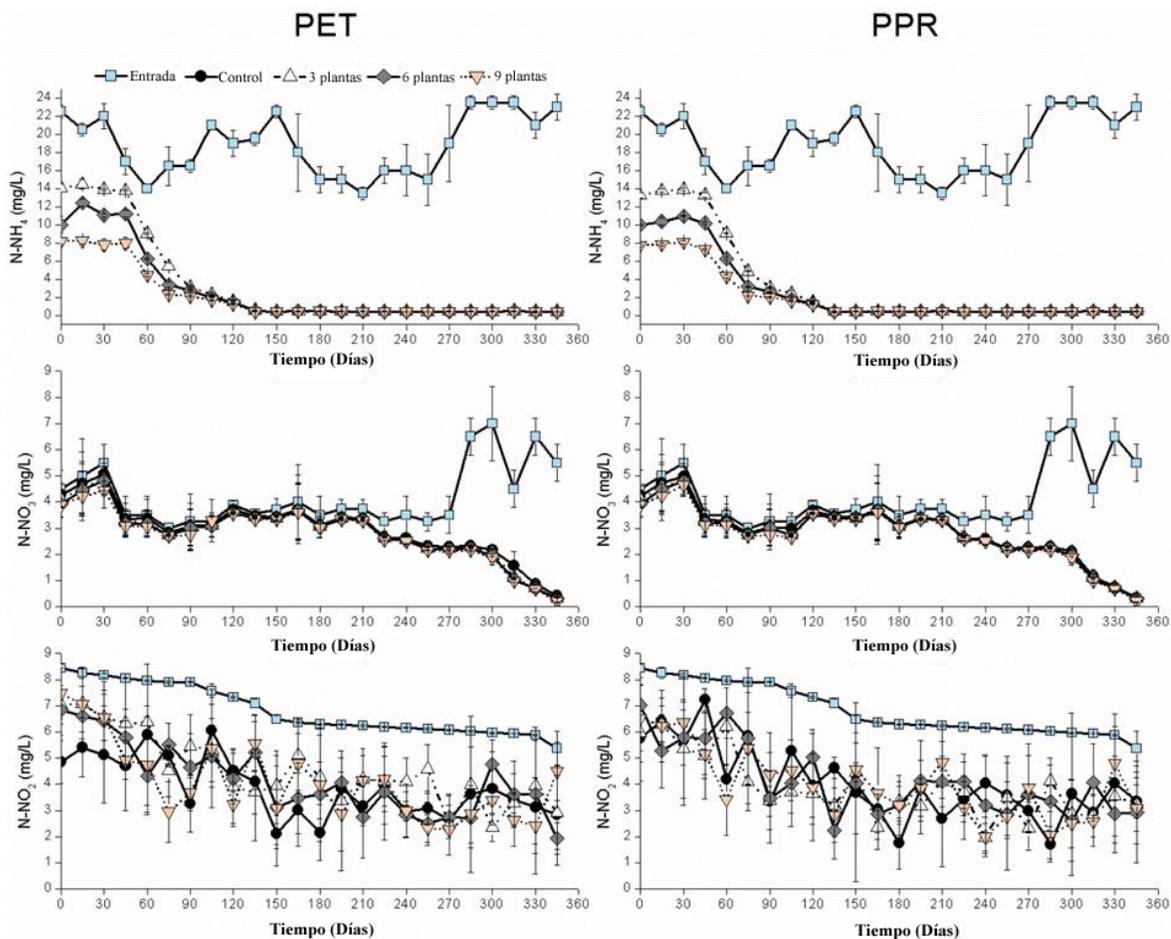


Figura 5.5. Concentración de Contaminantes N-NH₄, N-NO₃ y N-NO₂ en influente y efluentes en sustratos de PET y PPR.

Otra vía de reducción de N-NO₃ es la desnitrificación que se favorece en condiciones anóxicas/anaerobias parciales. A través de ella, el N-NO₃ se transforma a óxido nítrico (NO), a óxido nitroso (N₂O) y finalmente nitrógeno gas (N₂) (Bojorges et al., 2017). La concentración de N-NO₂, en el influente se encontró una concentración de 6.84 ± 0.14 mg/L, mientras que en los influentes con vegetación fue de 4.38 ± 0.13 mg/L en PET y 3.99 ± 0.24 mg/L en PPR, en CWs sin vegetación se encontró 3.87 ± 0.10 mg/L y 4.04 ± 0.25 mg/L en PET y PPR respectivamente (Figura 5).

5.3.4. Remoción de contaminantes en mescosmos CWs

5.3.4.1. Demanda Bioquímica del Oxígeno/Demanda química de Oxígeno

La DBO₅ y la DQO, estos parámetros indican la capacidad reducir el oxígeno presente en cuerpos receptores de agua y son los principales parámetros para medir el contenido de materia orgánica en aguas residuales (Abdalla & Hammam, 2014; Valente et al., 2018). El incremento de DBO₅, incrementa las condiciones anóxicas en el agua y pone en riesgo las comunidades biológicas en los cuerpos de aguas, por otra parte, la DQO indica la presencia de sustancias de origen no municipales a los cuerpos receptores de agua (Peters et al., 2009). En este sentido resulta importante que se eliminen antes de descargar las aguas residuales a cuerpos receptores de aguas. En este estudio la remoción de DBO₅ se encontraron en sistemas con vegetación superiores al 85% en todos los mesocosmos evaluados (Figura 6), a excepción de los mesocosmos con menor densidad de plantas (sembrado inicial de 3 Plantas) y sin vegetación la remoción fue ligeramente inferior entre 65% y 75%, pero sin diferencias significativas (P=0.176) entre sustratos (PET y PPR) con o sin vegetación. Los resultados obtenidos en este estudio son similares a los reportados por Haghshenas-Adarmanabadi et al. (2016), quienes emplearon sistemas plantados con *Phragmites australis*, *Typha latifolia* y *Arundo donax*, las especies más comunes mentes usadas en CWs y sistemas no plantados que encontraron remociones en promedio 85% en un periodo igual de estudio (12 meses).

Con relación a las remociones de DQO, tampoco se encontraron diferencias significativas (P=0.184) entre sistemas con vegetación sin importar la densidad de plantas y sin vegetación, con eficiencias de remoción oscilaron entre 74 % y 93% (Figura 6). En general las emociones encontradas fueron congruentes con lo reportados por Zurita et al. (2009), de 81% y Leiva et al (2018) encontrando remociones promedio de 78% en sistemas con policultivos de plantas ornamentales en CWs alimentados con aguas residuales domésticas.

Se puede inferir que ni la densidad de plantas y el tipo de sustrato tuvieron un efecto sobre la remoción de la DBO₅ y DQO en los CWs, diferentes autores indica que no se han encontrado diferencias significativas entre sistemas con plantas y sin plantas, al parecer las plantas cumplen un efecto significativo cuando se tienen altas concentraciones de estos contaminantes en CWs (Belmont et al., 2004; Karathanasis et al., 2003, Zurita et al., 2009; Sandoval et al. 2019; Sandoval-Herazo et al., 2018). Lo anterior indica que para tener un panorama más claro de la función de la vegetación en CWs, se siguieren nuevos estudios con

mayor presencia de materia orgánica en las aguas residuales, para valorar su aportación significativa al tratamiento de aguas residuales en estos sistemas.

5.3.4.2. Fosfato (P-PO₄)

Se encontraron diferencias ($P < 0.05$) entre tratamientos en diferentes sustratos de PET y PPR con vegetación y entre densidad de plantas (Figura 6). En el sustrato de PET, la remoción en sistemas sin presencias de vegetación en promedio fue de 10% < en sistemas de sembrado inicial de tres individuos 18% < a seis individuos 35%, que fue donde se presentó mayor eliminación de contaminantes ($p = 0.043$), en cuanto a los tratamiento con nueve plantas, la remoción de P-PO₄, se encuentro entre el 5 y 15%. Vymazal (2007) indica que el fósforo en sus diferentes formas puede ser empleado por las plantas para su desarrollo con mejores resultados en climas tropicales donde las plantas se cosechan continuamente para que no se interrumpa este cuando la plantas alcancen su madurez, lo que puede explicar los resultados obtenidos en este estudio, donde las planta lograron desarrollarse considerablemente (Figura 2), y el fosfato pudo ser usado para su desarrollo y floración de las mismas (Sandoval-Herazo et al., 2018), indicando que la interacción iónica con los sustratos (Zamora-Castro et al., 2019) no fue tan relevante en este estudio, tal vez por los sustratos empleados (PET y PPR), poco convencionales usados como sustratos en CWs y no se conocen mecanismos precisos de sus funcionamiento, pero la eliminación en estos puede deberse a la adopción en las películas microbianas que se desarrollaron en este. En cuanto a las remociones en sustrato PPR, se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$), entre todos los tratamientos en los controles sin vegetación 20% < en tratamientos con tres especies de plantas 26% < en tratamiento con seis individuos de plantas < 37% en tratamiento de nueve individuos de plantas 45%, en general se pude observar que la mayor densidad de plantas en sustrato de PPR indicaa un efecto positivo en mayor condiciones de plantas contrario a lo observado en los sistemas PET, el aporte de la vegetación en sustrato PPR, fue 16% en este estudio. Lo que atiende los mecanismos de eliminación de fosfatos en CWs (Rugaika et al., 2019). En comparación de los tratamientos en PET y PPR, el comportamiento de remoción de fosfatos en sustrato de PET fue como se esperaba dado que al parecer no tuvo un efecto en la

eliminación del este compuesto, mientras que en los tratamientos PPR, se mostró un efecto positivo, pero no mayor la reportado en la literatura.

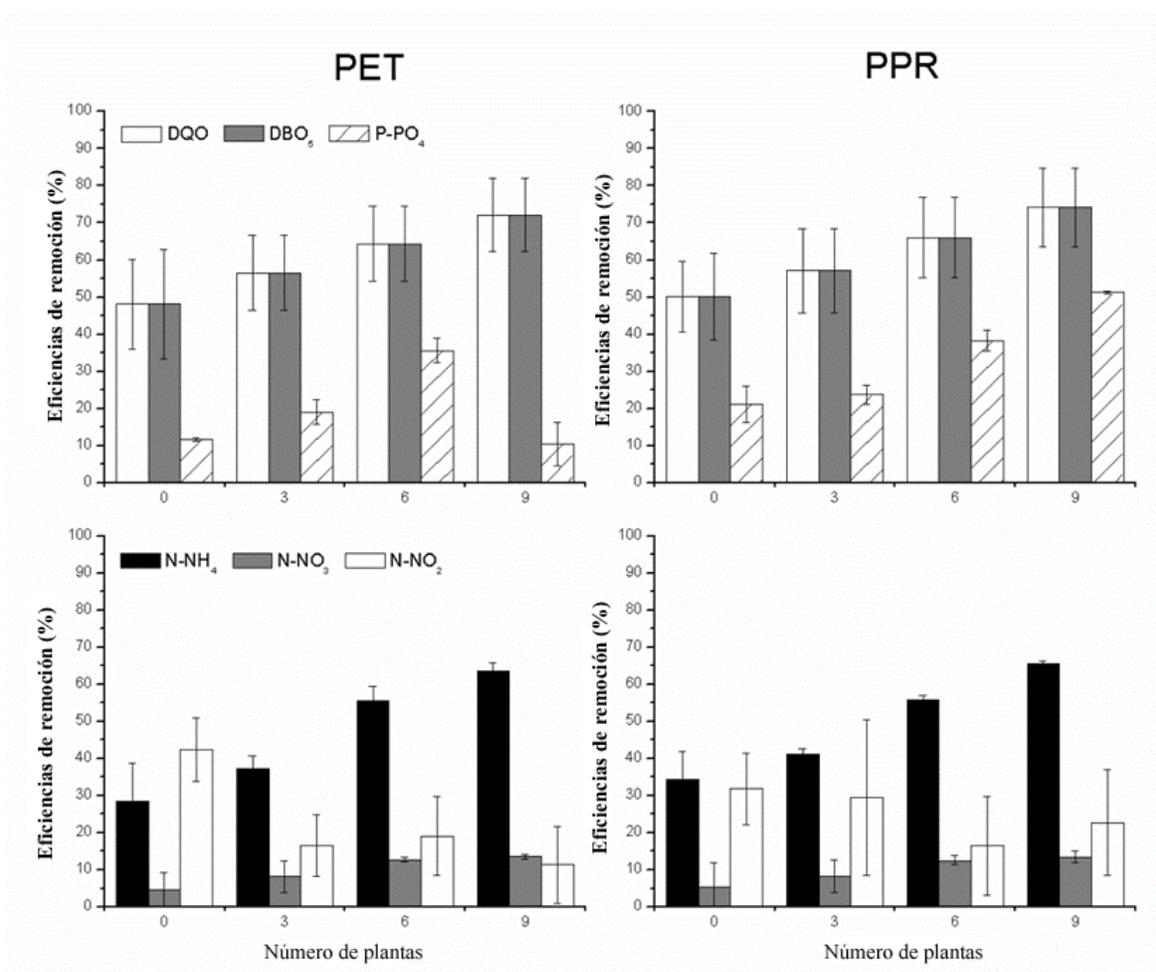


Figura 5.6. Remoción de contaminantes en CWs

5.3.4.3. Amonio (N-NH₄)

La capacidad de los humedales de flujo horizontal de oxidar el nitrógeno amoniacal es baja (Nitrificación), dada las condiciones de poca presencia de oxígeno disuelto (Tabla II) por las condiciones de saturación constante (Han et al., 2019). A pesar de esto las eliminaciones en este estudio (Figura 6) fueron considerablemente significativas ($p > 0.05$), en sistema con 3 plantas en promedio la remoción fue de 37% y 39%; sistemas con 6 plantas 52% y 55%; en sistemas con 9 plantas 61% y 64% y en controles sin vegetación 29% y 34% en sustrato de PET y PPR respectivamente. Sin diferencias significativas ($p > 0.05$) entre sustratos, pero si

($p < 0.05$) entre densidad de plantas, así como entre los controles. Estos resultados son más altos que los reportados por Shiwei et al. (2019), quienes emplearon como sustratos, anillos de plástico; una combinación zeolita y cenizas volantes con más elemento calcio; Cenizas volantes empleando micrófitas como vegetación emergente encontrando eliminaciones entre 40% y 58% de $N-NH_4$.

5.3.4.4. Nitratos (N-NO₃)

En los sistemas con sustrato de PET (Figura 6) con mayor densidad de plantas 9 por celda la eliminación fue mayor, en promedio 15% > en sistemas con 6 por celda en promedio 12% > en sistemas con 3 plantas por celda en promedio 8.5% > en controles sin vegetación en promedio 5% encontrándose diferencias significativas entre densidades de plantas y controles ($p < 0.05$). Mientras que en sistemas con sustrato de PPR (Figura 6) con mayor densidad de plantas 9 por celda la eliminación fue mayor en promedio 14% > en sistemas con 6 por celda en promedio 10% > en sistemas con 3 plantas por celda en promedio 9% > en controles sin vegetación en promedio 6%, encontrándose diferencias significativas entre densidades de plantas y controles ($p < 0.05$). Los resultados encontrados en este estudio difieren de los esperados en CWs flujo horizontal para la eliminación de $N-NO_3$, dado que las condiciones anaerobias, una fuente de carbono y bacterias desnitrificantes favorecen la eliminación este compuesto (Kujala et al., 2019). Lo anterior pudo tener lugar porque dado que las concentraciones de amonio (Figura 4) fueron relativamente más altas, se produjeron nitratos y esto pudo afectar los mecanismos de eliminación de este CWs.

5.3.4.5. Nitritos (N-NO₂)

La eliminación $N-NO_2$, se vio favorecida en CWs (Figura 6), encontrando diferencias significativas ($P < 0.05$) entre sustratos y densidad de plantas en celdas con controles sin vegetación 41% y 30%; en celdas 3 plantas 16% y 29%; en celdas con 6 plantas 20% y 15% y en celdas con 9 plantas 11% y 21% en sustratos de PET y PPR respectivamente. Esto resultados pueden deberse a la alta eliminación de amonio que pudo contribuir a la producción de nitritos como se muestra en la figura 6.

Conclusiones

El uso de *Alpinia purpurata*, *Canna hydrids* y *Hedychium coronarium* en policultivos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en mesocosmos de CWs, favorecieron la eliminación de contaminantes PPO₄, N-NO₂, NT, en este sentido se recomienda su uso en diseños de CWs.

En cuanto a la producción de flores *Canna hydrids*, demostró una floración mayor que sus condiciones de desarrollo normal en su estado natural, sin embargo, las especies *Alpinia purpurata* y *Hedychium coronarium*, no lograron producir flores, se sugieren estudios en mayor periodo de tiempo para entender las condiciones de floración de estas plantas en CWs, al parecer en estos sistemas estas pueden requerir periodos mayores 12 meses.

El PET demuestra ser un medio de soporte adecuado para ser usado en CWs a gran escala, dado que permite desarrollo adecuado de la vegetación y no limitó la eliminación de contaminantes en comparación al PPR que es un sustrato más común usado en CWs.

La densidad de plantas muestra un efecto positivo en la eliminación de contaminantes, sin embargo en celdas donde existían mayor número de plantas a una distancia menor de sembrado el desarrollo de brotes de nuevas plantas se fue limitado, en este sentido se recomienda que la distancia adecuada para este tipo de plantas en policultivos son 40 a 50 cm de dilatación en sistemas a escala real, con la finalidad de aprovechar la cosecha de especies en estos y permitir que especies de mayor follaje como *Alpinia purpurata* y *Hedychium coronarium*, se desarrollen de forma adecuada y puedan producir flores en CWs.

CAPÍTULO VI. ESTUDIO DE HUMEDALES COMUNITARIOS SEMBRADOS CON POLICULTIVOS DE PLANTAS ORNAMENTALES Y SUSTRATO DE PARA EL TRATAMIENTO DEL 100% DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE PASTORÍAS, ACTOPAN, VERACRUZ

6.1 Introducción

Los humedales construidos son una alternativa de tratamiento de aguas residuales para comunidades rurales que no cuentan con recursos económicos para la construcción y operación de infraestructuras grises de tratamiento (Boano et al., 2019; Stec, 2020). En países en vías de desarrollo 1 450 millones de personas viven en ciudades y pueblos de 500 000 habitantes o menos, estas representan el 50% de la población de estos países (FAO, 2020), tan solo en México (uno de los países con mayor densidad poblacional en latino américa) existen 196 mil comunidades rurales menores a 2500 habitantes, de las cuales el 92% se encuentran aisladas de los principales núcleos poblacionales urbanos (CONAPO, 2020). En esta solo se tratan el 20% de las aguas residuales generadas (SEMARNAT, 2018), esto debido a los bajos ingresos económicos, dispersión geográfica de las comunidades a lo largo y ancho del territorio, por lo que se requieren sistemas de tratamiento económicos, de fácil operación y mantenimiento y con requerimientos energéticos mínimos o cero, que permitan tratar las aguas residuales generadas con facilidad y efectividad, dándole un valor agregado para su reúso en actividades cotidianas o agricultura local (Zamora et al. 2019). Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales son los humedales construidos o artificiales (HC), estos sistemas simulan la funcionalidad de mejorar la desintoxicación del agua de contaminantes por procesos físicos, químicos y biológicos que tienen los humedales naturales, y que también son llamados riñones planetarios (Piñeyro et al. 2019). Los CW son células con un sustrato, donde la vegetación se planta para adaptarse a las condiciones de saturación de las aguas residuales en las raíces. Se trata de HC de flujo superficial cuando solo hay una capa de suelo en el fondo de la celda y las aguas residuales están en contacto con la atmósfera, una situación que permite la presencia de plantas emergentes (plantadas en el suelo y proyectadas desde la columna de agua), plantas flotantes en la columna de agua y / o plantas sumergidas (arraigadas al suelo, pero no sobresalen de la columna de agua). Las CW de flujo subsuperficial son células rellenas con un medio granular

de cierta porosidad que permite el desarrollo de películas microbianas por la presencia del sustrato, por lo que solo pueden tener plantas emergentes (Marín-Muñiz, 2018). Las plantas son una de las principales componentes de los HC (Shelef et al. 2013; Wu et al. 2015), los macrófitos tienen varias propiedades en relación con el proceso de tratamiento que los convierte en un componente esencial del diseño. En los HC saturados e insaturados de agua con *Typha spp.*, o *Juncus spp.*, la eliminación de compuestos de nitrógeno fue 20-30% mayor en presencia de vegetación, en comparación con los sistemas no plantados (Zhang et al. 2019). De manera similar, en la eliminación de pesticidas (imazalil y tebuconazol), se evaluaron los mesocosmos no plantados frente a los plantados, y la presencia de plantas mostró un 20-40% más de eficiencia de eliminación que las unidades sin vegetación (Lv et al. 2016). Vymazal (2011), en una revisión sobre la importancia de las plantas en los HC, el autor describió que la vegetación tiene principalmente un efecto positivo; es decir, apoya una mayor eficiencia del tratamiento, para los productos orgánicos y nutrientes. *Phragmites spp.*, *Typha* y *Scirpus spp.*, son las plantas más utilizadas en todo el mundo. Sin embargo, en las regiones tropicales y subtropicales, las plantas ornamentales se estudian de acuerdo con su capacidad de adaptación en condiciones HC.

Por otro lado, el rendimiento del tratamiento de los CW puede verse fuertemente afectado por los medios (sustrato); grava y arena se han utilizado como los medios tradicionales en diseños (Zamora et al. 2019). El papel de los medios de comunicación se estudió comparando diferentes columnas de humedales construidos con flujo vertical y lleno de biochar (biochar de maíz, biochar de madera y grava). Se demostró que el biochar de maíz y madera proporciona eficiencias de eliminación significativamente mayores para la materia orgánica y el fósforo, en comparación con la grava, y los resultados se atribuyen a la mayor capacidad de adsorción y al cultivo microbiano en los medios de biochar porosos (Kizito et al. 2017). Otras investigaciones han analizado la roca porosa del río o el tepezil como medio en HC, mostrando una eliminación importante de contaminantes (Sandoval et al. 2019^a) Considerando el efecto de diferentes sustratos como medios de filtro en HC, se evaluó el efecto de la configuración de sustrato multicapa. Se demostró que el rendimiento de eliminación de contaminantes mejoró en la multicapa (unidades con tres y seis capas), en comparación con las HC monocapa (Ding et al. 2018; Bai et al. 2017).

Entre los procesos físicos, químicos y biológicos, la eliminación de contaminantes se lleva a cabo dentro del sistema manteniendo un tiempo de retención hidráulica en el mismo. Aunque esta tecnología ambiental se ha utilizado ampliamente en Europa y los Estados Unidos (Arden & Ma, 2018), en México, su uso no ha sido extenso, e incluso diferentes sustratos y vegetación de la zona tropical necesitan más estudios para mejorar los efectos de eliminación en estudios a gran escala, ya que las condiciones difieren de aquellos lugares donde los sistemas han sido ampliamente evaluados. En este sentido el objetivo de este trabajo fue Evaluar el proceso de remoción de contaminantes en aguas residuales comunitarias mediante Humedales Ingenieriles a gran escala, con monocultivos y policultivos de plantas ornamentales (*Anthurium sp*, *Canna hybrids*, *Typha dominguensis* *Spathiphyllum blandum*) y sembradas en residuos de PET como sustrato

6.2 Materiales y métodos

El sistema de humedal comunitario (HC) se encuentra ubicado en la localidad de Pastorías, Actopan, Veracruz de Ignacio de la Llave, México. Para realizar el diseño de este sistema fue necesario tener en cuenta parámetros de diseño; como la densidad poblacional actual y futura, adicional mente conocer si en la comunidad se realizaba algún tratamiento previo del agua residual generada, además de cuántas viviendas estaban conectadas al sistema de drenaje existente, el número de habitantes se cada vivienda, conectadas al sistema de drenaje o sin conectar. Lo anterior con la intención de obtener mayor presión en el diseño, para garantizar un óptimo tratamiento de las aguas residuales y seleccionar la vegetación idónea para este HC a gran escala. Teniendo cuenta parámetros anteriores y los resultados de las fases I y II de esta tesis doctoral, el diseño de construcción e implementación se llevó a cabo en abril a Julio 2018 y la puesta en marcha el monitoreo de parámetros de calidad de aguas residuales en la entrada y salida del sistema HC se realizará tres meses después de su puesta en marcha para que el sistema y la vegetación estuviera bien establecidos de octubre 2018 a septiembre del 2019.

6.2.1 Estudios preliminares para el diseño del Humedal Comunitario

Se evaluó el volumen de aguas residuales generado por la comunidad de Pastorías, Actopan, Ver., para el cálculo se consideró la población presente y futura a 20 años por el método de crecimiento aritmético (INEGI, 2014), con la finalidad de establecer la capacidad de diseño

del sistema. Simultáneamente se realizaron estudios previos de selección del lugar de construcción del humedal mediante inspección visual y reconocimiento del sitio (Anexo), se tuvo en cuenta la condición del relieve y los sitios estratégicos que no afectaran a los habitantes de la comunidad de Pastorías, Actopan. Ver., (Sampieri et al., 2010). Con la finalidad de conocer las condiciones del diseño de cimentación y de la construcción del sistema, se tomaron muestras de suelo para determinar sus características (Anexo), esto de acuerdo con las técnicas propuestas en la NMX-AA-164-SCFI-2013. Por otra parte, se tomó una muestra de suelo para realizar el perfil y caracterización del mismo, el muestreo se realizó por el método manual de exploración a cielo abierto (Villalaz, 2004) y se transportó al laboratorio de mecánica de suelos de la facultad de ingeniería de la Universidad Veracruzana en Boca del Rio, Veracruz. Con los datos obtenidos de la mecánica de suelos se procedió a realizar el diseño de la cimentación (Anexo). Para la definición de las dimensiones y características constructivas del sistema de tratamiento se consideraron los datos obtenidos del volumen de la descarga de aguas residuales con la población presente y futura, características de las aguas residuales que se producen en la comunidad (Tabla 4.5) y la mecánica de suelos. El diseño se llevó a cabo de acuerdo con el manual de diseño de HC propuesto por Yocum (2009) y la Norma de construcción de un humedal NOM-022-SEMARNAT-2003. Se empleó el programa asistido por computadora AutoCAD versión 2016, con las características específicas de diseño constructivo para la región de estudio (Anexo XX).

Tabla 6.1 Características del agua residual generada

Parámetro	Concentración
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) (mg/L)	380
Nitrógeno total (NT) (mg/L)	56
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ -N) (mg/L)	40
Fosfatos (P-PO ₄) (mg/L)	18

6.2.2 Características específicas del sistema

El HC de flujo horizontal (Fig. 4.10) comprende 12 celdas con unidades experimentales hechas de cemento y ladrillo, con medidas de 0.70 m. de alto, 4 m. de largo y 0.85 m. de ancho cada una teniendo en cuenta los criterios de diseño de humedales de flujo horizontal propuestos por Bécares (2004).

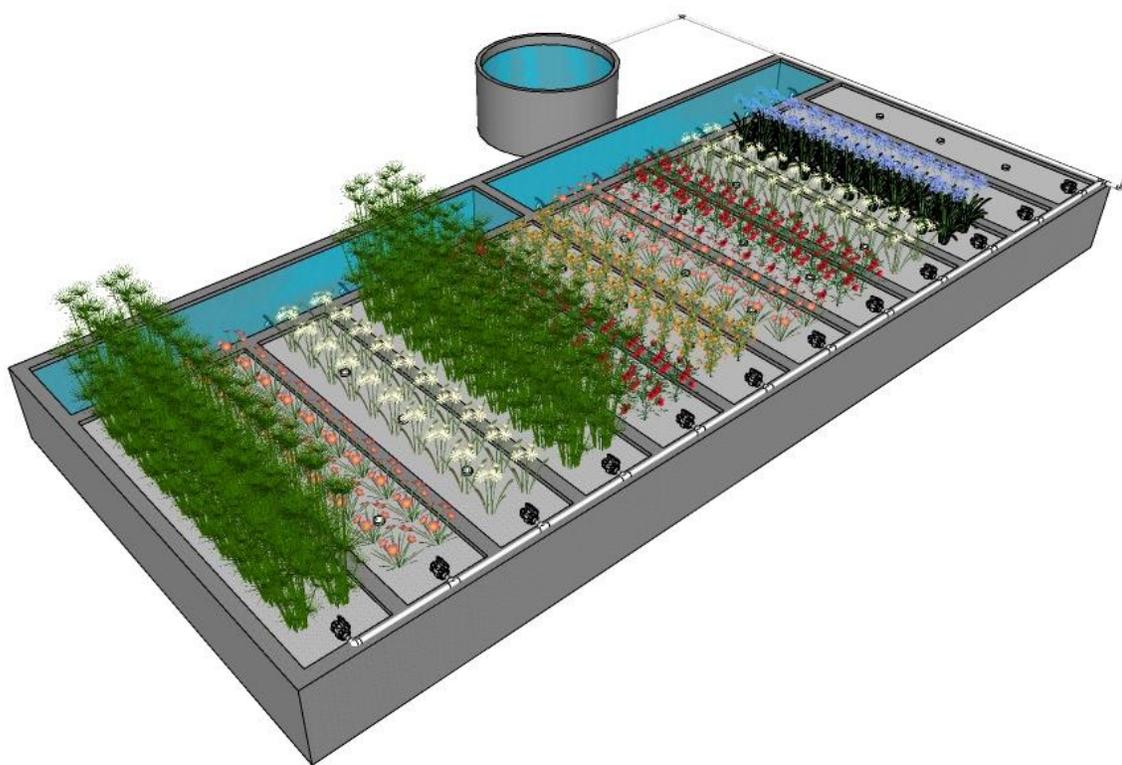


Figura 6.1 Esquema del humedal comunitario de flujo subsuperficial horizontal utilizado en el estudio

Las 12 celdas del HC se llenaron hasta una altura de 20 cm (de abajo hacia arriba) con PPR de tamaño promedio de 13.2 cm de diámetro con el objetivo de evitar obstrucciones en la salida de los humedales. Después de los 20 cm y hasta los 60 cm se rellenaron con zonas rugosas de PET, las cuales tuvieron un diámetro entre 3 a 5 cm, se dejó un espacio disponible del flujo de agua de 0.68 cm. El PET se obtuvo de residuos provenientes del consumo en tiendas de la comunidad y campañas de reciclaje en diferentes escuelas de la región entre los

meses de octubre del 2017 a marzo de 2018 un total de 41.82 toneladas de plástico, además se agregó una capa de 10 cm de PPR colectada en la zona ribereña del río “Topiltepec”, con la finalidad de evitar que el PET flotara y se generaran vectores como mosquitos, no se tuvo ninguna interferencia con el tratamiento ya que se ubicó sobre el nivel de salida del agua del sistema.

Los criterios que se tomaron en cuenta para seleccionar el sustrato empleado fueron los resultados obtenidos en la fase I y II de esta investigación, donde no se encontraron diferencias significativas entre ninguno de los tres sustratos empleados, pero sin en variedades de las plantas ornamentales empleadas en cada una de sus etapas (Microcosmos y mesocosmos), adicionalmente el PET es un producto que no genera costos por su origen al ser producto reciclado del consumo local de la comunidad y permite disminuir la contaminación por desechos sólidos que este causa (Sandoval-Herazo et al. 2018).

Con respecto al sistema de suministro de agua residual, consta de una fosa séptica con capacidad de 15 m³, donde llega el drenaje de la comunidad. El agua proveniente de la fosa se almacena en un tanque construido de cemento y block con dimensiones de 3 m de alto y un radio de 1.5 m, con una capacidad de almacenaje de 21,205.75 L; el tanque a su vez funciona como sedimentador, el cual provee de agua residual doméstica a las celdas del humedal comunitario. Esto se logra mediante una tubería de PVC de 2” de diámetro conectada a dicho tanque y mediante gravedad circula el agua a cada una de las celdas. La entrada de agua es controlada con una llave de paso de 2” conectada al PVC donde se regula el flujo de agua a través de un sistema de control. La salida de agua ya tratada se encuentra en el extremo opuesto a la de entrada del agua residual, pero por la parte inferior de las celdas. El efluente sube mediante una tubería de PVC de 4”, aludiendo al principio de Bernoulli para salir de la celda y después coincidir con el agua tratada de todas las celdas como se muestre en la Figura 4.9.

El suministro de agua en los HC fue calculado con la ecuación de Flujo Hidráulico (FH) (Mitsch & Gosselink, 2015). Se consideró un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 3 días para todos los componentes del humedal comunitario (Marín-Muñiz, 2017).

Volumen para celdas con PPR

V PPR: Volumen relleno con piedras de 12 a 20 cm (anexo xxx)

$$V \text{ PPR} = L \times A \times H = 4 \text{ m} \times 0.85 \text{ m} \times (0.6 - 0.4) \text{ m} = 0.68 \text{ m}^3$$

$$V \text{ PPR} = 680 \text{ L}$$

Donde:

V= Volumen de la celda

l= largo (4 m)

A= ancho (0.85 m)

H2= altura (H-H1) (0.6 m – 0.4 m)

Además, para el cálculo del volumen real se incluyó la porosidad del sustrato, en este caso piedra porosa de río (0.5), es decir ocupó la mitad del volumen total de la zona rellena con PPR, se procede a calcular para cada celda como se muestra a continuación:

$$V1 \text{ real PPR} = (680 \text{ L}) (0.5) = 340 \text{ L}$$

Volumen para celdas con PET

V PET: Volumen relleno con PET de 2.5 a 5 cm (Anexo xxx)

$$V \text{ PET} = l \times A \times H = 4 \text{ m} \times 0.85 \text{ m} \times (0.6 - 0.2) \text{ m} = 1.36 \text{ m}^3$$

$$V \text{ PET} = 1,360 \text{ L}$$

Donde:

V= volumen de la celda

l= largo (4 m)

A= ancho (0.85 m)

H1= altura (H-H2) (0.6 m – 0.2 m)

$$V \text{ real PET} = (1,360 \text{ L}) (0.5)$$

$$= 680 \text{ L}$$

Volumen real del celda de HC

$$V \text{ real total} = V \text{ PPR grande} + V \text{ PET}$$

$$= 340 \text{ L} + 680 \text{ L} = 1,020 \text{ L}$$

Obteniendo un flujo para los HC de PET y calcular el caudal, se despejó la siguiente formula:

$$V \text{ real total} = \text{TRH} \times Q$$

$$Q = V \text{ real} / \text{TRH}$$

Dónde:

V PET = volume real (L)

TRH = tiempo de retención hidráulico (días) (3 días)

Q = Flujo volumétrico (ml/ min o L/d)

$$Q = V \text{ real} / \text{TRH} = (1,020 \text{ L}) / (3 \text{ días}) = 340 \text{ L/ día}$$

$$(340 \text{ L/ día}) (1,000 \text{ ml} / 1,440 \text{ min})$$

$$Q = 236 \text{ ml} / \text{min}$$

De las celdas 12 fueron sembradas con policultivos de planta ornamentales, *Anthurium* spp (10 a 5 cm), *Canna hybrids* (20 a 30 cm), *Spathiphyllum Blandum* (15 a 25 cm), *Typha* spp (30 a 50 cm) y policultivos de la diferentes especies en las mismas alturas que se emplearon en las demás celdas, en duplicados sembrados a 30 cm de distancia a lo largo y 42.5 cm de ancho.

0 - 0,30 m	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	CONTROL SIN VEGETACIÓN 1	CONTROL SIN VEGETACIÓN 2					
0,30 - 0,60 m	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A							
0,60 - 0,90 m	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A							
0,90 - 1,2 m	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	E	E	E			E	B	B	B	B
1,2 - 1,5 m	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	E	E	E			E	B	B	B	B
1,5 - 1,8 m	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	E	E	E			E	C	C	C	C
1,8 - 2,1 m	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	E	E	E			E	C	C	C	C
2,1 - 2,4 m	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	E	E	E			E	D	D	D	D
2,4 - 2,7 m	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	E	E	E			E	D	D	D	D
2,7 - 3,0 m	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	E	E	E			E	E	E	E	E
3,0 - 3,3 m	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	E	E	E			E	E	E	E	E
3,3 - 3,6 m	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	E	E	E			E	A	A	A	A
3,6 - 4,0 m	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	E	E	E	E	A	A	A	A		

Figura 6.2 Arreglo de plantas en humedal comunitario (A) *Typha* spp, (B) *Canna hybrids*, (C) *Spathiphyllum blandum*, (D) *Anthurium* spp y (E) Policultivos.

Las 216 plantas en este estudio fueron recolectadas de diferentes formas: *Anthurium* spp (54 individuos) de un vivero de una localidad cercana llamada la bocana, *Canna hybrids* (54 individuos) en una vivienda de la misma comunidad, *Spathiphyllum blandum* (54 individuos), se colectaron en las orillas del río Actopan cerca de la comunidad de estudio, y

Typha spp (54 individuos) fueron colectados en un humedal natural que se encuentra a 2 km de la comunidad. Las plantas de esta fase fueron seleccionadas como resultado de la revisión de antecedentes literarios, en el caso de la *Typha* spp, a su vez se ha evaluado en estudios anteriores en la comunidad de Pastorías (Puruch et al, 2016; Valipour y Ahn, 2016; Marín-Muñiz, 2016), además de los resultados obtenidos en las fases I y II de esta investigación.

Las plantas fueron sembradas en la orilla del afluyente de aguas residuales que salía de la fosa séptica, misma que era empleada para la disposición de las aguas residuales domésticas de la comunidad, éste afluyente se producía del rebaso de la capacidad de la fosa y afloraba conformando una corriente de agua, la cual tenía como disposición final el río “Topiltepec”, afluyente del río Actopan. Este proceso fue durante aproximadamente dos meses (Junio del 2018), se realizó con la intención de que las plantas se adaptaran a las nuevas condiciones de calidad del agua a las cuales se verían enfrentadas en el sistema de tratamiento.

6.2.3 Muestreo y análisis físico-químicos

Se tomaron muestras de aguas quincenalmente, tanto en el influente como el efluente del HC, el monitoreo fue durante el periodo del 1 octubre de 2018 al 30 de septiembre 2019 y se analizaron en el laboratorio de agua, suelo y planta del ITSP, se tomaron 500 ml de cada de la salida de cada y de la entrada de los sistemas, estas se transportaron en refrigeración a -4°C, hasta el laboratorio y se analizaron inmediatamente.

6.2.4 Temperatura Ambiente - Humedal

La temperatura ambiental y humedad del entrono fue medida quincenalmente en los horarios de 9:00 a 10:00, 14:00 a 15:00 y 18:00 a 19:00 horas, mediante higrómetro termómetro digital interior y exterior humedad en situó (Marca:Hanna).

6.2.5 Intensidad de luz

La intensidad de luz a la que estuvieron expuestas las unidades experimentales fue medida quincenalmente con un luxómetro (Marca:Stere), los horarios de 9:00 a 10:00, 14:00 a 15:00 y 18:00 a 19:00 horas, mediante un luxómetro digital medidor de luminosidad hasta 50000 lux en situó.

6.2.6 pH- Sólidos Disueltos Totales (STD) – Conectividad eléctrica (EC).

El pH, se midió quincenalmente durante toda la investigación empleando el Medidor pH Digital Con Buffer Ph 0-14 Lcd Xto.

Los STD, EC y temperatura del agua, tanto en influente como en el efluente se midieron quincenalmente durante toda la investigación empleando el Medidor Tds-ec.

Todas las mediciones se realizaron en horario de 9:00 a 11:00 horas en sitio.

6.2.7 Análisis de laboratorio

Los métodos se muestran la tabla 4.4 y de igual forma están referenciados en los Métodos HATCH para el análisis de agua potable y agua residuales (APHA, AWWA, WEF, 2005).

Tabla 6.2. Parámetros analizados en laboratorio

Parámetro	Método de medición
Sólidos suspendidos totales (SST)	Medición cuantitativa
Fosforo total (TP)	Adenosine 5`- monophosphate monohidrat
Demanda química de oxígeno (DQO)	Digestión por ácidos clorhídrico
Demando Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Titulación Yodometrica
Nitrógeno Total (NT)	Chomotropic acid

6.2.8 Diseño experimental y análisis estadístico

Los datos de crecimiento de la vegetación fueron comparados estadísticamente con respecto al tipo de vegetación mediante un Análisis de varianza (ANOVA) de dos vías.

Se empleó un diseño de un factor con bloques, siendo el bloque el número de días, el factor a evaluar se definió como especie de planta ornamental: *Typha* sp, *Canna hybrid*, *Spathiphyllum Cannifolium*, *Anthurium* sp y *Zantedeschia aethiopica*, con sus respectivos

controles, siendo las variables respuesta la medición de DBO₅, DQO, NT, PT, SST, pH, Sólidos Disueltos Totales (STD), Conectividad eléctrica (EC).

Para el análisis estadístico de los resultados sobre la remoción entre los diferentes tratamientos, se usó un análisis de varianza (ANOVA) de efectos fijos a un nivel de confianza del 95%, y considerando un solo factor. Además, se realizó la comparación de medias con la prueba de Tukey a un nivel de significancia del $P=0.05$. Para la altura de la planta y número de flores se utilizó un diseño completamente al azar al $P=0.05$ de significancia, usando el paquete estadístico Minitab versión 16.1.0.

6.3. Resultados de los estudios y análisis

6.3.1. Datos ambientales temperatura, humedad y intensidad de luz

El uso de *Alpinia purpurata*, *Canna hybrids* y *Hedychium coronarium* en policultivos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en mesocosmos de CWs, favorecieron la eliminación de contaminantes PPO₄, N-NO₂, NT, en sentido se recomienda su uso en diseños de CWs.

