

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA



MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

TÍTULO:

**Diseño, implementación y evaluación de un sistema de humedales
construidos en regiones semiáridas. Caso de estudio: Centro de Ingeniería y
Tecnología-UABC, Valle de las Palmas.**

TESIS

Para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta:
Juan Carlos Payán Ramos

Director de Tesis:
Dra. Michelle Hallack Alegría

Codirector de Tesis:
Dr. Jorge Ramírez Hernández

MEXICALI, B. C.

OCTUBRE DE 2014

RESUMEN

En los últimos años, la creciente necesidad en el tratamiento de las aguas residuales a partir de su descarga cruda al medio natural ha obligado a buscar alternativas que mitiguen este problema. Los humedales construidos son utilizados en países desarrollados para la depuración de aguas residuales por ser tecnologías simples y de bajo costo en operación y mantenimiento. El sistema de humedales construidos que se presenta en este trabajo es un humedal de tipo flujo subsuperficial híbrido, instalado en una región semiárida, compuesto por dos filtros conectados en serie flujo vertical y flujo horizontal, el cual utiliza plantas acuáticas de tule, carrizo y alcatraz como especie ornamental. Para el diseño del humedal se determinó el área superficial en función de la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), se establecieron procedimientos para la construcción que consistieron en identificar las características geotécnicas del suelo a fin de encontrar alternativas contra la infiltración; la colocación de los medios filtrantes; la instalación de redes de alimentación y descarga de las aguas residuales y la plantación de las especies. Se realizó un balance hídrico con la determinación de la evapotranspiración potencial y real con el uso de un modelo hidrológico llamado HIDROBAS para establecer el comportamiento de sistema en términos hidrológicos y su influencia en la eficiencia. El sistema presentó eficiencia en la remoción de la DBO de un 86% en promedio para un periodo de siete meses, considerada dentro de las normas sanitarias para reúso.

Palabras claves: humedales construidos, diseño, construcción, eficiencia, balance hídrico, regiones semiáridas.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California por la oportunidad de superarme académicamente, estos años de estudio me ha servido para madurar profesionalmente, la que realiza la Universidad a través del Instituto de Ingeniería es encomiable y un ejemplo a seguir.

A la Universidad Autónoma de Baja California y CONACyT por el apoyo otorgado en el financiamiento del proyecto de investigación a través de la 16va Convocatoria Interna de Proyectos de Investigación.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado para cursar los estudios de Maestría en Ingeniería en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California

Al Centro de Ingeniería y Tecnología-UABC y al Instituto de Ingeniería por su valioso apoyo durante la realización de esta investigación.

A la Doctora Michelle Hallack Alegría por la oportunidad, confianza y enseñanza que me otorgó para desarrollar este estudio.

Al Doctor Jorge Ramírez Hernández por el gran apoyo y flexibilidad durante este proceso.

A mi esposa Elvira Araceli Lugo Ortega por su incondicional apoyo y paciencia en esta aventura.

A mis Hijos Carlos Andrés, Paul Eduardo y Diego Yahir por su comprensión en los momentos de descuido.

DEDICATORIAS

A mis padres, **Víctor Manuel Payán Rodríguez y Clemencia Ramos Fragoso** (Finada), por darme la vida.

A mis hermanos, por sus consejos, comprensión y apoyo incondicional en esta realización y en especial a mi hermano Saúl Armando Payán Ramos, quien me apoyo en el momento que más necesitaba.

A mis suegros, Jesús Librado Lugo Gastelum y Teresa Ortega Ochoa quienes además de darle la vida a mi bella esposa, siempre han estado al pendiente de mí.

A mi amigo, compadre y hermano, Mario Enrique Ramírez Urías y su esposa Melisa Gómez por abrirme las puertas de su hogar a través de este estudio

A mi gran amigo, José Arturo Rodríguez Montaña, por su consejos que me impulsaban a seguir.

Contenido

1. Introducción	8
Objetivos:	12
Hipótesis	12
Alcances y Limitaciones	13
Antecedentes	14
2. Marco Teórico	18
2.1 Clasificación de los Humedales Construidos	18
2.2 Humedales de flujo superficial	18
2.3 Humedales de flujo subsuperficial	19
2.3.1 Humedales subsuperficiales de flujo horizontal.	20
2.3.2 Humedales subsuperficiales de flujo vertical	21
2.4 Vegetación en humedales	22
2.4.1 Tipos de plantas	24
2.4.2 Especies emergentes más utilizadas	24
a) Scirpus Lacustris (tule o junco de Agua)	24
b) Typha Latifolia (Eneas, espadañas)	25
c) Phragmites Australis (Carrizo)	26
2.4.3 Especies Ornamentales	26
2.5 Características del sistema de humedales en estudio	27
3. Materiales y métodos	28
3.1 Localización de la zona de estudio	29
3.1.1 Descripción	30
3.2 Tren de tratamiento	30
3.2.2 Caracterización del agua residual	31
a) Adquisición de Muestra	31
b) Parámetros analizados	32
3.3 Diseño experimental del humedal	33

3.3.1 Consideraciones de diseño	33
3.3.2 Método de diseño	34
3.4 Determinación de parámetros hidrodinámicos	35
3.4.1 Tiempo de residencia hidráulico (TRH)	35
3.4.2 Caudales	36
3.5 Procedimientos de Construcción	37
3.5.1 Análisis Geotécnicos del suelo	37
3.5.2 Trabajos preliminares de limpieza, trazo y nivelación, colocación de materiales, Instalación de tuberías, plantación y obras adicionales	37
3.6.1 Operación	39
a) Evaluación y Ajustes	39
3.6.2 Mantenimiento	39
3.7 Balance Hídrico	40
3.7.1 Datos meteorológicos	40
3.7.2 Capacidad de campo del suelo	41
3.7.3 Definición de años tipo	41
3.7.4 Determinación de variables hidrológicas	41
3.7.5 Balance hídrico	43
4. Resultados y Discusión	44
4.1 Diseño de humedales construidos	44
4.1.1 Diseño Experimental	44
4.1.2 Diseño Teórico	45
4.2 Parámetros Hidrodinámicos	46
4.3 Procedimientos de Construcción	48
4.3.1 Análisis geotécnicos	48
a) Clasificación y características del suelo	48
4.3.2 Trabajos preliminares a la construcción	50
a) Limpieza, trazo y nivelación	50
4.3.3 Excavación, compactación y afine	50
a) Excavaciones	50
b) Compactación del suelo y afine	51
4.3.4 Esquema representativo de los procedimientos de construcción	52

Figura 4.4 Esquema general del tren de procedimientos constructivos y funcionamiento del sistema de humedales construidos.	53
4.3.5 Colocación y habilitado de materiales	54
a) Colocación de membrana impermeable	54
b) Sustrato o Medio filtrante	54
c) Habilitado de tuberías y conexiones	55
4.3.6 Instalación de tuberías	56
a) Red de descarga	56
b) Red de alimentación	57
4.3.7 Plantación	59
a) Especies utilizadas	59
4.3.8 Obras adicionales	61
a) Registros de control	61
b) Protección de bordos y taludes	61
c) Registro sedimentador de solidos	62
4.4 Operación y mantenimiento	65
4.4.1 Operación	65
a) Evaluación y Ajustes	65
4.4.2 Mantenimiento	66
4.5 Eficiencia del sistema	67
4.5.1 Remoción de DBO	68
4.6 Balance Hídrico	73
4.6.1 Datos meteorológicos	73
4.6.2 Capacidad de campo-Hipótesis de Reserva de Agua	74
4.6.3 Años Tipo (secos, medios y húmedos)	74
4.6.4 Evapotranspiración Potencial (ETP), Evapotranspiración Real (ETR) y Balance Hídrico (BH)	75
5. Conclusiones y Recomendaciones	77
Bibliografía	80
Anexos	