6.3.1.1. Temperatura y humedad

Temperatura ambiental o temperatura real del aire, es una noción de calor, medida en cualquier lugar, con un termómetro (Castillo et al., 2020). En este estudio la temperatura máxima se registró en el mes de agosto 2019 (35 °C promedio) y la mínima en el mes de enero 2018 (18 °C promedio), en general los promedios de temperatura se muestran en la Figura 6.3. Lo que permite clasificar como clima tropical (promedio mensual de 24 °C aproximadamente), además de la región geográfica donde se encuentra México, principalmente la zona centro del estado de Veracruz (Villa-Mancera & Reynoso-Palomar, 2019), que se corroboran en este estudio (Figura 6.3).

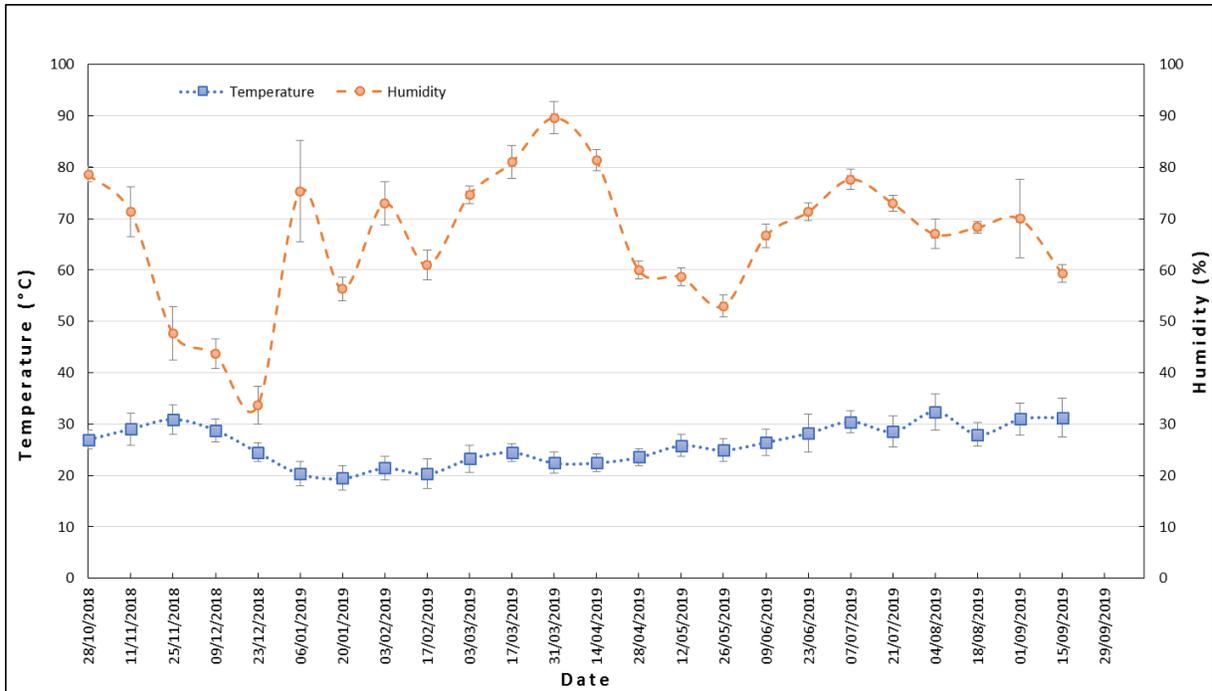


Figura 6.3. Temperatura ambiental y humedad durante el periodo de estudio

La temperatura ambiental se relaciona con la humedad relativa que es el porcentaje de vapor de agua que se encuentra presente en el aire, y puede cambiar cuando cambia cuando la temperatura del aire (Tian et al., 2020).

6.3.1.2. Intensidad de la luz

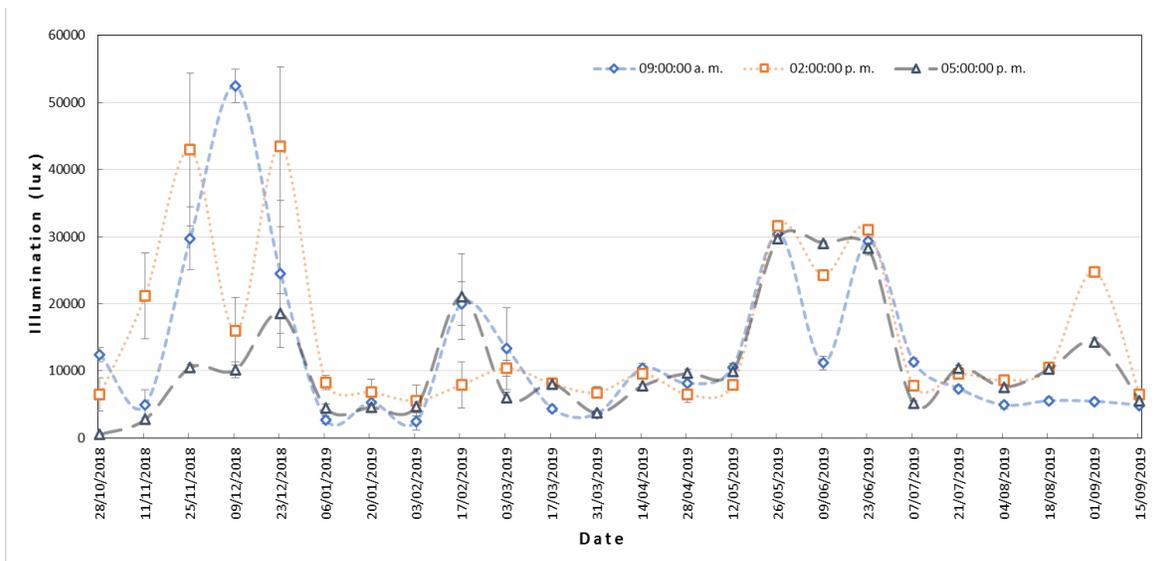


Figura 6.4. Intensidad de luz a la que se vio expuesto el experimento

Diferentes factores afectan el crecimiento de las plantas en diferentes condiciones de desarrollo (Metsoviti e ayl., 2020). Uno de los más importantes es la intensidad de luz a la cual se encuentran expuestas a lo largo de su periodo de vida (Dean et al., 2010). Contribuye a la generación de nuevas células, la respiración y fotosíntesis (Tellez et al., 2020). En este estudio la intensidad de luz a la cual se encontraron expuestas las plantas se muestra en la figura 6.4, encontrando que en el mes de diciembre se presentaron los valores más altos en promedio 51450 lux, mientras que la intensidad más baja se reportó en el mes de febrero, esto pudo deberse a que la región de México donde se desarrolló este estudio presenta un periodo de lluvias entre los meses Julio a Octubre; frente frío con fuertes vientos y lluvias entre Noviembre y Febrero; y periodo de secas entre los meses de Marzo a Junio (Marín-Muniz, 2016). Por otra parte los datos encontrados en este estudio están en los rangos óptimos de intensidad de luz necesarios para producir plantas ornamentales en climas tropicales que son de 40,000 a 50,000 lux (Sandoval-herazo et al., 2018). y son los rangos en los cuales se encuentran los resultados en este estudio.

6.3.4. pH en la entrada y salida del sistema

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para pH. Realiza varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre pH. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permitieron identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples permitieron identificar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

6.3.4.1. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para pH.

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de pH en contribuciones debidas a varios factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. En la tabla se observa que el factor tiempo (mes) tiene un valor-P menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre pH con un 95.0% de nivel de confianza.

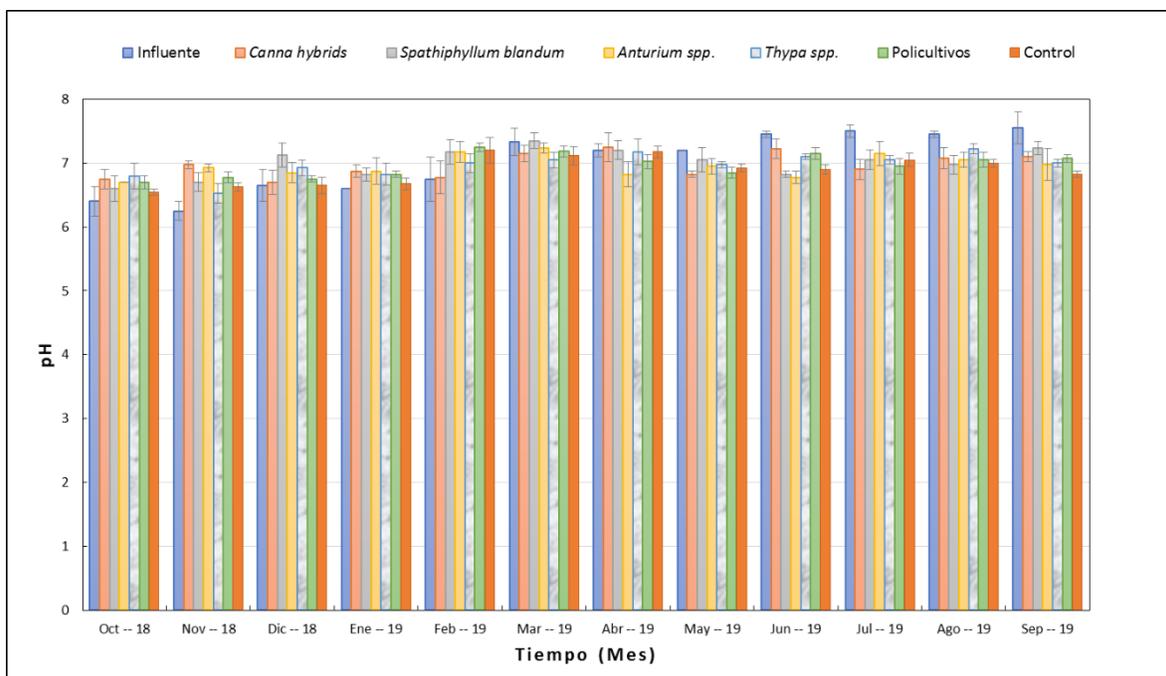


Figura 6.5 Comportamiento del pH durante el estudio en la entrada y salida de los sistemas.

6.3.4.2. Análisis de varianza (ANOVA) simple del factor mes

Se presenta un análisis de varianza de un factor para pH. Se utilizan varias pruebas y gráficas para comparar los valores medios de pH para los 12 diferentes niveles del Tiempo (mes). La prueba-F en la tabla ANOVA determina si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples muestran cuáles medias son significativamente diferentes de otras. También se utiliza la Prueba de Kruskal-Wallis la cual compara las medianas en lugar de las medias. Las diferentes gráficas ayudan a juzgar la significancia práctica de los resultados, así como a buscar posibles violaciones de los supuestos subyacentes en el análisis de varianza.

Tabla 6.5. ANOVA para para pH por mes.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2.75415	11	0.250377	7.59	0.0000
Intra grupos	2.37498	72	0.0329858		
Total (Corr.)	5.12913	83			

La tabla ANOVA descompone la varianza de pH en dos componentes: un componente entre-grupos (tiempo) y un componente dentro-de-grupos (error). La razón-F, que en este caso es igual a 7.59044, es el cociente entre el mes y el error estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05 ($p < 0.05$), existe una diferencia estadísticamente significativa entre los meses, con un nivel del 95.0% de confianza.

6.3.4.3. Prueba de Kruskal-Wallis

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de pH dentro de cada uno de los 12 niveles del factor Tiempo (mes) son iguales.

Tabla 6.6. Prueba de Kruskal-Wallis

Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	11	46.78	0.000
Ajustado para empates	11	46.87	0.000

Puesto que el valor-P es menor que 0.05 ($p < 0.05$), existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Los resultados coinciden con los del ANOVA anterior. Puesto que el valor p del ANOVA es menor que el nivel de significancia ($p < 0.05$), algunas de las medias de los tratamientos son diferentes.

6.3.4.4. Prueba de Kruskal-Wallis para pH

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de pH dentro de cada uno de los 7 tratamientos son iguales. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 6.7. Prueba de Kruskal-Wallis para pH

Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	6	2.50	0.868
Ajustado para empates	6	2.51	0.868

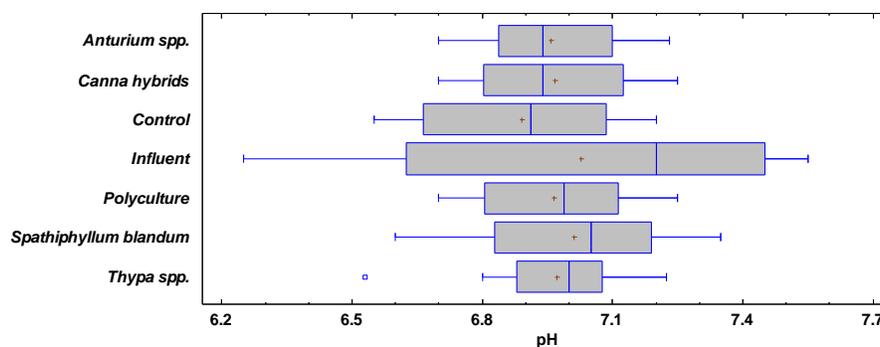


Figura 6.6. Analisis de Medias de pH en en los sistemas

De la figura 6.6 y las tablas 6.7 anteriores se concluye que entre algunos meses existen diferencias significativas en el pH, pero en cuanto a los distintos tratamientos, estos no mostraron diferencias significativas.

6.3.5. Conductividad eléctrica entrada y salida del sistema.

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para la conductividad eléctrica (CE). Se realizaron varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la CE. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples muestran cuales medias son significativamente diferentes de otras. La Gráfica de Medias y la Gráfica de Interacciones son de gran ayuda para interpretar los efectos significativos.

6.3.5.1. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la conductividad eléctrica (CE).

La tabla 6.8, descompone la variabilidad de la CE en contribuciones debidas a varios factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Se observa en la tabla que 2 valores-P (mes y especie) son menores que 0.05 ($p < 0.05$), estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la CE con un 95.0% de nivel de confianza.

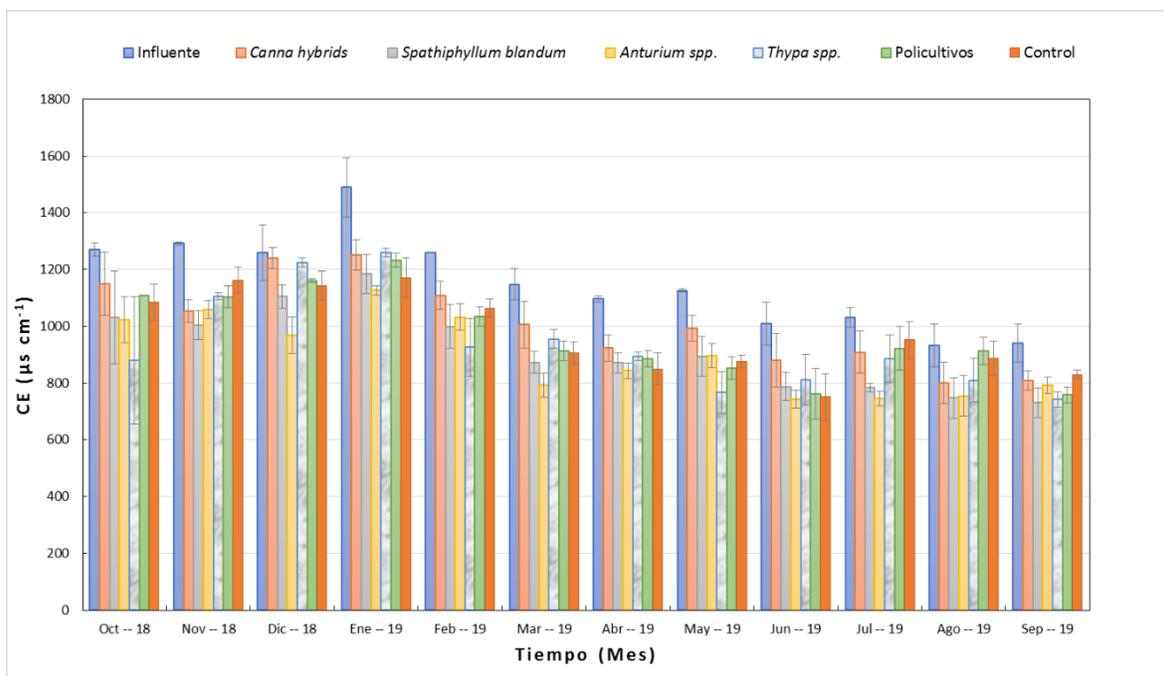


Figura 6.7. Conductividad eléctrica en la entrada y salida de los sistemas

6.3.5.2. Prueba de Tukey

Puesto que el valor p del ANOVA es menor que el nivel de significancia ($p < 0.05$), algunas de las medias de los tratamientos son diferentes. Los resultados se muestran en las siguientes tablas:

En este método se aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. En la siguiente tabla se muestran las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 6.8. ANOVA

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
<i>Anturium spp. - Influent</i>	*	-256.66	190.589
<i>Influent - Spathiphyllum blandum</i>	*	236.986	190.589
<i>Influent - Thypha spp.</i>	*	216.257	190.589

* indica una diferencia significativa.

En la tabla 6.9, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0. Las diferencias significativas encontradas entre los tratamientos se resumen en la siguiente tabla

Tabla 6.9. Medias de CE y analisis de grupos homegenios.

Treatment	Casos	Media	Grupos Homogéneos
<i>Anturium</i> spp.	12	897.84	X
<i>Spathiphyllum blandum</i>	12	917.514	X
<i>Thypa</i> spp.	12	938.243	X
Polyculture	12	970.389	XX
Control	12	973.243	XX
<i>Canna hybrids</i>	12	1010.31	XX
Influent	12	1154.5	X

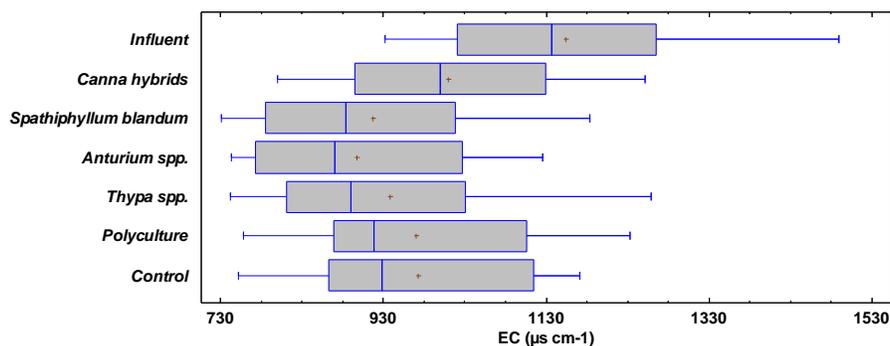


Figura 6.8. Diagrama de casa de CE

De la figura 6.8 y la tabla 6.9, anteriores se concluye que, en cuanto a los tratamientos, no se observaron diferencias significativas con el control. La prueba de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher corrobora los resultados de la prueba de Tukey. Los resultados se muestran en la tabla 6.10

Tabla 6.10. Difercias estadísticas entre tratamientos de CE

Contraste	Sig.	Diferencia	Límites +/-
<i>Anturium</i> spp. - Control		-75.4033	125.352
<i>Canna hybrids</i> - Control		37.0625	125.352

Influent - Control	*	181.257	125.352
Polyculture - Control		-2.85417	125.352
Spathiphyllum bla - Control		-55.7292	125.352
Thypa spp. - Control		-35.0	125.352

* denota una diferencia estadísticamente significativa.

Los tratamientos no mostraron diferencias versus el control, y tampoco hubo diferencias significativas entre los tratamientos.

6.3.6. Sólidos disueltos totales en la entrada y salida del sistema.

La tabla 6.11, descompone la variabilidad de la TDS en contribuciones debidas a varios factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Se observa en la tabla que 2 valores-P (tiempo y tratamiento) son menores que 0.05 ($p < 0.05$), estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la concentración de TDS con un 95.0% de nivel de confianza.

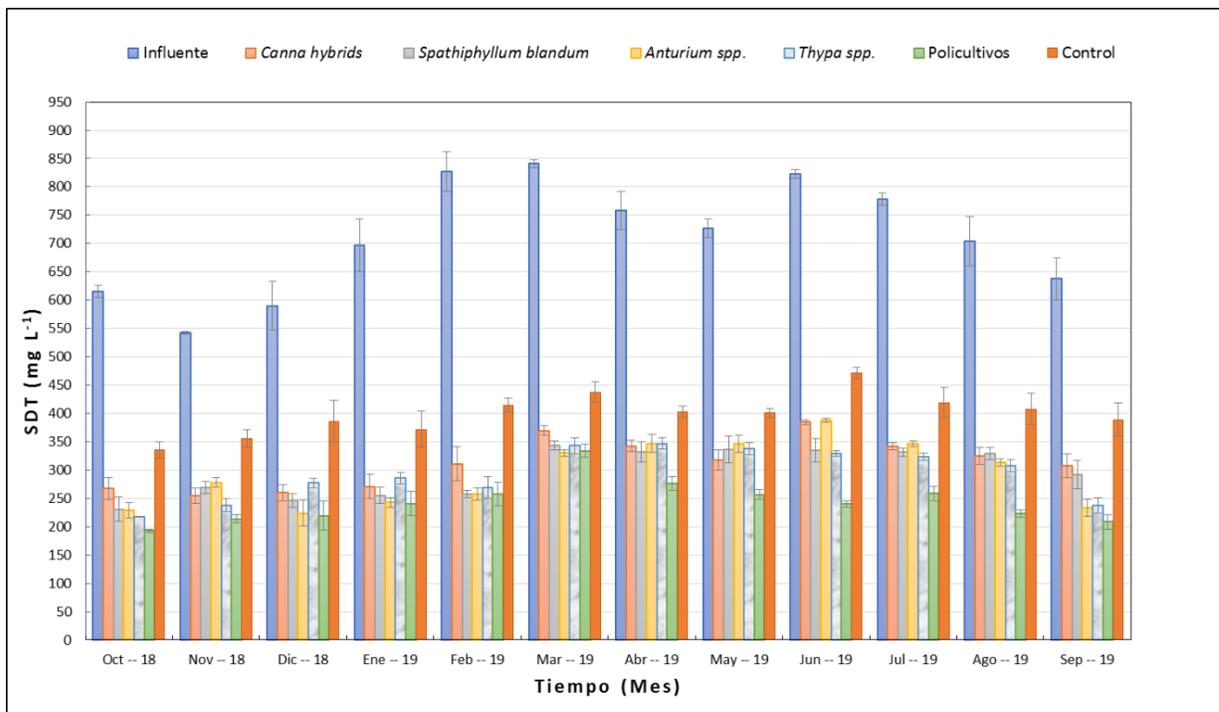


Figura 6.9. Comportamiento de SDT en la entrada y salida del sistema

6.3.6.1. Análisis de varianza (ANOVA) simple del factor mes

Tabla 6.11. ANOVA para TDS por Mes.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	161273.	11	14661.2	0.55	0.8623
Intra grupos	1.92013E6	72	26668.4		
Total (Corr.)	2.0814E6	83			

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor a 0.05 ($p > 0.05$), no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la concentración de TDS entre un nivel de mes y otro, con un nivel del 95.0% de confianza. En la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis no se encontraron diferencias significativas.

6.3.6.2. Prueba de Kruskal-Wallis

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de los valores de la concentración de TDS dentro de cada uno de los 12 Meses son iguales.

Tabla 6.12. Prueba de Kruskal-Wallis

Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	11	17.19	0.102
Ajustado para empates	11	17.19	0.102

Puesto que el valor-P es mayor que 0.05 ($p = 0.102$), se concluye que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza.

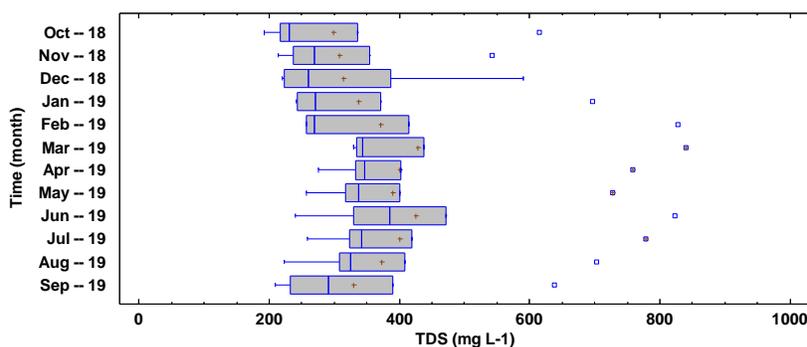


Figura 6.9. Gráfico de Caja y Bigotes para TDS en cada uno de los meses.

6.3.6.3. Análisis de varianza (ANOVA) simple de los tratamientos

La tabla 6.11 descompone la varianza de TDS en dos componentes: el tratamiento y el error. La razón-F, que en este caso es igual a 100.29, es el cociente entre tratamiento y el error. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05 ($p < 0.05$), existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la concentración de TDS entre los diferentes tratamientos con un nivel del 95.0% de confianza.

6.3.6.4. Prueba de Tukey

Puesto que el valor p del ANOVA es menor que el nivel de significancia ($p < 0.05$), algunas de las medias de los tratamientos son diferentes.

Esta prueba aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 12 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 6.13. Prueba de Tukey en SDT por tratamiento

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>Anturium</i> spp. - Control	*	-104.681	68.4459
<i>Anturium</i> spp. - Influent	*	-417.091	68.4459
<i>Canna hybrids</i> - Control	*	-86.5417	68.4459
<i>Canna hybrids</i> - Influent	*	-398.952	68.4459
<i>Canna hybrids</i> - Polyculture	*	69.3542	68.4459
Control - Influent	*	-312.41	68.4459
Control - Polyculture	*	155.896	68.4459
Control - <i>Spathiphyllum blandum</i>	*	102.75	68.4459
Control - <i>Thypha</i> spp.	*	106.667	68.4459
Influent - Polyculture	*	468.306	68.4459
Influent - <i>Spathiphyllum blandum</i>	*	415.16	68.4459
Influent - <i>Thypha</i> spp.	*	419.077	68.4459

* indica una diferencia significativa.

En la tabla 6.13, se han identificado 4 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que

compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 6.14. Medias de CE y análisis de grupos homogéneos.

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Polyculture	12	243.375	X
<i>Thypha</i> spp.	12	292.604	XX
<i>Anturium</i> spp.	12	294.59	XX
<i>Spathiphyllum blandum</i>	12	296.521	XX
<i>Canna hybrids</i>	12	312.729	X
Control	12	399.271	X
Influent	12	711.681	X

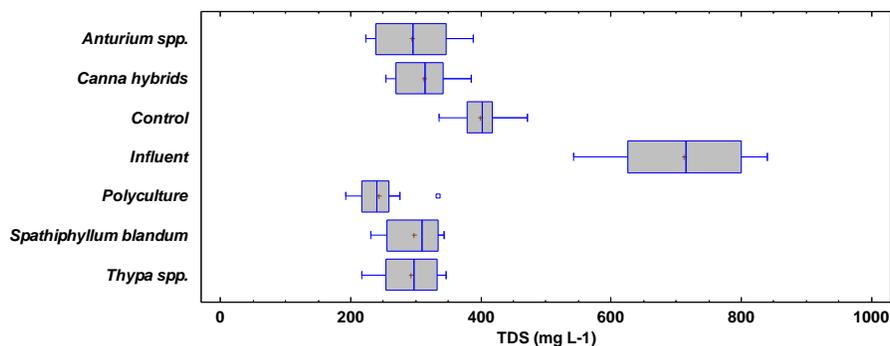


Figura 6.10. Gráfico de Caja y Bigotes para TDS en cada uno de los trataminetos.

De la figura 6.10 y la tabla 6.14, anteriores se concluye que, en cuanto a los tratamientos, todas mostraron diferencias significativas con el Influyente y con el control. La prueba de Dunnett corrobora los resultados de la prueba de Tukey. Los resultados se muestran en la tabla 6.15.

Tabla 6.15. Resumen de resultados de la prueba de Tokey para SDT.

Contraste	Sig.	Diferencia	Límites +/-
<i>Anturium</i> spp. - Control	*	-104.681	61.4021
<i>Canna hybrids</i> - Control	*	-86.5417	61.4021
Influent - Control	*	312.41	61.4021
Polyculture - Control	*	-155.896	61.4021
<i>Spathiphyllum bla</i> - Control	*	-102.75	61.4021
<i>Thypha</i> spp. - Control	*	-106.667	61.4021

* denota una diferencia estadísticamente significativa.

Todos los tratamientos mostraron diferencias versus el control, La única diferencia significativa entre los diferentes tratamientos son *Can*

6.4. Concentraciones de contaminantes

6.4.1. DQO en la entrada y salida del sistema

6.4.1.1. Análisis estadístico de la demanda química de oxígeno

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para la demanda química de oxígeno (COD). Se realizaron varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la COD. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples muestran cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

6.4.1.2. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la demanda química de oxígeno (COD).

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de la COD en contribuciones debidas a varios factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Se observa en la tabla que 2 valores-P (mes y especie) son menores que 0.05 ($p < 0.05$), estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la COD con un 95.0% de nivel de confianza.

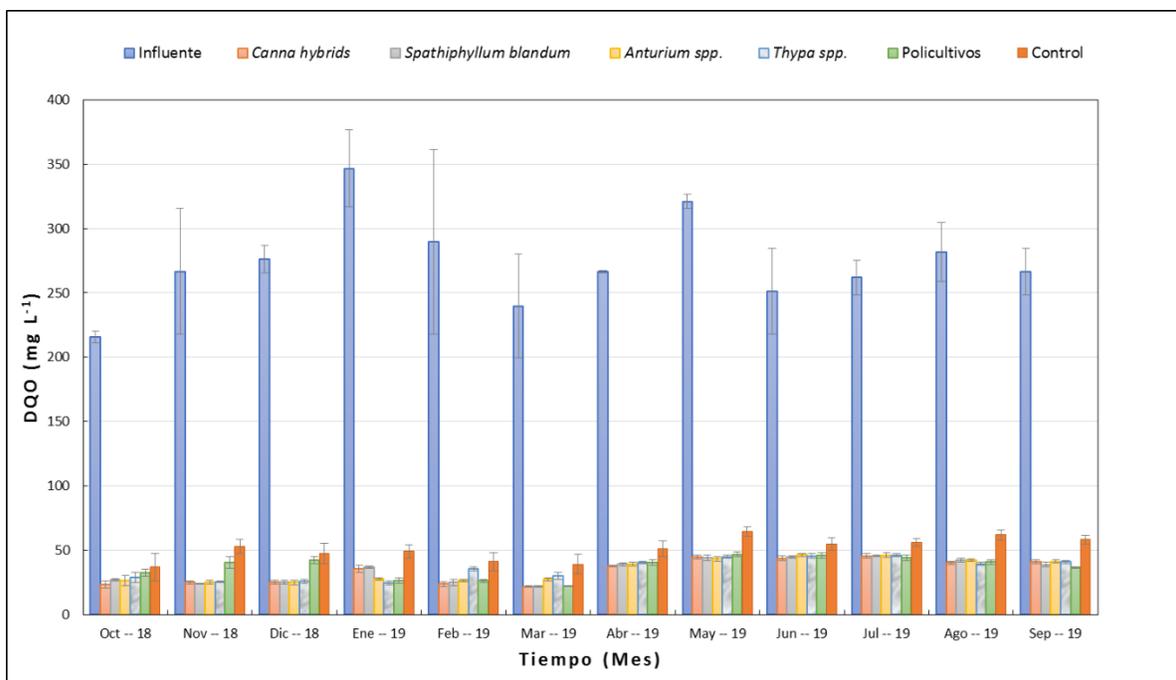


Figura 6.11. Concentraciones de entrada y salida de DQO en los sistemas

6.4.1.3. Prueba de Tukey

Puesto que el valor p del ANOVA es menor que el nivel de significancia ($p < 0.05$), algunas de las medias de los tratamientos son diferentes. Los resultados se muestran en la tabla

Tabla 6.16. Prueba de Tukey para DQO

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
<i>Canna hybrids</i>	12	33.8512	X
<i>Spathiphyllum blandum</i>	12	34.4426	X
<i>Anturium spp.</i>	12	34.5998	X
<i>Thypha spp.</i>	12	35.5613	X
Polyculture	12	37.0057	X
Control	12	51.0644	X
Influent	12	273.639	X

Este método aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 6 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. Se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0. Las diferencias significativas encontradas entre los tratamientos se resumen en la tabla 6.17.

Tabla 6.17. Diferencias significativas entre tratamientos

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Influent - <i>Canna hybrids</i>	*	239.788	19.1102
Influent - <i>Spathiphyllum blandum</i>	*	239.197	19.1102
Influent - <i>Anturium spp.</i>	*	239.039	19.1102
Influent - <i>Thypha spp.</i>	*	238.078	19.1102
Influent - Polyculture	*	236.633	19.1102
Influent - Control	*	222.575	19.1102

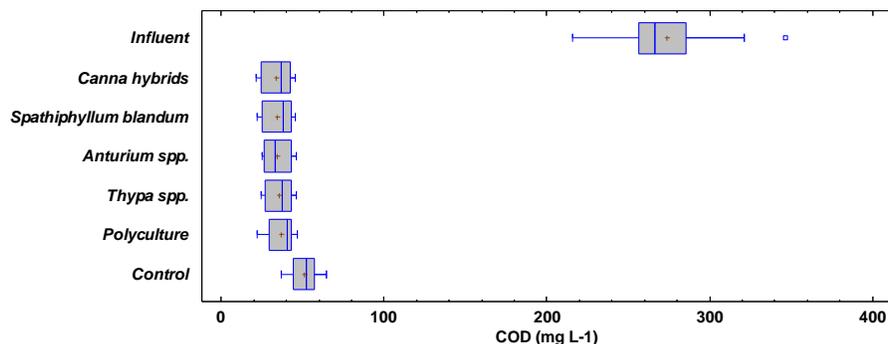


Figura 6.12. Diagrama de cajas de DQO

De la figura 6.12 y la tabla 6.17, se concluye que, en cuanto a los tratamientos, todas mostraron diferencias significativas con el Influyente y con el control. La prueba de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher corrobora los resultados de la prueba de Tukey. Los resultados se muestran en la tabla 6.18.

Tabla 6.18. Resultados general de a prueba de Tukey

Contraste	Sig.	Diferencia	Límites +/-
<i>Anturium</i> spp. - Control	*	-16.4646	12.5689
<i>Canna hybrids</i> - Control	*	-17.2132	12.5689
Influent - Control	*	222.575	12.5689
Polyculture - Control	*	-14.0587	12.5689
<i>Spathiphyllum blandum</i> - Control	*	-16.6218	12.5689
<i>Thypa</i> spp. - Control	*	-15.503	12.5689

* denota una diferencia estadísticamente significativa.

Todos los tratamientos mostraron diferencias versus el control, pero no hubo diferencias significativas entre los tratamientos.

6.4.2. DBO₅ en la entrada y salida del sistema

6.4.2.1. Análisis estadístico de la demanda bioquímica de oxígeno

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Se realizaron varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la DBO. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples muestran cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

6.4.2.2. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de la DBO en contribuciones debidas a varios factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Se observa en la tabla que el factor Treatment tuvo un valor-p menor que 0.05 ($p < 0.05$), este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la DBO con un 95.0% de nivel de confianza.

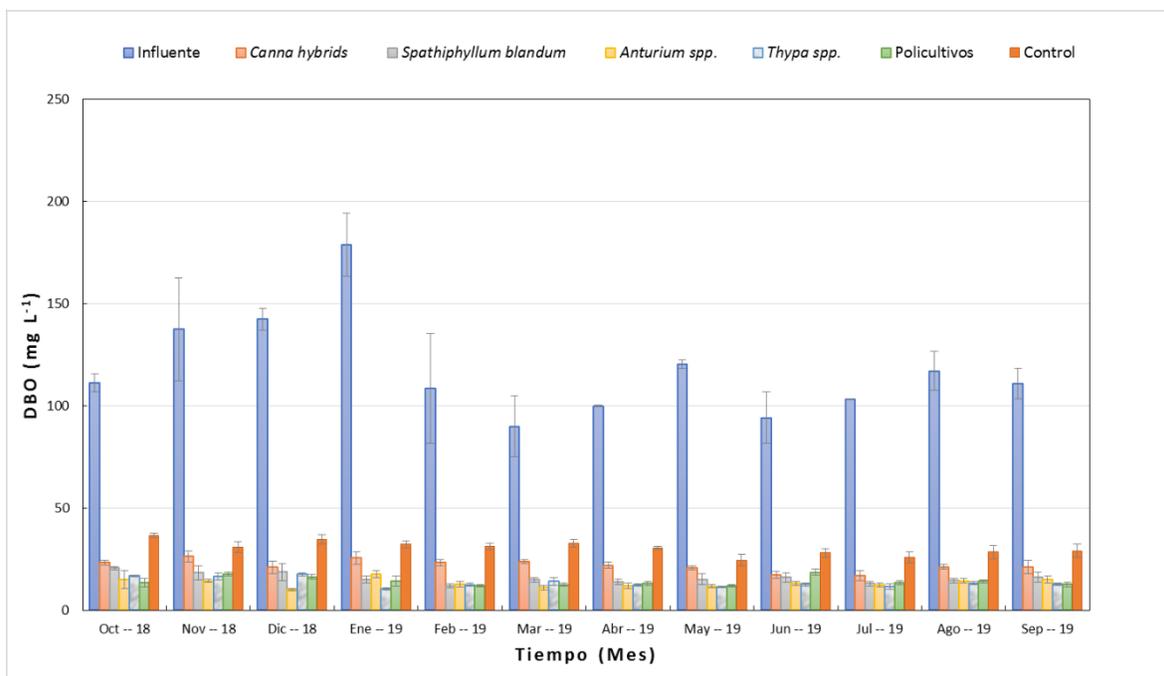


Figura 6.13. Contracciones en a netrada y slida de DBO₅

6.4.2.3. Prueba de Tukey

Puesto que el valor p del ANOVA es menor que el nivel de significancia ($p < 0.05$), algunas de las medias de los tratamientos son diferentes. Los resultados se muestran en la siguiente tabla 6.19.

Tabla 6.19. Datos honeos de las variables en el paramtro DBO₅

Treatment	Casos	Media	Grupos Homogéneos
<i>Anturium spp.</i>	12	13.2092	X
<i>Thypa spp.</i>	12	13.3781	X
Polyculture	12	14.0725	XX
<i>Spathiphyllum blandum</i>	12	15.5929	XX
<i>Canna hybrids</i>	12	21.7933	X
Control	12	30.295	X
Influent	12	117.816	X

Este método aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. El asterisco que se encuentra al lado de los 10 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la tabla anterior, se han identificado 3 grupos homogéneos según

la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0. Las diferencias significativas encontradas entre los tratamientos se resumen en la siguiente tabla 6.20.

Tabla 6.20. Diferencias significativas de todo el estudio DBO₅

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Influent - <i>Canna hybrids</i>	*	96.0227	11.9673
Influent - <i>Spathiphyllum blandum</i>	*	102.223	11.9673
Influent - <i>Anturium spp.</i>	*	104.607	11.9673
Influent - <i>Thypa spp.</i>	*	104.438	11.9673
Influent - Polyculture	*	103.744	11.9673
Influent - Control	*	87.521	11.9673
<i>Spathiphyllum blandum</i> - Control	*	-14.7021	11.9673
<i>Anturium spp.</i> - Control	*	-17.0858	11.9673
<i>Thypa spp.</i> - Control	*	-16.9169	11.9673
Polyculture - Control	*	-16.2225	11.9673

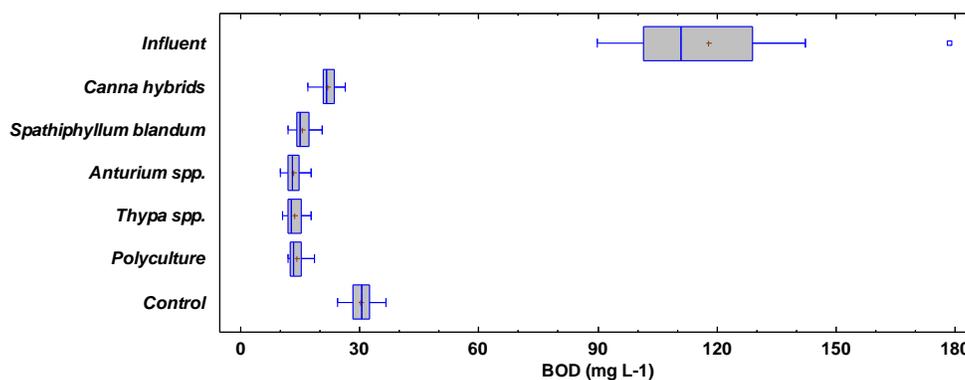


Figura 6.14. Análisis de caja de DBO₅

De la figura 6.14 y la tabla 6.20 se concluye que, en cuanto a los tratamientos, todas mostraron diferencias significativas con el Influyente y con el control. La prueba de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher corrobora los resultados de la prueba de Tukey. Los resultados se muestran en la tabla

Tabla 6.21. Prueba de Tukey para datos de DBO₅

Contraste	Sig.	Diferencia	Límites +/-
<i>Anturium</i> spp. - Control	*	-17.0858	7.87102
<i>Canna hybrids</i> - Control	*	-8.50167	7.87102
Influent - Control	*	87.521	7.87102
Polyculture - Control	*	-16.2225	7.87102
<i>Spathiphyllum blandum</i> - Control	*	-14.7021	7.87102
<i>Thypha</i> spp. - Control	*	-16.9169	7.87102

* denota una diferencia estadísticamente significativa.

Todos los tratamientos mostraron diferencias versus el control, pero no hubo diferencias significativas entre los tratamientos.

6.4.3. NT en la entrada y salida del sistema

6.4.3.1. Análisis estadístico de la concentración de nitrógeno total (tn)

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para la concentración de nitrógeno total (N). Se realizaron varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la concentración de N. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples muestran cuales medias son significativamente diferentes de otras.

6.4.3.2. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la concentración de nitrógeno total (N).

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de la N en contribuciones debidas a varios factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Se observa en la tabla que el factor tratamiento es menor que 0.05 ($p < 0.05$), estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la N con un 95.0% de nivel de confianza.

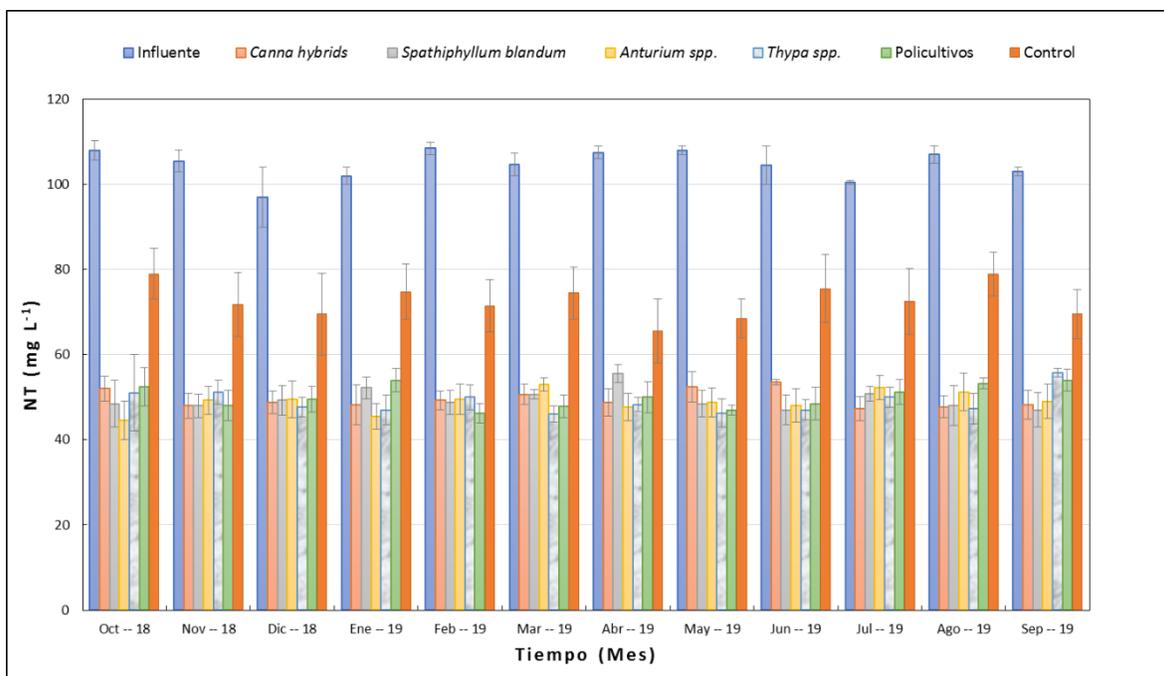


Figura 6.15. Concentración de nitrógeno total (N) (entrada) y exportación (salida) del humedal construido de cada una de las especies estudiadas.

6.4.3.3. Análisis de varianza (ANOVA) simple del factor mes

Tabla 6.22. ANOVA para N por Mes.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	60.7284	11	5.52077	0.01	1.0000
Intra grupos	33139.8	72	460.276		
Total (Corr.)	33200.6	83			

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor a 0.05 ($p > 0.05$), no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la concentración de N entre un nivel de Mes y otro, con un nivel del 95.0% de confianza. En la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis no se encontraron diferencias significativas.

6.4.3.4. Prueba de Tukey

Puesto que el valor p del ANOVA es menor que el nivel de significancia ($p < 0.05$), algunas de las medias de los tratamientos son diferentes.

Esta prueba aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La siguiente tabla muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 11 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 6.23. Significancia de medias para DBO₅

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>Anturium</i> spp. - Control	*	-23.6042	3.66054
<i>Anturium</i> spp. - Influent	*	-55.66	3.66054
<i>Canna hybrids</i> - Control	*	-23.0483	3.66054
<i>Canna hybrids</i> - Influent	*	-55.1042	3.66054
Control - Influent	*	-32.0558	3.66054
Control - Polyculture	*	22.4517	3.66054
Control - <i>Spathiphyllum blandum</i>	*	23.1108	3.66054
Control - <i>Thypha</i> spp.	*	23.6667	3.66054
Influent - Polyculture	*	54.5075	3.66054
Influent - <i>Spathiphyllum blandum</i>	*	55.1667	3.66054
Influent - <i>Thypha</i> spp.	*	55.7225	3.66054

* indica una diferencia significativa.

En la siguiente tabla 6.23, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 6.24. Grupos de homogenios para parámetro de NT

Treatment	Casos	Media	Grupos Homogéneos
<i>Thypha</i> spp.	12	48.9583	X
<i>Anturium</i> spp.	12	49.0208	X
<i>Spathiphyllum blandum</i>	12	49.5142	X
<i>Canna hybrids</i>	12	49.5767	X
Polyculture	12	50.1733	X
Control	12	72.625	X
Influent	12	104.681	X

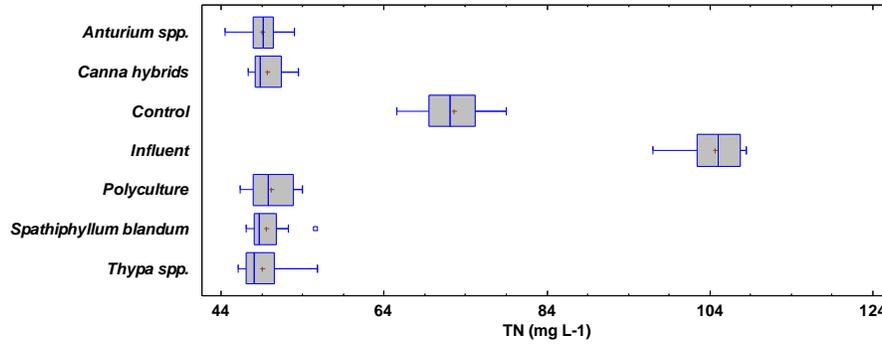


Figura 6.16. Analisis de caja de NT

De la figura 6.16 y la tabla 6.23, se concluye que, en cuanto a los tratamientos, todas mostraron diferencias significativas con el Influyente y con el control. La prueba de Dunnett corrobora los resultados de la prueba de Tukey. Los resultados se muestran en la tabla 6.24.

Tabla 6.25. Prueba de Tukey para NT

Contraste	Sig.	Diferencia	Límites +/-
<i>Anturium</i> spp. - Control	*	-23.6042	3.28383
<i>Canna hybrids</i> - Control	*	-23.0483	3.28383
Influent - Control	*	32.0558	3.28383
Polyculture - Control	*	-22.4517	3.28383
<i>Spathiphyllum bla</i> - Control	*	-23.1108	3.28383
<i>Thypha</i> spp. - Control	*	-23.6667	3.28383

* denota una diferencia estadísticamente significativa.

Todos los tratamientos mostraron diferencias versus el control, pero no hubo diferencias significativas entre los tratamientos.

6.4.4 PT en la entrada y salida del sistema

6.4.4.1. Análisis estadístico de la concentración de fósforo total

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para la concentración de fósforo total (TP). Se realizaron varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la concentración de TP. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas

de Rangos Múltiples muestran cuales medias son significativamente diferentes de otras. La Gráfica de Medias y la Gráfica de Interacciones son de gran ayuda para interpretar los efectos significativos.

6.4.4.2. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la concentración de fosforo total (TP).

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de la TP en contribuciones debidas a varios factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Se observa en la tabla que 2 valores-P (tiempo y tratamiento) son menores que 0.05 ($p < 0.05$), estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la concentración de TP con un 95.0% de nivel de confianza.

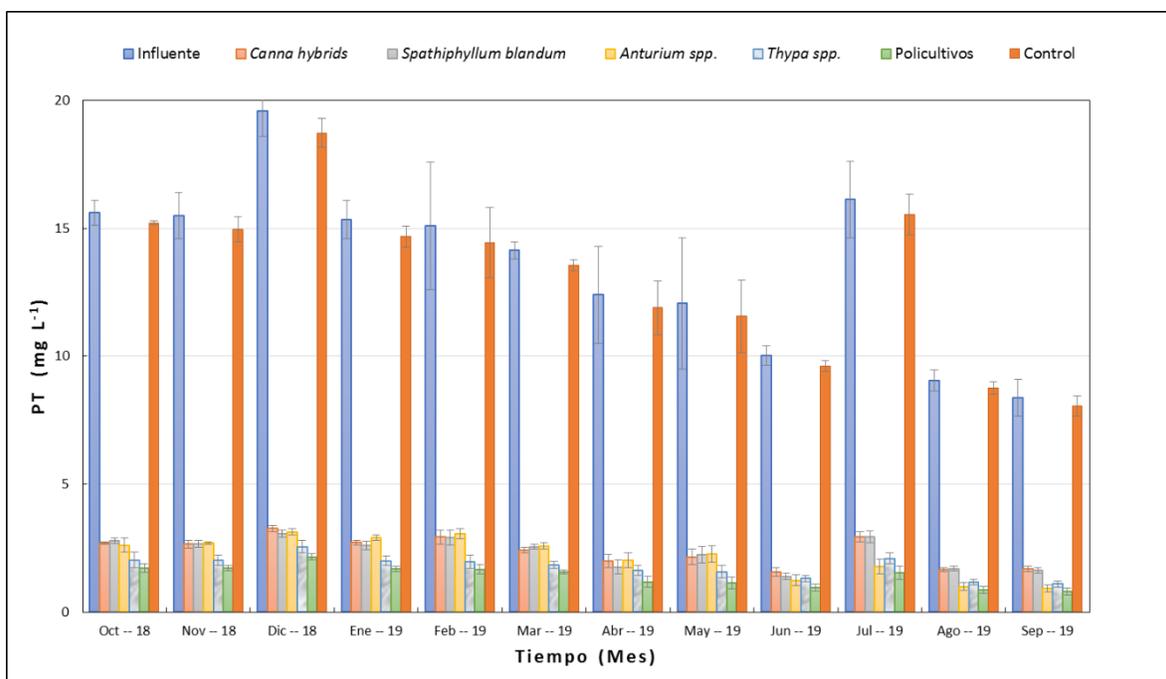


Figura 6.17. Concentraciones de PT en la entrada y salidas de los sistemas

6.4.4.3. Análisis de varianza (ANOVA) simple del factor mes

Tabla 6.25. ANOVA para TP por Mes.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	130.217	11	11.8379	0.37	0.9650
Intra grupos	2327.2	72	32.3222		
Total (Corr.)	2457.42	83			

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor a 0.05 ($p > 0.05$), no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la concentración de TP entre un nivel de Mes y otro, con un nivel del 95.0% de confianza. En la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis no se encontraron diferencias significativas.

6.4.4.4. Prueba de Tukey

Puesto que el valor p del ANOVA es menor que el nivel de significancia ($p < 0.05$), algunas de las medias de los tratamientos son diferentes.

Esta prueba aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La tabla 6.26, muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 10 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 6.26. Diferencias entre medias para PT

Contraste	Sig.	Diferencia +/-	Límites
<i>Anturium</i> spp. - Control	*	-10.9002	2.22163
<i>Anturium</i> spp. - Influent	*	-11.4277	2.22163
<i>Canna hybrids</i> - Control	*	-10.694	2.22163
<i>Canna hybrids</i> - Influent	*	-11.2215	2.22163
Control - Polyculture	*	11.6679	2.22163
Control - <i>Spathiphyllum blandum</i>	*	10.7335	2.22163
Control - <i>Thypha</i> spp.	*	11.3098	2.22163
Influent - Polyculture	*	12.1954	2.22163
Influent - <i>Spathiphyllum blandum</i>	*	11.261	2.22163
Influent - <i>Thypha</i> spp.	*	11.8373	2.22163

* indica una diferencia significativa.

En la tabla 6.26, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que

compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 6.26. Grupos homogéneos análisis PT

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Polyculture	12	1.41333	X
<i>Thypha</i> spp.	12	1.77146	X
<i>Anturium</i> spp.	12	2.18104	X
<i>Spathiphyllum blandum</i>	12	2.34771	X
<i>Canna hybrids</i>	12	2.38729	X
Control	12	13.0812	X
Influent	12	13.6088	X

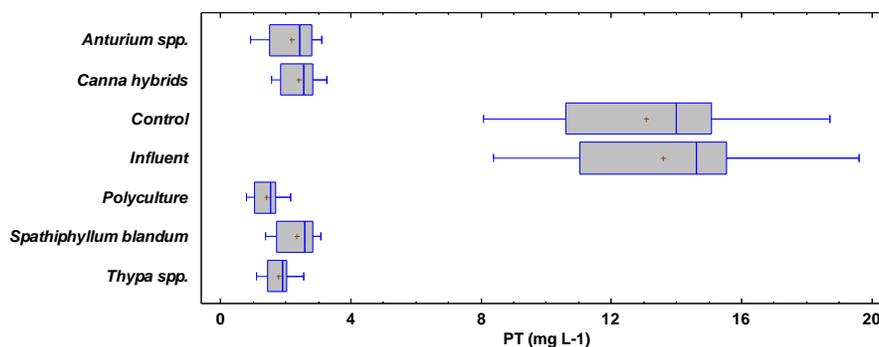


Figura 6.18. Analisis de caja de PT

De la figura 6.18 y la tabla 6.26, se concluye que, en cuanto a los tratamientos, todas mostraron diferencias significativas con el Influyente y con el control. La prueba de Dunnett corrobora los resultados de la prueba de Tukey. Los resultados se muestran en la tabla 6.27.

6.27. Prueba de Dunnett para PT

Contraste	Sig.	Diferencia	Límites +/-
<i>Anturium</i> spp. - Control	*	-10.9002	1.993
<i>Canna hybrids</i> - Control	*	-10.694	1.993
Polyculture - Control	*	-11.6679	1.993
<i>Spathiphyllum bla</i> - Control	*	-10.7335	1.993
<i>Thypha</i> spp. - Control	*	-11.3098	1.993

* denota una diferencia estadísticamente significativa.

Todos los tratamientos mostraron diferencias versus el control, pero no hubo diferencias significativas entre los tratamientos.

6.4.5. SST en la entrada y salida del sistema

6.4.5.1. Análisis estadístico de la concentración de sólidos totales suspendidos

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para la concentración de sólidos totales suspendidos (TSS). Se realizaron varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la TSS. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples muestran cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

6.4.5.2. Análisis de varianza (ANOVA) múltiple para la concentración de sólidos totales suspendidos (TSS).

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de la concentración de TSS en contribuciones debidas a varios factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Se observa en la tabla que 2 valores-P (tiempo y tratamiento) son menores que 0.05 ($p < 0.05$), estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la TSS con un 95.0% de nivel de confianza.

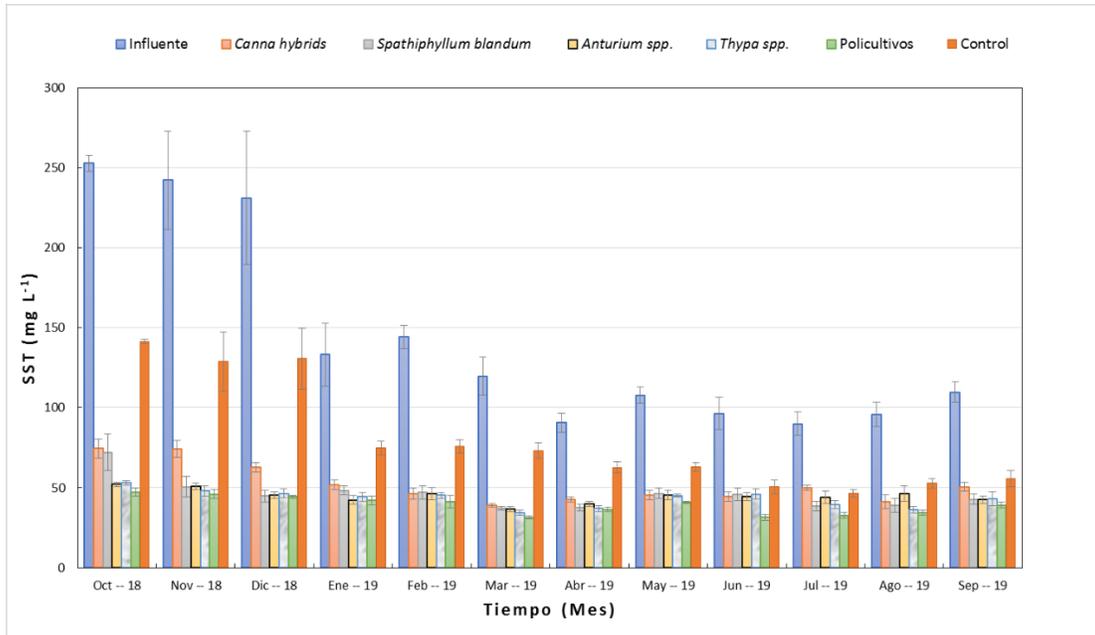


Figura 6.19. Concentraciones de entrada y salidad de sistemas SST

6.4.5.3. Análisis de varianza (ANOVA) simple del factor mes

Tabla 6.28. ANOVA para TSS por Mes.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	24976.7	11	2270.61	1.22	0.2911
Intra grupos	134216.	72	1864.11		
Total (Corr.)	159193.	83			

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor a 0.05 ($p > 0.05$), no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la concentración de TSS entre un nivel de Mes y otro, con un nivel del 95.0% de confianza. En la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis no se encontraron diferencias significativas.

6.4.5.4. Prueba de Tukey

Puesto que el valor p del ANOVA es menor que el nivel de significancia ($p < 0.05$), algunas de las medias de los tratamientos son diferentes.

Esta prueba aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La tabla 6.29, muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 9 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 6.29. Diferencias significativas entre medias para SST

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>Anturium</i> spp. - Control	*	-35.0098	34.1419
<i>Anturium</i> spp. - Influent	*	-98.0996	34.1419
<i>Canna hybrids</i> - Influent	*	-90.8985	34.1419
Control - Influent	*	-63.0898	34.1419
Control - Polyculture	*	40.8213	34.1419
Control - <i>Thypha</i> spp.	*	36.5496	34.1419
Influent - Polyculture	*	103.911	34.1419
Influent - <i>Spathiphyllum blandum</i>	*	96.9717	34.1419
Influent - <i>Thypha</i> spp.	*	99.6394	34.1419

* indica una diferencia significativa.

En la tabla 6.30, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 6.30. Grupos homegenios para tratmientos SST

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Polyculture	12	38.9098	X
<i>Thypha</i> spp.	12	43.1815	X
<i>Anturium</i> spp.	12	44.7212	X
<i>Spathiphyllum blandum</i>	12	45.8492	XX
<i>Canna hybrids</i>	12	51.9223	XX
Control	12	79.731	X
Influent	12	142.821	X

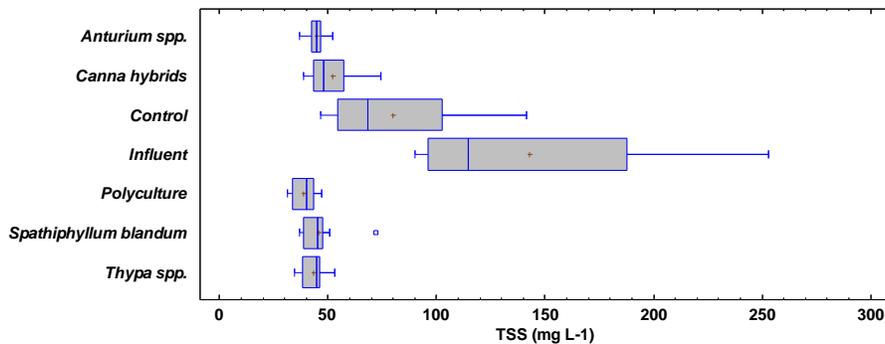


Figura 6.20. Diagram de casajas para SST

De la figura 6.20 y la tabla 6.30, se concluye que, en cuanto a los tratamientos, la mayoría de los tratamientos mostraron diferencias significativas con el influente y con el control. La prueba de Dunnett corrobora los resultados de la prueba de Tukey. Los resultados se muestran en la tabla

Tabla 6.31. Prueba de Tukey para SST

Contraste	Sig.	Diferencia	Límites +/-
<i>Anturium</i> spp. - Control	*	-35.0098	30.6283
<i>Canna hybrids</i> - Control		-27.8088	30.6283
Influent - Control	*	63.0898	30.6283
Polyculture - Control	*	-40.8213	30.6283
<i>Spathiphyllum bla</i> - Control	*	-33.8819	30.6283
<i>Thypha</i> spp. - Control	*	-36.5496	30.6283

* denota una diferencia estadísticamente significativa.

La mayoría de los tratamientos mostraron diferencias versus el control, pero no hubo diferencias significativas entre los tratamientos.

6.5 Discusiones de eliminación de contaminantes

La eliminación de la materia orgánica se indica en este estudio por la DBO₅ y DQO, la figura 6.11, muestra la disminución de DQO, mostrando diferencias significativas ($p < 0.05$) entre sistemas con vegetación y sistemas sin presencia de vegetación. La eliminación de DQO en sistemas sin vegetación fue en promedio de 86.95%, mientras que en sistema sin presencia de vegetación la eliminación fue menos en promedio en un 5.6%. En relación a la DBO₅ (Figura 6.13), el comportamiento fue similar al de la DQO, encontrando diferencias significativas ($p < 0.05$) entre humedales con vegetación y humedales sin vegetación, sin

importar el tipo de plantas, la eliminación en sistemas con vegetación fue superior en 4.8%, en relación a la eliminación de sistemas sin vegetación que eliminaron el 81.3% de la DBO₅. Por otra parte, en la Tabla 6.32, no se muestra una diferencia significativa entre el aporte de las diferentes vegetaciones (como cultivos de plantas ornamentales, monocultivo de plantas típicas de humedales y policultivos), en la reducción de estos dos parámetros, pero si entre sistemas no plantados, esto puede deberse a liberación de oxígeno por las raíces de las plantas que pudieron favorecer el desarrollo de microorganismos aerobios (Haddis et al., 2020), que al parecer contribuyeron notablemente a la degradación de la materia orgánica. Por otra parte los resultados de este estudio, que usa PET como sustrato y plantas ornamentales no típicas de humedales, no difieren de otros estudios que usan plantas típicas de humedales y otros sustratos, como se puede ver en la revisión literaria realizada por Wang et al. (2020), quienes indican el aporte de los medios de soporte y Sandoval et al. (2019), que analiza las vegetaciones típicas de humedales y plantas ornamentales y en algunos casos no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$), entre sistemas con este tipo de vegetaciones.

Tabla 6.32. Concentraciones y eliminación de contaminantes en humedales comunitarios

Parámetro	Plantas de humedales en diferentes sustratos					
	<i>Canna hybrids</i>	<i>Spathiphyllum blandum</i>	<i>Anturium spp.</i>	<i>Thypha spp.</i>	Policultivo	Control
COD						
CE			274.65 ± 10.02			
CS	33.79 ± 1.39	34.24 ± 1.36	34.64 ± 1.31	35.62 ± 1.23	36.57 ± 1.35	51.15 ± 1.95
Remoción (%)	87.48 ± 0.53	87.27 ± 0.53	87.05 ± 0.55	86.64 ± 0.55	86.40 ± 0.53	81.33 ± 0.60
DBO						
CE			116.93 ± 5.94			
CS	21.81 ± 0.67	15.35 ± 0.64	13.05 ± 0.44	13.26 ± 0.43	14.03 ± 0.44	30.14 ± 0.75

Remoción (%)	80.47 ± 0.85	86.35 ± 0.61	88.47 ± 0.40	88.05 ± 0.54	87.38 ± 0.56	72.86 ± 1.12
TSS						
CE			137.28 ± 12.08			
CS	50.44 ± 1.78	44.39 ± 1.42	44.08 ± 0.93	42.40 ± 0.99	38.26 ± 0.92	76.89 ± 4.86
Remoción (%)	60.27 ± 1.42	64.27 ± 1.53	63.92 ± 1.64	65.53 ± 1.49	69.34 ± 1.13	43.68 ± 1.05
PT						
CE			13.55 ± 0.71			
CS	2.38 ± 0.09	2.34 ± 0.09	2.18 ± 0.12	1.76 ± 0.08	1.41 ± 0.07	13.01 ± 0.48
Remoción (%)	82.41 ± 0.30	82.72 ± 0.34	84.28 ± 0.59	86.99 ± 0.29	89.75 ± 0.30	3.93 ± 0.12
NT						
CE			104.54 ± 0.94			
CS	49.52 ± 0.80	49.60 ± 0.84	49.38 ± 0.93	48.75 ± 0.82	49.98 ± 0.83	72.44 ± 1.86
Remoción (%)	52.55 ± 0.82	52.39 ± 0.94	52.64 ± 0.99	53.31 ± 0.79	52.04 ± 0.92	30.70 ± 1.74

La tabla 6.32 muestra el comportamiento de la disminución de SST, encontrando que en promedio la eliminación de los sistemas con vegetación fue de 64.7%, mientras que en sistemas sin vegetación fue de 38.6%, encontrando diferencias significativas ($p < 0.05$), este comportamiento es menos eficiente que los reportados en la literatura que enmarca eliminaciones de sólidos entre 70 y 90%, empleando sustratos de grava y/o arena (García et al 2010), este comportamiento puede tener sustento en que el tipo de sustrato usado en este estudio (PET), no tiene las mismas características que los sustratos convencionales, aunque tiene una eliminación considerable. Por otra parte, al parecer se muestra una mayor influencia de los diferentes tipos de vegetación (Tabla 6.32), siendo mayor en celdas con

policultivos, esto puede deberse a que las diferentes plantas empleadas pudieron generar competencia por el espacio y desarrollar mayor densidad de raíces, que pudieron retener sólidos en las zonas radicales, este comportamiento es similar al reportado por Tanner et al. 1995, en su estudio de eliminación de sólidos en humedales de flujo horizontal.

En cuanto a la eliminación de PT, se encontraron altas diferencias significativas ($P < 0.05$) entre sistemas con vegetación y sistemas sin vegetación, lo que indica que la vegetación jugó un papel muy importante en este estudio (figura 6.17), esto podría deberse a la alta producción de flores generadas por las especies de plantas y la producción de plantas, teniendo en cuenta que el fósforo induce la floración en las plantas (Torres Bojorges et al. 2017) y el aumento del número de plantas de 200 a 876 durante un periodo de 12 meses. El intercambio iónico, la precipitación en los sistemas (Vymazal, 2007) y los minerales contenidos en la tetina podrían ser otra forma de eliminación (Bolton et al. 2019). La eliminación de fósforo total en sistemas con vegetación fue de 85.2 % en promedio, esto puede deberse a la densidad de plantas y el bajo contenido de fósforo presente en el agua (Figura 6.17), mientras que en sistemas sin vegetación la eliminación se encontró en el promedio durante el periodo de estudio en 3.9%, este resultado se pudo deber a que el PET es un sustrato poco común en humedales que dificulta que el PT sea eliminado en humedales.

En cuanto a la eliminación de NT, en los humedales comunitarios, no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la vegetación, ni entre los policultivos, pero sí ($p > 0.05$) entre controles sin vegetación y sistemas plantados (Tabla 6.32), estos resultados son congruentes a los reportados por otros estudios que evalúan sistemas plantados y no plantados en el caso de Zamora et al. (2019), Sandoval-Herazo et al. (2018), encontraron diferencias significativas entre sistemas plantados y no plantados, en este sentido se puede afirmar que la vegetación en humedales de flujo subsuperficial favorece la eliminación de nitrógeno en aguas residuales, y el PET facilitó el desarrollo de las plantas a pesar de ser un sustrato poco convencional para ser usado en humedales de tratamiento.

Conclusiones

Las plantas ornamentales, *Anthurium* sp, *Canna hybrids*, *Typha dominguensis* *Spathiphyllum blandum*, lograron desarrollarse adecuadamente en humedales comunitarios con PET, como

sustrato. Por otra parte, el PET demostró ser un medio de soporte adecuado para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, su uso debe de evaluarse en mayor periodo de tiempo para análisis el proceso de degradación de este no introduce microplásticos a los sistemas de tratamiento.

El uso de humedales de tratamiento representa una alternativa económica y ecológicamente viable para tratar problemas de contaminación de aguas residuales en comunidades rurales aisladas y de escasos recursos, en conjunto con las plantas ornamentales pueden facilitar la aceptación de estos sistemas y su inserción en los entornos rurales, así como el PET disminuye los costos de implementación de estos sistemas cuando se requieren como solución en comunidades aisladas de escasos recursos.

CAPÍTULO VII. VIABILIDAD ECONÓMICA DEL USO DE HUMEDALES INGENIERILES CON PARTICIPACIÓN COMUNITARIA.

7.1 Introducción

La contaminación de los mantos acuíferos en comunidades vulnerables y la baja inversión en materia de tratamiento de aguas residuales en países en vía de desarrollo, da como resultado un foco riesgo para la salud humana y los ecosistemas cada vez mas dañados por el contacto humano, debido a la descarga de contaminantes y grandes volúmenes generados por este tipo de aguas que se arrojan sin tratar a cuerpos superficiales y subterráneos de aguas (Villalobos & Díaz, 2018; Zhindón et al., 2018).

Dadae esta situación se genera la obligación de encontrar alternativas, económicas y a la par generen beneficios económicos para estas comunidades, que en su mayoría no tienen una fuente de ingresos de manera regular (Zhang et al., 2015; Sandoval et al., 2019a; Guven et al., 2019). Este estudio se realizó en las comunidades marginadas de Pastorías, estas enfrentan escenarios de elevada vulnerabilidad social cuya mitigación escapa del control personal o familiar (Almejo et al., 2013). Sin embargo, se contó con la participación de la comunidad, para la donación del lugar donde se construyó el HC, y se capacitó para el cuidado de las plantas ornamentales, típicas de la región con la finalidad de generar ingresos por medio de la venta de las plantas utilizadas para la remoción de contaminantes. Se realiza el análisis financiero para comprobar la viabilidad de este tipo de proyectos, teniendo cuenta que se puede replicar en comunidades aledañas o de las mismas características para el tratamiento de aguas residuales generando alternativas económicas que generen bienestar social.

7.2 Materiales y métodos

La localidad de San José Pastorías pertenece al municipio de Actopan en el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (México), geográficamente se encuentra situada a 260 metros sobre el nivel del mar, a $-96^{\circ} 57'05.56''$ de longitud oeste y $19^{\circ} 56'44.44''$ de latitud norte. La localidad cuenta con una población de 620 habitantes (INEGI, 2015). La hidrología se constituye por el río Topiltepec (afluente del río Actopan), el clima es húmedo-regular tiene

tres periodos que comprenden: periodo de lluvias entre los meses julio a octubre; frentes fríos con fuertes vientos y lluvias entre noviembre y febrero; y periodo de sequía entre los meses de marzo a junio. La precipitación promedio anual fluctúa entre 1,200 y 1,650 mm y la temperatura promedio anual es de 24.3°C (Marín-Muñiz, 2016).

En esta zona el suelo es de tipo feozem caracterizado por contener suficiente materia orgánica y nutrientes, el uso del suelo se destina principalmente a la ganadería y la agricultura (INAFED, 2010).



Figura 7.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio, localidad de Pastorías en el municipio de Actopan en el estado de Veracruz.

De acuerdo con CONAPO (2015) Actopan es un municipio con alto grado de marginación, por lo que los habitantes carecen de oportunidades sociales y ausencia de capacidades para adquirirlas o generarlas, también tienen privaciones e inaccesibilidad a bienes y servicios fundamentales para el bienestar o vidas dignas. En consecuencia, las comunidades marginadas como Pastorías enfrentan escenarios de elevada vulnerabilidad social cuya mitigación escapa del control personal o familiar (Almejo et al., 2013).

Uno de los problemas principales que presenta la localidad de Pastorías es la contaminación del río Topiltepec, esta comunidad, aunque cuenta con sistema de alcantarillado desde el año 2013, no tiene un sistema de tratamiento de aguas residuales y ésta se deposita en un tanque

receptor de aproximadamente 15 m³, insuficiente para el volumen de aguas residuales generado por la población, por lo que se desborda y por orografía escurre hacia el río ocasionando daños al ecosistema. Aunado a esto, el cuerpo de agua es empleado como área recreativa por la comunidad y para la pesca de especies nativas como lo son los peces denominados localmente como “barrigones” empleados para alimento de las familias en la comunidad (Marín-Muñiz, 2016). Por lo anterior la entrada de aguas contaminadas al río denota un posible foco de infección para los habitantes y daños al ecosistema acuático, entre otros.

Uno de los problemas principales que presenta la localidad de Pastorías es la contaminación del río Topiltepec, esta comunidad, aunque cuenta con sistema de alcantarillado desde el año 2013, no tiene un sistema de tratamiento de aguas residuales y ésta se deposita en un tanque receptor de aproximadamente 15 m³, insuficiente para el volumen de aguas residuales generado por la población, por lo que se desborda y por orografía escurre hacia el río ocasionando daños al ecosistema. Aunado a esto, el cuerpo de agua es empleado como área recreativa por la comunidad y para la pesca de especies nativas como lo son los peces denominados localmente como “barrigones” empleados para alimento de las familias en la comunidad (Marín-Muñiz, 2016). Por lo anterior la entrada de aguas contaminadas al río denota un posible foco de infección para los habitantes y daños al ecosistema acuático, entre otros.

El sistema de humedales construidos de flujo horizontal, consta de 12 celdas de 4 m de largo por 0.85 m de ancho y 0.65 de profundidad cada una de ellas, para un área efectiva de tratamiento de 40 m², estas estuvieron sembradas con plantas ornamentales: (*Canna hybrids*, *Iris germánica*, *Anthurium* sp., *Spathiphyllum wallisii*, *Zingiber spectabile* y *Alpinia purpurata*.), cada 30 cm de distancia en ambos sentidos, para un total de 408 plantas sembradas en esta proporción; colectadas en su estado natural cerca de la zona de estudio. Se emplearon botellas de PET recicladas en total 36 toneladas, obtenidas en cafeterías y escuelas de la zona de Actopan, Veracruz. La construcción y monitoreo de la planta de tratamiento de aguas residuales se desarrolló con participación comunitaria de todos los interesados, y el cuidado del humedal y la producción de plantas ornamentales, se dio por medio de un grupo de mujeres organizadas por la agencia municipal del Pastorías, Actopan,

Veracruz, y capacitadas por el Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo y la Lic. Graciela Nani González, de enero a Octubre de 2018, con la finalidad de que dieran mantenimiento al HC y produjeran plantas ornamentales y flores de interés comercial, como estrategia económica para la generación de ingresos adicionalmente a la ecotecnología. En este humedal construido se tratan 6,240 L de aguas diariamente, en un mes se tratarían 187,200 l que permitirían abastecer de agua 1883 has. con superficie de producción agrícola, en la zona de Actopan, Veracruz.

7.3 Metodología

En este estudio, fue necesario calcular el valor de infraestructura del HC que se construyó en la comunidad de Pastorías, municipio de Actopan, Veracruz. Esto requirió un método de valoración, y se eligió el método costo-beneficio para determinar la viabilidad y factibilidad del proyecto. A diferencia de una evaluación de valor público, que intenta capturar el valor económico total de las soluciones de infraestructura (Talberth et al. 2013), solo la capacidad de tratamiento de aguas residuales, este método valora directamente la viabilidad del humedal construido en este caso de estudio como modelo de negocio.

Toda nueva implementación de tecnología tiene un riesgo de rendimiento asociado, que a menudo se mitiga con la proyección de estudios piloto (Dimuro et al., 2014). Como se indicó anteriormente, el humedal construido para este estudio tiene el costo del estudio y fue incluido en los resultados financieros.

El método de costo-beneficio se puede utilizar para determinar tanto el valor de un activo o el de un servicio, así como el valor de la infraestructura. (Gómez-Baggethun & Barton 2013; de Groot et al., 2002).

Por lo cual, la siguiente fase de la investigación consiste en la realización de un análisis costo beneficio con base en la Guía Europea para la realización del análisis coste-beneficio. Según Rendón (2014) un análisis costo-beneficio es una técnica de interpretación de datos, que se realiza con base en los informes financieros de un proyecto ejecutado, para tener una expectativa de la viabilidad y pertinencia de la evaluación competitiva y estratégica de este, con la finalidad de:

- Demostrar la confiabilidad y estabilidad del proyecto de cara a la financiación por parte de terceros.
- Demostrar que existe un área de oportunidad en la ejecución de un proyecto de esta naturaleza.
- Búsqueda de personas y entidades interesadas en la realización de nuevos proyectos similares o la expansión del mismo.
- Búsqueda de recursos del estado o de entidades privadas.

Previamente a la realización de la evaluación financiera se debe contar con:

- Idea del proyecto.
- Análisis del entorno (Económicos, Socioeconómicos, Tecnológicos, Factores ambientales).
- Situación actual del mercado (Análisis de la industria, Clientes, Competencia).
- Líneas de negocio, de producto, servicios, clientes y distribución.
- Producción (Recursos).
- Estados financieros o Proyección financiera.

7.4 Resultados

7.4.1. Inversión inicial

Strauch (2002) define como la cantidad de dinero que se necesita para iniciar operaciones del proyecto. Incluirá todos los activos fijos, tangibles e intangibles, que se necesitan para iniciar las operaciones del proyecto en cuestión.

7.3.2. Capital de trabajo.

Santana (2015) define el capital de trabajo como el recurso económico adicional, diferente de la inversión inicial, que se requiere para poner en marcha la empresa. Sirve para financiar la primera producción de la empresa.

- Se calcula: Comparando los egresos con los ingresos por una unidad de tiempo, que puede ser semanal, quincenal o mensual, anual., etc.

Tabla 7.1 Inversión inicial

CONCEPTOS	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	MONTOS PROGRAMA		PARTICIPACIÓN CIUDADANA	TOTAL
ACTIVO FIJO							
COSTO DE MATERIALES	FLETE	1	\$543,661.50	\$543,661.50	\$0.00	\$543,661.50	\$543,661.50
INTALACIONES HIDROSANITARIAS	LOTE	1	\$9,997.00	\$9,997.00	\$9,997.00		\$9,997.00
MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN SEDIMENTADOR	LOTE	1	\$37,584.50	\$37,584.50	\$37,584.50		\$37,584.50
MATERIALES CONST. DE CELDAS	LOTE	1	\$109,077.00	\$109,077.00	\$109,077.00		\$109,077.00
TOTAL ACTIVO FIJO				\$156,658.50	\$543,661.50		\$700,320.00
ACTIVO DIFERIDO							
MANO DE OBRA	PRESUPUESTO	1	\$29,250.00	\$29,250.00		\$29,250.00	\$29,250.00
TOTAL ACTIVO DIFERIDO				\$0.00			\$29,250.00
CAPITAL DE TRABAJO							
AGUA RESIDUAL	LOTE	1	\$2,500.00		\$0.00	\$2,500.00	\$2,500.00
PLANTAS ORNAMENTALES	LOTE	1	\$576.00	\$576.00	\$576.00	\$0.00	\$576.00
TOTAL CAPITAL DE TRABAJO					\$157,234.50	\$575,411.50	\$761,896.00
TOTAL				\$730,146.00	\$313,893.00	\$1,119,073.00	\$1,491,466.00

7.3.3. Financiamiento

Será la descripción del mecanismo por el cual se consiguió el capital suficiente para cubrir con los recursos específicos que requiere el negocio.

7.3.4. Ingresos, Costos y Gastos.

Aquí se debe de incluir:

- Los ingresos de producción: unidades vendidas y precio de venta.
- Costos de producción: mano de obra, materiales, maquinaria,
- Gastos totales: venta, administrativos y financieros (aquí se incluirá el monto de pago de todos los gastos, valorando incluso aquellos que sean aportados por la comunidad ya que este proyecto es de carácter social y comunitario).

Para el manejo de un humedal construido no es necesaria la instalación eléctrica para bombeo del agua, pues es suministrada por gravedad desde los sedimentadores hacia el humedal, al ser adquirido el lote del lugar, no se generan costos de renta, el humedal no genera salarios,

solo costos de insumos al ser ingresados al humedal, el único costo es el de ingresar las plantas.