CAPITULO 1

Introducción

En los escurrimientos naturales la presencia de las aguas residuales que provienen de diferentes actividades realizadas por el ser humano, genera un impacto desfavorable en el ambiente y donde el vertimiento de estas aguas se realiza sin previo tratamiento. Esto ha obligado a buscar alternativas viables que mejoren la calidad del agua que se descarga o en condiciones que no alteren el equilibrio ecológico (Urquiza, 2005, 2006). Investigaciones científicas (EPA, 2000; Kadlec y Wallace, 2009; O'connell et al., 2012) han demostrado que los humedales naturales tienen un potencial de autodepuración; por ejemplo, remoción en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 70 a 96%, en sólidos suspendidos totales (SST) de 60 a 90% y Nitrógeno (N) de 40 a 90% (EPA, 1988), debido en gran parte a la vegetación, el suelo y la flora bacteriana que viven en la naturaleza.

Los humedales, desempeñan ciertas funciones muy importantes en el ambiente como son la recarga y descarga de acuíferos, control de inundaciones, control de erosión, retención de sedimentos, exportación de biomasa, protección contra tormentas, estabilización de microclimas y turismo (McCartney y Ackerman, 2009; McCartney et al., 2011). Sin embargo su función principal es el proceso de filtración de agua, la cual se ha demostrado que es de mejor calidad a la salida que a la entrada, esto gracias a la retención de sedimentos y tejido de las plantas presentes en el humedal (Dugan, 1992). De acuerdo a la Convención sobre los Humedales de Importancia Internacional, Ramsar (2013) los humedales se pueden clasificar en tres tipos:

- Humedales marinos y costeros: pueden ser aguas marinas someras permanentes, lechos marinos submareales, arrecifes de coral, costas marinas rocosas, playas de arenas, estuarios, y otros sistemas hídricos subterráneos.

- Humedales continentales: algunos pueden ser deltas interiores, ríos o arroyos permanentes, ríos o arroyos estacionales intermitentes e irregulares, lagos permanentes de agua dulce, entre otros.
- Humedales artificiales: estanques de acuicultura, estanques artificiales, tierras de regadío, tierras agrícolas inundadas estacionalmente, zonas de explotación de sal, áreas de almacenamiento de agua, excavaciones, área de tratamiento de aguas servidas, canales de trasportación y drenajes.

Entre estos sistemas de tratamiento de aguas residuales se encuentra el de los humedales de tratamiento o humedales artificiales, basado en principios de Ingeniería Ecológica.

De estos tres, el último es de nuestro interés, ya que se pueden diseñar e implementar como sistemas de tratamiento de aguas residuales para imitar las funciones de los humedales naturales (Mitsch, 1993; Mitsch y Jørgensen, 2004). En la clasificación de los humedales artificiales existen los humedales construidos que son considerados mecanismos de ingeniería y donde el término construcción significa “hecho por el hombre”; es decir, se pueden controlar algunos aspectos como el área, las variables hidráulicas, la profundidad, etc. Estos sistemas son sustentables y consisten en un estanque o sustrato; como medio filtrante (de grava, arena o tierra), comunidades microbianas y plantas macrófitas que son utilizadas para el tratamiento de aguas residuales a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial (EPA, 2000).

El diseño del humedal construido consiste en que el efluente pasa por el humedal durante un tiempo de retención donde es tratado por mecanismos físicos, químicos y bacteriológicos, que se dan en forma espontánea (EPA, 2000; Kayombo et al., 2005). El oxígeno es transferido al medio filtrante por las especies vegetales hasta sus raíces donde es aprovechado por los microorganismos, la eliminación de contaminantes, absorción de nitrógeno y fósforo, así como la filtración de los sólidos dependen en gran medida del oxígeno. Las plantas

acuáticas emergentes más utilizadas en los humedales construidos son tule, carrizo y espadaña (Kadlec y Wallace, 2009).

Muchos son los beneficios que se pueden obtener de estos sistemas de depuración, por mencionar algunos: tecnología simple, reducción de materia orgánica y patógenos, remoción alta de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno, fósforo y sólidos suspendidos totales (SST), absorción de metales pesados, consumo energético relativamente bajo, no generan malos olores ni producen insectos (EPA, 1998) y se pueden construir con materiales locales lo que disminuye considerablemente los costos de construcción, operación y mantenimiento (Tee et al., 2009; kadlec y Wallace, 2009).

Asimismo, dentro de las acciones de diseño, se contempla la hidrología, que es reconocida como una de las componentes primarias que influyen en el desarrollo de humedales, su permanencia y ecología (Mitsch y Gosselink, 1993). En regiones semiáridas, el manejo hidrológico racional de sistemas de humedales puede resultar complejo debido a un comportamiento climático caótico (Molles et al. 1992), que resulta en controversia con la falta de un balance entre el abastecimiento de agua y su demanda.

Las condiciones ambientales del sitio pueden interferir en el rendimiento y en la eficiencia de estos sistemas (Kadlec y Wallace, 2009), por esta razón es necesario elaborar estudios para determinar los aspectos hidrológicos de la zona principalmente en regiones áridas y semiáridas, ya que éstas regiones presentan una sensibilidad a las variaciones en el clima, como es la precipitación, temperatura y específicamente la evapotranspiración (ET) donde su análisis juega un papel importante en los cambios locales respecto al ambiente presente en estas regiones (Yunhao et al., 2005). La ET puede definirse como el transporte del agua entre la superficie y la atmósfera, representa el flujo compuesto de agua interceptada, superficial y poco profunda contenida en el suelo evaporada por la energía solar (Barclay et al., 2008) como también el agua que transpiran las

plantas. En la actualidad existen diversas metodologías para determinar la ET, mediante el uso de métodos estadísticos (Lakatos et al., 2011), sensores remotos con apoyo satelital (Glenn et al., 2013) así como la modelación (Eiji et al., 2011). De tal forma, que para lograr un manejo efectivo de los recursos hídricos en humedales se requiere comprender la manera en que interactúan los componentes del balance hídrico que intervienen en estos sistemas (Gilman, 1994).

Es mucha la necesidad de implementar este tipo de tecnología en México; país en vías de desarrollo y que cuenta con un potencial enorme, donde se busca como alternativa una fuente que sea utilizable para el reúso del agua (Urquiza et al., 2006).