Tabla 7.2 Ingresos

CONCEPTO (MERCANCIAS)	PRESENTACION	COSTO DE INSUMOS	VENTA SEMANAL	COSTO SEMANAL	COSTO MENSUAL	P. VENTA	INGRESO SEMANAL	INGRESO MENSUAL	INGRESO ANUAL
<i>CANNA HYBRIDS</i>	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$120	\$240	\$960	\$11,520
<i>IRIS GERMANICA</i>	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$108	\$216	\$864	\$10,368
<i>ANTHURIUM SP</i>	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$144	\$288	\$1,152	\$13,824
<i>SPATHIPHYLLUM WALLISII</i>	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$96	\$192	\$768	\$9,216
<i>ZINGIBER SPECTABILE</i>	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$96	\$192	\$768	\$9,216
<i>ALPINIA PURPURATA</i>	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$108	\$216	\$864	\$10,368
AGUA TRATADA	LT	\$0.05	37,800	\$1,890.00	\$7,560.00	\$0.28	\$10,395.00	\$41,580.0	\$498,960.0
TOTAL					\$8,136.00	\$672.28	\$11,739.00	\$46,956.0	\$563,472.0

Tabla 7.3 Costo de materia prima

LOTE DE MATERIAS PRIMAS					
CONCEPTO (MERCANCIAS)	PRESENTACION	COSTO DE INSUMOS	CANTIDAD	TOTAL	
<i>CANNA HYBRIDS</i>	UNIDAD	\$	12.00	8	\$96
<i>IRIS GERMANICA</i>	UNIDAD	\$	12.00	8	\$96
<i>ANTHURIUM SP</i>	UNIDAD	\$	12.00	8	\$96
<i>SPATHIPHYLLUM WALLISII</i>	UNIDAD	\$	12.00	8	\$96
<i>ZINGIBER SPECTABILE</i>	UNIDAD	\$	12.00	8	\$96
<i>ALPINIA PURPURATA</i>	UNIDAD	\$	12.00	8	\$96
AGUA RESIDUAL	LT	\$	0.05	50000	\$2,500.00
TOTAL					\$3,076

Tabla 7.4 Costo de insumos

COSTOS DE INSUMOS					
CONCEPTO	PRESENTACION	COSTO	CANTIDAD	TOTAL	
FLETES	UNIDAD	\$	250.00	0.030	\$7.50
HERRAMIENTA	UNIDAD	\$	100.00	0.023	\$2.30
MANO DE OBRA AUXILIARES (2)	JORNAL	\$	200.00	0.010	\$2.00
ENVASES P.E.T	PZA	\$	0.20	1.000	\$0.20

TOTAL	\$12.00
--------------	---------

Tabla 7.5 Costo de mano de obra

COSTOS DE MANO DE OBRA				
CONCEPTO	PRESENTACION	COSTO	CANTIDAD	TOTAL
HERRAMIENTA	UNIDAD	\$ 100.00	75.000	\$7,500.00
MANO DE OBRA MAESTRO	JORNAL	\$ 450.00	15.000	\$6,750.00
MANO DE OBRA AUXILIARES (2)	JORNAL	\$ 500.00	30.000	\$15,000.00
TOTAL				\$29,250.00

Tabla 7.6 Costo fijos

COSTOS FIJOS				
CONCEPTO	IMPORTE MENSUAL	A 2 MESES	A UN AÑO	
RENTA DE LOCAL	\$0.00	\$0.00	\$0.00	
SERVICIO DE LUZ	\$0.00	\$0.00	\$0.00	
SALARIOS (PODA, COLECTA DE FLORES Y MANTENIMIENTO)	\$200.00	\$400.00	\$2,400.00	
TOTAL	\$200.00	\$400.00	\$2,400.00	

7.3.5. Depreciaciones y amortizaciones

La depreciación se refiere a reducción periódica del valor de un bien material o inmaterial y amortización se refiere al valor dado a cada periodo. Por lo tanto, se incluirá:

- El valor original: El costo del concepto en el periodo determinado.
- El porcentaje de la tasa que aumentará.
- Los años que el concepto permanecerá en el proyecto.
- El cargo anual, desprendido del valor total
- Valor residual, el monto total correspondiente a cada periodo contemplando el desgaste.

Tabla 7.7 Depreciaciones de los activos

COSTOS DE DEPRECIACIONES	
---------------------------------	--

ACTIVO FIJO	VALOR ORIGINAL	TASA	AÑOS	DEP ANUAL	VALOR RESCATE
COSTO DE MATERIALES	\$543,661.50	5%	10.00	\$27,183.08	\$271,830.75
INTALACIONES HIDROSANITARIAS	\$9,997.00	5%	10.00	\$499.85	\$4,998.50
MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN SEDIMENTADOR	\$37,584.50	5%	10.00	\$1,879.23	\$18,792.25
MATERIALES CONST. DE CELDAS	\$109,077.00	5%	10.00	\$5,453.85	\$54,538.50
TOTAL	\$700,320.00			\$35,016.00	\$350,160.00

7.3.6. Método de depreciación en línea recta

Este método consiste en tomar cada año, para el activo considerado, un valor de depreciación constante. (Santana, 2015)

Supone que la depreciación anual es la misma para toda la vida útil y, en consecuencia, cada año se reservan valores iguales, de manera que, al finalizar la vida útil, se tenga un fondo de reserva que, sumado al valor de salvamento del bien, alcance para su reposición.

El valor del depósito anual o cargo por depreciación puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$\text{Cargo de depreciación (CD)} = \frac{\text{Costo inicial (CI)} - \text{Valor de Salvamento (VS)}}{\text{Número de año de la vida útil (N)}}$$

7.3.7. Costos Variables y Costos Fijos

Los costos variables se definen como los gastos que cambian en proporción a la actividad de una empresa. Se denominan a veces a nivel de unidad producida, ya que los costos varían según el número de unidades producidas, estos cambian en proporción a la actividad de una empresa. Se denominan a veces a nivel de unidad producida, ya que los costos varían según el número de unidades producidas. (Santana, 2015)

Tabla 7.8 Costos variables

COSTOS VARIABLES	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
LOTE DE MATERIAS PRIMAS	\$ 97,632.00	\$ 102,513.60	\$ 107,639.28	\$ 113,021.24	\$ 118,672.31
TOTAL	\$ 97,632.00	\$ 102,513.60	\$ 107,639.28	\$ 113,021.24	\$ 118,672.31

Los costos fijos se definen como aquellos costos que la empresa debe pagar independientemente de su nivel de operación, es decir, produzca o no produzca debe pagarlos, pueden incluir mano de obra, mantenimiento, entre otros gastos.

Tabla 7.9 Costos fijos

COSTOS FIJOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
RENTA DE LOCAL	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
SALARIOS (PODA, COLECTA DE FLORES Y MANTENIMIENTO)	\$2,400.00	\$2,520.00	\$2,646.00	\$2,778.30	\$2,917.22
TOTAL	\$2,400.00	\$2,520.00	\$2,646.00	\$2,778.30	\$2,917.22

7.3.8. Punto de equilibrio

Número mínimo de productos o servicios que debe vender para que la empresa no pierda dinero, es decir, para que sus ingresos sean iguales a sus costos. El punto de equilibrio se establece en unidades físicas o unidades monetarias. (Santana, 2015)

Para hallar el punto de equilibrio es importante definir el margen de contribución, que es la diferencia entre el precio de venta del producto o servicio y los costos.

Margen de contribución por unidad producida = precio de venta - costo variable unitario.

El punto de equilibrio se calcula resolviendo:

$$\text{Punto de equilibrio del periodo} = \frac{\text{Total de costos fijos del periodo}}{\text{Margen de contribución unitaria}}$$

$$\text{Punto de Equilibrio Unidades} = \frac{\text{Costos Fijos X Unidades Producidas}}{\text{Ventas Totales} - \text{Costos Variables}}$$

$$\text{Punto de Equilibrio Monetario} = \frac{\text{Costos Variables}}{1 - (\text{Costos fijos} / \text{Ventas Totales})}$$

Tabla 7.10 Punto de equilibrio

CONCEPTOS / AÑO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
VENTAS	\$563,472.00	\$591,645.60	\$621,227.88	\$652,289.27	\$684,903.74
COSTOS FIJOS	\$2,400.00	\$2,520.00	\$2,646.00	\$2,778.30	\$2,917.22

COSTOS VARIABLES	\$97,632.00	\$102,513.60	\$107,639.28	\$113,021.24	\$118,672.31
COSTOS TOTALES	\$100,032.00	\$105,033.60	\$110,285.28	\$115,799.54	\$121,589.52
PUNTO DE EQUILIBRIO \$	\$2,903.00	\$3,048.15	\$3,200.56	\$3,360.58	\$3,528.61
PUNTO DE EQUILIBRIO %	0.52%	0.52%	0.52%	0.52%	0.52%

7.3.9. Estado de resultados

Estado financiero que muestra la ganancia (utilidad) o pérdida de un periodo determinado, es decir, la rentabilidad del negocio desde un punto de vista operativo. La proyección del estado de resultados del humedal artificialmente construido se realiza a 5 años, para realizar debidamente el estado de resultados y el balance pro forma deben desarrollarse primero los presupuestos, de ahí elaborar el flujo para posteriormente realizar el estado financiero a una fecha determinada futura. Para esto es necesario contar con el detalle de los presupuestos. (Santana, 2015)

Tabla 7.11 Estado de resultados

CONCEPTOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(+) VENTAS	\$563,472.00	\$591,645.60	\$621,227.88	\$652,289.27	\$684,903.74
COSTOS FIJOS	\$2,400.00	\$2,520.00	\$2,646.00	\$2,778.30	\$2,917.22
COSTOS VARIABLES	\$97,632.00	\$102,513.60	\$107,639.28	\$113,021.24	\$118,672.31
(-) COSTOS TOTALES	\$100,032.00	\$105,033.60	\$110,285.28	\$115,799.54	\$121,589.52
(=) UTILIDAD BRUTA	\$463,440.00	\$486,612.00	\$510,942.60	\$536,489.73	\$563,314.22
(-) DEPRECIACION	\$35,016.00	\$36,766.80	\$38,605.14	\$40,535.40	\$42,562.17
(=) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$428,424.00	\$449,845.20	\$472,337.46	\$495,954.33	\$520,752.05
(-) IMPUESTOS	\$68,547.84	\$71,975.23	\$75,573.99	\$79,352.69	\$83,320.33
(=) UTILIDAD DEL EJERCICIO	\$359,876.16	\$377,869.97	\$396,763.47	\$416,601.64	\$437,431.72

7.3.10. Flujo de efectivo

El flujo de efectivo muestra todos los ingresos y egresos, actuales y futuros, que tiene o tendrá un plan del proyecto en cuestión.

El flujo de efectivo debe considerar tres aspectos:

- Ingresos: Total de cantidad vendida multiplicada por el precio unitario de venta.

- Egresos: Suma de costos de fabricación + costos administrativos + costos de comercialización.
- Financiamiento: Amortizaciones de intereses y capital.

Para la creación del flujo de efectivo se calcula el año 0, el cual está constituido por la compra del activo fijo, el activo diferido, y la compra del capital de trabajo, desglosada en el cuadro de inversión. Después se inicia actividades del proyecto, por lo cual comienzan los gastos de operación; el flujo de efectivo del año 1 corresponde a las ventas de las plantas ornamentales y al agua tratada más el valor de rescate, a esta suma se le realiza la diferencia de los egresos, los cuales serán los costos fijos y variables.

Tabla 7.12 Flujo de efectivo

CONCEPTOS / AÑO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(+) VENTAS	\$0.00	\$563,472.00	\$591,645.60	\$621,227.88	\$652,289.27	\$684,903.74
(+) VALOR DE RESCATE	\$0.00	\$350,160.00	\$350,160.00	\$350,160.00	\$350,160.00	\$350,160.00
(=) INGRESOS TOTALES	\$0.00	\$913,632.00	\$941,805.60	\$971,387.88	\$1,002,449.27	\$1,035,063.74
COSTOS FIJOS	\$0.00	\$2,400.00	\$2,520.00	\$2,646.00	\$2,778.30	\$2,917.22
COSTOS VARIABLES	\$0.00	\$97,632.00	\$102,513.60	\$107,639.28	\$113,021.24	\$118,672.31
(=) COSTOS TOTALES	\$0.00	\$100,032.00	\$105,033.60	\$110,285.28	\$115,799.54	\$121,589.52
COMPRA ACTIVO FIJO	\$700,320.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
COMPRA ACTIVO DIFERIDO	\$29,250.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
COMPRA CAPITAL DE TRABAJO	\$761,896.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
(=) SALDO FINAL	-\$1,491,466.00	\$813,600.00	\$836,772.00	\$861,102.60	\$886,649.73	\$913,474.22

7.3.11. TIR, VAR y PRD

Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) de una inversión está definida como la tasa de interés con la cual el Valor Actual Neto (VAN) es igual a cero. (Figura 10).

$$\text{Rentabilidad} = \text{Utilidad} / \text{Costo de Inversión} \times 100$$

Índices para determinar la rentabilidad del plan del proyecto:

- La Relación Benéfico Costo: que deberá ser mayor a 1.
- La Tasa Interna de Retorno: deberá ser mayor a la tasa de interés a largo plazo del mercado.

- El Valor Actual Neto: que debe ser positivo.
- El plazo de recuperación descontado determina el momento en que se recupera el dinero de una inversión, teniendo en cuenta los efectos del paso del tiempo en el dinero.

VNA o VAN, es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión.

Al flujo de caja proyectado, se le hacen algunas modificaciones para llegar al flujo de fondos y luego se le aplica una tasa de descuento para estimar el valor del proyecto en el presente para calcular el Valor Neto (VAN). (Santana, 2015)

El Valor Actual Neto = Valor Actualizado De Los Ingresos (Incluyendo el valor residual del proyecto) - Valor Actualizado de los ingresos (Incluyendo la inversión inicial).

Santana (2015) explica que la forma más sencilla de calcular el PRD es a través de una hoja de cálculo. Esta es la fórmula para calcularlo:

$$PRD = a + \frac{I_0 - b}{Ft}$$

Donde:

a: Es el número del periodo inmediatamente anterior hasta recuperar el desembolso inicial

I_0 : Es la inversión inicial del proyecto

b: Es la suma de los flujos hasta el final del periodo «a»

Ft : Es el valor del flujo de caja del año en que se recupera la inversión.

Y finalmente se interpretarán los resultados a fin de proponer un modelo de Gestión descentralizada de aguas residuales para las comunidades rurales de México.

Tabla 7.12 Flujo de efectivo

AÑO	INGRESOS	COSTOS	FLUJO DE EFECTIVO	TASA (1+t)-n	INGRESOS ACTUALIZADOS	EGRESOS ACTUALIZADOS	FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO
0	\$0.00	\$1,491,466.00	-\$1,491,466.00	\$1.00	\$0.00	\$1,491,466.00	-\$1,491,466.00

1	\$563,472.00	\$100,032.00	\$463,440.00	\$0.91	\$512,247.27	\$90,938.18	-\$1,028,026.00
2	\$591,645.60	\$105,033.60	\$486,612.00	\$0.83	\$488,963.31	\$86,804.63	-\$922,992.40
3	\$621,227.88	\$110,285.28	\$510,942.60	\$0.75	\$466,737.70	\$82,858.96	-\$812,707.12
4	\$652,289.27	\$115,799.54	\$536,489.73	\$0.68	\$445,522.35	\$79,092.65	-\$696,907.58
5	\$684,903.74	\$121,589.52	\$563,314.22	\$0.62	\$425,271.33	\$75,497.53	-\$575,318.05
TOTAL	\$3,113,538.49	\$2,044,205.95	\$1,069,332.55		\$2,338,741.97	\$1,906,657.95	

VAN	\$	432,084.02
TIR		20.40%
B/C	\$	1.23
PRD		6.02

El proyecto es viable de acuerdo a la evaluación realizada, con los indicadores presentados, se tiene que el VAN mayor que cero, lo que significa que el proyecto además de la recuperación, las utilidades y ganancias, se tendrá al final de los 5 años una ganancia extra, un excedente de dinero. Se tiene un TIR mayor que la tasa de evaluación, lo que indica viabilidad. Y por último la relación Beneficio-Costo es mayor que 1, lo que significa, que por cada peso invertido se va a recuperar y se tendrá un excedente de 0.23 pesos. El PRD nos indica que dentro de 6.02 periodos se recuperará la inversión total del proyecto.

7.5 Conclusiones

El uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales no viene sin costos. Estos costos incluyen el capital o inversión inicial, los costos de operación, los costos de materia prima, entre otros. Sin embargo, para evaluar los beneficios de estos sistemas se han usado métodos de valoración que estiman la disposición a pagar por mejoras en la calidad del agua, o por el consumo de agua sin contaminantes. Existe cierta dificultad para valorizar los beneficios del tratamiento de aguas residuales, en este sentido, los beneficiados difieren en el valor económico de un litro de agua tratada.

Para tener una idea de negocio del humedal, se propuso generar valor económico por medio de la venta de plantas ornamentales que florecen dentro del humedal, estas plantas tienen un periodo de crecimiento de 3 meses en promedio, es decir, existen 4 cortes o cosechas de flores a lo largo de un año fiscal. El humedal tiene en total una salida promedio trimestral de 144 plantas y, en consecuencia, un aproximado de 576 plantas ornamentales. Dentro de los

costos operativos se consideran la obtención de las plantas ornamentales típicas de la región y las labores de mantenimiento y poda. Al ser de carácter comunitario, no existen más costos involucrados dentro del modelo económico propuesto.

El presupuesto inicial de inversión es de \$1,491,466.00, dentro de lo que está considerado los activos fijos, los activos diferidos, el capital de trabajo (agua residual y plantas ornamentales típicas de la región). Dentro de los costos de operación, se consideran \$200.00 mensuales a razón de \$2,400.00 y \$8,336.00 de costos de adquisición de las plantas ornamentales, con un costo anual de \$97,632.00, con un total de \$100,032.00, pero en contraste con los ingresos por la venta de las plantas ornamentales y el agua residual tratada por la cantidad de \$563,472.00, con la diferencia de la depreciación anual y los impuestos se tiene una utilidad del ejercicio de \$359,876.16.

Dentro del punto de equilibrio se indica el porcentaje de 0.52% de ventas que se debe tener para cubrir los costos totales, sin que se tenga ganancias, es lo mínimo que se debe vender en porcentaje y en valor (\$) para no tener pérdidas. El porcentaje de ventas es mínimo, para sostener en funcionamiento integral del humedal, sin embargo al ser una alta inversión el valor de construcción del humedal, se requiere al menos 6 años para recuperar la inversión, El proyecto es viable de acuerdo a la evaluación realizada, con los indicadores presentados, se tiene que el VAN mayor que cero (\$432,084.02), lo que significa que el proyecto además de la recuperación, las utilidades y ganancias, se tendrá al final de los 5 años una ganancia extra, un excedente de dinero. Se tiene un TIR (20.40%⁹ mayor que la tasa de evaluación (10%), lo que indica viabilidad. Y por último la relación Beneficio-Costo es mayor que 1, lo que significa, que por cada peso invertido se va a recuperar y se tendrá un excedente de 0.23 pesos.

CAPITULO VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones y recomendaciones

El uso de residuos de PET como medio de soporte resultó idóneo, favoreciendo la remoción de contaminantes y el buen desarrollo de las plantas, siendo una innovación en el uso de sustratos en Humedales singenieriles, lo anterior representaría la no inversión de recursos económicos en al momento de ser implementados, además que contribuye notablemente a disminuir los impactos que causa el PET en el medio ambiente, por lo que debe de ser considerado en futuros diseños tanto a nivel mesocosmos como tamaño real.

Los resultados RVG, mostró resultados favorables con respecto a remoción nitratos, fosfatos, demanda bioquímica de oxígeno y bacterias como Coliformes fecales. El uso de estos sustratos combinados con otros de origen pétreo podría ser considerado en futuros estudios para tener un panorama completo de su eficiencia de remoción y para el desarrollo de plantas tanto a nivel microcosmos como macrocosmos, así como en estudios de diferentes especies de plantas que puedan adaptarse a estos sistemas usando como medio de soporte el PET.

Los resultados obtenidos en este estudio son congruentes con los reportados por otros autores en que los humedales verticales, son eficientes en la remoción de contaminantes como DBO₅, P-PO₄, N-NO₃ y CF.

En la remoción de contaminantes como nitratos, fosfatos, demanda bioquímica de oxígeno y bacterias como Coliformes fecales en CW sembrados con plantas ornamentales, *Anthurium* sp, *Zantedeschia aethiopica*, y *Spathiphyllum wallisi* son eficientes. Con esto se demuestra la capacidad de adaptación y de crecimiento de estas plantas en humedales. Por lo anterior se recomienda el uso de estas plantas ornamentales en un macrocosmos y mesocosmos de humedales para tratar aguas residuales en comunidades rurales con problemas de tratamiento de aguas residuales. Adicionalmente, la producción de flores nos indica que estas plantas pueden convertirse en una fuente de ingreso económico para los cuidadores de humedales y puede contribuir a que estas ecotecnologías sean aceptadas con mayor impacto paisajístico en las sociedades donde se requieran este tipo de soluciones. La *Lavandula* sp, no logro adaptarse a los sistemas de humedales, por lo que no se recomienda usarla en futuros diseños como vegetación en este tipo de sistema.

El uso de plantas ornamentales como *Anthurium* sp., *Zantedeschia aethiopica*, y *Spathiphyllum wallisii*, posibilita el reúso de agua residual para áreas verde, y agricultura, adicional mente el uso de este tipo de plantas genera un paisaje estético y permite una mayor aceptación de estos sistemas en comunidades. Por otra parte, se puede usar como cultivo de plantas ornamentales y obtener un beneficio económico de estos sistemas.

Además, con esto se demostró que el uso de PPR y PET, como medio de soporte son una alternativa que si es empleada en humedales a tamaño real permitirá ahorrar hasta un 80% los costos de implementación, por esto al encontrarse las materias en abundancia en diferentes regiones cercanas a ríos en caso PPR y en el caso del PET se genera millones de esto diariamente en todo el mundo, por lo cual se deben de considerar en futuros diseños y aplicarlo a gran escala. Por otra parte, si bien la GVR es un sustrato eficiente, su valor comercial es alto por su uso como material de contracción por lo que su uso en estos sistemas se puede ver limitado a gran escala.

Al final de este trabajo, las siguientes contribuciones han sido identificadas:

- 1) Un nuevo medio se postor (PET) que puede ser empleado en Humedales Ingenieriles.
- 2) Se amplió el conocimiento sobre las intenciones que realizan las plantas ornamentals terrestres adaptadas a condiciones HI en el tiramiento de agua residual, así como nuevo grupo de plantas que pueden ser empleadas en futuros diseños tamaño real.

Los resultados obtenidos han sido presentados en un congreso nacional y un congreso internacional y revistas pertenecientes al índice de JCR Los congresos seleccionados son acordes al tema de Tesis Doctoral. La evidencia de estos trabajos se presenta a continuación:

Productividad

CONGRESOS

L.C. Sandoval Herazo, A. Alvarado Lassman y J. Luis Marín Muñiz. (2017). Desinfección de aguas residuales y producción de flores en microsistemas de humedales, Cartel. IV Congreso Mexicano de Ecología. México. (3 Semestre, II-2017)



La Sociedad Mexicana de Ecología

Otorga la presente

Constancia

A:

Luis Carlos Sandoval Herazo

Por su entusiasta participación durante el VI Congreso Mexicano de Ecología celebrado el 30 de Julio al 4 de Agosto del 2017 en la ciudad de León, Gto.

Dra. Valeria Souza
Presidente de La Sociedad Mexicana de Ecología



La Sociedad Mexicana de Ecología

Otorga la presente constancia a:

L.C. Sandoval Herazo, A. Alvarado Lassman y J. Luis Marian Muñiz

con el cartel titulado:

DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y PRODUCCIÓN DE FLORES MEDIANTE HUMEDALES
CONSTRUIDOS A NIVEL MICROCOSMO

durante el VI Congreso Mexicano de Ecología celebrado el 30 de Julio al 4 de
Agosto del 2017 en la ciudad de León, Gto.

Dra. Valeria Souza
Presidente de La Sociedad Mexicana de Ecología

Luis Carlos Sandoval. Ponencia magistral titulada: Tratamiento de aguas residuales y producción de flores en humedales construidos, del trol del marco XXX Reunión Científica Tecnológica-Forestal y Agropecuaria, Que se levo acabo los días 13 y 14 de Noviembre de 2017, en la ciudad de Huatusco, Veracruz, México. (3 Semestre, II-2017)

El Comité Organizador del 1er Simposio en Biotecnología Ambiental y Agroalimentaria

OTORGA LA PRESENTE

Constancia

al: **Dr. Luis Carlos Sandoval**

Por su PONENCIA MAGISTRAL TITULADA "Tratamiento de aguas residuales y producción de flores en Humedales construidos" Dentro de Marco del XXX Reunión Científica-Tecnológica-Forestal y Agropecuaria, que se llevó a cabo los días 13 y 14 de Noviembre de 2017 en la Ciudad de Huatusco de Chicuelor, Veracruz.


Ing. David Gerardo Velasco González
Director del Instituto Tecnológico Superior de Huatusco


Dr. Benigno Rodríguez Padrón
Director de la Universidad Autónoma Chapingo
UNCA-FRUO


Dr. Eduardo Carraón Muñoz
Rector de la Universidad Politécnica de Huatusco

MEMORIAS DE CONGRESO

Sandoval-Herazo, L.; Marín-Muñiz, J.L.; Alvarado, A.; Castelán, R.; Ramírez, D. (2016). Diseño de un Mesocosmo de Humedal Construidos con Materiales Alternativos Para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Comunidad de Pastorías Actopan, Ver. In *Congreso Interdisciplinario de Ingenierías*.35. Available online: https://www.researchgate.net/publication/318711824_Diseño_de_un_Mesocosmo_de_Humedal_Construidos_con_Materiales_Alternativos_Para_el_Tratamiento_de_Aguas_Residuales_en_la_Comunidad_de_Pastorías_Actopan_Ver. (1 Semestre, II-2016)

Copyright 2016 Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Congreso Interdisciplinario de Ingenierías
Instituto Tecnológico Superior de Misantla 2016

Misantla, Veracruz, México
Noviembre 17-18, 2016

Diseño de un Mesocosmo de Humedal Construidos con Materiales Alternativos Para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Comunidad de Pastorías Actopan, Ver

Luis Carlos Sandoval Herazo, M.D.R.S.¹, Dr. José Luis Marín-Muñiz², Dr. Alejandro Alvarado Lasman³, Raul Castelán Estudiante de Maestría en paisaje y Turismo rural⁴, Estudiante de ingeniería. Donato Ramírez López⁵.

¹ Luis Carlos Sandoval-Herazo, Estudiante de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería del Tecnológico de Orizaba. ing.luisCarlosSandoval@gmail.com

² El Dr. José Luis Marín-Muñiz, es Profesor-Investigador de la Academia en Desarrollo Regional Sustentable. El colegio de Veracruz. soydran@hotmail.com

³ El Dr. Alejandro Alvarado-Lasman, es Profesor-Investigador de la División de Posgrados en el Tecnológico de Orizaba. lasman@prodigy.net.mx

⁴ Raul Castelán Cabaña es estudiante de Maestría en Paisaje Rural del el Colegio de Postgraduados, sede Córdoba. castelranr@gmail.com

⁵ Donato Ramírez López es estudiante de la carrera de ingeniería civil. Donato Ramírez López, es alumno en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla. 14260330@itism.edu.mx

Resumen - La contaminación de aguas es una situación creciente en el mundo. Para atacar este problema, los humedales construidos (HC) son una opción que ha tomado fuerza en las últimas dos décadas, implementándose en el tratamiento de aguas residuales domésticas, en comunidades en su mayoría rurales. Los estudios a nivel piloto que se han implementado en HC a nivel macrocosmos, son realizados con materiales tradicionales como cemento, bloque, ladrillos entre otros, dejando entre dicho la sustentabilidad del proceso de diseño y construcción de estos. En este estudio se presenta el diseño de un HC con materiales alternativos y tradicionales, pero con una base artesanal a partir de materiales orgánicos de difícil infiltración, además utilizando plantas ornamentales que han sido ampliamente evaluadas y probadas en su eficiencia de remoción de contaminantes, lo cual resulta en una propuesta de diseño de un HC de menor costo que los tradicionales, más estético y, novedoso, que aprovecha materiales de la región de estudio "Pastorías, Actopan, ver", para la sustitución de la base y obteniendo un diseño amigable con el medio ambiente. Marcando pautas en nuevos diseños, propuestas de materiales y plantas que pueden ser usados para la construcción de estos sistemas de tratamiento de aguas.

Palabra(s) clave: Aguas residuales, Comunidades, Contaminantes, Humedales.

Abstract - Water Pollution is a situation ever increasing in the world. To face this problem, artificial or constructed wetlands implementation (HC) are an option that has gained strength in recent two decades in the treatment of domestic sewage in rural communities overall. The pilot studies are implemented in macrocosm level have been developed with traditional materials such as cement, block, bricks among others, but the sustainability process design and construction of these has been questionable. In this study the design of the HC involves traditional materials such as block, bricks, cement, but with a craft base designed with a mixture of organic materials of low infiltration and using ornamental flowering plants that have been reported as excellent in pollutants removal, obtaining as a result, a sustainable HC for "Pastorías, Actopan" replacing the base design with an economic, esthetic and environmentally friendly system.

Key words - Communities, Waste, Water pollution, Wetlands.

1. Introducción

El agua es una prioridad esencial para lograr el desarrollo de cualquier población. Este recurso es de vital importancia, sin embargo, el crecimiento poblacional y su uso desmedido ha favorecido su contaminación. La calidad del recurso es un problema en comunidades rurales, por ello existe la necesidad de crear alternativas que sean ecológicamente amigables con el ambiente. De acuerdo a Conagua (2014), a nivel nacional existen 4904 plantas de tratamiento, de las cuales, 2287 están instaladas en áreas urbanas y 2617 tratan aguas residuales industriales. Este número de sistemas solo tratan el 50 % de las aguas residuales urbanas y el 29 % de las aguas industriales. Para el caso de comunidades rurales menores a 2500 habitantes, estas pocas veces son consideradas para la instalación de tecnologías para tratar sus aguas. (Marín et al, 2016). Por lo anterior, es habitual que en comunidades rurales las descargas de agua residual sean un foco de posibles infecciones, y más aún cuando estas son vertidas a los cuerpos de agua que también son utilizados como sitios recreativos o donde el cuerpo de agua es la fuente principal del recurso para las actividades diarias (Zurita et al., 2011).

CAPÍTULOS DE LIBRO

Sandoval-Herazo L.C., Alvarado-Lassman A., Marín-Muniz J.L., Méndez-Contreras J.M., Martínez-Sibanca A & Aguilar-Lasserre A. (2018). Desarrollo de Plantas Ornamentales Terrestres en Microcosmos de Humedales Constraídos. *Investigación en el Sistema de Educación Superior Tecnológica del Estado de Veracruz, 2018. 1a. Edición. Transferencia e Innovación, Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. Xalapa-Enríquez Veracruz, México.124-129. (4 Semestre, I-2018).*

Desarrollo de Plantas Ornamentales Terrestres en Microcosmos de Humedales Construidos

Sandoval-Herazo L.C.¹, Alvarado-Lassman A.¹, Marín-Muniz J.L.², Méndez-Contreras J.M.¹, Martínez-Sibaja A.¹, Aguilar-Lasserre A.¹

¹División de Estudios de Posgrados e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba, Oriente 9, Emiliano Zapata Sur, C.P. 94320, Orizaba, Veracruz, México.
²El Colegio de Veracruz, Carrillo Puerto No. 26, C.P. 91060, Xalapa, Veracruz, México.
^{*}Autor para correspondencia: lsandovalh@gmail.com

Resumen— El uso de humedales construidos (HC) en países en vías de desarrollo es una biotecnología poco empleada para el saneamiento de agua en comunidades rurales, a pesar de ser una eco-tecnología de bajo costo y fácil operación, una de las causas de su poca aceptación es su apariencia estética. El objetivo de este trabajo fue evaluar el desarrollo de plantas ornamentales terrestres (*Anthurium sp.*, *Lavandula sp.*, *Spathiphyllum wallisii* y *Zantedeschia aethiopicum*) en microcosmos de HC plantados en sustratos de piedra porosa de río, grava volcánica roja y PET, y su efecto en la demanda bioquímica de oxígeno, con la finalidad de mejorar la apariencia estética de humedales. Se emplearon 30 microcosmos como humedales de flujo vertical, con un tiempo de retención hidráulica de tres días, un individuo de cada planta fueron sembrados en los sistemas en duplicados para cada sustrato y dos unidades de cada medio se emplearon como control sin vegetación, se midió el crecimiento vegetal y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), pH, sólidos disueltos totales (STD), conductividad eléctrica y temperatura tanto en la entrada como en la salida de los sistemas, cada 15 días durante nueve meses de experimentación. Se encontró que las plantas lograron adaptarse y crecieron saludables en los tres medios de soporte con excepción de la *Lavandula sp.* que no sobrevivió en ninguno de los anteriores, en cuanto a la floración en promedio se produjeron tres flores por planta. En cuanto a la remoción DBO₅ no se encontraron diferencias significativas entre los tres sustratos (60-85 %), los STD se redujeron significativamente (45-60%). Lo anterior nos permite afirmar que el uso de plantas ornamentales y medios de soportes poliméricos son una alternativa viable tanto económica como ecológica para ser implementadas en estudios a tamaño real y solucionar problemas de contaminación de aguas residuales en comunidades rurales; y adicionalmente dan una mejor apariencia estética a este tipo de sistemas. Nuevas investigaciones encaminadas a evaluar policultivos de estas plantas y sustratos híbridos son necesarios para tener un panorama completo de su funcionamiento e interacción bioquímica en HC tanto a nivel macrocosmos como tamaño real.

Palabras clave— Aguas Residuales; humedales construidos; plantas ornamentales; PET; piedra porosa de río; grava volcánica roja.

I. INTRODUCCIÓN

En escases del agua en cantidad y calidad es un problema que enfrenta el mundo [1]. En países de ingresos económicos bajos el 80% del agua residual es vertida a los cuerpos de agua residuales sin ningún tipo de tratamiento [2], si tenemos en cuenta que el 90% de los países latino americanos hacen parte

Este estudio se llevó a cabo en la localidad de de este grupo.

Lo anterior se debe a los altos costos que acarrea en la implementación de sistemas de tratamientos convencionales como lodos activados y lagunas de oxidación, tanto en construcción como manejo [3]. Tan solo en México entre el 60-70% de las aguas residuales generadas no reciben ningún tipo de tratamiento, son arrojadas a ríos, lagos y acuíferos causando fuerte problemas de contaminación [4]. Una estrategia viable para el tratamiento de aguas residuales son los Humedales Construidos (HC), estos sistemas ingenieriles de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales han sido ampliamente evaluado en países de climas templados, estos son celdas con sustrato que generalmente son tezontle y arena. Estas plantas suelen ser macrofitas típicas de humedales naturales, capaces de sobrevivir en condiciones de inundación como la *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Cyperus papyrus* [4], [5], [7] [8], [9], donde el agua fluye, y a través de procesos bioquímicos se renuevan contaminantes del agua [4], [5]. Estos sistemas además de ser de bajo costo de implementación, operación y altamente eficaces en la remoción de contaminantes han sido poco empleados en países tropicales en vías de desarrollo [4], [6].

La mayor parte de las investigaciones sobre el uso de plantas en HC ha sido macrofitas típicas de humedales y se han llevado a cabo en climas templados y hay pocos estudios sobre el uso de plantas ornamentales terrestres adaptadas o condiciones de humedales tanto en regiones de climas templados y mucho menos en climas tropicales como México, donde la condiciones medioambientales (luz, temperatura más calidad) pueden proporcionar condiciones adecuadas para el desarrollo rápido y que pueden contribuir a una absorción significativa de contaminantes [4], [10], [11]. Así como medios sustratos alternativos que puedan reducir impacto ambiental como materiales poliméricos o fácil obtención en las zonas de estudio y que a la vez generen costo de invención \$ 0 [1], [3].

El objetivo de este trabajo es evaluar el desarrollo de plantas ornamentales terrestres (*Anthurium sp.*, *Lavandula sp.*, *Spathiphyllum wallisii* y *Zantedeschia aethiopicum*) en microcosmos de humedales construidos plantados como en sustratos de piedra porosa de río, grava volcánica roja y PET. Para mejorar la calidad de aguas residuales domésticas, específicamente con respecto a la demanda bioquímica de oxígeno y nitratos.

ARTÍCULOS

Sandoval, L., Alvarado-Lassman, A., Nani, G., & Nakase, C., (2019). Influence of light intensity on growth and flowering ornamental plants in constructed wetlands. *Renewable Energy, Biomass & Sustainability*, 1(1), 39-52. (7 Semestre, II-2019).



INFLUENCE OF LIGHT INTENSITY ON GROWTH AND FLOWERING ORNAMENTAL PLANTS IN CONSTRUCTED WETLANDS

Sandoval, L., Alvarado-Lassman, Alejandro., Nani, G., Nakase-Rodríguez, C.,
Division of Research, Postgraduate Studies and Innovation, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Misantla, Veracruz, México.
Division of Research, Postgraduate Studies and Innovation, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México.
Department of Engineering in Business Management, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Misantla, Veracruz, México
*Autor de correspondencia: lcsandovalh@gmail.com.

Recibido: 20 de Septiembre 2019, Aceptado: 08 de Noviembre 2019.

Abstract
Light is an indispensable source for the photosynthesis of plants, but also for their growth and development. On the other hand, the production of ornamental plants requires multiple nutrients for their proper development, a source available in high concentrations in wastewater. Recent research on constructed wetlands (CWs) that use ornamental plants to treat wastewater and at the same time are used as a means of growth, is considered a sustainable alternative. This study evaluated the influence of light intensity on the growth and flowering of ornamental plants (*Lavandula* sp., *Anthurium* sp., *Zantedeschia aethiopica* and *Spathiphyllum wallisii*) in constructed wetlands, fed with domestic wastewater. 30 mesocosms of constructed wetlands were used as a culture medium for ornamental plants, the effect of light intensity on the development of the plants was measured, as well as the removal of Nitrogen (N-NO_x), phosphate (P-PO_x) and biochemical demand of oxygen (DBO_x). The plants were able to adapt and grew healthy in the three-support media with the exception of *Lavandula* sp., which did not survive in any of the systems, showing that in the months when the light intensity was higher, a higher growth rate was reached to 9.5 % on average. In terms of the removal of N-NO_x (45-80%), P-PO_x (20-23%) and DBO_x (80-85%), no significant differences were found between any of the substrates. The above allows us to affirm that CWs, are suitable means for cultivation of ornamental plants and the development of them is favored with intensities of light in ranges from 720 to 856 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. On the other hand, the substrates used proved to be efficient to remove contaminants, but at the same time to facilitate the healthy development of the used ornamental vegetation, with the exception of the lavender sp. Research is required to evaluate the effects of light intensity on the production of ornamental plants in controlled environments.

Keywords: Intensity of light, ornamental plants, Constructed wetlands, Residual waters.

Sandoval, L et al. / REB&S / Volumen 1, Número 1 – 2019/ páginas 39-5239

ARTÍCULOS JCR

Sandoval-Herazo, L. C., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J. L., Méndez-Contreras, J. M., & Zamora-Castro, S. A. (2018). Effects of the Use of Ornamental Plants and Different Substrates in the Removal of Wastewater Pollutants through Microcosms of Constructed Wetlands. *Sustainability*, 10(5), 1594. (4 Semestre, I-2018).

InCites Journal Citation Reports		Clarivate Analytics		
Journal Data Filtered By: Selected JCR Year: 2018 Selected Editions: SCIE,SSCI Selected Category Scheme: WoS				
Rank	Full Journal Title	Total Cites	Journal Impact Factor	Eigenfactor Score
3747	Sustainability	28,022	2.592	0.02380
3751	CONSERVATION	2,752	2.691	0.00289



[https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100240100&tip=sid&exact=no](https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100240100&tip=sid&exact=no "SCImago Journal & Country Rank") title="SCImago Journal & Country Rank" src="https://www.scimagojr.com/journal_img.php?id=21100240100" alt="SCImago Journal & Country Rank" />



Article

Effects of the Use of Ornamental Plants and Different Substrates in the Removal of Wastewater Pollutants through Microcosms of Constructed Wetlands

Luis Carlos Sandoval-Herazo ¹, Alejandro Alvarado-Lassman ¹, José Luis Marín-Muñiz ^{2,*}, Juan Manuel Méndez-Contreras ¹ and Zamora-Castro Sergio Aurelio ³

- 1 División de Estudios de Posgrados e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Oriente 9, Emiliano Zapata Sur, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México; lsandovalh@gmail.com (L.C.S.-H.); lassaman@prodigy.net.mx (A.A.-L.); jmmendez@hotmail.com (J.M.M.-C.)
- 2 El Colegio de Veracruz, Carrillo Puerto No. 26, 91000 Xalapa, Veracruz, México
- 3 Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana Bv. Adolfo Ruíz Cortines 455, Costa Verde, C.P. 94294 Boca del Río, Veracruz, México; saze1976@hotmail.com
- * Correspondence: soydnew@hotmail.com; Fax: 841-5100 (ext. 109)

Received: 11 April 2018; Accepted: 12 May 2018; Published: 16 May 2018



Abstract: The high costs involved in treating wastewater are problems that developing countries confront, mainly in rural areas. Therefore, Constructed Wetlands (CWs), which are composed of substrate, vegetation, and microorganisms, are an economically and ecologically viable option for wastewater treatment in these places. There is a wide variety of possibilities for substrates and ornamental plants that have not yet been evaluated to be implemented in future CW designs. The goal of this study was to evaluate the process of adaptation and removal of wastewater pollutants in CW microcosms using different terrestrial ornamental plants (*Larundula* sp., *Spathiphyllum wallisii*, and *Zantedeschia aethiops*). These plants were sown in two types of substrate: red volcanic gravel (RVG) and polyethylene terephthalate (PET). CWs with vegetation reduced 5-day biochemical oxygen demand (BOD₅) by 68% with RVG substrate and 63% with PET substrate, nitrates 50% in RVG substrate and 35% in PET substrate, phosphates 38% in RVG substrate and 35% in PET substrate, and fecal coliforms 64% in RVG and 59% in PET substrate. In control microcosms without vegetation, reductions were significantly lower than those in the presence of plants, with reduction of BOD₅ by 61% in RVG substrate and 55% in PET substrate, nitrates 26% in RVG substrate and 22% in PET substrate, phosphates 27% in RVG substrate and 25% in PET substrate. Concerning fecal coliforms 62% were removed in RVG substrate and 59% in PET substrate. Regarding the production of flowers, *Larundula* sp. did not manage to adapt and died 45 days after sowing and did not produce flowers. *Spathiphyllum wallisii* produced 12 flowers in RVG and nine flowers in PET, while *Zantedeschia aethiops* produced 10 in RVG and 7 in PET. These results showed that the use of substrates made of RVG and PET is a viable alternative to be implemented in CWs. In addition, the reuse of PET is an option that decreases pollution by garbage. The plants *Spathiphyllum wallisii* and *Zantedeschia aethiops* remarkably contribute in the removal of pollutants in wastewater. Additionally, the use of ornamental plants, with commercial interest such as those evaluated, enables an added value to the CW to be given, which can be used for flower production purposes on a larger scale and favor its acceptance within rural communities.