Esta investigación permitió la implementación de un sistema de humedales contruidos de tipo experimental como tratamiento secundario de aguas residuales, de alta eficiencia y bajo costo ubicado en una región semiárida y el objetivo es evaluar la eficiencia del sistema de humedales, estableciendo la metodología de diseño, los procedimientos de construcción y de operación, así como un balance hídrico del suelo a fin de determinar la influencia de los aspectos hidrológicos en el sistema. De esta forma, se analiza a manera de caso de estudio el humedal construido en el Centro de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California en su unidad Valle de las Palmas, México, con la finalidad de promover una educación ambiental y que el agua tratada sea reutilizada en riego de áreas verdes

Objetivos:

Objetivo General.-

Diseñar, implementar y evaluar un sistema de depuración de agua residual domestica para comunidades rurales entre 100 y 2499 habitantes con humedales construidos de flujo subsuperficial de bajo costo construido en regiones semiáridas.

Objetivos Específicos

- Diseñar a escala piloto un sistema de tratamiento de aguas residuales de origen sanitario de tipo humedal flujo subsuperficial (tratamiento secundario) en CITEC-UABC Unidad Valle de las Palmas.
- Determinar los parámetros hidrodinámicos efectivos en el diseño de humedales construidos para regiones semiáridas: tiempo de residencia óptimo y caudal.
- Determinar el Balance Hídrico durante las estaciones de invierno y verano a considerar en el diseño de humedal construido para región semiárida.
- Establecer una metodología transferible a localidades rurales en regiones semiáridas.
- Obtener un efluente con calidad de agua requerida en la NOM-003 SEMARNAT-1997, para su descarga, riego y reutilización.
- Colaborar con el organismo operador de manejo de agua para su reúso.
- Transferir la tecnología a comunidades rurales y núcleos de población entre 100 y 2499 habitantes, sin conexión a sistema de alcantarillado, para el tratamiento in situ de agua residual.

Hipótesis

General:

1. Los humedales construidos son una alternativa viable para la depuración de aguas residuales en regiones semiáridas. Asimismo, los humedales mantienen una condición de equilibrio durante las estaciones de invierno y verano.

2. Es esencial evaluar el Balance Hídrico en el diseño de humedales construidos durante las estaciones de invierno y verano para regiones semiáridas y lograr un equilibrio estacional.

Alcances y Limitaciones

Alcances:

El logro de los objetivos descritos, permitirá diseñar un sistema de humedal construido de tipo flujo subsuperficial híbrido para la depuración de aguas residuales, estableciendo los procedimientos para su construcción, operación y mantenimiento.

Con la evaluación de un balance hídrico para las diferentes estaciones del año se determinara si en términos hidrológicos, las variables de precipitación, temperatura, evapotranspiración puedan intervenir en la eficiencia del sistema ya que la zona en estudio se encuentra en una región semiárida

Limitaciones:

1. Los humedales construidos tienen la capacidad de depuración de diferentes contaminantes por ejemplo: DBO, DQO, SST, Fosforo, Nitrógeno, Metales Pesados, Amonio, Sulfatos, entre otros), En este trabajo se ha diseñado para remover únicamente la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) como parámetro principal, con la intención de dar cumplimiento con la Norma Sanitaria NOM-003-SEMARNAT-1997.

Antecedentes

El agua es un recurso natural esencial en la vida humana y es fundamental en el desarrollo de un país; es el compuesto químico vital más abundante del planeta (Romero-Aguilar et al., 2009). La disponibilidad de este líquido poco a poco va disminuyendo; una de las causas es la contaminación a través de diversos medios, incluyendo mantos acuíferos, esto conlleva a un desequilibrio ambiental, económico y social (Esponda, 2001).

En México, la contaminación del agua es un problema a nivel nacional que obliga a la investigación de alternativas de solución económicamente viable (Arias y Brix, 2003). A finales de 1982, el Gobierno federal advirtió que las agencias centralizadas encargadas de la administración de los recursos hídricos no eran capaces de manejar todos los proyectos de saneamiento requeridos en el país (Pineda, 2002). A nivel nacional existe una cobertura del tratamiento de aguas residuales del 44.8% equivalente a un caudal de 93.6 m³/s, (CONAGUA, 2011). Para finales del 2010, este caudal es depurado por 2,186 plantas de tratamiento que se encuentran en operación (CONAGUA, 2011). Estos resultados muestran la necesidad de contar con una mayor infraestructura y recursos humanos que contribuyan en la mejora de la calidad de este recurso hídrico, como también, la innovación e implementación de sistemas de tratamiento en diferentes condiciones ambientales y socioeconómicas (Romero-Aguilar et al., 2009).

JUSTIFICACION

En el Estado de Baja California, se ha detectado la necesidad de contar con nuevas fuentes de recuperación y abastecimiento de agua, para esto; se ha contemplado la construcción de plantas satélites de tratamiento de aguas residuales con la finalidad de realizar un ahorro importante en el uso del agua potable.

Una forma de cuidar este recurso hídrico es la posibilidad de reutilizar las aguas residuales tratadas para uso industrial, agrícola, y riego de áreas verdes (Morari y Giardini, 2009).

Debido a los costos de construcción altos, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales es importante considerar la selección adecuada de la tecnología y sistema de tratamiento a emplear (Zurita et al., 2011). De esta manera, es necesario desarrollar tecnologías de tratamiento para mejorar la calidad del agua, con alta eficiencia y costos económicos (Rodríguez-Monroy y Duran-de-Bazua, 2006).

Entre otras tecnologías, encontramos a los humedales, cuyas ventajas y comparaciones con los sistemas convencionales ofrecen bajos costos al tener un mecanismo simple en operación y mantenimiento (Nivala et al., 2012), son considerados **sistemas de ingeniería** diseñados y contruidos para la eliminación de contaminantes mediante procesos naturales (Vymazal, 2005) utilizados como tratamientos de agua residual (doméstica, industrial, agricultura, petroquímicos) (Knight et al; 1999; Vymazal, 2009).

Estos sistemas consisten en áreas someras con vegetación acuática, que forman verdaderos filtros orgánicos que retienen los nutrientes y fijan minerales (Urquiza et al., 2005) constituyendo así una alternativa a la problemática antes mencionada, debido a la alta eficiencia que ofrecen los humedales para remoción de los contaminantes (tanto orgánicos como inorgánicos) de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno y fósforo (Tee et al., 2009; Ayaz et al. 2012), como resultado del empleo de plantas macrófitas (Jianbo et al. 2008; Zhao et al. 2010), sin olvidar, los costos de construcción bajos, operación y mantenimiento (Comin et al. 1997; Ramos-Espinosa et al., 2007).

Los humedales artificiales presentan mecanismos de purificación semejantes a los naturales, solo que se controlan aspectos como la poda, extracción y disposición

de la vegetación, asimismo, mediante el uso de tuberías, se mejora el comportamiento hidráulico obteniéndose alta eficiencia en el tratamiento (Urquiza et al. 2005). Por lo tanto, los humedales artificiales han sido muy exitosos en el tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades alrededor del mundo (Merlin et al., 2002; Chong et al. 2008; Wu et al. 2011).

Según el Censo de Población y Vivienda 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, el 8.7 % de localidades en Baja California tienen menos de 2500 habitantes, consideradas como rurales, y de acuerdo con las Normas de Proyecto para obras de alcantarillado sanitario en localidades Urbanas de la República Mexicana emitidas en agosto de 1993 señalan en su apartado 2.4 que se debe adoptar el criterio que la aportación de aguas negras el del 75% al 80% de la dotación de agua potable; en el apartado 2.5 mencionan que, de acuerdo a un clima cálido, la dotación es del 150 l/hab/día para poblaciones de entre 2,500 y 15,000 habitantes, lo que representa en aportación de aguas negras un promedio de 120 l/hab/día (3.47 l/s). Esta aportación de agua residual en la mayoría de las comunidades rurales se vierte a los cuerpos naturales de agua sin un tratamiento previo, ocasionando degradación en el ambiente (Urquiza, 2005).