Keywords: wastewater treatment; ornamental plants; red volcanic gravel; PET

PORTADA DE LA REVISTA: Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Zamora-Castro, S. A., Sandoval-Salas, F., & Alvarado-Lassman, A. (2019). Evaluation of Wastewater Treatment by Microcosms of Vertical Subsurface Wetlands in Partially Saturated Conditions Planted with Ornamental Plants and Filled with Mineral and Plastic Substrates. *International journal of environmental research and public health*, 16(2), 167.

InCites Journal Citation Reports		Clarivate Analytics		
Journal Data Filtered By: Selected JCR Year: 2018 Selected Editions: SCIE,SSCI Selected Category Scheme: WoS				
Rank	Full Journal Title	Total Cites	Journal Impact Factor	Eigenfactor Score
4952	Journal of Ocean Research	1,593	2.469	0.005480
4967	International Journal of Environmental Research and Public Health	20,097	2.468	0.040780



Article

Evaluation of Wastewater Treatment by Microcosms of Vertical Subsurface Wetlands in Partially Saturated Conditions Planted with Ornamental Plants and Filled with Mineral and Plastic Substrates

Luis Sandoval ^{1,2}, José Luis Marin-Muñiz ³, Sergio Aurelio Zamora-Castro ⁴,
Fabiola Sandoval-Salas ⁵ and Alejandro Alvarado-Lassman ^{1,*}

¹ División de Estudios de Posgrados e Investigación, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Orizaba, Oriente 9 852, Emiliano Zapata Sur, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, Mexico; lesandovalh@gmail.com

² Department of Civil Engineering, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km. 1.8 Carretera a Loma del Cojolite C.P. 93821 Misantla, Veracruz, Mexico

³ El Colegio de Veracruz, Carrillo Puerto No. 26, 91000 Xalapa, Veracruz, Mexico; soydrew@hotmail.com

⁴ Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana Bv. Adolfo Ruiz Cortines 455, Costa Verde, C.P. 94294 Boca del Río, Veracruz, Mexico; szamora@uv.mx

⁵ División de Estudios de Posgrados e Investigación, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Superior de Perote, C.P. 91270 Perote, Veracruz, Mexico; investiga.itspe@gmail.com

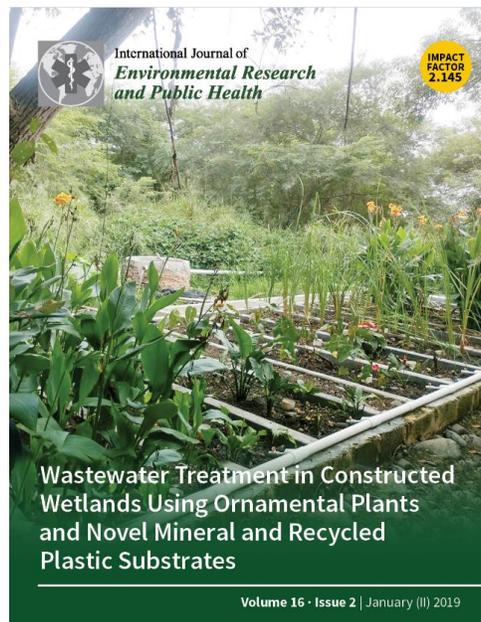
* Correspondence: lassman@prodigy.net.mx; Tel: +52-272-72-57056

Received: 26 November 2018; Accepted: 4 January 2019; Published: 9 January 2019



Abstract: The current knowledge about the role terrestrial ornamental plants play in constructed wetlands (CWs) has scarcely been evaluated. Likewise, little attention has been given towards the use of new support or fill media for subsurface flow CWs, which may result in the reduction of costs when implemented on a large scale. This study evaluated, during nine months, the effect of three terrestrial ornamental plants and two substrates on the elimination of pollutants in wastewaters by using fill-and-drain vertical subsurface flow CWs (FD-CWs). Sixteen microcosms were used, nine filled with polyethylene terephthalate (PET) and nine with porous river stone (PRS). For each type of substrate, duplicates of microcosms were used, utilizing *Anthurium* sp., *Zantedeschia aethiops*, and *Spathiphyllum wallisii* as vegetation and two other CWs without vegetation as controls. The environmental conditions, number of flowers, and height of the plants were registered. The results revealed that both substrates in the FD-CWs were efficient in removing pollutants. The average removal of pollutants in systems with vegetation revealed a positive effect on the reduction of the biochemical oxygen demand (55–70%), nitrates (28–44%), phosphates (25–45%), and fecal coliforms (52–65%). Meanwhile, in units without vegetation, the reduction of pollutants was nearly 40–50% less than in those with vegetation. The use of PET as a filling substrate in CWs did not affect the growth and/or the flowering of the species; therefore, its use combined with the species studied in CWs may be replicated in villages with similar wastewater problems. This may represent a reduction in implementation costs when utilizing PET recycled wastes and PRS as substrates in these systems in comparison with the typical substrates used in CWs. More studies are needed to better understand the interactions among these novel support media and the commercial terrestrial ornamental plants.

Keywords: PET; ornamental plants; porous river stone; constructed wetlands; microcosms; wastewater



Sandoval-Herazo, L. C., Alvarado-Lassman, A., López-Méndez, M. C., Martínez-Sibaja, A., Aguilar-Lasserre, A. A., Zamora-Castro, S., & Marín-Muñiz, J. L. (2020). Effects of Ornamental Plant Density and Mineral/Plastic Media on the Removal of Domestic Wastewater Pollutants by Home Wetlands Technology. *Molecules*, 25(22), 5273.



Article

Effects of Ornamental Plant Density and Mineral/Plastic Media on the Removal of Domestic Wastewater Pollutants by Home Wetlands Technology

Luis Carlos Sandoval-Herazo ^{1,2}, Alejandro Alvarado-Lassman ¹,
María Cristina López-Méndez ², Albino Martínez-Sibaja ¹, Alberto A. Aguilar-Lasserre ¹,
Sergio Zamora-Castro ³ and José Luis Marín-Muñiz ^{4,*}

¹ División de Estudios de Posgrados e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Oriente 9, Emiliano Zapata Sur, C.P. Orizaba 94320, Veracruz, Mexico; lsandovalh@gmail.com (L.C.S.-H.); lassman@prodigy.net.mx (A.A.-L.); albino3_mx@yahoo.com (A.M.-S.); albertosal@hotmail.com (A.A.A.-L.)

² División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Misantla, Veracruz, C.P. Misantla 93821, Veracruz, Mexico; mclopezm@misantla.tecnm.mx

³ Faculty of Engineering, Construction and Habitat, Universidad Veracruzana Bv. Adolfo Ruiz Cortines 455, Costa Verde, C.P. Boca del Río 94294, Veracruz, Mexico; szamora@uv.mx

⁴ Sustainable Regional Development Academy, El Colegio de Veracruz, Xalapa 91000, Veracruz, Mexico

* Correspondence: soydrew@hotmail.com

Academic Editor: Giorgio Vilardi

Received: 11 September 2020; Accepted: 6 November 2020; Published: 12 November 2020



Abstract: Wastewater treatment (WWT) is a priority around the world; conventional treatments are not widely used in rural areas owing to the high operating and maintenance costs. In Mexico, for instance, only 40% of wastewater is treated. One sustainable option for WWT is through the use of constructed wetlands (CWs) technology, which may remove pollutants using cells filled with porous material and vegetation that works as a natural filter. Knowing the optimal material and density of plants used per square meter in CWs would allow improving their WWT effect. In this study, the effect of material media (plastic/mineral) and plant density on the removal of organic/inorganic pollutants was evaluated. Low (three plants), medium (six plants) and high (nine plants) densities were compared in a surface area of 0.3 m² of ornamental plants (*Alpinia purpurata*, *Canna hybrids* and *Hedychium coronarium*) used in polycultures at the mesocosm level of household wetlands, planted on the two different substrates. Regarding the removal of contaminants, no significant differences were found between substrates ($p \geq 0.05$), indicating the use of plastic residues (reusable) is an economical option compared to typical mineral materials. However, differences ($p = 0.001$) in removal of pollutants were found between different plant densities. For both substrates, the high density planted CWs were able to remove COD in a range of 86–90%, PO₄-P 22–33%, NH₄-N in 84–90%, NO₃-N 25–28% and NO₂-N 38–42%. At medium density, removals of 79–81%, 26–32, 80–82%, 24–26%, and 39–41%, were observed, whereas in CWs with low density, the detected removals were 65–68%, 20–26%, 79–80%, 24–26% and 31–40%, respectively. These results revealed that higher COD and ammonia were removed at high plant density than at medium or low densities. Other pollutants were removed similarly in all plant densities (22–42%), indicating the necessity of hybrid CWs to increase the elimination of PO₄-P, NO₃-N and NO₂-N. Moreover, high density favored 10 to 20% more the removal of pollutants than other plant densities. In addition, in cells with high density of plants and smaller planting distance, the development of new plant shoots was limited. Thus, it is suggested that the appropriate distance for this type of polyculture plants should be from 40 to 50 cm in expansion to real-scale systems in order to take advantage of the harvesting of species in these and allow species of greater foliage, favoring its growth and new shoots with the appropriate distance to compensate, in the short time, the removal of nutrients.

Molecules 2020, 25, 5273; doi:10.3390/molecules25225273

www.mdpi.com/journal/molecules

Biomolecules

← Muestre este widget en su propio sitio web

Q1 Biochemistry
best quartile

SJR 2019
1.61

powered by scimagojr.com

Simplemente copie el código a continuación y péguelo dentro de su código html:

```
<a href="https://www.scimaç
```

IMPACT
FACTOR
3.267



BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO I

- Aylward, L., Bonner, R., Sheridan, C., & Kappelmeyer, U. (2019). Hydraulic study of a non-steady horizontal sub-surface flow constructed wetland during start-up. *Science of The Total Environment*, 646, 880-892.
- Avellán, T., & Gremillion, P. (2019). Constructed wetlands for resource recovery in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 42-57.
- Badhe, N., Saha, S., Biswas, R., y Nandy, T. (2014). Role of algal biofilm in improving the performance of free surface, up-flow constructed wetland. *Bioresource technology*, 169. 596-604.
- Calheiros, S., Bessa, S., Mesquita, B., Brix, H., Rangel, O., y Castro, M. (2015). Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. *Ecological Engineering*, 79, 1-7.
- Carrera, A. (2016). Evaluación de crecimiento y sondeo de comercialización de plantas ornamentales sembradas en microcosmos de humedales. El Colegio de Veracruz. Maestría en Desarrollo Regional Sustentable.
- Chong, H., Chia, S., y Ahmad, N. (2013). The adsorption of heavy metal by Bornean oil palm shell and its potential application as constructed wetland media. *Bioresourcetchnology*, 130, 181-186.
- Conagua (2015). Inventario Nacional de plantas municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2015. 273 pp.
- Conagua (2016). Estadísticas del Agua en México. México. 275 pp.
- Conapo (2015). Nota metodológica de la estimación del índice de marginación por entidad federative y municipio 2015, http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61552/Nota_metodol_gica_marginaci_n.pdf, 11-09-2017.
- Dahl, T. E., & Allord, G. J. (1996). History of wetlands in the conterminous United States. National summary on wetland resources. USGS, Springfield, 19-26.

- Del Carmen Durán-Domínguez-de, M., Navarro-Frómeta, A. E., & Bayona, J. M. (2018). Greenhouse Gas Emissions and Treatment Performance in Constructed Wetlands with Ornamental Plants: Case Studies in Veracruz, Mexico María Elizabeth Hernández-Alarcón and José Luis Marín-Muñiz. In *Artificial or Constructed Wetlands* (pp. 171-185). CRC Press.
- Del Carmen Durán-Domínguez-de, M., Navarro-Frómeta, A. E., & Bayona, J. M. (Eds.). (2018). *Artificial or Constructed Wetlands: A Suitable Technology for Sustainable Water Management*. CRC Press.
- Elfanssi, S., Ouazzani, N., Latrach, L., Hejjaj, A., & Mandi, L. (2018). Phytoremediation of domestic wastewater using a hybrid constructed wetland in mountainous rural area. *International journal of phytoremediation*, 20(1), 75-87.
- INEGI (2015). *Conteo Nacional*.
<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/poblacion/>
- García-García, L., Ruelas-Monjardín, L., y Marín-Muñiz, J. L. (2016). Constructed wetlands: a solution to water quality issues in Mexico? *Water Policy*, 18(3), 654-669. DOI: 10.2166/wp.2015.172.
- Hernández, M. E. H. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *RINDERESU (Revista Internacional De Desarrollo Regional Sustentable)*, 1(2), 01-12.
- Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Seceña, J. C., y Sandoval-Herazo, L. C. (2017). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. *RINDERESU*, 2(1-2), 75-87.
- Masi, F., Rizzo, A., & Regelsberger, M. (2018). The role of constructed wetlands in a new circular economy, resource oriented, and ecosystem services paradigm. *Journal of environmental management*, 216, 275-284.
- Marín-Muñiz, J. L. (2017). Humedales Construidos en México para el Tratamiento de Aguas Residuales, Producción de Plantas Ornamentales y Reuso del Agua. *Agroproductividad*. 10(5).

- Mitch, W. J., y Gosselink J. (2015). *Wetlands*. Quinta Edición. John Wiley and Sons Inc., New York. 456pp.
- Pálffy, T. G., Meyer, D., Troesch, S., Gourdon, R., Olivier, L., & Molle, P. (2018). A single-output model for the dynamic design of constructed wetlands treating combined sewer overflow. *Environmental Modelling & Software*, 102, 49-72.
- Pedraza-López, A. M. (2015). Organización comunitaria para el manejo común: El caso del humedal artificial de Pinoltepec, Municipio de Emiliano Zapata, Veracruz. El Colegio de Veracruz. Maestría en Desarrollo Regional Sustentable.
- Román-Reyes, R. P. Grupo Científico sobre Mercados Laborales Somede (2015) Reflexiones sobre la medición de la magnitud, características y condiciones de la participación económica de la población mexicana en la Encuesta Intercensal 2015”.
- Romero-Martínez, M., Shamah-Levy, T., Cuevas-Nasu, L., Méndez Gómez-Humarán, I., Gaona-Pineda, E. B., Gómez-Acosta, L. M. y Hernández-Ávila, M. (2017). Diseño Metodológico de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición de Medio Camino 2016. *Salud Pública de México*. 59(3). 299-305.
- Sandoval-Herazo, L. C., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J. L., Méndez-Contreras, J. M., & Zamora-Castro, S. A. (2018). Effects of the Use of Ornamental Plants and Different Substrates in the Removal of Wastewater Pollutants through Microcosms of Constructed Wetlands. *Sustainability*, 10(5), 1594.
- Sandoval-Herazo, L.C., Marín-Muñiz, J.L., Alvarado, Castelán y Ramírez. (2016). Diseño de un Mesocosmo de Humedal Construidos con Materiales Alternativos Para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Comunidad de Pastorías Actopan, Ver. In Congreso Interdisciplinario de Ingenierías (p.35).
- Sardana, A., Cottrell, B., Soulsby, D., & Aziz, T. N. (2019). Dissolved organic matter processing and photoreactivity in a wastewater treatment constructed wetland. *Science of The Total Environment*, 648, 923-934.
- Urakawa, H., y Bernhard, A. E. (2017). Wetland management using microbial indicators. *Ecological Engineering*, 108, 456-476.

- Verma, R., & Suthar, S. (2018). Performance assessment of horizontal and vertical surface flow constructed wetland system in wastewater treatment using multivariate principal component analysis. *Ecological Engineering*, 116, 121-126.
- Vincent, G., Shang, K., Zhang, G., Chazarenc, F., & Brisson, J. (2018). Plant growth and nutrient uptake in treatment wetlands for water with low pollutant concentration. *Water Science and Technology*, 77(4), 1072-1078.
- Wang, M., Zhang, D. Q., Dong, J. W., y Tan, S. K. (2017). Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate—A review. *Journal of Environmental Sciences*.
- Yang, Y., Zhao, Y., Liu, R., & Morgan, D. (2018). Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands. *Bioresourcetechnology*.
- Zheng, X., Jin, M., Zhou, X., Chen, W., Lu, D., Zhang, Y., & Shao, X. (2019). Enhanced removal mechanism of iron carbon micro-electrolysis constructed wetland on C, N, and P in salty permitted effluent of wastewater treatment plant. *ScienceofThe Total Environment*, 649, 21-30.
- Zurita, F., Castellanos-Hernández, O. A., y Rodríguez-Sahagún, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe1), 139-150.
- Ruelas M.L.C. y H. Martínez M. (2013). *Medio Físico. En: L.C. Ruelas M. et al. Diagnóstico para la planeación y el manejo integral de los recursos el caso de la cuenca del Río Nautla. Juan Pablos Editor. Instituto Tecnológico Superior de Xalapa y Colegio de Veracruz. México, D.F. 2013.*
- Mexicana, N. O. (1996). *NOM-001-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. México, DF.*

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO II

- Armstrong, W. (1971). Oxygen diffusion from roots of rice grown under non-waterlogged conditions. *Physiologia Plantarum* 24:242-247.
- Austin, G., & Yu, K. (2016). *Constructed Wetlands and Sustainable Development*. Taylor & Francis.
- Castañeda, S. L. A., (2017). Una revisión sobre el uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domesticas en América latina: Diseño, Operación y Resultados. *A review Bioresource Technology*.
- CONAGUA. Comisión nacional del agua. (2016). Estadísticas del agua en México. Edición 2016.http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf.
- Davis, L. (1995). A handbook of constructed wetlands: a guide to creating wetlands for: agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater in the Mid-Atlantic Region. v. 1. General considerations--v. 2. Domestic wastewater--v. 3. Agricultural wastewater--v. 4. Coal mine drainage--v. 5. Stormwater.
- Delgadillo, O. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Nelson Antequera.
- Giannakis, S., Androulaki, B., Comminellis, C., & Pulgarin, C. (2018). Wastewater and urine treatment by UVC-based advanced oxidation processes: Implications from the interactions of bacteria, viruses, and chemical contaminants. *Chemical Engineering Journal*, 343, 270-282.
- Hamersley, M. R., Woebken, D., Boehrer, B., Schultze, M., Lavik, G., y Kuypers, M. M. (2009). Water column anammox and denitrification in a temperate permanently stratified lake (Lake Rassnitzer, Germany). *Systematic and applied microbiology*, 32(8), 571-582.
- Hernández, M. E. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable* 1(2): 1-12.

- Heynes-Silerio, A. S., del Socorro Gonzalez-Elizondo, M., Ruacho-Gonzalez, L., Gonzalez-Elizondo, M., & Lorena Lopez-Enriquez, I. (2017). Wetlandvegetation in themunicipalityof Durango, Durango, Mexico. *REVISTA MEXICANA DE BIODIVERSIDAD*, 88(2), 358-364.
- Huang, S., Shingaki-Wells, R. N., Petereit, J., Alexova, R., & Millar, A. H. (2018). Temperature-dependent metabolic adaptation of *Triticum aestivum* seedlings to anoxia. *Scientificreports*, 8(1), 6151.
- INEGI (2015). Encuesta Inter Censal de la población en México. <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>.
- Jackson, M. B., & Colmer, T. D. (2005). Response and adaptation by plants to flooding stress. *Annals of Botany*, 96(4), 501-505.
- Jana, B. B., Heeb, J., & Das, S. (2018). Ecosystem Resilient Driven Remediation for Safe and Sustainable Reuse of Municipal Wastewater. In *Wastewater Management Through Aquaculture* (pp. 163-183). Springer, Singapore.
- Lazcano, C. (2016). *Bioteconología ambiental de aguas y aguas residuales*. ECOE EDICIONES.
- Li, X., Zhang, M., Liu, F., Chen, L., Li, Y., Li, Y., ... y Wu, J. (2018). Seasonality distribution of the abundance and activity of nitrification and denitrification microorganisms in sediments of surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllumelatinoides* during swine wastewater treatment. *Bioresource technology*, 248, 89-97.
- Lonergan, S. C. (2018). Water and conflict: Rhetoric and reality. In *Environmentalconflict* (pp. 109-124). Routledge.
- Lot, A., & Novelo, A. (2004). *Iconografía y estudio de plantas acuáticas de la ciudad de México y sus alrededores*. Unam.
- Lot, A., Novelo, A., & Ramírez-García, P. (1993). Diversity of Mexican aquatic vascular plant flora. *Biological diversity of Mexico*. Oxford University Press. New York., USA, 577-591.

- Martínez, S. A. A., Toro, F. M. B., Rojas, G. G., Giraldo, J. P. S., & Ángel, M. L. H. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador técnico*, 74.
- Noyola Robles, A., Güereca Hernández, L. P., Morgan Sagastume, J. M., Hernández Padilla, F., Padilla Rivera, A., Carius, C., ... & Villalba, E. (2013). Informe técnico final/Water and Sanitation: LAC Cities Adapting to Climate Change by Making Better Use of their Available Bioenergy Resources.
- ONU (2017). <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-population-prospects-2017.html>.
- Pattanaik, P., Panigrahi, N., Mishra, J., Sahoo, N. K., Dash, B. P., & Rath, D. (2018). Evaluation of MCM-41 Nanoparticles for Removal of Phenol Contents from Coke-Oven Wastewater. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 22(2), 04018001.
- Peláez, D., Guzmán, B. L., Rodríguez, J., Acero, F., & Nava, G. (2016). Presencia de virus entéricos en muestras de agua para el consumo humano en Colombia: desafíos de los sistemas de abastecimiento. *Biomédica*, 36(Sup2), 169-178.
- Pérez-Villar, M. M., Domínguez, E. R., Martínez Nodal, P. D. L. C., López Vega, M. E., Gonzáles Roche, Y. M., & Monteagudo Serrano, M. (2009). Eficiencia de diferentes sustratos de filtros de suelo plantados en la depuración de aguas residuales domésticas. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 40(3).
- Sandoval-Herazo, L.C.; Alvarado-Lassman, A.; Marín-Muñiz, J.L.; Méndez-Contreras, J.M.; Zamora-Castro, S.A. (2018). Effects of the Use of Ornamental Plants and Different Substrates in the Removal of Wastewater Pollutants through Microcosms of Constructed Wetlands. *Sustainability*, 10(5), 1594.
- Segura, C. M. L., Vargas, C. V. V., & Hernández, N. B. (2018). Pobreza, medio ambiente y proactividad del derecho. *Revista Órbita Pedagógica. ISSN 2409-0131*, 3(2), 83-92.
- Stearman, G. K., George, D. B., Carlson, K., & Lansford, S. (2003). Pesticide removal from container nursery runoff in constructed wetland cells. *Journal of environmental quality*, 32(4), 1548-1556.

- Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). *Vertical flow constructed wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment*. Newnes.
- Stottmeister, U., Wießner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., ... & Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology advances*, 22(1-2), 93-117.
- Taylor, C. R. (2009). *Selecting plant species to optimize wastewater treatment in constructed wetlands* (Doctoral dissertation, Montana State University-Bozeman, College of Agriculture).
- Tiner, R. W. (2012). *Defining hydrophytes for wetland identification and delineation*. ERCD. CRREL CR-12-1. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Washington, DC, USA.
- Tobón, S. R., Cadavid, R. M. A., & Gutiérrez, L. A. (2017). Patógenos Microbianos e Indicadores Microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Facultad Nacional de Salud Pública: El escenario para la salud pública desde la ciencia*, 35(2), 2.
- Vacca, G., Wand, H., Nikolausz, M., Kusch, P., & Kästner, M. (2005). Effect of plants and filter materials on bacteria removal in pilot-scale constructed wetlands. *Water research*, 39(7), 1361-1373.
- Vymazal, J. & Kröpfelová, L. (2008). Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal subsurface flow, 14.
- Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review. *Ecological Engineering*, 73, 724-751.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2017. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. París, UNESCO.
- Yang, X., Jansen, M. J., Zhang, Q., Sergeeva, L., Ligterink, W., Mariani, C., ... & Visser, E. J. (2018). A disturbed auxin signaling affects adventitious root outgrowth in *Solanum dulcamara* under complete submergence. *Journal of plant physiology*, 224, 11-18.

- Yang, Y., Zhao, Y., Liu, R., y Morgan, D. (2018). Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands. *Bioresource Technology*.
- Yang, Z., Wang, Q., Zhang, J., Xie, H., y Feng, S. (2016). Effect of plant harvesting on the performance of constructed wetlands during summer. *Water*, 8(1), 24.
- Yocum, D. (2009). Manual de Diseño: Humedal construido para el tratamiento de las aguas grises por biofiltración. *Bren School of Environmental Science and Management. University of California, Santa Barbará. Estados Unidos de Norteamérica*.
- Zurita, M. F. (2008). Tratamiento de aguas residuales domesticas por humedales artificiales del tipo subsuperficial con plantas de ornato de interés comercial. Tesis Doctorado en Ciencias. CIATEJ, Guadalajara, Jal.
- Sato, T., Qadir, M., Yamamoto, S., Endo, T., & Zahoor, A. (2013). Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management*, 130, 1-13.
- Water, U. N. (2018). Sustainable Development Goal 6 Synthesis Report on Water and Sanitation. Published by the United Nations New York, New York, 10017.
- Contreras, E. R., & Jimeno, V. A. V. (2017, July). Remoción de Cr (III) y materia orgánica del agua residual de una curtiembre, mediante *Chlorella* sp. viva en suspensión. In 2017.
- Mamani, M., Valenty, C., & Salazar García, L. K. (2016). Centro de investigación y de interpretación para la conservación y puesta en valor del ecosistema de los humedales Ite con enfoque sostenible, Región Tacna.
- Chávez-Dagostino, R. M., Ochoa-Chávez, J. M., de Jesús Álvarez-López, J., & Maldonado-Ibarra, O. A. (2014). Humedales costeros y turismo en el Pacífico latinoamericano. *Investigaciones costeras*, 190.
- Sánchez, A. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y ambiente*, (14), 119-143.
- González, B., Torrealba, G., Cuicas, E. C. L., Sierra, M. G. P., Quintero, L. R. M., & Sierra, M. C. P. (2016). Evaluación de un humedal artificial como tratamiento para efluentes sintéticos de tenería. *Novum Scientiarum*, (4).

- Crombet Grillet, S., Abalos Rodríguez, A., Rodríguez Pérez, S., & Pérez Pompa, N. (2016). Evaluación del tratamiento anaerobio de las aguas residuales de una comunidad universitaria. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1), 49-56.
- Arrechea, P. L., & Buchwald, S. L. (2016). Biaryl phosphine based Pd (II) amido complexes: the effect of ligand structure on reductive elimination. *Journal of the American Chemical Society*, 138(38), 12486-12493.
- Chavarria, D. N., Verdenelli, R. A., Muñoz, E. J., Conforto, E. C., Restovich, S. B., Andriulo, A. E., ... & Vargas Gil, S. (2016). Soil microbial functionality in response to the inclusion of cover crop mixtures in agricultural systems.
- Rivas, E., & Gesenia, K. (2016). Remoción de Aceites y grasas residuales domésticas usando lodos activados de planta de tratamiento de agua residual en el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez en Lima-Perú.
- Moreno-Casasola, P. (2016). La zona costera y sus ecosistemas. *Servicios Ecosistémicos de las Selvas y Bosques Costeros de Veracruz*; Moreno-Casasola, P., Ed, 18-36.
- Mora Cervetto, A., & Molina Moreira, N. (2017). Diagnóstico del manejo de residuos sólidos en el parque histórico Guayaquil. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 26(2), 72-83.
- Zacarías, V. H. R., Machuca, M. A. V., Soto, J. L. M., Equihua, J. L. P., Cardona, A. A. V., Calvillo, M. D. L., & González, J. V. (2017). Hydrochemistry and emerging contaminants in industrial urban wastewater in Morelia, Michoacán, Mexico. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 221-235.
- Jurado Garayar, D. D. (2016). Diseño piloto del sistema de tratamiento pasivo de infiltraciones provenientes del depósito de material inadecuado de Minera La Zanja, Perú (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Sánchez, A., & Javier, J. (2016). Diseño del sistema de alcantarillado sanitario y del tratamiento de sus aguas residuales con el método Doyoo Yookasoo para el barrio El Cristal, parroquia Totoras, cantón Ambato, provincia de Tungurahua (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil).

- Babatunde, A. O., Zhao, Y. Q., & Zhao, X. H. (2010). Alum sludge-based constructed wetland system for enhanced removal of P and OM from wastewater: concept, design and performance analysis. *Bioresource Technology*, 101(16), 6576-6579.
- Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of environmental management*, 112, 429-448.
- Tanner, C. C. (1996). Plants for constructed wetland treatment systems—a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological engineering*, 7(1), 59-83.
- Zurita, F., Belmont, M. A., De Anda, J., & Cervantes-Martinez, J. (2008). Structurally stable output regulation problem with sampled-output measurements using fuzzy immersions.
- Peña Guzmán, C. A., & Lara Borrero, J. (2012). A run-off treatment by made wetlands-A review. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22(2), 39-61.
- Price, T., & Probert, D. (1997). Role of constructed wetlands in environmentally-sustainable developments. *Applied Energy*, 57(2-3), 129-174.

BIBLIOGRAFÍA CAPITULO III

- Acosta, C. M., Silván, R. S., Ocaña, G. L., Margulis, R. G. B., & Cerino, M. J. R. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México/Constructed wastewater treatment by tropical-wetlands in Tabasco, Mexico/Treatment of water waste by wetlands artificial tropical in Tabasco. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5(10), 1-20.
- Acosta, C. M., Silván, R. S., Ocaña, G. L., Margulis, R. G. B., & Cerino, M. J. R. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México/Constructed wastewater treatment by tropical-wetlands in Tabasco, Mexico/Treatment of water waste by wetlands artificial tropical in Tabasco. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5(10), 1-20.
- Agudelo, C., Ruth, M., Jaramillo, G., Mónica, L., Peñuela, M., Aguirre, R., & Néstor, J. (2010). Remoción del carbono orgánico disuelto en humedales piloto de flujos subsuperficial y superficial. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 28(1), 21-28.
- Agudelo-Álvarez, L., Moreno-Velasquez, J., & Ocampo-Peñuela, N. (2010). Colisiones de aves contra ventanales en un campus universitario de Bogotá, Colombia. *Ornitología Colombiana*, 10, 3-10.
- Akratos, C. S., and V. A. Tsihrintzis. 2007. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 29:173-191.
- Allen, W. C., P. B. Hook, O. R. Stein, and J. A. Beiderman. (2002). Temperature and wetland plant species effects on wastewater treatment and root zone oxidation. *Journal of Environmental Quality* 31:1010-1016.
- Al-Omari, A., y Fayyad, M. (2003). Treatment of domestic wastewater by subsurface flow constructed wetlands in Jordan. *Desalination*, 155(1), 27-39.
- Arivoli, A., & Mohanraj, R. (2013). Efficacy of *Typha angustifolia* based vertical flow constructed wetland system in pollutant reduction of domestic wastewater. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(5), 1497.

- Ayaz, S. C. (2008). Post-treatment and reuse of tertiary treated wastewater by constructed wetlands. *Desalination*, 226(1-3), 249-255.
- Badejo, A. A., Omole, D. O., Ndambuki, J. M., & Kupolati, W. K. (2017). Municipal wastewater treatment using sequential activated sludge reactor and vegetated submerged bed constructed wetland planted with *Vetiveria zizanioides*. *Ecological Engineering*, 99, 525-529.
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146, 105725.
- Ballantine, D. J., & Tanner, C. C. (2010). Substrate and filter materials to enhance phosphorus removal in constructed wetlands treating diffuse farm runoff: a review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 53(1), 71-95.
- Barbaro, L. A., Karlanian, M. A., Morisigue, D. E., Rizzo, P. F., Riera, N. I., Della Torre, V., & Crespo, D. E. (2011). Compost de ave de corral como componente de sustratos. *Ciencia del suelo*, 29(1), 83-90.
- Bassi, N., Kumar, M. D., Sharma, A., & Pardha-Saradhi, P. (2014). Status of wetlands in India: a review of extent, ecosystem benefits, threats and management strategies. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 1-19.
- Beavers, P. D., & Tully, I. K. (2005). Nutrient reduction evaluation of sewage effluent treatment options for small communities. *Water Science and Technology*, 51(10), 221-229.
- Belmont, M.A., Cantellano, E., Thompson, S., Williamson, M., Sánchez, A. and Metcalfe, C.D. (2004). Treatment of domestic wastewater in a pilot scale natural treatment system in central Mexico. *Ecological Engineering*, 23, 299-311.
- Belmont, M.A., Metcalfe, C.D., (2003). Feasibility of using ornamental plants (*Zantedeschia aethiopica*) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, chemical oxygen demand and nonylphenol ethoxylate surfactants – a laboratory-scale study. *Ecol. Eng.* 21, 233–247.

- Berberidou, C., Kitsiou, V., Lambropoulou, D. A., Antoniadis, A., Ntonou, E., Zalidis, G. C., & Poulios, I. (2017). Evaluation of an alternative method for wastewater treatment containing pesticides using solar photocatalytic oxidation and constructed wetlands. *Journal of environmental management*, 195, 133-139.
- Bezbaruah, A. N., & Zhang, T. C. (2003). QUANTIFICATION OF OXYGEN RELEASE BY BULRUSH (SCIRPUS VALIDUS) ROOTS. Proceedings of the Water Environment Federation, 2003(9), 685-700.
- Bhomia, RK, y Reddy, KR (2018). Influencia de la vegetación en el secuestro de fósforo a largo plazo en humedales de tratamiento subtropical. *Journal of Environmental Quality*.
- Borreguero Fabelo, A., Herrera-Melián, J. A., Araña, J., & Ortega Méndez, J. A. (2015). Estudio del uso de triturado de palmera como sustrato de humedales de tratamiento de aguas residuales.
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology* 35:11-17.
- Brix, H., Sorrell, B. K., & Lorenzen, B. (2001). Are Phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases?. *Aquatic Botany*, 69(2-4), 313-324.
- Caballero-Peluffo, J., Osorio-Fernández, R., y Quiñones Bolaños, E. D. (2016). *Tratamiento de aguas residuales usando Rhizophora mangle (Mangle rojo) para la remoción de nutrientes y materia orgánica en un humedal artificial de flujo vertical* (Doctoral dissertation, Universidad de Cartagena).
- Cabrera, R. I. (1999). Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5(1), 5-11.
- Calheiros C., Bessa V., Mesquita R., Brix H., Rangel A. and Castro P. (2015). Constructed wetlands with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. *Ecological Engineering*. 79: 1-7.
- Calheiros, C. S. C., Pereira, S. I. A., Brix, H., Rangel, A. O. S. S., & Castro, P. M. L. (2017). Assessment of culturable bacterial endophytic communities colonizing *Canna flaccida* inhabiting a wastewater treatment constructed wetland. *Ecological Engineering*, 98, 418-426.

- Cao, W., & Zhang, Y. (2014). Removal of nitrogen (N) from hypereutrophic waters by ecological floating beds (EFBs) with various substrates. *Ecological engineering*, 62, 148-152.
- Cao, W., Wang, Y., Sun, L., Jiang, J., & Zhang, Y. (2016). Removal of nitrogenous compounds from polluted river water by floating constructed wetlands using rice straw and ceramsite as substrates under low temperature conditions. *Ecological Engineering*, 88, 77-81.
- Carvalho, P. N., Arias, C. A., y Brix, H. (2017). *Constructed Wetlands for Water Treatment: New Developments*.
- Casierra-Martínez, H. A., Charris-Olmos, J. C., Caselles-Osorio, A., & Parody-Muñoz, A. E. (2017). Organic Matter and Nutrients Removal in Tropical Constructed Wetlands Using *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) and *Echinochloa colona* (Poaceae). *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(9), 338.
- Chafloque, W. A. L., & Gómez, E. G. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 9(17), 85-96.
- Charlesworth, S. M., & Mezue, M. (2016). Sustainable Drainage Out of the Temperate Zone: The Humid Tropics. *Sustainable Surface Water Management: A Handbook for SUDS; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, US*, 301.
- Chen, J., Wei, X. D., Liu, Y. S., Ying, G. G., Liu, S. S., He, L. Y., ... & Yang, Y. Q. (2016). Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from domestic sewage by constructed wetlands: Optimization of wetland substrates and hydraulic loading. *Science of the Total Environment*, 565, 240-248.
- Chen, Y., Huang, C., Ticehurst, C., Merrin, L., & Thew, P. (2013). An evaluation of MODIS daily and 8-day composite products for floodplain and wetland inundation mapping. *Wetlands*, 33(5), 823-835.
- Chong, H. L. H., Chia, P. S., & Ahmad, M. N. (2013). The adsorption of heavy metal by Bornean oil palm shell and its potential application as constructed wetland media. *Bioresource technology*, 130, 181-186.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016). Estadísticas del Agua en México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. P. 282. http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf
- Cronk, J. K., & Fennessy, M. S. (2016). *Wetland plants: biology and ecology*. CRC press.
- Denny, P. (1997). Implementation of constructed wetlands in developing countries. *Water Science and Technology*, 35(5), 27-34.
- Dominínguez-Patiño, M. L., Rodríguez-Martínez, A., & Jasso-Castillo, L. A. (2012). Design and Implement a System of Wastewater Treatment Based on Wetlands. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, 6-11
- Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., & Smith, K. A. (1999). Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems. *Water Research*, 33(17), 3595-3602.
- Esbert, R. M., Marcos, R. M., Ordaz, J., Montoto, M., del Rio, L. M. S., de Argandoña, V. G. R., ... & Rodríguez-Rey, Á. (1989). Petrografía, propiedades físicas y durabilidad de algunas rocas utilizadas en el patrimonio monumental de Catalunya, España. *Materiales de construcción*, 39(214), 37-47.
- Esbert, R. M., Marcos, R. M., Ordaz, J., Montoto, M., del Rio, L. M. S., de Argandoña, V. G. R., ... & Rodríguez-Rey, Á. (1989). Petrografía, propiedades físicas y durabilidad de algunas rocas utilizadas en el patrimonio monumental de Catalunya, España. *Materiales de construcción*, 39(214), 37-47.
- Espinosa-Ortiz, C. E. (2014). *Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes* (Doctoral dissertation, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito).
- Faulwetter, J. L., Gagnon, V., Sundberg, C., Chazarenc, F., Burr, M. D., Brisson, J., ... y Stein, O. R. (2009). Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: a review. *Ecological engineering*, 35(6), 987-1004.
- Fraser, L. H., S. M. Carty, and D. Steer. (2004). A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms. *Bioresource Technology* 94:185-192.

- Freeland, J., Ciotir, C., & Kirk, H. (2013). Regional differences in the abundance of native, introduced, and hybrid *Typha* spp. in northeastern North America influence wetland invasions. *Biological invasions*, 15(12), 2651-2665.
- Gagnon, V., Chazarenc, F., Comeau, Y., & Brisson, J. (2007). Influence of macrophyte species on microbial density and activity in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 56(3), 249-254.
- Gao J., Wang W., Guo X. y Zhu S. (2014). Nutrient removal capability and growth characteristics of iris sibirica in subsurface vertical flow constructed wetlands in winter. *Ecological Engineering*. 70: 351-361.
- Gao J., Zhang J., Ma N., Wang W., Ma C. and Zhang R. (2015). Cadmium removal capability and growth characteristics of *iris sibirica* in subsurface vertical flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 84: 443-450.
- Garcia, J., Rousseau, D. P., Morato, J., Lesage, E. L. S., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2010). Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(7), 561-661.
- Garzón M., González J. and García R. (2016). Evaluación de un sistema de tratamiento doméstico para reúso de agua residual. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 32(2): 199-211.
- Gebremariam, S. Y., y Beutel, M. W. (2008). Nitrate removal and DO levels in batch wetland mesocosms: Cattail (*Typha* spp.) versus bulrush (*Scirpus* spp.). *Ecological engineering*, 34(1), 1-6.
- Gersberg, R. M., B. V. Elkins, S. R. Lyon, and C. R. Goldman. (1986). Role of aquatic plants in waste-water treatment by artificial wetlands. *Water Research* 20:363-368.
- González, B., Torrealba, G., Cuicas, E. C. L., Sierra, M. G. P., Quintero, L. R. M., & Sierra, M. C. P. (2016). Evaluación de un humedal artificial como tratamiento para efluentes sintéticos de tenería. *Novum Scientiarum*, (4).
- Greenway, M., & Woolley, A. (1999). Constructed wetlands in Queensland: performance efficiency and nutrient bioaccumulation. *Ecological engineering*, 12(1-2), 39-55.

- Guerra, J. D. T., Vargas, J. S. M., Aguirre, R. R. P., y Huaranga, M. A. C. (2018). Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales Artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, en Carapongo-Lurigancho. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 1(2).
- Ha, N. T. H., Sakakibara, M., & Sano, S. (2011). Accumulation of Indium and other heavy metals by *Eleocharis acicularis*: an option for phytoremediation and phytomining. *Bioresource technology*, 102(3), 2228-2234.
- Hallack M., Payan J.C., Mungaray A., López A., González M., Castañón M.C. and Pérez-Banuet M. (2015). Implementación y evaluación de un sistema de tratamiento de agua residual natural a través de humedales construidos en el noroeste de México. In *Gestión de humedales españoles y Mexicanos: Apuesta conjunta por su futuro.* (coord.). Sastre A., Díaz I and Ramírez J. Universidad de Alcalá. I.S.B.N.: 978-84-16599-15-8.
- Hatano, K., Trettin, C. C., House, C. H., & Wollum, A. G. (1991). *Microbial populations and decomposition activity in three subsurface flow constructed wetlands* (No. CONF-9110402-2). Oak Ridge National Lab., TN (United States).
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C., Ekama, G. A., y Brdjanovic, D. (Eds.). (2008). *Biological wastewater treatment*. IWA publishing.
- Hernández A., M. E. y A. A. Hernández S. (2013). Manual de operación de las celdas de humedales construidos en Pinoltepec, Ver. Producto entregable del Proyecto —Asesoría para el diseño y operación de la Unidad demostrativa de humedales construidos para tratar las aguas municipales con producción de plantas ornamentales en Pinoltepec, Ver. CONAGUA. INECOL. JAMOAP. México, D.F. p: 14.
- Hernández, M. E. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable* 1(2): 1-12.
- Hernández, M. E., & Moreno-Casasola Barceló, P. (2018). Almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en México. *Madera y bosques*, 24(SPE).