Los sistemas de tratamiento que más se emplean en las comunidades rurales que cuentan con plantas de tratamiento de agua residual son lagunas de estabilización y humedales artificiales (Zurita, 2011), además de que los humedales son recomendados para pequeñas poblaciones donde el caudal a tratar sea en bajas cantidades (Merlín et al., 2002; Ye y Li. 2009). Por otro lado, el uso de estas tecnologías ha sido limitado, principalmente por la falta de manuales de diseño y operación, accesibles a las autoridades locales y usuarios directos, sin dejar de mencionar la falta de integración de los grupos de investigación en el país (Zurita, 2011).

Finalmente, el diseño del humedal permite la restauración de áreas que hayan sido degradadas, con la reforestación de planta nativa y planta adaptada que

ayuda a la formación de hábitat para las especies, además de aprovechar los recursos visuales y naturales del lugar (Urquiza, 2006). Los humedales son herramientas asequibles para recuperación de aguas residuales, especialmente en las zonas áridas y semi-áridas (Vymazal et al., 2006), y corresponden al tipo donde se ubica nuestro lugar de estudio.

CAPITULO 2

Marco Teórico

2.1 Clasificación de los Humedales Construidos

Los humedales construidos se clasifican de acuerdo al régimen de flujo que presentan (Vymazal et al., 2008), los de flujo superficial y flujo subsuperficial (figura 2.1). De acuerdo a esta clasificación se tienen ventajas y desventajas principalmente respecto al sitio donde serán ubicados, por lo tanto se debe tener un riguroso cuidado en la selección del sistema a utilizar. A continuación se presenta una descripción esquemática de los dos tipos de sistemas.



Figura 2.1 Clasificación de humedales construidos (modificado de Vymazal, 2008)

2.2 Humedales de flujo superficial

Los sistemas de flujo superficial (conocidos en inglés como *surface flow constructed wetlands* o *free water surface constructed wetlands*) son aquellos donde el agua está expuesta directamente a la atmósfera (figura 2.2) y tiene una circulación preferentemente a través de los tallos de los diferentes tipos de plantas que lo componen (EPA 2000). Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, su profundidad está limitada (< 60 cm). En términos de paisaje, este sistema es recomendable por su

alta capacidad de albergar variedad de peces, anfibios, aves, etcétera. Pueden construirse, en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas debido a las complejas interacciones biológicas y ecológicas que se generan y se establecen.

Por otro lado pueden generar malos olores y un foco de infección por la presencia de insectos (moscas, mosquitos, roedores, etc.), lo que limita su uso principalmente en zonas donde exista presencia y contacto con el ser humano.

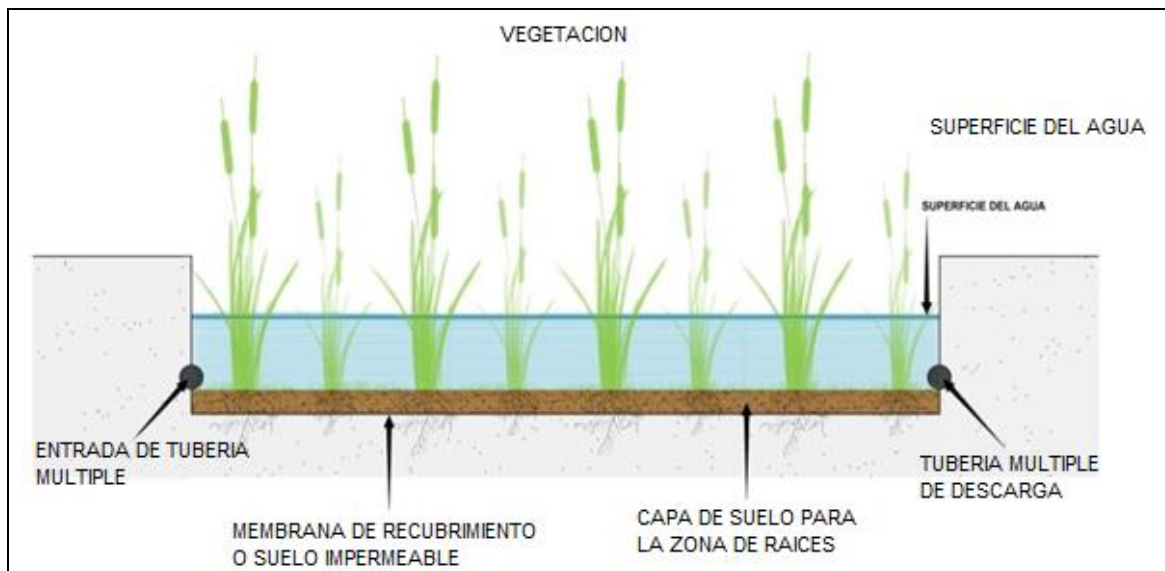


Figura 2.2 Esquema general de humedales con flujo superficial

2.3 Humedales de flujo subsuperficial

Los humedales de flujo subsuperficial (conocidos en inglés como *subsurface flow constructed wetlands*) se caracterizan porque su lecho contiene un medio poroso de grava o arena, en el cual se encuentran las plantas acuáticas. Este tipo de humedales se diseñan de tal manera que el nivel del agua se encuentre por debajo de la superficie del estrato como se muestra en la figura 2.3, logrando con esto minimizar los malos olores. La profundidad en el medio filtrante está en función del tamaño de raíz de la planta a utilizar. La vegetación es sembrada en el medio granular donde el agua está en contacto con los rizomas y raíces en todo momento (EPA 2000).