- Hernández, M. E., Galindo-Zetina, M., y Carlos, H. H. J. (2017). Greenhouse gas emissions and pollutant removal in treatment wetlands with ornamental plants under subtropical conditions. *Ecological Engineering*.
- Hernández-Crespo, C., Gargallo, S., Benedito-Durá, V., Nácher-Rodríguez, B., Rodrigo-Alacreu, M. A., & Martín, M. (2017). Performance of surface and subsurface flow constructed wetlands treating eutrophic waters. *Science of the Total Environment*, 595, 584-593.
- Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Seceña, J. C., y Sandoval-Herazo, L. C. (2017). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. *RINDERESU*, 2(1-2), 75-87.
- Hickey, A., Arnscheidt, J., Joyce, E., O'Toole, J., Galvin, G., O'Callaghan, M., y Walsh, K. (2018). An assessment of the performance of municipal constructed wetlands in Ireland. *Journal of environmental management*, 210, 263-272.
- Hien, T. T., Park, H. D., Jo, H. Y., Yun, S. T., & Minh, N. T. (2011). Influence of different substrates in wetland soils on denitrification. *Water, Air, & Soil Pollution*, 215(1-4), 549-560.
- Hu Y., He F., Ma L., Zhang Y. y Wu Z. (2016). Microbial nitrogen removal pathways in integrated vertical-flow constructed wetland systems. *Bioresource Technology*. 207: 339-345. *
- Hu, L., Hu, W., Deng, J., Li, Q., Gao, F., Zhu, J., & Han, T. (2010). Nutrient removal in wetlands with different macrophyte structures in eastern Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, 36(12), 1725-1732.
- Huang, X., Zheng, J., Liu, C., Liu, L., Liu, Y., & Fan, H. (2017). Removal of antibiotics and resistance genes from swine wastewater using vertical flow constructed wetlands: effect of hydraulic flow direction and substrate type. *Chemical Engineering Journal*, 308, 692-699.
- Huang, Y. A. O., Sun, W., Zhang, W. E. N., Yu, Y., Su, Y., & Song, C. (2010). Marshland conversion to cropland in northeast China from 1950 to 2000 reduced the greenhouse effect. *Global Change Biology*, 16(2), 680-695.

- Jofre-Meléndez, R., Cervantes-Pérez, J., y Barradas, V. L. (2015). Calidad del agua de la niebla captada artificialmente en la microcuenca del río Pixquiac, Veracruz, México: resultados preliminares. *TIP*, 18(2), 122-130.
- Kadlec, R. H., Knight, R., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., y Haberl, R. (2017). *Constructed wetlands for pollution control*. IWA publishing.
- Kadlec, R. H., y Wallace, S. (2008). *Treatment wetlands*. CRC press, ede. 993. Boca Raton, FL.
- Kivaisi, A.K. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecol. Eng.* 16 (4), 545–560.
- Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. *Methods of soil analysis: part 1—physical and mineralogical methods*, (methodsofsoilan1), 635-662.
- Konnerup, D., Trang, N. T. D., y Brix, H. (2011). Treatment of fishpond water by recirculating horizontal and vertical flow constructed wetlands in the tropics. *Aquaculture*, 313(1-4), 57-64.
- Korboulewsky, N., Wang, R., & Baldy, V. (2012). Purification processes involved in sludge treatment by a vertical flow wetland system: focus on the role of the substrate and plants on N and P removal. *Bioresource technology*, 105, 9-14.
- Latune, R. L., Laporte-Daube, O., Fina, N., Peyrat, S., Pelus, L., y Molle, P. (2017). Which plants are needed for a French vertical-flow constructed wetland under a tropical climate?. *Water Science and Technology*, 75(8), 1873-1881.
- Lemaire, F.; Fatigues, A.; Revière, L. M.; Charpentier, S. and Morel, P. (2003). Cultures en post etconteneurs, principesagronomiqueset applications. 2^a ed. INRA.Paris. 210 p.
- Li, B., Liao, C. H., Zhang, X. D., Chen, H. L., Wang, Q., Chen, Z. Y., ... & Cheng, X. L. (2009). *Spartina alterniflora* invasions in the Yangtze River estuary, China: an overview of current status and ecosystem effects. *ecological engineering*, 35(4), 511-520.
- Li, C. B., Wang, Z. D., Zheng, Z., Hu, L. L., Zhong, S. Q., & Lei, L. (2011). Number of blastomeres and distribution of microvilli in cloned mouse embryos during compaction. *Zygote*, 19(3), 271-276.

- Li, M. H., Sung, C. Y., Kim, M. H., & Chu, K. H. (2010). Bioretention for stormwater quality improvement in Texas: pilot experiments (No. FHWA/TX-10/0-5949-2). Texas Transportation Institute.
- Li, M., Wu, Y. J., Yu, Z. L., Sheng, G. P., & Yu, H. Q. (2007). Nitrogen removal from eutrophic water by floating-bed-grown water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) with iron implantation. *Water research*, *41*(14), 3152-3158.
- Li, X., Zhang, M., Liu, F., Chen, L., Li, Y., Li, Y., ... y Wu, J. (2018). Seasonality distribution of the abundance and activity of nitrification and denitrification microorganisms in sediments of surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum latifolium* during swine wastewater treatment. *Bioresource technology*, *248*, 89-97.
- Li, Y., Zhu, X., Sun, X., & Wang, F. (2010). Landscape effects of environmental impact on bay-area wetlands under rapid urban expansion and development policy: a case study of Lianyungang, China. *Landscape and urban Planning*, *94*(3), 218-227.
- Liang, Y., Zhu, H., Bañuelos, G., Yan, B., Shutes, B., Cheng, X., y Chen, X. (2017). Removal of nutrients in saline wastewater using constructed wetlands: plant species, influent loads and salinity levels as influencing factors. *Chemosphere*, *187*, 52-61.
- Liu, L., Liu, Y. H., Liu, C. X., Wang, Z., Dong, J., Zhu, G. F., & Huang, X. (2013). Potential effect and accumulation of veterinary antibiotics in *Phragmites australis* under hydroponic conditions. *Ecological engineering*, *53*, 138-143.
- Long, Y., Yi, H., Chen, S., Zhang, Z., Cui, K., Bing, Y., ... y Guo, Q. (2016). Influences of plant type on bacterial and archaeal communities in constructed wetland treating polluted river water. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(19), 19570-19579.
- López-Rivera A., López-López A., Vallejo-Rodríguez R. y León-Becerril E. (2016). Effect of the organic loading rate in the stillage treatment in a constructed wetland with *Canna indica*. *Environmental progress & sustainable energy*. *35*(2): 411-415.
- Lou, Y., Gao, C., Pan, Y., Xue, Z., Liu, Y., Tang, Z., ... & Rydin, H. (2018). Niche modelling of marsh plants based on occurrence and abundance data. *Science of The Total Environment*, *616*, 198-207.

- Lv, T., Carvalho, P. N., Zhang, L., Zhang, Y., Button, M., Arias, C. A., ... y Brix, H. (2018). Functionality of microbial communities in constructed wetlands used for pesticide remediation: Influence of system design and sampling strategy. *Water research*, *110*, 241-251.
- Madera-Parra C.A., Peña-Salamanca E.J., Peña M.R., Rousseau D.P.L. y Lens P.N. (2015). Phytoremediation of landfill leachate with *Colocasia esculenta*, *Gynerumsagittatum* and *Heliconia psittacorum* in Constructed Wetlands. *International Journal of Phytoremediation*. 17:16-24.
- Marchand, L., Nsanganwimana, F., Lamy, J. B., Quintela-Sabaris, C., Gonnelli, C., Colzi, I., ... & Bordas, F. (2014). Root biomass production in populations of six rooted macrophytes in response to Cu exposure: intra-specific variability versus constitutive-like tolerance. *Environmental pollution*, *193*, 205-215.
- Marchand, L., Nsanganwimana, F., Oustrière, N., Grebenshchykova, Z., Lizama-Allende, K., & Mench, M. (2014). Copper removal from water using a bio-rack system either unplanted or planted with *Phragmites australis*, *Juncus articulatus* and *Phalaris arundinacea*. *Ecological Engineering*, *64*, 291-300.
- Marín-Muñiz, J. L. (2016). Remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedales artificiales establecidos en el municipio de Actopan, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *15*(2), 553-563.
- Marín-Muñiz, J. L. (2017). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reuso del agua. *Agroproductividad*, *10* (5).
- Marín-Muñiz, J. L. (2017). Wetlands built in Mexico for the treatment of residual waters, production of ornamental plants and water reuse. *Agroproductividad*, *10*(5), 90-95.
- Marín-Muñiz, J. L., García-González, M. C., Ruelas-Monjardín, L. C., y Moreno-Casasola, P. (2018). Influence of Different Porous Media and Ornamental Vegetation on Wastewater Pollutant Removal in Vertical Subsurface Flow Wetland Microcosms. *Environmental Engineering Science*, *35*(2), 88-94.

- Marín-Muñiz, J. L., Hernández, M. E., y Moreno-Casasola, P. (2015). Greenhouse gas emissions from coastal freshwater wetlands in Veracruz Mexico: Effect of plant community and seasonal dynamics. *Atmospheric Environment*, 107, 107-117.
- Martínez, C. P., & Castañeda, J. G. (2017). CULTIVO DEL CONSORCIO FOTOSINTÉTICO LA11 EN AGUAS RESIDUALES DE RASTRO URBANO. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 2(1), 15-19.
- Martínez, R. S. C. (2016). Caracterización de comunidades bacterianas y resistencia a antibioticos en humedales construidos (Doctoral dissertation, Universidad de León).
- Maucieri, C., Barbera, A. C., Vymazal, J., & Borin, M. (2017). A review on the main affecting factors of greenhouse gases emission in constructed wetlands. *Agricultural and forest meteorology*, 236, 175-193.
- Maza-Márquez, P., González-Martínez, A., Martínez-Toledo, M. V., Fenice, M., Lasserrot, A., & González-López, J. (2017). Biotreatment of industrial olive washing water by synergetic association of microalgal-bacterial consortia in a photobioreactor. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(1), 527-538.
- Mburu, G. P. (2014). Potential payment for ecosystem services (pes) scheme in Lake OlBolossatNyandarwa County.
- Méndez-Mendoza A., Bello-Mendoza R., Herrea-López D., Mejía-González G. y Calixto-Romo A. (2015). Performance of constructed wetlands with ornamental plants in the treatment of domestic wastewater under the tropical climate of south Mexico. 10(1): 110-123.
- Merino-Solís M., Villegas E., de Anda J. y López-López A. (2015). The effect of the hydraulic retention time on the performance of an ecological wastewater treatment system: An anaerobic filter with a constructed wetland. *Water*. 7: 1149-1163.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (5th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Mitsch, W. J., y Gosselink, J. G. (2000). The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological economics*, 35(1), 25-33.
- Mitsch, W. J., y Gosselink, J. G. (2007). *Wetlands*. Fourth Ed.

- Muga, H. E., y Mihelcic, J. R. (2008). Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of environmental management*, 88(3), 437-447.
- Ng, W.J., Gunaratne, G. (2011). Design of tropical constructed wetlands. In: Tanaka, N., Ng, W.J., Jinadasa, K.B.S.N. (Eds.), *Wetlands for Tropical Application*. Imperial College Press, pp. 69–94.
- Nieto, A. D. C., & Castañeda, J. G. (2017). Cultivo del consorcio fotosintético r17 en aguas residuales de rastro urbano. *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 1434-1438.
- NMX-AA, N. M., & de la Federación, D. O. (1997). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- Organización Mundial de la Salud (OMS 2016). Nuevo portal de datos de la OMS que permite seguir de cerca los avances hacia la cobertura sanitaria mundial. [consultado 14 Marzo 2018]. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2016/portal-universal-health/es/>.
- Orozco C., Cruz A., Rodríguez M. y Pohlan A. (2006). Humedal subsuperficial de flujo vertical como sistema de depuración terciaria en el proceso de beneficiado de café. *Hig. Sanid. Ambient.* 6: 190-196.
- Oves, M., Khan, M. Z., y Ismail, I. M. (2018). *Modern Age Environmental Problems and Their Remediation*. Springer.
- Paleo, M. C., & Meroni, M. P. (2006). Dimensión social de la tecnología cerámica en sociedades cazadoras-recolectoras. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia*, (15-16), 73-85.
- Paulo, P.L., C. Azevedo., L. Begosso., A.F. Galbiati., y M.A. Boncz. (2013). Natural systems treating greywater and blackwater on-site: integrating treatment, reuse and landscaping. *Ecol. Eng.* 50: 95-100.
- Pavlineri, N., Skoulikidis, N. T., & Tsihrintzis, V. A. (2017). Constructed floating wetlands: a review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis. *Chemical Engineering Journal*, 308, 1120-1132.

- Peña, M. Y., Posada, F. C., & Monsalve, O. I. (2014). Producción hidropónica de tomate (*Solanumlycopersicum* L.) en cascarilla de arroz mezclada con materiales minerales y orgánicos. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(2), 217-227.
- Pérez Castellanos, N. A., & Lima Muñoz, E. (2013). Diseño y evaluación de consolidantes para el patrimonio pétreo de origen volcánico. *Intervención (México DF)*, 4(8), 5-12.
- Pérez, R. (2013). Producción porcina y contaminación del agua en La Piedad, Michoacán. Instituto de Investigaciones Económicas. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Polomski, R.F., D .G. BielenbergT.Whitwell. (2007). Nutrient Recovery by Seven Aquatic Garden Plants in a Laboratory-scale Subsurface-constructed Wetland. *Hortscience* 42 (7) :16741680.
- Qiu, Z., Wang, M., Lai, W., He, F., Chen, Z., (2011). Plant growth and nutrient removal in constructed monoculture and mixed wetlands related to stubble attributes. *Hydrobiologia* 661, 251–260.
- Ramírez-Carrillo, H. F., Luna-Pabello, V. M., & Arredondo-Figueroa, J. L. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Revista mexicana de ingeniería química*, 8(1), 93-99.
- Redmond, E. D., Just, C. L., y Parkin, G. F. (2014). Nitrogen removal from wastewater by an aerated subsurface-flow constructed wetland in cold climates. *Water Environment Research*, 86(4), 305-313.
- Ren, Y., Zhang, B., Liu, Z., & Wang, J. (2007). Optimization of four kinds of constructed wetlands substrate combination treating domestic sewage. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 12(6), 1136-1142.
- Reyes, R. G. M., Judith, M. B., Alfredo, J. B., & Joaquín, S. L. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14(2), 223-235.

- Ríos-Montes, K. A., & Peñuela-Mesa, G. A. (2015). Chlorothalonil degradation by a microbial consortium isolated from constructed wetlands in laboratory trials. *Actualidades Biológicas*, 37(102), 255-265.
- Ríos-Montes, K. A., & Peñuela-Mesa, G. A. (2015). Chlorothalonil degradation by a microbial consortium isolated from constructed wetlands in laboratory trials. *Actualidades Biológicas*, 37(102), 255-265.
- Runting, R. K., Lovelock, C. E., Beyer, H. L., & Rhodes, J. R. (2017). Costs and opportunities for preserving coastal wetlands under sea level rise. *Conservation Letters*, 10(1), 49-57.
- Saeed, T., y Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of environmental management*, 112, 429-448.
- Sandoval-Herazo, Marín-Muñiz, Alvarado, Castelán y Ramírez. (2016). Diseño de un Mesocosmo de Humedal Construidos con Materiales Alternativos Para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Comunidad de Pastorías, Actopan, Ver. In *Congreso Interdisciplinario de Ingenierías* (p. 35).
- Sarmiento A.P., Borges A.C. y Matos A.T. (2013). Effect of cultivated species and retention time on the performance of constructed wetlands. *Environ. Technol.* 35 (8), 961-965.
- Saumya S., Akansha A., Rinaldo J., Jayasri M.A. y Suthindhiran K. (2015). Construction and evaluation of prototype subsurface flow wetland planted with *Heliconia angusta* for the treatment of synthetic greywater. *Journal of Cleaner Production*. 91: 235-240.
- Seidel, K. (1951). Zur Ökologie von *Scirpus lacustris*. *Ber. dtsh. bot. Ges*, 64, 342-52.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., y Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of botany*, 2012.
- Sibrell, P. L., Montgomery, G. A., Ritenour, K. L., & Tucker, T. W. (2009). Removal of phosphorus from agricultural wastewaters using adsorption media prepared from acid mine drainage sludge. *Water research*, 43(8), 2240-2250.

- Singh, B. K., Bardgett, R. D., Smith, P., y Reay, D. S. (2010). Microorganisms and climate change: terrestrial feedbacks and mitigation options. *Nature Reviews Microbiology*, 8(11), 779.
- Stefanakis, A. I., & Tsihrintzis, V. A. (2012). Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands. *Chemical engineering journal*, 181, 416-430.
- Stein, O. R., and P. B. Hook. (2005). Temperature, plants, and oxygen: How does season affect constructed wetland performance? *Journal of Environmental Science and Health* 40:1331-1342.
- Stottmeister, U., Wießner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., ... & Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology advances*, 22(1-2), 93-117.
- Sun, L.P., Liu, Y., Jin, H., (2009). Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna. *Ecol. Eng.* 35 (1), 135–140.
- Surrency, D. (1993). Evaluation of aquatic plants for constructed wetlands. *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 349-357.
- Tanner, C. C., & Headley, T. R. (2011). Components of floating emergent macrophyte treatment wetlands influencing removal of stormwater pollutants. *Ecological Engineering*, 37(3), 474-486.
- Tejeda A., Torres-Bojorges A., Zurita F. (2016). Carbamazepine removal in three pilot-scale hybrid wetlands planted with ornamental species. *Ecological Engineering*. In press.
- Tiner, R. W. (1999). *Wetland Indicators: A Guide to Wetland Identification, Delineation, Classification, and Mapping*.
- Trejo-Téllez, L. I., Ramírez-Martínez, M., Gómez-Merino, F. C., García-Albarado, J. C., Baca-Castillo, G. A., & Tejeda-Sartorius, O. (2013). Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(SPE5), 863-876.

- Truu, M., Juhanson, J., y Truu, J. (2009). Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. *Science of the total environment*, 407(13), 3958-3971.
- Tsihrintzis, V. A. (2017). The use of vertical flow constructed wetlands in wastewater treatment. *Water Resources Management*, 31(10), 3245-3270.
- Valles-Aragón, M. C., & Alarcón-Herrera, M. T. (2014). Retención de arsénico en humedales construidos con *Eleocharismacrostrachya* y *Schoenoplectusamericanus*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 143-148.
- Vicario, i. S., Saiz, a. R., Cuadrado, j. G., Petrement, c. J., & Gonzalez, s. G. (2017). Influencia de la porosidad en el comportamiento de morteros fabricados con escorias de acería y aditivos en ambientes húmedos. *Dyna*, 92(2), 220-225.
- Viraraghavan, T., y Srinivasan, A. (2011). Thallium: Environmental pollution and health effects.
- Vohla, C., Kõiv, M., Bavor, H. J., Chazarenc, F., & Mander, Ü. (2011). Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review. *Ecological Engineering*, 37(1), 70-89.
- Von Sperling, M. (2017). *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. IWA publishing.
- Vymazal J. (2013). Emergent plant used in free water surface constructed wetlands: A review. *Ecological Engineering*. 61P: 582-592.
- Vymazal, J. (1995). *Algae and element cycling in wetlands*. Lewis Publishers Inc.
- Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecological Engineering*, 18(5), 633-646.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the total environment*, 380(1-3), 48-65.
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 20, 133–156.

- Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review. *Ecological Engineering*, 73, 724-751.
- Vymazal, J. (Ed.). (2016). *Natural and Constructed Wetlands: Nutrients, heavy metals and energy cycling, and flow*. Springer.
- Wallace, S. (2001). Advanced designs for constructed wetlands. *Biocycle*, 42(6), 40-40.
- Wang W., Ding Y., Ullman J., Ambrose R., Wang Y., Song X. y Zhao Z. (2016). Nitrogen removal performance in planted and unplanted horizontal subsurface flow constructed wetlands treating different influent COD/N ratios. *Environmental Science pollution Research*. 23: 9012-9018.
- Wang, J., Tai, Y., Man, Y., Wang, R., Feng, X., Yang, Y., ... y Chen, Z. (2018). Capacity of various single-stage constructed wetlands to treat domestic sewage under optimal temperature in Guangzhou City, South China. *Ecological Engineering*, 115, 35-44.*
- Wang, J., Tai, Y., Man, Y., Wang, R., Feng, X., Yang, Y., ... y Chen, Z. (2018). Capacity of various single-stage constructed wetlands to treat domestic sewage under optimal temperature in Guangzhou City, South China. *Ecological Engineering*, 115, 35-44.
- Wang, M., Zhang, D. Q., Dong, J. W., & Tan, S. K. (2017). Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate—A review. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 293-311.
- Wen L., Hua C., Ping Z. y Xiang L. (2011). Removal of total phosphorus from septic tank effluent by the hybrid constructed wetland system. *Procedia Environmental Sciences*. 10: 2102-2107.
- White, S. A., & Cousins, M. M. (2013). Floating treatment wetland aided remediation of nitrogen and phosphorus from simulated stormwater runoff. *Ecological engineering*, 61, 207-215.
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., ... & Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation. *Bioresource technology*, 175, 594-601.

- Wu, H., Zhang, J., Wei, R., Liang, S., Li, C., & Xie, H. (2013). Nitrogen transformations and balance in constructed wetlands for slightly polluted river water treatment using different macrophytes. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(1), 443-451.
- Wu, S., Kuschik, P., Brix, H., Vymazal, J., & Dong, R. (2014). Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: a nitrogen and organic matter targeted review. *Water research*, 57, 40-55.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2017. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. París, UNESCO.
- Xie, X., He, F., Xu, D., Dong, J., Cheng, S., Wu, Z. (2012). Application of large scale integrated vertical-flow constructed wetland in Beijing Olympic forest park: design, operation and performance. *Water and Environmental Journal* 26:100-107.
- Xu, J., Zhang, J., Xie, H., Li, C., Bao, N., Zhang, C., & Shi, Q. (2010). Physiological responses of *Phragmites australis* to wastewater with different chemical oxygen demands. *Ecological Engineering*, 36(10), 1341-1347.
- Xue, Y., Kovacic, D. A., David, M. B., Gentry, L. E., Mulvaney, R. L., & Lindau, C. W. (1999). In situ measurements of denitrification in constructed wetlands. *Journal of Environmental Quality*, 28(1), 263-269.
- Yan, X., Ward, S., Butler, D., y Daly, B. (2018). Performance assessment and life cycle an analysis of potable water production from harvested rainwater by a decentralized system. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2167-2173.
- Yang, Y., Zhao, Y., Liu, R., y Morgan, D. (2018). Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands. *Bioresource Technology*.
- Zanella, G., Scharf, M., Vieira, G. A., & Peralta-Zamora, P. (2010). Treatment of textile dyeing baths by photo-Fenton processes and evaluation of the reuse potentiality. *Química Nova*, 33(5), 1039-1043.

- Zhang D., Jinadasa K., Gersberg R., Liu Y., Ng W. y Tan S. (2014). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries – A review of recent developments. *Journal of environmental Management*. 141: 116-131.
- Zhang X.B., Liu P., Yang Y.S. y Chen W.R. (2007). Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes. *Journal Environmental Science (China)*. 19(8): 902-909.
- Zhang, D. Q., Hua, T., Gersberg, R. M., Zhu, J., Ng, W. J., y Tan, S. K. (2012). Fate of diclofenac in wetland mesocosms planted with *Scirpusvalidus*. *Ecological engineering*, 49, 59-64.
- Zhang, D. Q., Jinadasa, K. B. S. N., Gersberg, R. M., Liu, Y., Tan, S. K., y Ng, W. J. (2015). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000–2013). *Journal of Environmental Sciences*, 30, 30-46.
- Zhang, D. Q., Tan, S. K., Gersberg, R. M., Zhu, J., Sadreddini, S., y Li, Y. (2012). Nutrient removal in tropical subsurface flow constructed wetlands under batch and continuous flow conditions. *Journal of environmental management*, 96(1), 1-6.
- Zhang, X., Lei, Y., Yuan, Y., Gao, J., Jiang, Y., Xu, Z., y Zhao, S. (2018). Enhanced removal performance of Cr (VI) by the core-shell zeolites/layered double hydroxides (LDHs) synthesized from different metal compounds in constructed rapid infiltration systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-12.
- Zhao, F., Zhang, S., Ding, Z., Aziz, R., Rafiq, M. T., Li, H., ... & Yang, X. (2013). Enhanced Purification of Eutrophic Water by Microbe-Inoculated Stereo Floating Beds. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(3).
- Zhou, X., & Wang, G. (2010). Nutrient concentration variations during *Oenanthe javanica* growth and decay in the ecological floating bed system. *Journal of Environmental Sciences*, 22(11), 1710-1717.
- Zhu, T., Jenssen, P. D., Maehlum, T., &Krogstad, T. (1997). Phosphorus sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates (LWA)-potential filter media in treatment wetlands. *Water Science and Technology*, 35(5), 103-108.

- Ziqiang, A., Jie, Z., Guiqun, P., Jiaqi, F., Cheng, J., & Jihai, X. (2017). Plant Selection of Constructed Wetlands for Treatment of Piggery Wastewater. *Meteorological&EnvironmentalResearch*, 8(2).
- Zurita F., De Anda J., Belmont M. (2006). Performance of laboratory-scale wetlands planted with tropical ornamental plants to treat domestic wastewater. *Water Qual. Res. J. Canada*. 41(4): 410-417.
- Zurita F., Del Toro-Sánchez C., Gutiérrez-Lomelí M., Rodríguez-Sahagún A., Castellanos-Hernández O., Ramírez-Martínez G. y White J. (2012). Preliminary study on the potential of arsenic removal by subsurface flow constructed mesocosms. *Ecological Engineering*. 47: 101-104.
- Zurita, F. y White, J. (2014). Comparative study of three two-stage hybrid ecological wastewater treatment systems for producing high nutrient, reclaimed water for irrigation reuse in developing countries. *Water*. 6,213-228.
- Zurita, F., Belmont, M. A., De Anda, J., & White, J. R. (2011). Seeking a way to promote the use of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries. F. Zurita et al. *Constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries*. *Water Science and Technology*, 63(4), 654-659.
- Zurita, F., Belmont, M., De Anda, J., Cervantes-Martínez, J. (2008). Stress detection by laser-induced fluorescence in *Zantedeschia aethiopica* planted in subsurface-flow treatment wetlands. *Ecological Engineering* 33:110-118.
- Zurita, F., De Anda, J., Belmont, M.A., (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecol. Eng.* 35 (5), 861–869.
- Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. A., y Rodríguez-Sahagún, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe1), 139-150.

BIBLIOGRAFÍA CAPITULO IV

- Avelar, F. F., de Matos, A. T., de Matos, M. P., & Borges, A. C. (2014). Coliform bacteria removal from sewage in constructed wetlands planted with *Mentha aquatica*. *Environmental technology*, 35(16), 2095-2103.
- APHA-AWWA-WEF. (2005). Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales. American Public Health Association, Washington, DC, EE.UU.
- Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological engineering*, 29(2), 173-191.
- Bermudez, M. (2009). Uso industrial de plantas Aromáticas medicinales. Unpublished ingeniería, Universidad Politécnica de Madrid. Available online: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/uso-industrial-de-plantas-aromaticas-y-medicinales>. (accessed on 9 March 2018). (In Spanish).
- Casierra-Martínez, H. A., Charris-Olmos, J. C., Caselles-Osorio, A., & Parody-Muñoz, A. E. (2017). Organic matter and nutrients removal in tropical constructed wetlands using *Cyperus ligularis* (cyperaceae) and *Echinochloa colona* (poaceae). *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(9), 338.
- Calheiros, C. S., Bessa, V. S., Mesquita, R. B., Brix, H., Rangel, A. O., & Castro, P. M. (2015). Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. *Ecological Engineering*, 79, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.03.001>
- Chávez, P., Fabiola, J., Chimbo, Z., & Lucía, F. (2015). Estudio comparativo de la capacidad depuradora de *Phragmites Australis* y *Cyperus Papyrus* en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales en el cantón Santa Isabel (Bachelor's thesis).
- Fumasoli, A., Bürgmann, H., Weissbrodt, D. G., Wells, G. F., Beck, K., Mohn, J., ... & Udert, K. M. (2017). Growth of Nitrosococcus-related ammonia oxidizing bacteria coincides with extremely low pH values in wastewater with high ammonia content. *Environmental science & technology*, 51(12), 6857-6866.

- García, J., Rousseau, D. P., Morato, J., Lesage, E. L. S., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2010). Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(7), 561-661.
- Garzón Zúñiga, M. A., González Zurita, J., & García Barrios, R. (2016). Evaluación de un sistema de tratamiento doméstico para reúso de agua residual. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(2), 199-211.
- Gómez-Pompa, A. *Botanical Studies in the Region of Misantla, Veracruz* (No. 200); Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables: Misantla, VER, Mexico, 1996; Available online: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19660605399> (accessed on 20 March 2018).
- Guzmán, A. B. M., & Palenius, H. G. N. (2017). Utilización De Un Sistema De Inmersión Temporal (Sit) Para Multiplicar Plantas Ornamentales De Agave Victoriae-Reginae (T. Moore). *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 2(1), 1429-1433.
- García, M., Soto, F., González, J. M., & Bécares, E. (2008). A comparison of bacterial removal efficiencies in constructed wetlands and algae-based systems. *Ecological Engineering*, 32(3), 238-243.
- García, M., Soto, F., González, J. M., & Bécares, E. (2009). A comparison of bacterial removal efficiencies in constructed wetlands and algae-based systems. *Ecological Engineering*, 32(3), 238-243.
- Gill, L. W., O'Lunaigh, N., & Johnston, P. M. (2011). On-site wastewater treatment using subsurface flow constructed wetlands in Ireland. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 46(7), 723-728.
- Ghosh, D., & Gopal, B. (2010). Effect of hydraulic retention time on the treatment of secondary effluent in a subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 36(8), 1044-1051.
- Guzmán, A. B. M., & Palenius, H. G. N. (2017). Utilización De Un Sistema De Inmersión Temporal (Sit) Para Multiplicar Plantas Ornamentales De Agave Victoriae-Reginae (T. Moore). *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 2(1), 1429-1433.

- Ho, L., & Ho, G. (2012). Mitigating ammonia inhibition of thermophilic anaerobic treatment of digested piggy wastewater: use of pH reduction, zeolite, biomass and humic acid. *Water research*, 46(14), 4339-4350.
- Hayder, G., Ahmed, A. N., & Fu'ad, N. F. S. M. (2017). A review on media clogging in attached growth system. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 12, 8034-8039.
- Huang, J. H., Paul, S., Mayer, S., Moradpour, E., Hasselbach, R., Gieré, R., & Alewell, C. (2017). Metal biogeochemistry in constructed wetlands based on fluvial sand and zeolite-and clinopyroxene-dominated lava sand. *Scientific Reports*, 7(1), 2981.
- He, Y., Peng, L., Hua, Y., Zhao, J., & Xiao, N. (2018). Treatment for domestic wastewater from university dorms using a hybrid constructed wetland at pilot scale. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 8532-8541.
- Headley, T., Nivala, J., Kassa, K., Olsson, L., Wallace, S., Brix, H., ... & Müller, R. (2013). *Escherichia coli* removal and internal dynamics in subsurface flow ecotechnologies: effects of design and plants. *Ecological engineering*, 61, 564-574.
- Hinds Jr, T. D., Brown, R. R., & Burns Jr, E. H. (2004). Reduction of fecal coliform levels in two created wetlands at the Olentangy River Wetland Research Park.
- Karathanasis, A. D., Potter, C. L., & Coyne, M. S. (2003). Vegetation effects on fecal bacteria, DBO, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecological engineering*, 20(2), 157-169.
- Kyambadde, J., Kansiime, F., & Dalhammar, G. (2005). Nitrogen and phosphorus removal in substrate-free pilot constructed wetlands with horizontal surface flow in Uganda. *Water, air, and soil pollution*, 165(1-4), 37-59.
- Kadlec, R. H. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological engineering*, 35(2), 159-174.
- Lamphar, S., & Antonio, H. (2006). Ergonomía: Análisis de los factores que inciden en la astenopía de los trabajadores de inspección visual en la industria electrónica de Ciudad Juárez. *Cienc. Trab*, 8(21), 135-140.

- López, X., Bagisnky, C., & Portilla, G. (1997). CARACTERIZACIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE PLANTAS DE. *Agricultura Técnica (Chile)*, 57(2), 113-121.
- Lan, W., Zhang, J., Hu, Z., Ji, M., Zhang, X., Zhang, J., ... & Yao, G. (2018). Phosphorus removal enhancement of magnesium modified constructed wetland microcosm and its mechanism study. *Chemical Engineering Journal*, 335, 209-214.
- Mitsch, W.J.; Gosselink, J. *Wetlands*; John Wiley and Sons Inc.: New York, NY, USA, 2015.
- Marín-Muñiz, J. L. (2017). HUMEDALES CONSTRUIDOS EN MÉXICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, PRODUCCION DE PLANTAS ORNAMENTALES Y REUSO DEL AGUA. *Agroproductividad*, 10(5).
- Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas (Constructed wetlands with ornamental plants for removal of organic matter and nutrients contained in sewage). *Theoria*, 33-46.
- Marín-Muñiz, J. L. (2016). Removal of wastewater pollutant in artificial wetlands implemented in Actopan, Veracruz, Mexico. *REVISTA MEXICANA DE INGENIERIA QUIMICA*, 15(2), 553-563.
- Mesquita, C., Albuquerque, A., Amaral, L., & Nogueira, R. (2018). Effectiveness and temporal variation of a full-scale horizontal constructed wetland in reducing nitrogen and phosphorus from domestic wastewater. *ChemEngineering*, 2(1), 3.
- Olguín, E. J., Sánchez-Galván, G., González-Portela, R. E., & López-Vela, M. (2008). Constructed wetland mesocosms for the treatment of diluted sugarcane molasses stillage from ethanol production using *Pontederiasagittata*. *Water research*, 42(14), 3659-3666.
- Rahman, K. Z., Wiessner, A., Kusch, P., van Afferden, M., Mattusch, J., & Müller, R. A. (2011). Fate and distribution of arsenic in laboratory-scale subsurface horizontal-flow constructed wetlands treating an artificial wastewater. *Ecological engineering*, 37(8), 1214-1224.

- Rodríguez-Macedo, M., González-Christen, A., & León-Paniagua, L. S. (2014). Diversidad de los mamíferos silvestres de Misantla, Veracruz, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(1), 262-275.
- Sandoval-Herazo, L.; Marín-Muñiz, J.L.; Alvarado, A.; Castelán, R.; Ramírez, D. Diseño de un mesocosmo de humedal construidos con materiales alternativos para el tratamiento de aguas residuales en la comunidad de pastorías actopan, ver. In Congreso Interdisciplinario de Ingenierías; ITSM: Veracruz, Mexico, 2016; Available online: https://www.researchgate.net/publication/318711824_Disenio_de_un_Mesocosmo_de_Humedal_Construidos_con_Materiales_Alternativos_Para_el_Tratamiento_de_Aguas_Residuales_en_la_Comunidad_de_Pastorias_Actopan_Ver (accessed on 16 March 2018).
- Sacoto, G. Resulta ïtotécnica de Tres Variedades de *Zantedeschia aethiopica* L. Spreng, a la Aplicación de ácido Giberélico y Fertilización Orgánica, en el Quinche, Provincia de Pichincha. Tesis Ingeniería Agronómica, Universidad Estatal de Bolívar, Venezuela, 2010. Available online: <http://biblioteca.ueb.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-search.pl?q=su:%22TRIGO%22> (accessed on 10 March 2018).
- Smith, E., Gordon, R., Madani, A., & Stratton, G. (2005). Pathogen removal by agricultural constructed wetlands in cold climates. *Journal of Environmental Informatics*, 6(1), 46-50.
- Tejeda, A., López, Z., Rojas, D., Reyna, M. Z., Barrera, A., & Zurita, F. (2015). Eficiencia de tres sistemas de humedales híbridos para la remoción de carbamazepina. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(6), 19-31.
- Viejo Montesinos, J. L. (2011). Biodiversidad, aproximación a la diversidad botánica y zoológica de España, José Luis Viejo Montesino, editor. *Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Segunda época*.
- Vinasco, J. P. S., & Solís, A. V. (2011). Estimación de gases de efecto invernadero en humedales construidos de flujo subsuperficial. *Ingeniería y universidad*, 15(2), 519-533.

- Veliz Lorenzo, E., Llanes Ocaña, J. G., Asela Fernández, L., & Bataller Venta, M. (2009). Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. Revista CENIC. Ciencias Biológicas, 40(1).
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2(3), 530-549.
- Vymazal, J. (2011). Las plantas utilizadas en humedales construidos con subsuperficial horizontal flujo: una revisión. *Hydrobiologia*, 674, 133-156.
- Weerakoon, GMPR, Jinadasa, KBSN, Herath, GBB, Mowjood, MIM, Zhang, D., Tan, SK y Jern, NW (2016). El rendimiento del flujo subsuperficial tropical construyó humedales a diferentes tasas de carga hidráulica. *LIMPIO – Suelo, Aire, Agua*, 44 (8), 938-948.
- Wu, H., Lin, L., Zhang, J., Guo, W., Liang, S., & Liu, H. (2016). Purification ability and carbon dioxide flux from surface flow constructed wetlands treating sewage treatment plant effluent. *Bioresource technology*, 219, 768-772.
- Yalcuk, A., & Ugurlu, A. (2009). Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource technology*, 100(9), 2521-2526.
- Zhang, XB, Peng, Liu, Yang, YS, y Chen, WR (2007). La fitorremediación de aguas residuales urbanas según el modelo humedales con hydrophytes ornamentales. *J. Environ. Sci.* 19, 902.
- Zurita, F., Belmont, M. A., De Anda, J., & Cervantes-Martinez, J. (2008). Stress detection by laser-induced fluorescence in *Zantedeschia aethiopica* planted in subsurface-flow treatment wetlands. *Ecological engineering*, 33(2), 110-118.
- Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. A., & Rodríguez-Sahagún, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe1), 139-150.
- Zurita, F., de Anda, J., & Belmont, M. A. (2006). Performance of laboratory-scale wetlands planted with tropical ornamental plants to treat domestic wastewater. *Water Quality Research Journal*, 41(4), 410-417. DOI: <https://doi.org/10.2166/wqrj.2006.044>
- Ramírez-Carrillo, H. F., Luna-Pabello, V. M., & Arredondo-Figueroa, J. L. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de

- buena calidad para la acuicultura. *Revista mexicana de ingeniería química*, 8(1), 93-99. Available on: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-27382009000100009&script=sci_arttext&tlng=en
- Hernández, M. E. A. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *RINDERESU*, 1(2), 01-12. Available online: <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/16> (accessed on 1 March 2018). (in Spanish).
- Marín-Muñiz, J. L., García-González, M. C., Ruelas-Monjardín, L. C., & Moreno-Casasola, P. (2018). Influence of different porous media and ornamental vegetation on wastewater pollutant removal in vertical subsurface flow wetland microcosms. *Environmental Engineering Science*, 35(2), 88-94. DOI: <https://doi.org/10.1089/ees.2017.0061>
- Rousseau, D. P., Lesage, E., Story, A., Vanrolleghem, P. A., & De Pauw, N. (2008). Constructed wetlands for water reclamation. *Desalination*, 218(1-3), 181-189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.09.034>
- Macci, C., Peruzzi, E., Doni, S., Iannelli, R., & Masciandaro, G. (2015). Ornamental plants for micropollutant removal in wetland systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2406-2415. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2949-x>
- Zurita, F., De Anda, J., & Belmont, M. A. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(5), 861-869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.026>
- Torit, J., Siangdung, W., & Thiravetyan, P. (2012). Phosphorus removal from domestic wastewater by *Echinodorus cordifolius* L. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(5), 794-800. DOI: <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.660114>
- Garzón-Orduña, I. J., Miranda-Esquivel, D. R., and Donato, M. (2008). Parsimony analysis of endemicity describes but does not explain: an illustrated critique. *Journal of Biogeography* 35, 903–913. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01842.x>
- García, M., Soto, F., González, J. M., & Bécares, E. (2008). A comparison of bacterial removal efficiencies in constructed wetlands and algae-based systems. *Ecological Engineering*, 32(3), 238-243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.11.012>

Zurita, F., & Carreón-Álvarez, A. (2015). Performance of three pilot-scale hybrid constructed wetlands for total coliforms and *Escherichia coli* removal from primary effluent—a 2-year study in a subtropical climate. *Journal of water and health*, 13(2), 446-458. DOI: <https://doi.org/10.2166/wh.2014.135>

BIBLIOGRAFÍA CAPITULO V

- Abdalla, K. Z., & Hammam, G. (2014). Correlation between biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand for various wastewater treatment plants in Egypt to obtain the biodegradability indices. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 13(1), 42-48. Available online: <https://pdfs.semanticscholar.org/2629/9e0f5b734f1b1b14de684c79caa4d91f081b.pdf> (accessed on 2 March 2018). (in Spanish).
- Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., del Valle-Paniagua, D. H., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., & Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo/State of art: A current review of the mechanisms that make the artificial wetlands for the removal of nitrogen and phosphorus. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), 319-342. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>
- Baltazar-Bernal, O., & Zavala-Ruiz, J. (2012). Cultivo de Maracas (*Zingiber spp.*) en la floricultura tropical. *AGROProductividad*, 5(3), 20-28. Available online: <https://go.galegroup.com/ps/anonymouse?id=GALE%7CA382318766&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=fulltext&issn=&p=IFME&sw=w> (accessed on 25 March 2018)
- Bedoya-Pérez, J. C., Ardila Arias, A. N., & Reyes Calle, J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(3), 275-283. Available online: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000300004 (accessed on 1 March 2018). (in Spanish).
- Belmont, M. A., Cantellano, E., Thompson, S., Williamson, M., Sánchez, A., & Metcalfe, C. D. (2004). Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central Mexico. *Ecological engineering*, 23(4-5), 299-311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.003>
Bibliographic 16-01-2019 Available online: <https://philpapers.org/rec/MIYPPA> (accessed on 3 March 2018). (in English).