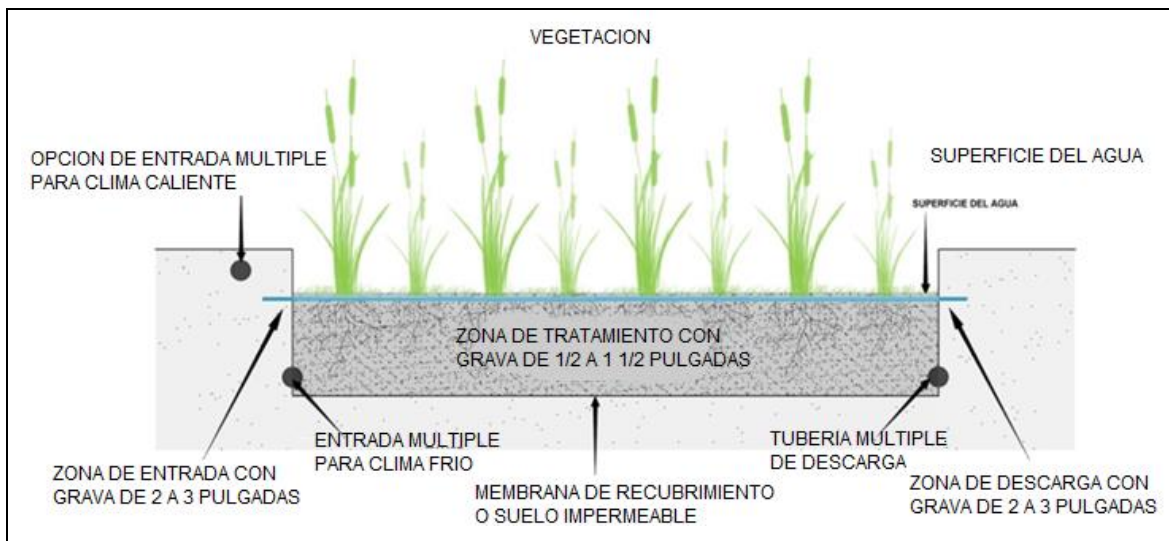


Figura 2.3 Esquema general de humedales con flujo subsuperficial

2.3.1 Humedales subsuperficiales de flujo horizontal.

Son los sistemas más utilizados en Europa y tienen su origen en Alemania (1967). El diseño de estos sistemas por lo general consiste en un filtro, ya sea de tierra, arena o grava y plantas acuáticas que en la mayoría de los casos son la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). La plantilla de fondo del filtro es cubierta por una membrana impermeable para evitar infiltraciones al subsuelo (EPA, 2000). El agua ingresa en forma permanente aplicada en la parte superior y es captada en el fondo, donde el suministro y descarga del fluido en el humedal se lleva a cabo mediante el uso de redes hidráulicas, donde las tuberías se diseñan garantizando en todo momento la distribución uniforme en el filtro (entrada y salida), para su correcto funcionamiento.

En este humedal la depuración del agua residual se desarrolla a medida que fluye lateralmente a través del medio poroso (figura 2.4), considerada como flujo tipo pistón. La profundidad depende en primera instancia del tamaño de raíz de la planta, el lecho varía entre 0.45 m a 0.60 m y la pendiente en el fondo del filtro varía entre 0.50% y 1%, necesaria para el movimiento del fluido por la acción de la gravedad. El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal

(cuerpo), sino que existe una zona de amortiguamiento generalmente formada por grava de mayor tamaño, donde el diámetro del grano oscila entre 50 a 100 mm y la zona de plantación está constituida por granos más pequeños que varían entre 3 y 32 mm de diámetro.

Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (50 a 100 mm de espesor), para lograr esto se debe regular el nivel del agua en el dispositivo de la red de descarga en función a este requerimiento.

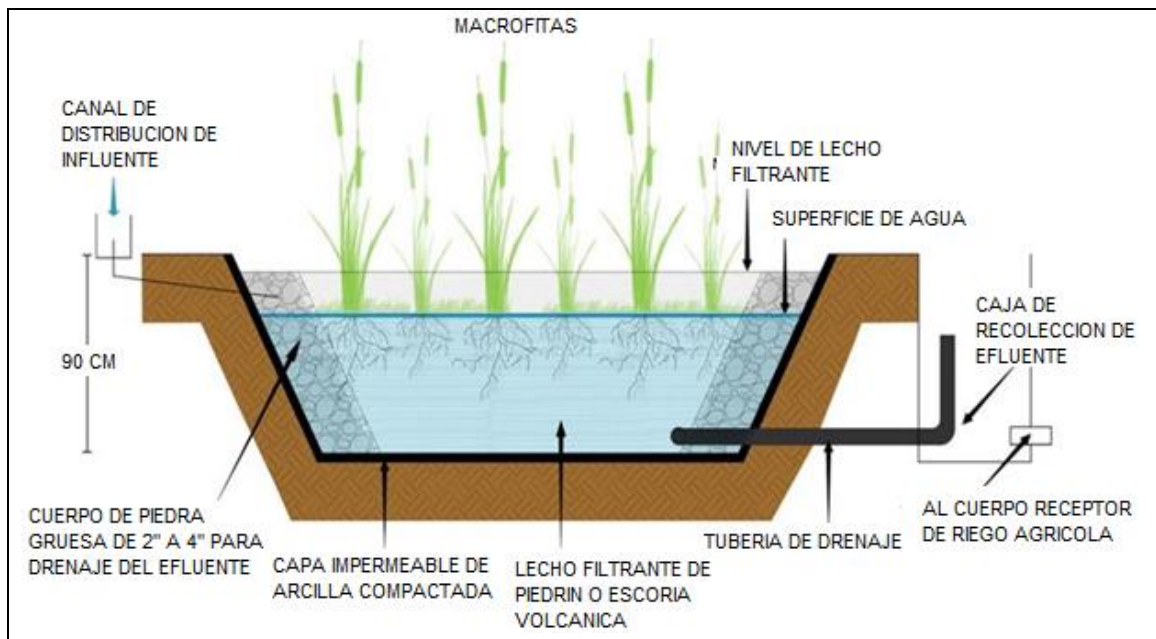


Figura 2.4 Humedales con flujo horizontal subsuperficial

2.3.2 Humedales subsuperficiales de flujo vertical

Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente, de esta forma, las condiciones de saturación de agua en el filtro son seguidas por períodos de no saturación, estimulando el suministro de grandes cantidades de oxígeno que son importantes en los procesos químicos y biológicos llevados a cabo en el medio filtrante. Estos sistemas reciben el agua residual de arriba hacia abajo como se muestra en la figura 2.5. Como en los casos anteriores, el suministro de las aguas a tratar se logra mediante el uso de una red hidráulica, la

distribución de la tubería debe repartir el fluido uniformemente en toda la superficie. Las aguas se infiltran verticalmente a través de un sustrato (arenas o gravas) y se captan en una red de drenaje situada en el fondo del filtro. La vegetación es emergente y se siembra en el medio granular. La aplicación de agua se efectúa en intervalos de tiempo, para preservar al máximo las condiciones aerobias, condición particular en estos sistemas.

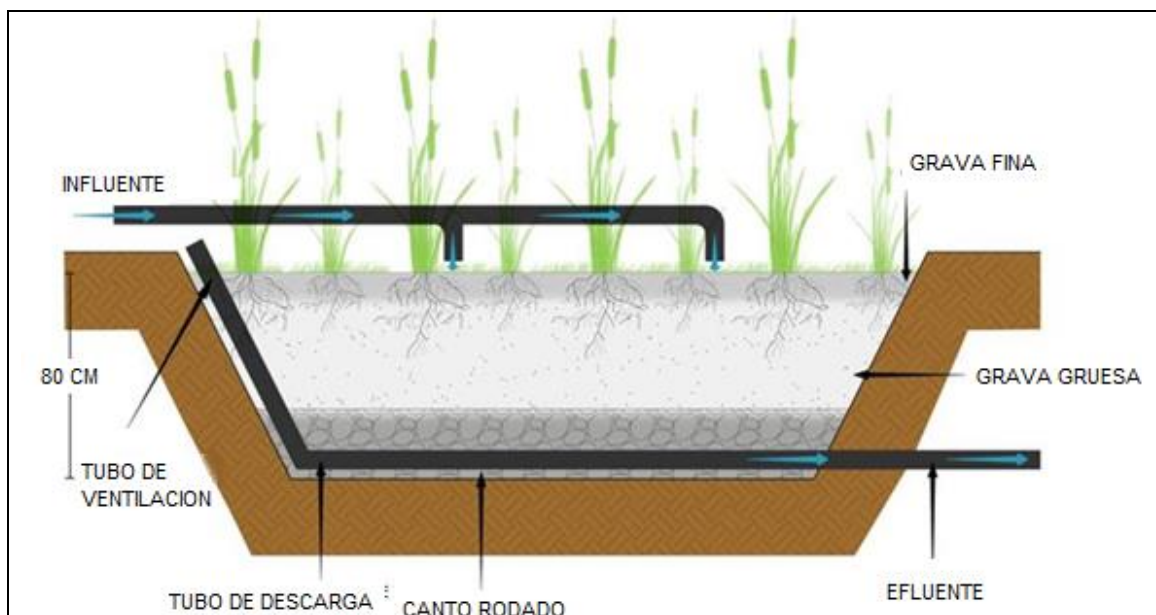


Figura 2.5 Humedales con flujo vertical subsuperficial

Estos últimos dos sistemas (flujo subsuperficial vertical y horizontal) son los más recomendados por los investigadores (Vymazal, 2005; Hoffman y Winker, 2011) ya que presentan ventaja en la remoción de contaminantes que uno solo no es capaz de remover y esto se debe a la combinación de ambos, además de utilizarse en cualquier sitio y que a su vez ofrecen condiciones ambientales favorables en el lugar, esto es, generan un hábitat y equilibrio ecológico.

2.4 Vegetación en humedales

Los humedales artificiales consisten normalmente en un monocultivo o policultivo de plantas acuáticas (macrófitas o hidrófitas) dispuestas en lagunas, tanques o canales poco profundos. Las plantas juegan un papel fundamental en estos sistemas siendo sus principales funciones:

- Airear el sistema radicular y facilitar oxígeno a los microorganismos que viven en la rizosfera.
- Ayudan en la absorción de nutrientes (nitrógeno y fósforo).
- Eliminación de contaminantes asimilándolos directamente en sus tejidos.
- Filtración de los sólidos a través del entramado que forma su sistema radicular (Kadlec y Knight, 1996)

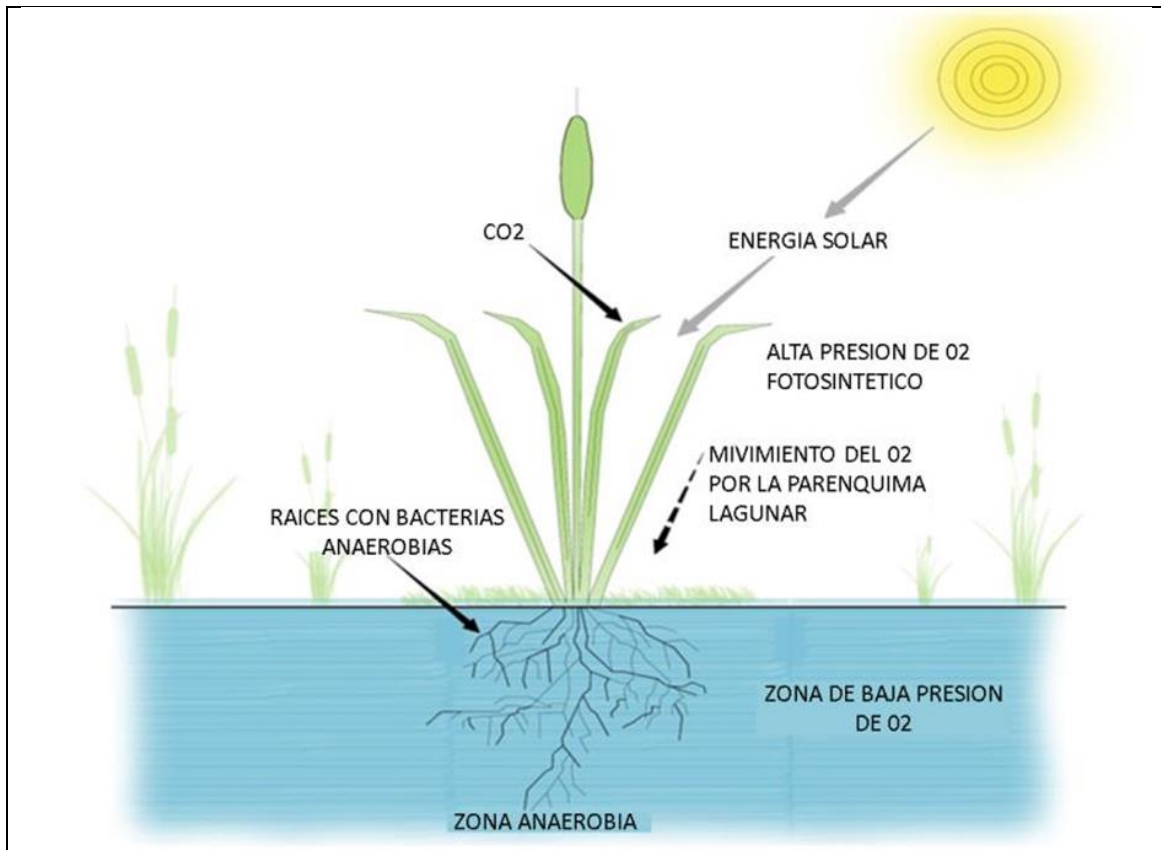


Figura 2.6 Esquema general de plantas acuáticas de tipo emergentes.

La selección de las especies vegetales se debe realizar de acuerdo a la adaptabilidad de las mismas al clima local, su capacidad de transportar oxígeno desde las hojas hasta la raíz (figura 2.6), su tolerancia a concentraciones elevadas de contaminantes, su capacidad asimiladora de los mismos, su tolerancia a condiciones climáticas diversas, su resistencia a insectos y enfermedades y su facilidad de manejo.

2.4.1 Tipos de plantas

Como se menciona anteriormente las plantas utilizadas en estos sistemas son llamadas acuáticas (macrófitas o hidrófitas), están adaptadas de manera natural por lo que se pueden utilizar en cualquier lugar y condición similar al medio donde se encuentren. Estas especies son de diferentes tipos por forma de crecimiento y vida de acuerdo a Ramos y Novelo, 1993 y Lot et al., 1999, estas se clasifican en:

1. enraizadas emergentes
2. enraizadas de hojas flotantes
3. enraizadas sumergidas
4. libre flotadora

Las especies utilizadas en gran parte son el tipo de macrófitas emergentes (Kadlec y Knight, 1996) en humedales de flujo superficial y subsuperficial tanto en Europa como en Norteamérica.

2.4.2 Especies emergentes más utilizadas

a) Scirpus Lacustris (tule o junco de Agua)

Son plantas ubicuas que crecen en un rango diverso de aguas interiores y costeras, pantanos salobres y humedales. Los juncos (figura 2.7) son capaces de crecer bien en agua desde 5 cm a 3 m de profundidad. La mayoría de las especies tienen un crecimiento moderado y pueden lograr un buen cubrimiento con separaciones de 0.60 m en un periodo de un año. Algunas especies crecen más rápido y pueden cubrir en el mismo periodo un esparcimiento menor entre 0.30 m y 0.60 m. Las raíces crecen y penetran aproximadamente 0.60 m en los estratos de grava (EPA, 1998).