- Bojorges, T., Xitlalli, Á., Hernández Razo, N. A., Urquieta, F., Aseret, A., & Zurita Martínez, F. (2017). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(1), 37-47. DOI: <http://dx.doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.03>
- Casierra-Martínez, H. A., Charris-Olmos, J. C., Caselles-Osorio, A., & Parody-Muñoz, A. E. (2017). Organic matter and nutrients removal in tropical constructed wetlands using *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) and *Echinochloa colona* (Poaceae). *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(9), 338. Available online: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-017-3531-1> (accessed on 3 March 2018). (in English).
- Chávez, P.; Fabiola, J.; Chimbo, Z.; Lucía, F. Estudio Comparativo de la Capacidad Depuradora de *Phragmites Australis* y *Cyperus Papyrus* en Humedales Artificiales Subsuperficiales de Flujo Vertical Para el Tratamiento de Aguas Residuales en el Cantón Santa Isabel. Bachelor's Thesis, Universidad de Cuenca, San Joaquin County, CA, USA, December 2015. Available online: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23197>
- Chen, X., Zhu, H., Xu, Y., Shutes, B., Yan, B., & Zhou, Q. (2018). Effect of Aeration Modes and COD/N Ratios on Organic Matter and Nitrogen Removal in Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland Mesocosms. *Water*, 10(11), 1530. <https://doi.org/10.3390/w10111530>
- Correa-Torres, S. N., Gamarra, Y., Salazar, A. A., & Pitta, N. M. (2015). Evaluación de la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros en agua residual doméstica, utilizando *Phragmites australis* en Bioreactores. *Información tecnológica*, 26(6), 89-98. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642015000600011>
- de la Varga, D., Soto, M., Arias, C. A., van Oirschot, D., Kilian, R., Pascual, A., & Álvarez, J. A. (2020). Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment and Removal of Nutrients. In *Waste Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (pp. 559-587). IGI global.
- Díaz, F. J., Anthony, T. O., & Dahlgren, R. A. (2012). Agricultural pollutant removal by constructed wetlands: Implications for water management and design. *Agricultural Water Management*, 104, 171-183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.012>

- Govaerts R, (2013). Lista de verificación mundial de Zingiberaceae. Richmond, Londres: Royal Botanic Gardens, Kew. Available online: <http://apps.kew.org/wcsp/>
- Gupta, A., Maurya, R., Roy, R. K., Sawant, S. V., & Yadav, H. K. (2013). AFLP based genetic relationship and population structure analysis of Canna—An ornamental plant. *Scientia horticulturae*, 154, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.005>
- Güven, H., Dereli, R. K., Özgün, H., Ersahin, M. E., & Öztürk, I. (2019). Towards sustainable and energy efficient municipal wastewater treatment by up-concentration of organics. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 145-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.002>
- Guzmán, A. B. M., & Palenius, H. G. N. (2017). Utilización De Un Sistema De Inmersión Temporal (Sit) Para Multiplicar Plantas Ornamentales De Agave Victoriae-Reginae (T. Moore). *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 1429-1433. Available online: <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1283/913> (accessed on 1 March 2018). (in Spanish).
- Haghshenas-Adarmanabadi, A., Heidarpour, M., & Tarkesh-Esfahani, S. (2016). Evaluation of horizontal-vertical subsurface hybrid constructed wetlands for tertiary treatment of conventional treatment facilities effluents in developing countries. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(1), 28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2718-6>
- Han, W., Luo, G., Luo, B., Yu, C., Wang, H., Chang, J., & Ge, Y. (2019). Effects of plant diversity on greenhouse gas emissions in microcosms simulating vertical constructed wetlands with high ammonium loading. *Journal of Environmental Sciences*, 77, 229-237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.08.001>
- He, K., Lv, T., Wu, S., Guo, L., Ajmal, Z., Luo, H., & Dong, R. (2016). Treatment of alkaline stripped effluent in aerated constructed wetlands: Feasibility evaluation and performance enhancement. *Water*, 8(9), 386. DOI: <https://doi.org/10.3390/w8090386>
- Hernández, M. E. A. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *RINDERESU*, 1(2), 01-12. Available online: <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/16> (accessed on 1 March 2018). (in Spanish).

- Karathanasis, A. D., Potter, C. L., & Coyne, M. S. (2003). Vegetation effects on fecal bacteria, DBO, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecological engineering*, 20(2), 157-169. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(03\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(03)00011-9)
- Konnerup, D., Koottatep, T., & Brix, H. (2009). Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with Canna and Heliconia. *Ecological engineering*, 35(2), 248-257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.04.018>
- Kress WJ; Liu AZ; Newman M; Li QingJun, 2005. La filogenia molecular de *Alpinia* (*Zingiberaceae*): un complejo y polifilético género de gingers. *American Journal of Botany*, 92 (1): 167-178. Available online: <http://www.amjbot.org/>
- Kujala, K., Karlsson, T., Nieminen, S., & Ronkanen, A. K. (2019). Design parameters for nitrogen removal by constructed wetlands treating mine waters and municipal wastewater under Nordic conditions. *Science of The Total Environment*, 662, 559-570. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.124>
- Lan, W., Zhang, J., Hu, Z., Ji, M., Zhang, X., Zhang, J., ... & Yao, G. (2018). Phosphorus removal enhancement of magnesium modified constructed wetland microcosm and its mechanism study. *Chemical Engineering Journal*, 335, 209-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.150>
- Lazcano, C., Tsang, A., Doane, T. A., Pettygrove, G. S., Horwath, W. R., & Burger, M. (2016). Soil nitrous oxide emissions in forage systems fertilized with liquid dairy manure and inorganic fertilizers. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 225, 160-172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.04.009>
- Leiva, A. M., Núñez, R., Gómez, G., López, D., & Vidal, G. (2018). Performance of ornamental plants in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow constructed wetlands for treating wastewater. *Ecological Engineering*, 120, 116-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.023>
- Loges, V., TEIXEIRA, M. D. C., CASTRO, A. D., & COSTA, A. D. (2005). Colheita, pós-colheita e embalagem de flores tropicais em Pernambuco. *Horticultura Brasileira*, 23(3), 699-702. Available online:

- <http://www.scielo.br/pdf/0D/hb/v23n3/a01v23n3.pdf> (accessed on 1 March 2018). (in Spanish).
- Lu, S., Zhang, X., Wang, J., & Pei, L. (2016). Impacts of different media on constructed wetlands for rural household sewage treatment. *Journal of Cleaner Production*, 127, 325-330. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.166>
- Marín-Muñiz, J. L. (2017). HUMEDALES CONSTRUIDOS EN MÉXICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, PRODUCCION DE PLANTAS ORNAMENTALES Y REUSO DEL AGUA. *Agroproductividad*, 10(5). Available online:
<https://web.a.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=01887394&asa=Y&AN=123874265&h=67wkno4hX%2bybrqBJ7WYOAL TAX2oL8VLHyRppp%2b7cDB7XT5ypeWjDh9beRmVw2Hr7ZqEZmGYY55pw7irh6xOqw%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrlNo tAuth&crlhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%3d01887394%26asa%3dY%26AN%3d123874265> (accessed on 3 March 2018). (in English).
- Marín-Muñiz, J. L., García-González, M. C., Ruelas-Monjardín, L. C., & Moreno-Casasola, P. (2018). Influence of different porous media and ornamental vegetation on wastewater pollutant removal in vertical subsurface flow wetland microcosms. *Environmental Engineering Science*, 35(2), 88-94. DOI: <https://doi.org/10.1089/ees.2017.0061>
- Metcalf & Eddy (1991) Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse. *Water resources and environmental engineering*, 73, 50-51. Available online: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ar300029v> (accessed on 5 March 2018). (in English).
- Morvannou, A., Forquet, N., Vanclooster, M., & Molle, P. (2013). Characterizing hydraulic properties of filter material of a vertical flow constructed wetland. *Ecological engineering*, 60, 325-335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.042>
- Ovando-Medina, I., Adriano-Anaya, L., Chávez-Aguilar, A., Oliva-Llaven, A., Ayora-Talavera, T., Dendooven, L., ... & Salvador-Figueroa, M. (2007). Ex vitro survival and early growth of *Alpinia purpurata* plantlets inoculated with *Azotobacter* and

- Azospirillum. *Pakistan journal of biological sciences: PJBS*, 10(19), 3454-3457. Available online: <http://www.docsdrive.com/pdfs/ansinet/pjbs/2007/3454-3457.pdf> (accessed on 3 March 2018). (in English).
- Pech, O. M. S., & Ocaña, G. L. (2014). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES. *Kuxulkab'*, 19(36). DOI: <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a19n36.337>
- Peters, E.; J. Campoy F. y K. Flessa (Eds.). *Ciénega de Santa Clara Comprehensive Monitoring Program*. Publicación especial del Instituto Nacional de Ecología, México. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.057>
- Prince, L. M. (2010). Phylogenetic relationships and species delimitation in *Canna* (Cannaceae). *Diversity, phylogeny, and evolution in the Monocotyledons*, 307-331. Available online: [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33163564/Prince_2010.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DPhylogenetic Relationships and Species D.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200121%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20200121T012303Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=9e37c9bdab552b4f8c01f0c11a76d8f4eb9c46621e5b22f7c565bf72205773](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33163564/Prince_2010.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DPhylogenetic+Relationships+and+Species+D.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200121%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20200121T012303Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=9e37c9bdab552b4f8c01f0c11a76d8f4eb9c46621e5b22f7c565bf72205773)
- 39
- Randall RP, (2012). Un compendio global de malas hierbas. Perth, Australia: Departamento de Agricultura y Alimentación de Australia Occidental, 1124 pp. Available online: <Http://www.cabi.org/isc/FullTextPDF/2013/20133109119.pdf>
- Rugaika, A. M., Van Deun, R., Njau, K. N., & Van der Bruggen, B. (2019). Phosphorus recovery as calcium phosphate by a pellet reactor pre-treating domestic wastewater before entering a constructed wetland. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(7), 3851-3860. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-02179-1>
- Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Zamora-Castro, S. A., Sandoval-Salas, F., & Alvarado-Lassman, A. (2019b). Evaluation of Wastewater Treatment by Microcosms of Vertical Subsurface Wetlands in Partially Saturated Conditions Planted with Ornamental Plants

- and Filled with Mineral and Plastic Substrates. *International journal of environmental research and public health*, 16(2), 167. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16020167>
- Sandoval, L., Zamora-Castro, S. A., Vidal-Álvarez, M., & Marín-Muñiz, J. L. (2019a). Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Applied Sciences*, 9(4), 685. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9040685>
- Sandoval-Herazo, J. (2018) (b). Desarrollo de Plantas Ornamentales Terrestres en Microcosmos de Humedales Construidos. Investigación en el Sistema de Educación Superior Tecnológica del Estado de Veracruz. Publisher: Transferencia e Innovación, Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. Xalapa-Enríquez Veracruz, México. Available online: <https://diverticiencia.com/archivos/encuentros/libroresumenes5encuentro1.pdf> (accessed on 1 March 2018). (in Spanish).
- Sandoval-Herazo, L. C., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J. L., Méndez-Contreras, J. M., & Zamora-Castro, S. A. (2018). (a). Effects of the Use of Ornamental Plants and Different Substrates in the Removal of Wastewater Pollutants through Microcosms of Constructed Wetlands. *Sustainability*, 10(5), 1594. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10051594>
- Saraiva, C. B., Matos, A. T., Matos, M. P., & Miranda, S. T. (2018). INFLUENCE OF SUBSTRATE AND SPECIES ARRANGEMENT OF CULTIVATED GRASSES ON THE EFFICIENCY OF HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS. *Engenharia Agrícola*, 38(3), 417-425. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n3p417-425/2018>
- Shiwei, C., Zhaoqian, J., Peng, Y., Wang, Y., & Wang, Y. (2019). Performance of constructed wetlands with different substrates for the treated effluent from the municipal sewage plant. *Journal of Water Reuse and Desalination*. DOI: [10.2166/wrd.2019.032](https://doi.org/10.2166/wrd.2019.032) February 2018). (in Spanish).
- Tong, S., Rodriguez-Gonzalez, L. C., Feng, C., & Ergas, S. J. (2017). Comparison of particulate pyrite autotrophic denitrification (PPAD) and sulfur oxidizing denitrification (SOD) for treatment of nitrified wastewater. *Water Science and Technology*, 75(1), 239-246. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2016.502>

- USEPA (2000). A Handbook of Constructed Wetlands. A guide to creating wetlands for agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater in the MidAtlantic region. Vol. 1: General considerations. Washintong, DC: United States Environmental Protection Agency. p. 32. DOI: <http://www.nal.usda.gov/>
- Vacca, G., Wand, H., Nikolausz, M., Kuschik, P., & Kästner, M. (2005). Effect of plants and filter materials on bacteria removal in pilot-scale constructed wetlands. *Water research*, 39(7), 1361-1373. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.01.005>
- Valente, J. P. S., Padilha, P. M., & Silva, A. M. M. (2018). Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu-SP. *Eclética Química Journal*, 22(1). DOI: <http://dx.doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v22.1.1997.p%25p>
- Villalobos, A., & Díaz, J. A. (2018). Capítulo 3. Calidad del ambiente, vulnerabilidad y acciones ante el cambio climático: Costa Rica en perspectiva comparada. *Avances hacia una política y economía sostenible en el contexto del cambio climático en Costa Rica*, 64. Available online: https://www.researchgate.net/profile/Victor_Milla/publication/325695386_Uso_de_los_recursos_forestales_como_elementos_para_el_desarrollo_del_territorio_indigena_Tayni_Perspectivas_a_futuro_en_el_contexto_de_la_Estrategia_Nacional_REDD/links/5b1e9bf545851587f2a07a12/Usode-los-recursos-forestales-como-elementos-para-el-desarrollo-del-territorio-indigena-Tayni-Perspectivas-a-futuro-en-el-contexto-de-la-Estrategia-Nacional-REDD.pdf#page=65 (accessed on 1 March 2018). (in Spanish).
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the total environment*, 380(1-3), 48-65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133-156. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>.
- Wang, M., Zhang, D. Q., Dong, J. W., & Tan, S. K. (2017). Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate—A review. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 293-311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.019>

- Wang, X., Tian, Y., Liu, H., Zhao, X., & Wu, Q. (2019). Effects of influent COD/TN ratio on nitrogen removal in integrated constructed wetland–microbial fuel cell systems. *Bioresource technology*, 271, 492-495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.039>
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., ... & Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation. *Bioresource technology*, 175, 594-601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>
- Wu, S., Austin, D., Liu, L., & Dong, R. (2011). Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas. *Ecological Engineering*, 37(6), 948-954. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.002>
- Yang, Y., Zhao, Y., Liu, R., & Morgan, D. (2018). Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands. *Bioresource technology*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.085>
- Zamora-Castro, S. A., Marín-Muñiz, J. L., Sandoval, L., Vidal-Álvarez, M., & Carrión-Delgado, J. M. (2019). Effect of Ornamental Plants, Seasonality, and Filter Media Material in Fill-and-Drain Constructed Wetlands Treating Rural Community Wastewater. *Sustainability*, 11(8), 2350. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11082350>
- Zhang, D. Q., Jinadasa, K. B. S. N., Gersberg, R. M., Liu, Y., Tan, S. K., & Ng, W. J. (2015). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000–2013). *Journal of Environmental Sciences*, 30, 30-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.10.013>
- Zhang, L., Lyu, T., Zhang, Y., Button, M., Arias, C. A., Weber, K. P., ... & Carvalho, P. N. (2018). Impacts of design configuration and plants on the functionality of the microbial community of mesocosm-scale constructed wetlands treating ibuprofen. *Water research*, 131, 228-238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.050>
- Zhang, X. B., Peng, L. I. U., Yang, Y. S., & Chen, W. R. (2007). Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes. *Journal of Environmental Sciences*, 19(8), 902-909. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60150-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60150-8)

- Zhindón, R., Cartuche, D., España, P., & Maldonado, M. (2018, July). Evaluación ambiental de aguas residuales: estero y manglar el macho de la ciudad de Machala. In *Conference Proceedings* (Vol. 2, No. 2). Available online: <http://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/article/view/277> (accessed on 6 March 2018). (in Spanish).
- Zurita, F., & White, J. (2014). Comparative study of three two-stage hybrids ecological wastewater treatment systems for producing high nutrient, reclaimed water for irrigation reuse in developing countries. *Water*, 6(2), 213-228. DOI: <https://doi.org/10.3390/w6020213>
- Zurita, F., de Anda, J., & Belmont, M. A. (2006). Performance of laboratory-scale wetlands planted with tropical ornamental plants to treat domestic wastewater. *Water Quality Research Journal*, 41(4), 410-417. DOI: <https://doi.org/10.2166/wqrj.2006.044>
- Zurita, F., De Anda, J., & Belmont, M. A. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(5), 861-869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.026>

BIBLIOGRAFÍA CAPITULO VI

- Arden, S., & Ma, X. (2018). Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: a review. *Science of The Total Environment*, 630, 587-599.
- Bai, S., Lyu, T., Ding, Y., Li, Z., Wang, D., You, S., & Xie, Q. (2017). Campus sewage treatment in multilayer horizontal subsurface flow constructed wetlands: Nitrogen removal and microbial community distribution. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 45(11), 1700254.
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., ... & Masi, F. (2019). A review of nature-based solutions for greywater treatment: applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of The Total Environment*, 134731. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
- CONAPO (Concejo Nacional de Población en México) (2020). Localidades Rurales en México. Encontrar en: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Localidades_rurales
- Dean, A. P., Sigee, D. C., Estrada, B., & Pittman, J. K. (2010). Using FTIR spectroscopy for rapid determination of lipid accumulation in response to nitrogen limitation in freshwater microalgae. *Bioresource technology*, 101(12), 4499-4507.
- Ding, Y., Lyu, T., Bai, S., Li, Z., Ding, H., You, S., & Xie, Q. (2018). Effect of multilayer substrate configuration in horizontal subsurface flow constructed wetlands: assessment of treatment performance, biofilm development, and solids accumulation. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(2), 1883-1891.
- FAO (Organización de las naciones unidad para la alimentación y agricultura). (2020). Las zonas rurales, a menudo consideradas focos de pobreza, so caves para el crecimiento económico de los países en desarrollo. Encontrar en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/1042101/icode/>
- Kizito, S., Lv, T., Wu, S., Ajmal, Z., Luo, H., & Dong, R. (2017). Treatment of anaerobic digested effluent in biochar-packed vertical flow constructed wetland columns: role of media and tidal operation. *Science of the Total Environment*, 592, 197-205.

- Ly, T., Zhang, Y., Zhang, L., Carvalho, P. N., Arias, C. A., & Brix, H. (2016). Removal of the pesticides imazalil and tebuconazole in saturated constructed wetland mesocosms. *Water research*, *91*, 126-136.
- Marín-Muniz, J. L. (2016). REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES POR MEDIO DE HUMEDALES ARTIFICIALES ESTABLECIDOS EN EL MUNICIPIO DE ACTOPAN, VERACRUZ, MEXICO REMOVAL OF WASTEWATER POLLUTANT IN ARTIFICIAL WETLANDS IMPLEMENTED IN ACTOPAN, VERACRUZ, MEXICO. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *15*(2), 553-563.
- Marín-Muñiz, J.; Humedales, L. *Riñones del Planeta y Hábitat de Múltiples Especies*; Editora de Gobierno del Estado de Veracruz: Xalapa, Mexico, 2018.
- Metsoviti, M. N., Papapolymerou, G., Karapanagiotidis, I. T., & Katsoulas, N. (2020). Effect of Light Intensity and Quality on Growth Rate and Composition of *Chlorella vulgaris*. *Plants*, *9*(1), 31.
- Piñeyro, M., Chalar, G., & Quintans, F. (2019). Constructed wetland scale model: organic matter and nutrients removal from the effluent of a fish processing plant. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-12.
- Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Zamora-Castro, S. A., Sandoval-Salas, F., & Alvarado-Lassman, A. (2019a). Evaluation of Wastewater Treatment by Microcosms of Vertical Subsurface Wetlands in Partially Saturated Conditions Planted with Ornamental Plants and Filled with Mineral and Plastic Substrates. *International journal of environmental research and public health*, *16*(2), 167.
- Sandoval-Herazo, L., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J., Méndez-Contreras, J., & Zamora-Castro, S. A. (2018). Effects of the use of ornamental plants and different substrates in the removal of wastewater pollutants through microcosms of constructed wetlands. *Sustainability*, *10*(5), 1594.
- SEMARNAT (2018). Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto

- invernadero (GyCEI) del sector Aguas Residuales de México. Encontrar en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/461753/Aguas_residuales.pdf
- Shelef, O., Gross, A., & Rachmilevitch, S. (2013). Role of plants in a constructed wetland: current and new perspectives. *Water*, 5(2), 405-419.
- Bolton, L., Joseph, S., Greenway, M., Donne, S., Munroe, P., & Marjo, C. E. (2019). Phosphorus adsorption onto an enriched biochar substrate in constructed wetlands treating wastewater. *Ecological Engineering: X*, 1, 100005.
- Tanner, C. C., & Sukias, J. P. (1995). Accumulation of organic solids in gravel-bed constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 32(3), 229-239.
- Stec, A. (2020). Alternative Water Resources. In *Sustainable Water Management in Buildings* (pp. 33-60). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-35959-1_4
- Téllez, A. A. C., Rodríguez, S. S. F., D'ors de Blas, A., García, L. C., Garnica-Romo, M. G., & Camacho, M. C. B. (2020). Evolution in the photosynthetic oxygen rate of a Cd-resistant strain of *Dictyosphaerium chlorelloides* by changes in light intensity and temperature. *Chemosphere*, 239, 124672.
- Tian, L., Yu, W., Schuster, P. F., Wen, R., Cai, Z., Wang, D., ... & Guo, X. (2020). Control of seasonal water vapor isotope variations at Lhasa, southern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 580, 124237.
- Villa-Mancera, A., & Reynoso-Palomar, A. (2019). High prevalence, potential economic impact, and risk factors of *Fasciola hepatica* in dairy herds in tropical, dry and temperate climate regions in Mexico. *Acta tropica*, 193, 169-175.
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133-156.
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., ... & Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation. *Bioresource technology*, 175, 594-601.

- Zamora, S., Sandoval, L., Marín-Muñíz, J. L., Fernández-Lambert, G., & Hernández-Orduña, M. G. (2019). Impact of ornamental vegetation type and different substrate layers on pollutant removal in constructed wetland mesocosms treating rural community wastewater. *Processes*, 7(8), 531.
- Zhang, L., Lyu, T., Zhang, Y., Button, M., Arias, C. A., Weber, K. P., ... & Carvalho, P. N. (2018). Impacts of design configuration and plants on the functionality of the microbial community of mesocosm-scale constructed wetlands treating ibuprofen. *Water research*, 131, 228-238.
- García, J., Rousseau, D. P., Morato, J., Lesage, E. L. S., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2010). Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(7), 561-661.
- Haddis, A., Van der Bruggen, B., & Smets, I. (2020). Constructed wetlands as nature based solutions in removing organic pollutants from wastewater under irregular flow conditions in a tropical climate. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20(1), 38-47.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the total environment*, 380(1-3), 48-65.
- Torres Bojorges, Á. X., Hernández Razo, N. A., Urquieta, F., Aseret, A., & Zurita Martínez, F. (2017). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(1), 37-47.
- Wang, Y., Cai, Z., Sheng, S., Pan, F., Chen, F., & Fu, J. (2019). Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 134736.

BIBLIOGRAFÍA CAPITULO VII

- Almejo, R., & Campos, M. (2013). Especialización y desempeño en sectores de uso intensivo del conocimiento de las ciudades mexicanas, 2000-2010. Ciudad de México: Consejo Nacional de Población.
- Conapo (2015). Nota metodológica de la estimación del índice de marginación por entidad federativa y municipio 2015, http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61552/Nota_metodol_gica_marginaci_n.pdf, 11-09-2017.
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological economics*, 41(3), 393-408. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- DiMuro, J. L., Guertin, F. M., Helling, R. K., Perkins, J. L., & Romer, S. (2014). A financial and environmental analysis of constructed wetlands for industrial wastewater treatment. *Journal of Industrial Ecology*, 18(5), 631-640. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12129>
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). (2010). Enciclopedia de los Municipios y delegaciones de México. México: INAFED. Recuperado de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM30veracruz/municipios/30004a.html>
- INEGI (2015). Encuentra inter censal de la población en México. <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>.
- Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological economics*, 86, 235-245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019>
- Guven, H., Dereli, R. K., Ozgun, H., Ersahin, M. E., & Ozturk, I. (2019). Towards sustainable and energy efficient municipal wastewater treatment by up-concentration of organics. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 145-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.002>

- Marín-Muniz, J. L. (2016). Remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedales artificiales establecidos en el municipio de Actopan, Veracruz, Mexico removal of wastewater pollutant in artificial wetlands implemented in Actopan, Veracruz, Mexico. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(2), 553-563.
- Rendón, Ó. H. (2014). Modelo del plan de negocios para la micro y pequeña empresa (Primera ed.). México: Patria.
- Sandoval, L., Zamora-Castro, S. A., Vidal-Álvarez, M., & Marín-Muñiz, J. L. (2019a). Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Applied Sciences*, 9(4), 685. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9040685>
- Santana, R. M. (2015). Excel para contadores y administrativos. México: Instituto Mexicano de Contadores Públicos, A.C.
- Strauch, A. A. (2002). Inversión pública sectorial y crecimiento económico: Una aproximación desde la metodología VAR. Colombia: Departamento Nacional de Planeación Dirección de Estudios Económicos.
- Talberth, J., E. Gray, L. Yonavjak, and T. Gartner. 2013. Green versus gray: Nature's solutions to infrastructure demands. *Solutions* 4(1). Disponible en: <http://thesolutionsjournal.anu.edu.au/node/1241>.
- Villalobos, A., & Díaz, J. A. (2018). Capítulo 3. Calidad del ambiente, vulnerabilidad y acciones ante el cambio climático: Costa Rica en perspectiva comparada. *Avances hacia una política y economía sostenible en el contexto del cambio climático en Costa Rica*, 64. Available online: https://www.researchgate.net/profile/Victor_Milla/publication/325695386_Uso_de_los_recursos_forestales_como_elementos_para_el_desarrollo_del_territorio_indigena_Tayni_Perspectivas_a_futuro_en_el_contexto_de_la_Estrategia_Nacional_REDD/links/5b1e9bf545851587f2a07a12/Usode-los-recursos-forestales-como-elementos-para-el-desarrollo-del-territorio-indigena-Tayni-Perspectivas-a-futuro-en-el-contexto-de-la-Estrategia-Nacional-REDD.pdf#page=65 (accessed on 1 March 2018). (in Spanish).

- Zhang, D. Q., Jinadasa, K. B. S. N., Gersberg, R. M., Liu, Y., Tan, S. K., & Ng, W. J. (2015). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000–2013). *Journal of Environmental Sciences*, 30, 30-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.10.013>
- Zhindón, R., Cartuche, D., España, P., & Maldonado, M. (2018, July). Evaluación ambiental de aguas residuales: estero y manglar el macho de la ciudad de Machala. In *Conference Proceedings* (Vol. 2, No. 2). Available online: <http://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/article/view/277> (accessed on 6 March 2018). (in Spanish).

ANEXOS

Anexo I: Microcosmos de Humedales

Sustratos empleados para la elaboración de los humedales



Piedra Volcánica.

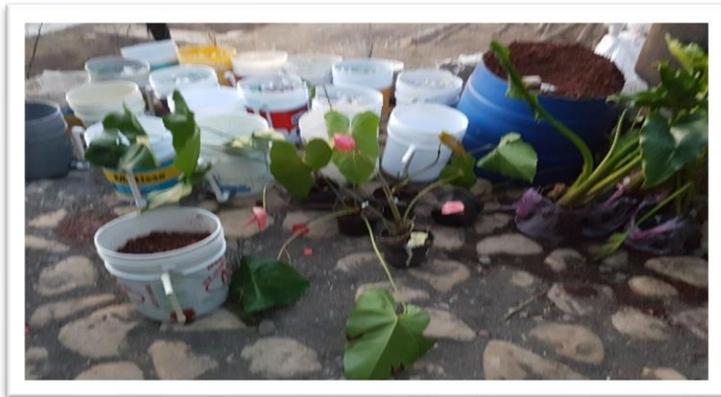


PET como sustrato.



Piedra Porosa de Rio.

Elección de plantas ornamentales para la remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas.



Anturio planta ornamental.



Alcatraz planta ornamental.



Lavanda planta ornamental.



Cuna de Moisés planta ornamental.

Construcción de microcosmos compuestos con sustratos alternativos y plantas ornamentales.



Plantas ornamentales sembradas en piedra volcánica, piedra porosa de río, pet.



Instalación hidráulica en el humedal construido.



Se instaló tubo de PVC de manera horizontal en el humedal.



Se instalaron goteros los cuales fueron calibrados con un flujo constante para cada tipo de sustrato cabe mencionar que el tiempo de retención de las plantas es de 3 días.

Sistema hidráulico terminado.



Sistema hidráulico terminado.

Colocación del sistema de almacenamiento de aguas tratadas.



Contenedores de agua residual tratada.

Recolección de agua residual tratada en el microcosmo del humedal construido.



Refrigeración de las muestras.



Se refrigeraron muestras a temperaturas de 4°C para la realización de las pruebas en el laboratorio.

Realización de pruebas de (N-NO₃-P-P₀₄, EC, TDS, pH, °C, DQO y DBO



Realización de pruebas de fosfatos y nitratos.



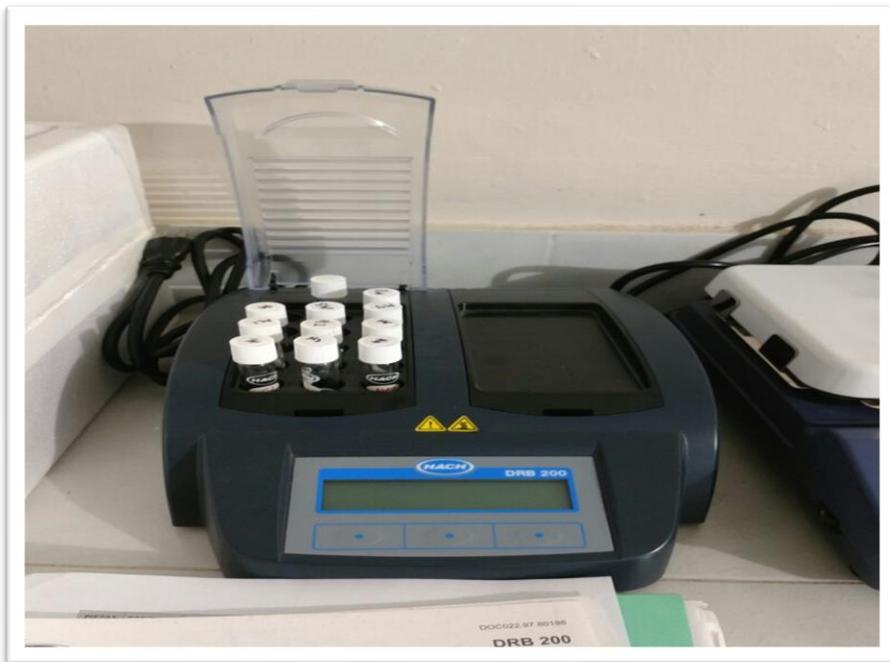
HI 98130 Medidores impermeables de pH, CE, TDS y temperatura



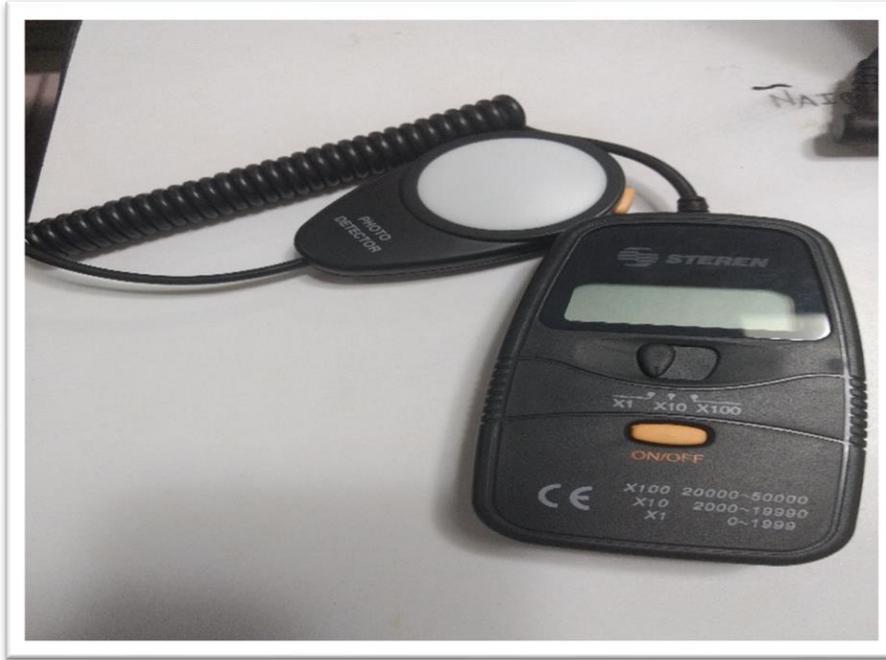
Estación meteorológica utilizada para la obtención de temperatura y humedad del medio ambiente.



Estación meteorológica ubicada en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla.



DRB200: Digital reactor de bloque: 21 x 16 mm pozos vial, 4 x 20 mm pozos vial, 115 Vac.



Digital Luxmeter- Medidor de luminosidad.

Anexo II: Humedales Domiciliarios





Anexos III: Humedales Comunitarios































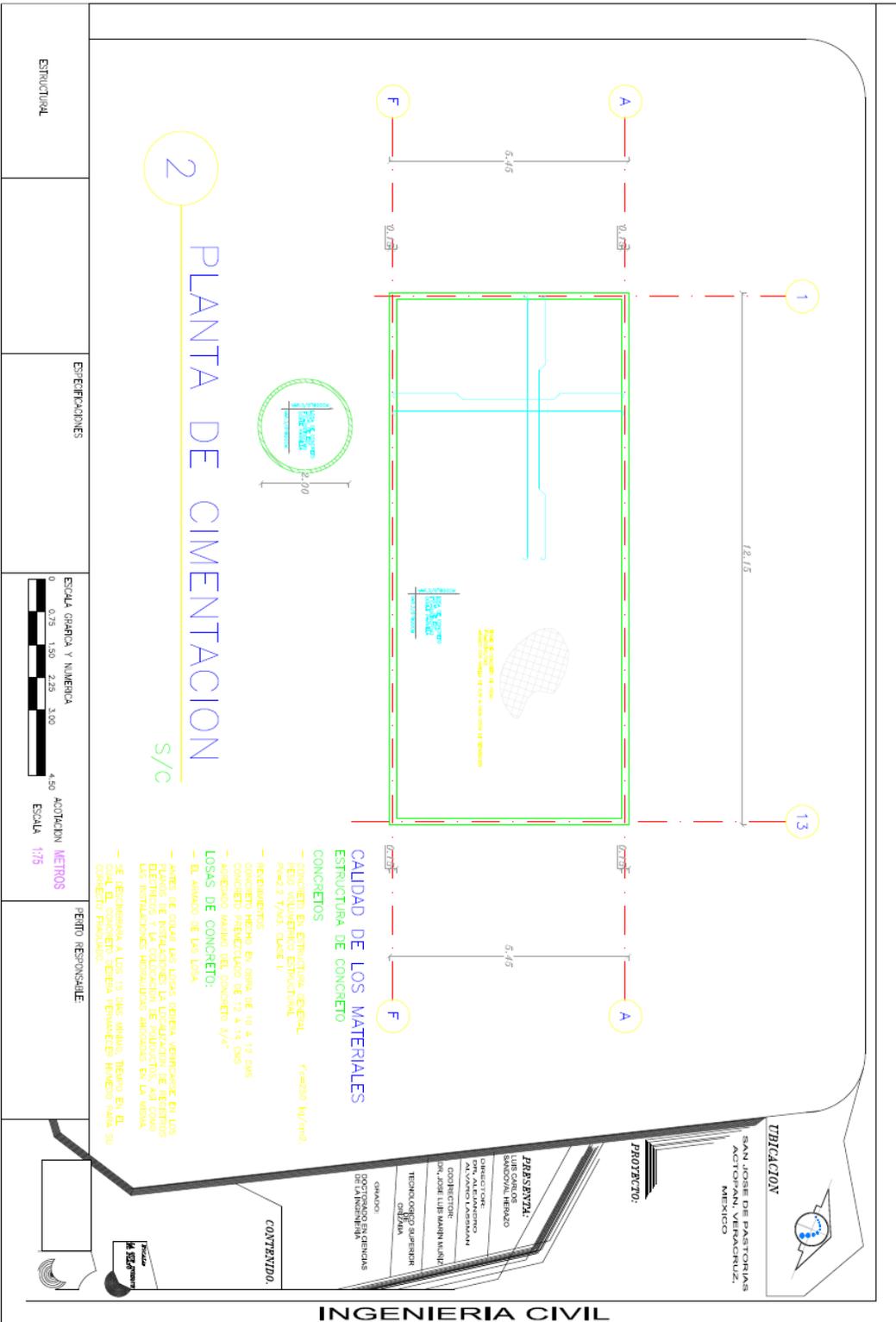


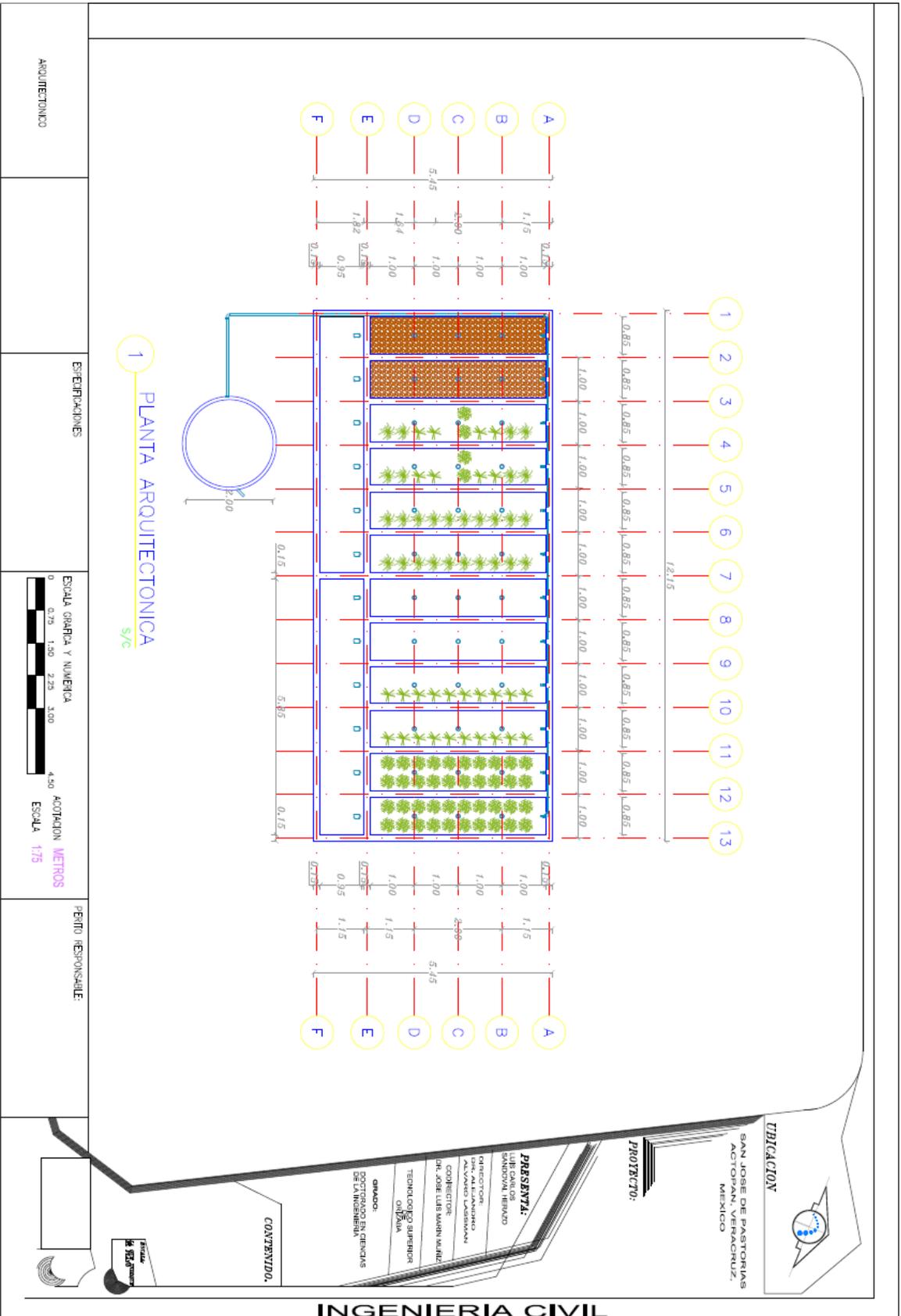




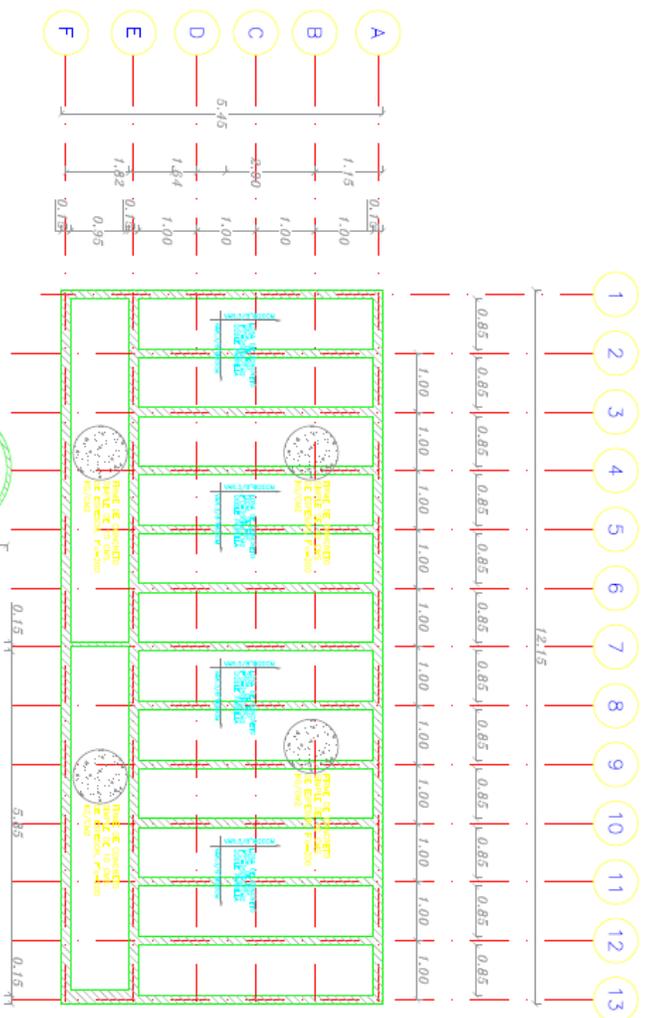


PLANOS





INGENIERIA CIVIL



1 PLANTA DE CIMENTACION S/C

- ### CALIDAD DE LOS MATERIALES
- #### ESTRUCTURA DE CONCRETO
- CONCRETOS
 - CONCRETO EN ESTRUCTURA GENERAL
 - RESO VOLUMETRICO ESTRUCTURAL
 - F_c=22 (TAMAS CLASE I)
 - REFINIENDOS
 - CONCRETO HECHO EN OBRA DE 10 A 12 CMS
 - CONCRETO PRECERADO DE 12 A 14 CMS
 - AGREGADO MAXIMO DEL CONCRETO 3/4"
 - LOSAS DE CONCRETO:
 - EL ARMADO DE LAS LOSAS
- ANTES DE COLAR LAS LOSAS DEBERA VERIFICARSE EN LAS PLANTAS DE CIMENTACION Y PLANOS DE ALICATADO DE LOS MUROS Y LA COLONIAS DE PUERTOS DE PASADIZOS LAS INSTALACIONES HIDRAULICAS HECHAS EN LA MISMA.
- SE RESOLVERA A LOS 15 DIAS SIGUIENTES, TIENDO EN CUENTA QUE EL CONCRETO DEBERA PERMANECER HUMEDO PARA SU COBERTO PROTEGIDO.