Figura 2.7 Diferentes especies de Junco de Agua. (Conabio, 2008)

b) *Typha Latifolia* (Eneas, espadañas)

La espadaña es ubicada en distribución, robusta, capaz de crecer bajo diversas condiciones ambientales, y se propaga fácilmente (figura 2.8), por lo que presenta una especie de planta ideal para un humedal artificial.



Figura 2.8 Imágenes de especies espadaña. (Conabio, 2008)

Los rizomas de la espadaña plantados a intervalos de aproximadamente 0.60 m, pueden producir una cubierta densa en menos de un año. Tiene una penetración en material de grava 0.30 m relativamente baja.

c) *Phragmites Australis* (Carrizo)

La figura 2.9 representa ejemplos de esta especie sus características son anuales y altos con un rizoma perenne extenso. Logran una buena cobertura en menos del año con una separación de 0.60 m. La penetración es de 0.40 m en material de grava y es recomendable su uso en los humedales

Para este trabajo, se utilizaron el uso del carrizo cuya especie ha mostrado una resistencia a las condiciones de clima cálidos alrededor de 35°C y de crecimiento rápido (Shutes et al 1999))



Figura 2.9 Diferentes imágenes de la especie carrizo. Conabio, 2008)

2.4.3 Especies Ornamentales

Las plantas ornamentales además de participar en el proceso de remoción de contaminantes del humedal, como una alternativa de las especies convencionales también se cultivan como producción de flores para su comercialización (Cantellano et al., 2008; Zurita, et al 2009), y con propósitos decorativos por sus características estéticas.

La especie utilizada en este trabajo es *Zantedeschia Aethiopica* conocida como alcatraz, es una planta herbácea de la familia de las Aráceas que se considera como la variedad más robusta de una planta algo más blanda (ornamental). Crece a partir de rizomas de forma natural, las hojas son grandes y coriáceas, de un verde oscuro y bordes ondulados como se muestra en la figura 2.10, los cuales salen de vástagos que terminan en unas flores blancas o amarillas acampanadas

en forma de trompeta, las flores son la característica más importante de esta planta (Cantellano et al., 2008).

Es amable con los climas suaves que no llegan a helar, la temperatura mínima aceptable es de 8°C, y la mejor para su desarrollo está entre 14 y 20°C, prefiere los lugares en semi-sombra aunque soporta el sol, se debe evitar el sol directo en las regiones de zona climática superiores a 10°C. Le favorecen suelos húmedos, fértiles, ricos en humus pero bien drenados; el rango de pH de mejor desarrollo es ligeramente ácido, aunque crece bien con un pH entre 6.5 y 7.5; se puede plantar en el agua a unos 25 cm de profundidad.



Figura 2.10 Ejemplo de la especie ornamental Alcatraz. (Conabio, 2008)

2.5 Características del sistema de humedales en estudio

En este estudio se consideró un sistema de humedales construidos de tipo subsuperficial (HCSS), combinado con filtros de flujo vertical y flujo horizontal conectados en serie. Este tipo de humedal (subsuperficial) es el más recomendado para su uso sin importar el sitio y que en parte se debe a las condiciones ambientales favorables que ofrecen ya que el agua que pasa a través del medio filtrante mantiene su nivel ligeramente debajo de la superficie del estrato, evitando con esto la acumulación de insectos (mosquitos, moscas, etc.) o roedores que puedan generar focos de infección en el lugar (EPA, 2000; Vymazal, 2008).

CAPITULO 3

Materiales y métodos

Modelo Metodológico

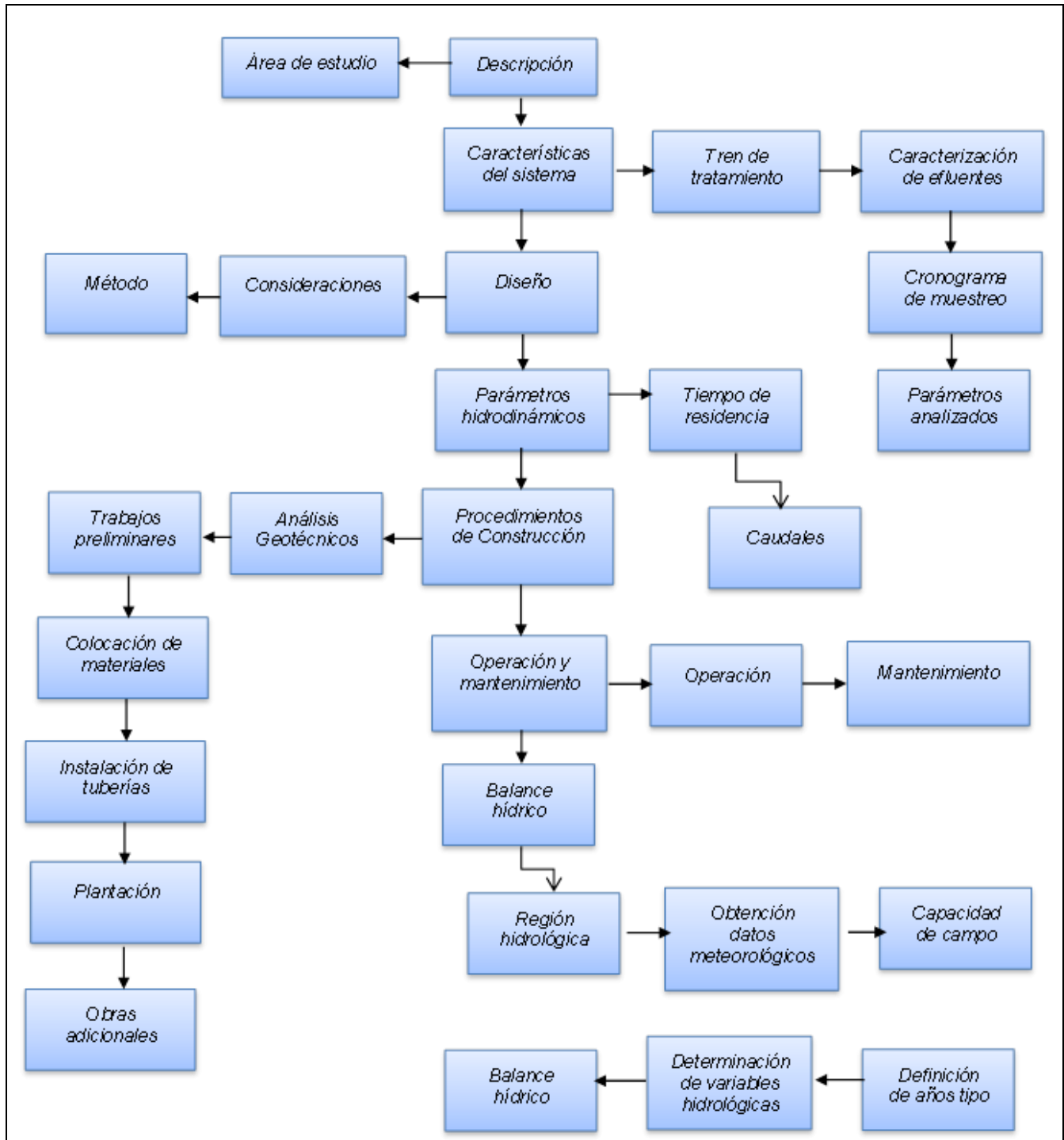


Figura 3.1.- Diagrama secuencial de las metodologías que comprenden el estudio

3.1 Localización de la zona de estudio

El área en estudio se encuentra en el ejido Valle de las Palmas, perteneciente al municipio de Tijuana, Baja California México. Está ubicada al noroeste del Estado de Baja California, en coordenadas geográficas 32° 26' 4.88" de Latitud Norte, 116° 40' 30.6" de Longitud Oeste y elevación promedio de 300 msnm acorde a los datos del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (2014), dentro de una microcuenca que tiene una superficie de 15.77 Km² y forma parte de la cuenca binacional Río Tijuana (figura 3.2). La cuenca binacional comprende una porción del estado de California, E.U.A. y otra en el estado de Baja California.