ESPECIFICACIONES

ESCALA GRAFICA Y NUMERICA

ADOTACION ESCALA METROS

ESCALA 1/75

PERITO RESPONSABLE

UBICACION

SAN JOSE DE PASTORIAS
ACTOPAN, VERACRUZ,
MEXICO

PROYECTO:

PRESENTA:

INGENIERO EN CIVIL
SANDOR VALERIANO

DIRECTOR:
DR. ALBAJORDO
ALVARO SANCHEZ

COORDINADOR:
DR. JOSE LUIS MARTIN MUNIZ

TECNOLOGICO SUPERIOR
OAXACA

GRUPO:
DOCTORADO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA

CONTENIDO:



UNIVERSIDAD
SAN JOSÉ DE PASTORIAS
ACTOPAN, VERACRUZ,
MÉXICO

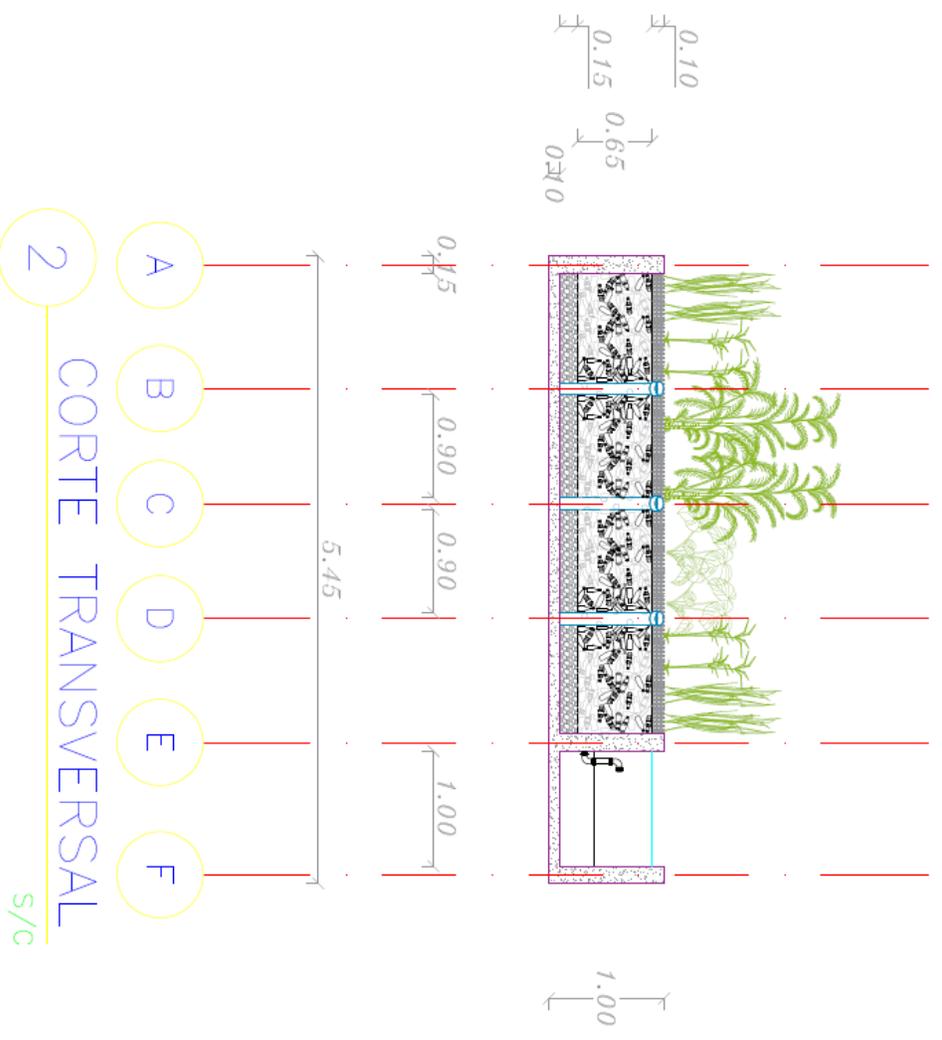
PROYECTO:

PRESENTA:
LUIS CARLOS SANDOVAL HERAZO
DIRECTOR DE ALUMNADO EN VIVO
COORDINADOR
DR. JOSÉ LUIS MARTÍN MUÑOZ
TECNÓLOGO SUPERIOR
OILTECA
GRUPO:
DOCTORADO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA

CONTENIDO:

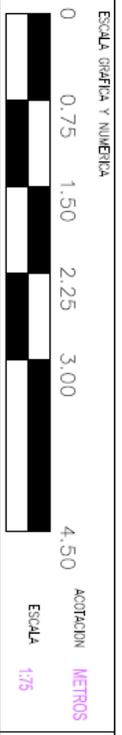


INGENIERIA CIVIL

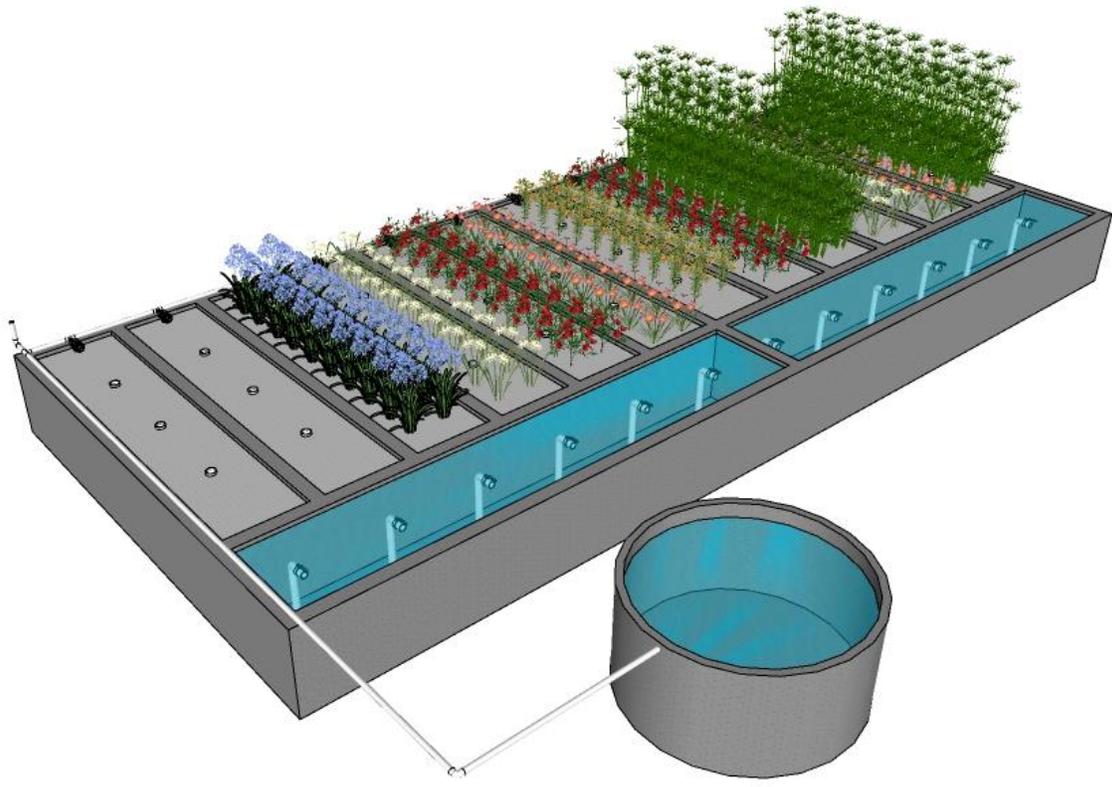
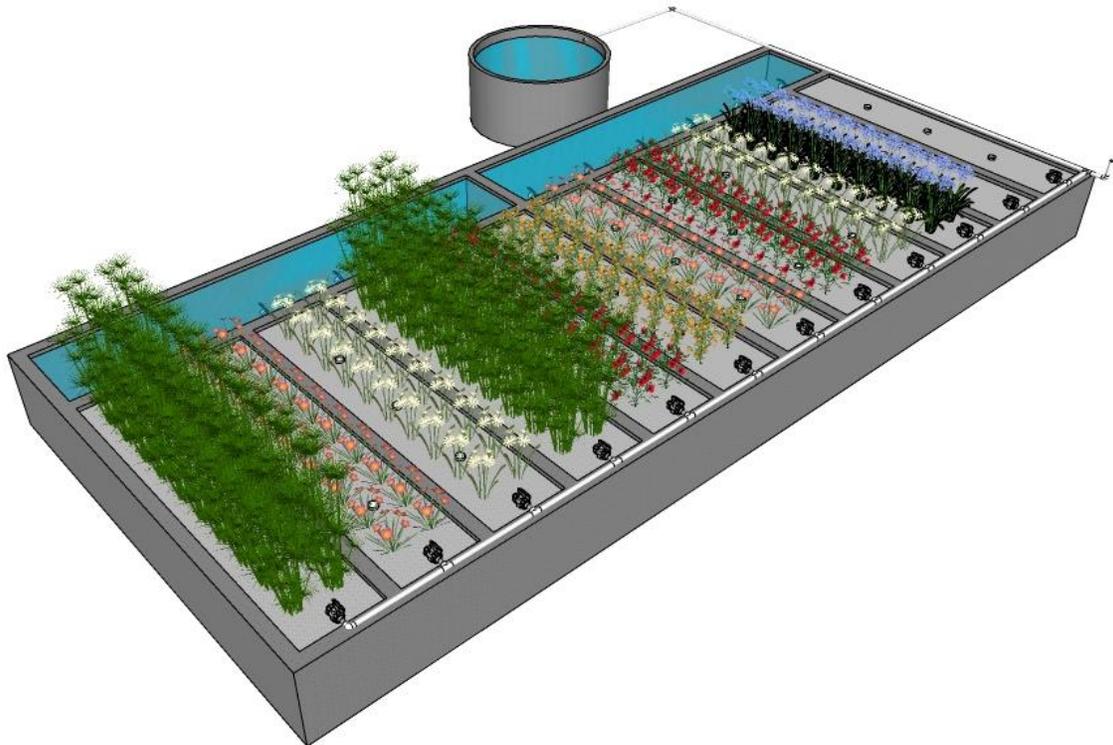


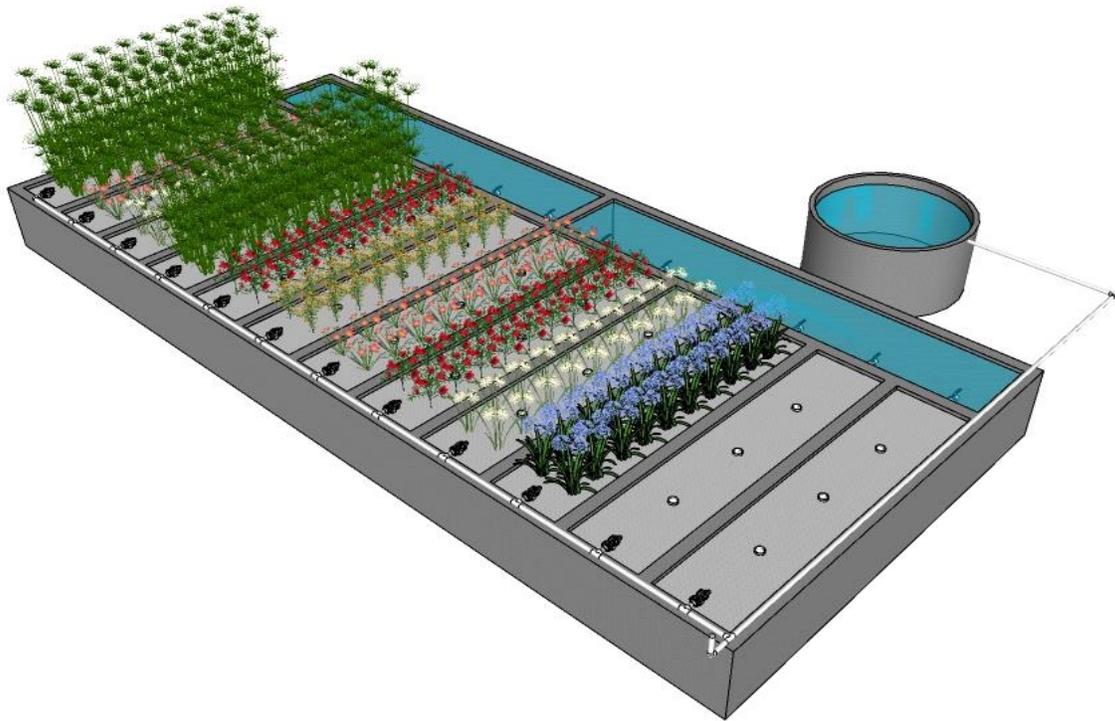
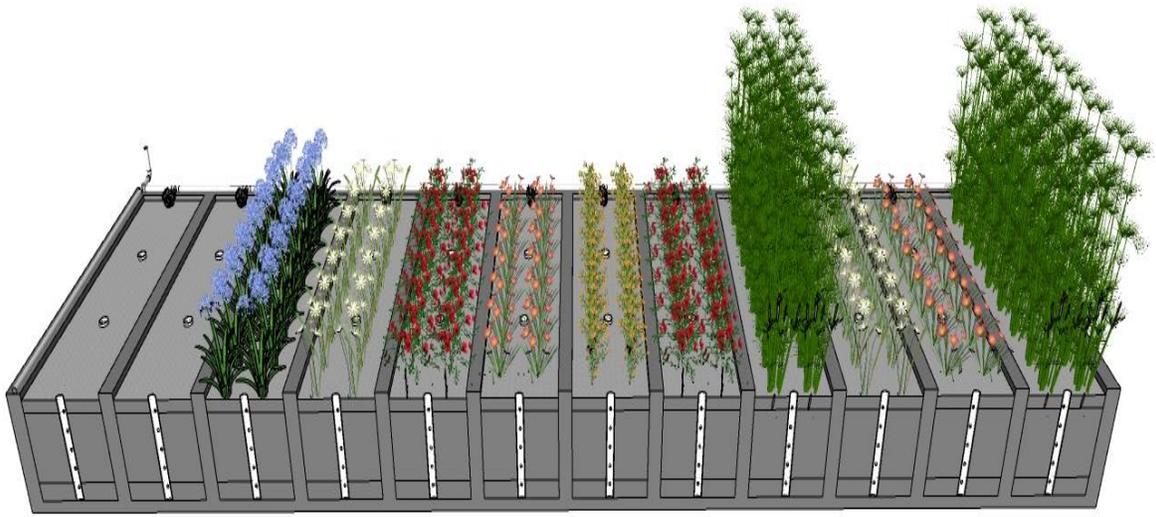
A B C D E F
2
CORTE TRANSVERSAL
S/C

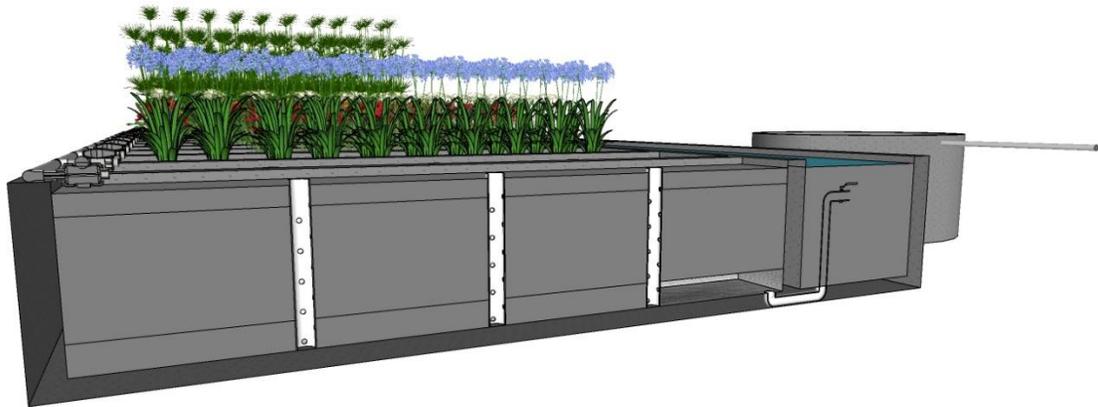
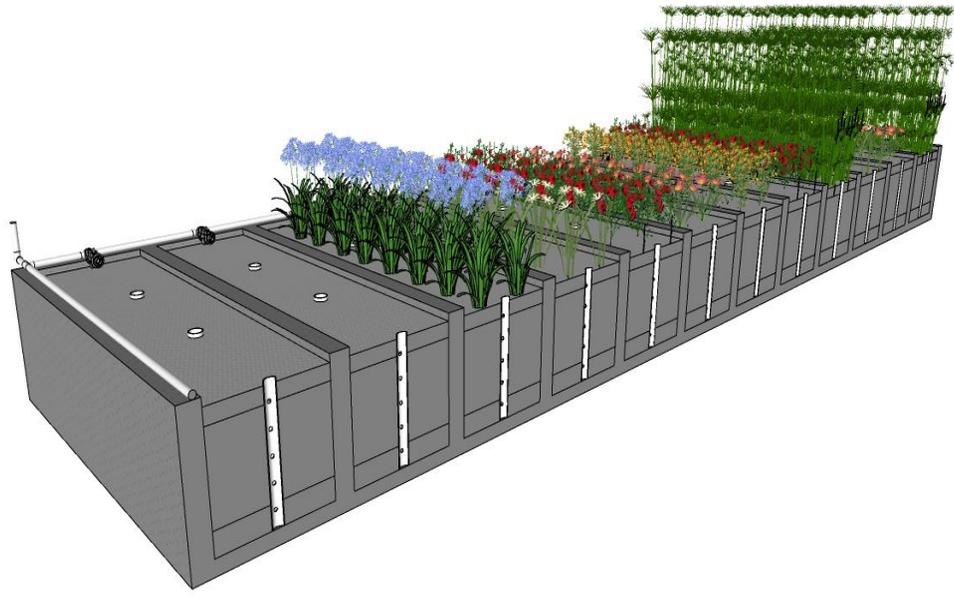
ESTRUCTURAL



FERRI RESPONSABLE







Anexo IV: Corrida financiera

A. PRESUPUESTO DE INVERSIÓN

CONCEPTOS	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	MONTOS	PROGRAMA	PARTICIPACIÓN CIUDADANA	TOTAL
ACTIVO FIJO							
COSTO DE MATERIALES	FLETE	1	\$ 543,661.50	\$ 543,661.50	\$ -	\$ 543,661.50	\$ 543,661.50
INTALACIONES HIDROSANITARIAS	LOTE	1	\$ 9,997.00	\$ 9,997.00	\$ -	\$ 9,997.00	\$ 9,997.00
MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN SEDIMENTADOR	LOTE	1	\$ 37,584.50	\$ 37,584.50	\$ -	\$ 37,584.50	\$ 37,584.50
MATERIALES CONST. DE CELDAS	LOTE	1	\$ 109,077.00	\$ 109,077.00	\$ -	\$ 109,077.00	\$ 109,077.00
TOTAL ACTIVO FIJO					\$ -	\$ 700,320.00	\$ 700,320.00
ACTIVO DIFERIDO							
MANO DE OBRA	PRESUPUESTO	1	\$ 29,250.00	\$ 29,250.00	\$ -	\$ 29,250.00	\$ 29,250.00
TOTAL ACTIVO DIFERIDO					\$ -	\$ -	\$ 29,250.00
CAPITAL DE TRABAJO							
AGUA RESIDUAL	LOTE	1	\$ 2,500.00	\$ -	\$ -	\$ 2,500.00	\$ 2,500.00
PLANTAS ORNAMENTALES	LOTE	1	\$ 576.00	\$ 576.00	\$ 576.00	\$ -	\$ 576.00
TOTAL CAPITAL DE TRABAJO				\$ 576.00	\$ 576.00	\$ 732,070.00	\$ 761,896.00
TOTAL				\$ 730,146.00	\$ 576.00	\$ 1,432,390.00	\$ 1,491,466.00

B.I. MEMORIA DE CÁLCULO

CONCEPTO (MERCANCIAS)	PRESENTACION	COSTO DE INSUMOS	VENTAS SEMANALE	COSTO SEMANAL	COSTO MENSUAL	P.VENTA	INGRESO SEMANAL	INGRESO MENSUAL	INGRESO ANUAL
CANNA HYBRIDS	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$120	\$240	\$960	\$11,520
IRIS GERMANICA	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$108	\$216	\$864	\$10,368
ANTHURIUM SP	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$144	\$288	\$1,152	\$13,824
SPATHIPHYLLUM WALLISII	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$96	\$192	\$768	\$9,216
ZINGIBER SPECTABILE	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$96	\$192	\$768	\$9,216
ALPINIA PURPURATA	UNIDAD	\$12.00	2	\$24.00	\$96	\$108	\$216	\$864	\$10,368
AGUA TRATADA	LT	\$0.05	37,800	\$1,890.00	\$7,560.00	\$0.28	\$10,395.00	\$41,580.00	\$498,960.00
TOTAL					\$8,136.00	\$672.28	\$11,739.00	\$46,956.00	\$563,472.00

LOTE DE MATERIAS PRIMAS				
CONCEPTO (MERCANCIAS)	PRESENTACION	COSTO DE INSUMOS	CANTIDAD	TOTAL
CANNA HYBRIDS	UNIDAD	\$ 12.00	8	\$96
IRIS GERMANICA	UNIDAD	\$ 12.00	8	\$96
ANTHURIUM SP	UNIDAD	\$ 12.00	8	\$96
SPATHIPHYLLUM WALLISII	UNIDAD	\$ 12.00	8	\$96
ZINGIBER SPECTABILE	UNIDAD	\$ 12.00	8	\$96
ALPINIA PURPURATA	UNIDAD	\$ 12.00	8	\$96
AGUA RESIDUAL	LT	\$ 0.05	50000	\$2,500.00
TOTAL				\$3,076

COSTOS DE INSUMOS				
CONCEPTO	PRESENTACION	COSTO	CANTIDAD	TOTAL
FLETES	UNIDAD	\$ 250.00	0.030	\$7.50
HERRAMIENTA	UNIDAD	\$ 100.00	0.023	\$2.30
MANO DE OBRA AUXILIARES (2)	JORNAL	\$ 200.00	0.010	\$2.00
ENVASES P.E.T	PZA	\$ 0.20	1.000	\$0.20
TOTAL				\$12.00

COSTOS DE MANO DE OBRA				
CONCEPTO	PRESENTACION	COSTO	CANTIDAD	TOTAL
HERRAMIENTA	UNIDAD	\$ 100.00	75.000	\$7,500.00
MANO DE OBRA MAESTRO	JORNAL	\$ 450.00	15.000	\$6,750.00
MANO DE OBRA AUXILIARES (2)	JORNAL	\$ 500.00	30.000	\$15,000.00
TOTAL				\$29,250.00

COSTO DE MATERIALES				
CONCEPTO	PRESENTACION	CANTIDAD	PRECIO	
			UNITARIO	PRECIO TOTAL
LOTE DE TERRENO	MT2	5000	\$ 50.00	\$ 250,000.00
#¡REF!	FLETE	3	\$ 500.00	\$ 1,500.00
TUBO SANITARIO DE 4'	FLETE	3	\$ 500.00	\$ 1,500.00
MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN S	UNIDAD	1	\$ 37,584.50	\$ 37,584.50
MATERIALES CONST. DE CELDAS	UNIDAD	1	\$ 109,077.00	\$ 109,077.00
SUSTRATO DE PET	LOTE	36	\$ 4,000.00	\$ 144,000.00
TOTAL				\$ 543,661.50

LS 04 SEDIMENTADOR					
CONCEPTO	CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	
CONSTRUCCIÓN DEL SEDIMENTADOR					
LADRILLO	PIEZA	1680	\$ 3.50	\$	5,880.00
CEMENTO INCLUYENDO REBOQUE	BULTO	10	\$ 190.00	\$	1,900.00
ARENA	LATAS	50	\$ 500.00	\$	25,000.00
CAL PARA CONSTRUCCIÓN	BULTO	5	\$ 80.00	\$	400.00
AGUA	LITROS	300	\$ 1.00	\$	300.00
TAPA DEL SEDIMENTADOR	FLETE	1	\$ 650.00	\$	650.00
ARENA	LATA	1	\$ 500.00	\$	500.00
GRAVA 3/4	LATA	2	\$ 500.00	\$	1,000.00
CEMENTO	BULTO	1	\$ 190.00	\$	190.00
AGUA	LITRO	17	\$ 1.00	\$	17.00
VARILLA 3/8"	PIEZA	1	\$ 190.00	\$	190.00
TUBERIA PVC 1/2"	PIEZA	5	\$ 60.00	\$	300.00
VARILLA 3/8"	PIEZA	5	\$ 190.00	\$	950.00
ALAMBRE	KG	0.15	\$ 50.00	\$	7.50
AGUA		300	\$ 1.00	\$	300.00
TOTAL				\$	37,584.50

LS-05 CONSTRUCCIÓN DE CELDAS 40 M2					
CONCEPTO	CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	
CEMENTO	BULTOS	30	\$ 190.00	\$	5,700.00
ARENA	LATAS	83	\$ 500.00	\$	41,500.00
GRAVA	LATAS	114	\$ 500.00	\$	57,000.00
AGUA	LITROS	672	\$ 1.00	\$	672.00
VARILLA 3/8	PIEZA	22	\$ 190.00	\$	4,180.00
ALAMBRE	KG	0.5	\$ 50.00	\$	25.00
				\$	-
TOTAL				\$	109,077.00

LS-03 INSTALACIÓN HIDROSANITARIA					
CONCEPTO	CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	
TUBO PVC DE 2' HIDRÁULICO	PIEZA	2	3.5 \$	7.00	
TUBO PVC DE 1' HIDRÁULICO	PIEZA	4	190 \$	760.00	
LLAVES DE PASO DE 2'	PIEZA	2	500 \$	1,000.00	
LLAVES DE PASO DE 1'	PIEZA	12	80 \$	960.00	
CODO DE 90° DE 2'	PIEZA	1	650 \$	650.00	
CODOS 45° DE 1'	PIEZA	1	110 \$	110.00	
TAPONES	PIEZA	24	190 \$	4,560.00	
T DE 4' SANITARIA	PIEZA	12	50 \$	600.00	
CODO SANITARIO DE 4'	PIEZA	12	25 \$	300.00	
TUBO SANITARIO DE 4'	PIEZA	3	350 \$	1,050.00	
TOTAL				\$ 9,997.00	

CONCEPTO	COSTOS FIJOS		
	IMPORTE MENSUAL	A 2 MESES	A UN AÑO
RENTA DE LOCAL	\$0.00	\$0.00	\$0.00
SERVICIO DE LUZ	\$0.00	\$0.00	\$0.00
SALARIOS (PODA, COLECTA DE FLORE	\$200.00	\$400.00	\$2,400.00
TOTAL	\$200.00	\$400.00	\$2,400.00

B.II COSTOS DE OPERACIÓN

CONCEPTO	COSTOS DEL PROYECTO					
	COSTOS COSTO MENSUAL	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
RENTA DE LOCAL	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
SERVICIO DE LUZ	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
SALARIOS (PODA, COLECTA DE FLORES Y MANTENIMIENTO)	\$ 200.00	\$ 2,400.00	\$ 2,520.00	\$ 2,646.00	\$ 2,778.30	\$ 2,917.22
LOTE DE MATERIAS PRIMAS	\$ 8,136.00	\$ 97,632.00	\$ 102,513.60	\$ 107,639.28	\$ 113,021.24	\$ 118,672.31
TOTAL	\$ 8,336.00	\$ 100,032.00	\$ 105,033.60	\$ 110,285.28	\$ 115,799.54	\$ 121,589.52

C.I PROYECCIÓN DE COSTOS

CONCEPTO	COSTOS FIJOS				
	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
RENTA DE LOCAL	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
SALARIOS (PODA, COLECTA DE FLORES Y MANTENIMIENTO)	\$ 2,400.00	\$ 2,520.00	\$ 2,646.00	\$ 2,778.30	\$ 2,917.22
TOTAL	\$ 2,400.00	\$ 2,520.00	\$ 2,646.00	\$ 2,778.30	\$ 2,917.22

COSTOS VARIABLES	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
LOTE DE MATERIAS PRIMAS	\$ 97,632.00	\$ 102,513.60	\$ 107,639.28	\$ 113,021.24	\$ 118,672.31
TOTAL	\$ 97,632.00	\$ 102,513.60	\$ 107,639.28	\$ 113,021.24	\$ 118,672.31

COSTOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
COSTOS FIJOS	\$ 2,400.00	\$ 2,520.00	\$ 2,646.00	\$ 2,778.30	\$ 2,917.22
COSTOS VARIABLES	\$ 97,632.00	\$ 102,513.60	\$ 107,639.28	\$ 113,021.24	\$ 118,672.31
COSTOS TOTALES	\$ 100,032.00	\$ 105,033.60	\$ 110,285.28	\$ 115,799.54	\$ 121,589.52

C.II PROYECCIÓN DE INGRESOS

CONCEPTO	PRESENTACION	VOLUMEN VENTA MENSUAL	PRECIO UNITARIO	VENTA MENSUAL	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
CANNA HYBRIDS	UNIDAD	8	\$ 120.00	\$ 960.00	\$ 11,520.00	\$ 12,096.00	\$ 12,700.80	\$ 13,335.84	\$ 14,002.63
IRIS GERMANICA	UNIDAD	8	\$ 108.00	\$ 864.00	\$ 10,368.00	\$ 10,886.40	\$ 11,430.72	\$ 12,002.26	\$ 12,602.37
ANTHURIUM SP	UNIDAD	8	\$ 144.00	\$ 1,152.00	\$ 13,824.00	\$ 14,515.20	\$ 15,240.96	\$ 16,003.01	\$ 16,803.16
SPATHIPHYLLUM WALLISII	UNIDAD	8	\$ 96.00	\$ 768.00	\$ 9,216.00	\$ 9,676.80	\$ 10,160.64	\$ 10,668.67	\$ 11,202.11
ZINGIBER SPECTABILE	UNIDAD	8	\$ 96.00	\$ 768.00	\$ 9,216.00	\$ 9,676.80	\$ 10,160.64	\$ 10,668.67	\$ 11,202.11
ALPINIA PURPURATA	UNIDAD	8	\$ 108.00	\$ 864.00	\$ 10,368.00	\$ 10,886.40	\$ 11,430.72	\$ 12,002.26	\$ 12,602.37
AGUA TRATADA	LT	151200	\$ 0.28	\$ 41,580.00	\$ 498,960.00	\$ 523,908.00	\$ 550,103.40	\$ 577,608.57	\$ 606,489.00
TOTAL					\$563,472.00	\$591,645.60	\$621,227.88	\$652,289.27	\$684,903.74

C.III ESTADO DE RESULTADOS

CONCEPTOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(+) VENTAS	\$ 563,472.00	\$ 591,645.60	\$ 621,227.88	\$ 652,289.27	\$ 684,903.74
COSTOS FIJOS	\$ 2,400.00	\$ 2,520.00	\$ 2,646.00	\$ 2,778.30	\$ 2,917.22
COSTOS VARIABLES	\$ 97,632.00	\$ 102,513.60	\$ 107,639.28	\$ 113,021.24	\$ 118,672.31
(-) COSTOS TOTALES	\$ 100,032.00	\$ 105,033.60	\$ 110,285.28	\$ 115,799.54	\$ 121,589.52
(=) UTILIDAD BRUTA	\$ 463,440.00	\$ 486,612.00	\$ 510,942.60	\$ 536,489.73	\$ 563,314.22
(-) DEPRECIACION	\$ 35,016.00	\$ 36,766.80	\$ 38,605.14	\$ 40,535.40	\$ 42,562.17
(=) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 428,424.00	\$ 449,845.20	\$ 472,337.46	\$ 495,954.33	\$ 520,752.05
(-) IMPUESTOS	\$ 68,547.84	\$ 71,975.23	\$ 75,573.99	\$ 79,352.69	\$ 83,320.33
(=) UTILIDAD DEL EJERCICIO	\$ 359,876.16	\$ 377,869.97	\$ 396,763.47	\$ 416,601.64	\$ 437,431.72

ACTIVO FIJO	COSTOS DE DEPRECIACIONES				
	VALOR ORIGINAL	TASA	AÑOS	DEP ANUAL	VALOR RESCATE
COSTO DE MATERIALES	\$ 543,661.50	5%	10.00	\$ 27,183.08	\$ 271,830.75
INTALACIONES HIDROSANITARIAS	\$ 9,997.00	5%	10.00	\$ 499.85	\$ 4,998.50
MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN	\$ 37,584.50	5%	10.00		
SEDIMENTADOR				\$ 1,879.23	\$ 18,792.25
MATERIALES CONST. DE CELDAS	\$ 109,077.00	5%	10.00	\$ 5,453.85	\$ 54,538.50
TOTAL	\$ 700,320.00			\$ 35,016.00	\$ 350,160.00

C.IV FLUJO DE EFECTIVO

CONCEPTOS / AÑO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(+) VENTAS	\$ -	\$ 563,472.00	\$ 591,645.60	\$ 621,227.88	\$ 652,289.27	\$ 684,903.74
(+) VALOR DE RESCATE	\$ -	\$ 350,160.00	\$ 350,160.00	\$ 350,160.00	\$ 350,160.00	\$ 350,160.00
(=) INGRESOS TOTALES	\$ -	\$ 913,632.00	\$ 941,805.60	\$ 971,387.88	\$ 1,002,449.27	\$ 1,035,063.74
COSTOS FIJOS	\$ -	\$ 2,400.00	\$ 2,520.00	\$ 2,646.00	\$ 2,778.30	\$ 2,917.22
COSTOS VARIABLES	\$ -	\$ 97,632.00	\$ 102,513.60	\$ 107,639.28	\$ 113,021.24	\$ 118,672.31
(=) COSTOS TOTALES	\$ -	\$ 100,032.00	\$ 105,033.60	\$ 110,285.28	\$ 115,799.54	\$ 121,589.52
COMPRA ACTIVO FIJO	\$ 700,320.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
COMPRA ACTIVO DIFERIDO	\$ 29,250.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
COMPRA CAPITAL DE TRABAJO	\$ 761,896.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(=) SALDO FINAL	-\$ 1,491,466.00	\$ 813,600.00	\$ 836,772.00	\$ 861,102.60	\$ 886,649.73	\$ 913,474.22

D.I PUNTO DE EQUILIBRIO

CONCEPTOS / AÑO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
VENTAS	\$ 563,472.00	\$ 591,645.60	\$ 621,227.88	\$ 652,289.27	\$ 684,903.74
COSTOS FIJOS	\$ 2,400.00	\$ 2,520.00	\$ 2,646.00	\$ 2,778.30	\$ 2,917.22
COSTOS VARIABLES	\$ 97,632.00	\$ 102,513.60	\$ 107,639.28	\$ 113,021.24	\$ 118,672.31
COSTOS TOTALES	\$ 100,032.00	\$ 105,033.60	\$ 110,285.28	\$ 115,799.54	\$ 121,589.52
PUNTO DE EQUILIBRIO \$	\$ 2,903.00	\$ 3,048.15	\$ 3,200.56	\$ 3,360.58	\$ 3,528.61
PUNTO DE EQUILIBRIO %	0.52%	0.52%	0.52%	0.52%	0.52%

INTERPRETACIÓN

El punto de equilibrio indica el porcentaje de ventas que se debe tener para cubrir los costos totales, sin que se tenga ganancias, es lo mínimo que se debe vender en porcentaje y en valor (\$) para no tener pérdidas

D.II ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

AÑO	INGRESOS	COSTOS	FLUJO DE EFECTIVO	TASA (1+t) ⁻ⁿ	INGRESOS ACTUALIZADOS	EGRESOS ACTUALIZADOS	FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO
0	\$ -	\$ 1,491,466.00	-\$ 1,491,466.00	1.000	\$ -	\$ 1,491,466.000	-\$ 1,491,466.000
1	\$ 563,472.00	\$ 100,032.00	\$ 463,440.00	0.909	\$ 512,247.27	\$ 90,938.182	-\$ 1,028,026.000
2	\$ 591,645.60	\$ 105,033.60	\$ 486,612.00	0.826	\$ 488,963.31	\$ 86,804.628	-\$ 922,992.400
3	\$ 621,227.88	\$ 110,285.28	\$ 510,942.60	0.751	\$ 466,737.70	\$ 82,858.963	-\$ 812,707.120
4	\$ 652,289.27	\$ 115,799.54	\$ 536,489.73	0.683	\$ 445,522.35	\$ 79,092.647	-\$ 696,907.576
5	\$ 684,903.74	\$ 121,589.52	\$ 563,314.22	0.621	\$ 425,271.33	\$ 75,497.526	-\$ 575,318.055
TOTAL	\$ 3,113,538.49	\$ 2,044,205.95	\$ 1,069,332.55		\$ 2,338,741.97	\$ 1,906,657.95	

VAN	\$ 432,084.02
TIR	20.40%
B/C	\$ 1.23
PRD	6.02

CRITERIO DE DECISIÓN

El proyecto es viable de acuerdo a la evaluación realizada, con los indicadores presentados, se tiene que el VAN mayor que cero, lo que significa que el proyecto además de la recuperación, las utilidades y ganancias, se tendrá al final de los 5 años una ganancia extra, un excedente de dinero. Se tiene un TIR mayor que la tasa de evaluación, lo que indica viabilidad. Y por último la relación Beneficio-Costo es mayor que 1, lo que significa, que por cada peso invertido se va a recuperar y se tendrá un excedente de 0.23 pesos. El PRD nos indica que dentro de 6.02 periodos se recuperará la inversión total del proyecto.