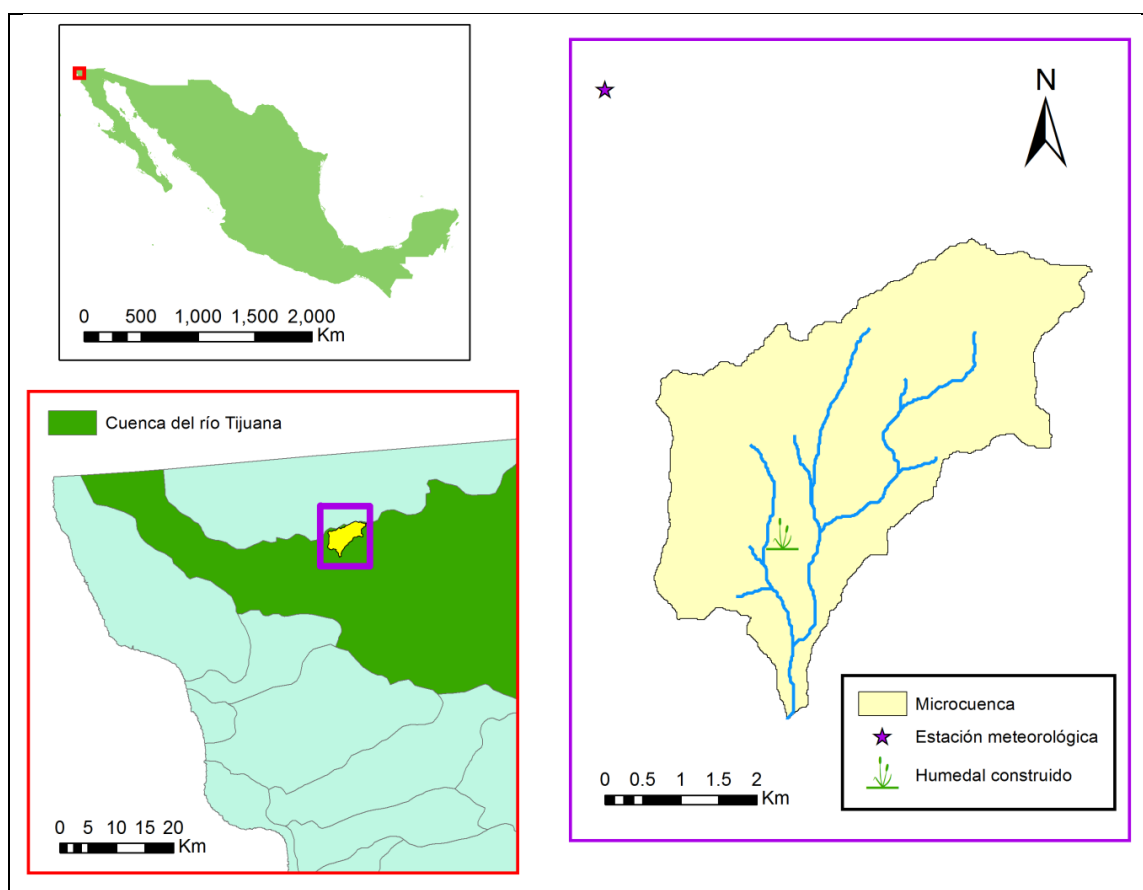


Figura 3.2.- Localización del sistema de humedales y la microcuenca en estudio

3.1.1 Descripción

La región es semiárida y clima mediterráneo, con lluvias muy escasas en promedio de 280 mm de precipitación media anual (Hallack et al., 2011) Es una región con climas templado y seco con lluvias de invierno, condición muy particular, ya que en el resto del país las lluvias son en verano, presenta una temperatura media anual de 18 a 19°C, con temperaturas altas mayores de 30°C, en los meses de mayo a septiembre y la más baja, alrededor de 5°C, en el mes de enero (INEGI, 2010).

El Centro de Ingeniería y Tecnología (CITEC), es una extensión académica de la Universidad Autónoma de Baja California-UABC en el cual se realizó la construcción del sistema piloto de tipo experimental de humedal construido. El montaje del sistema está ubicado en la parte sur del CITEC, aproximadamente 350 metros del edificio principal de la universidad, lugar donde se recolectan las aguas servidas

3.2 Tren de tratamiento

La figura 3.3 ofrece un esquema general de la conexión y tren de funcionamiento del humedal propuesto en este trabajo. El tren está compuesto por una fosa séptica y dos secciones que forman el sistema de humedales; de izquierda a derecha la fosa séptica como tratamiento primario, el filtro vertical en la parte central y el filtro horizontal al final, en este sentido es la conexión entre las partes del tren y en este mismo sentido es la dirección de flujo (flecha azul) y el paso del agua residual al mismo tiempo que se desarrollan los procesos de depuración.

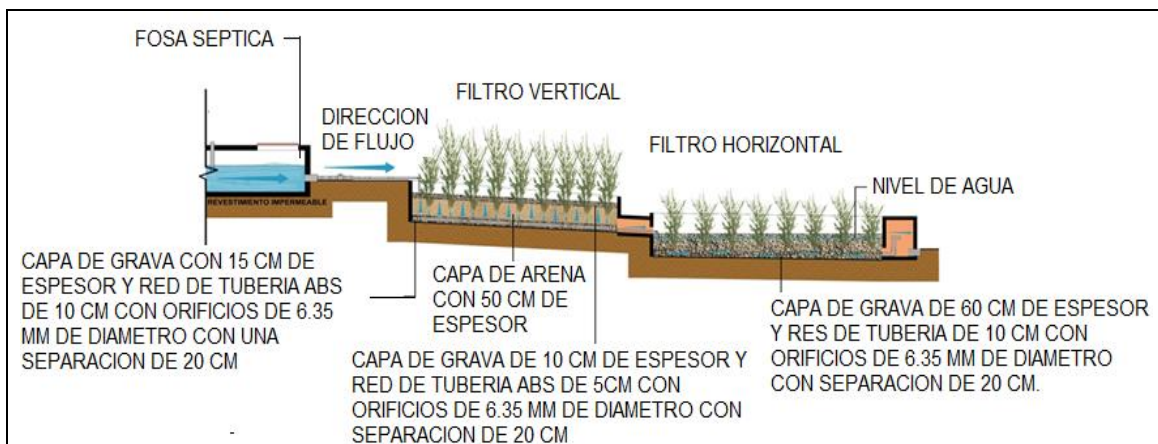


Figura 3.3 Esquema general del tren de tratamiento en estudio.

3.2.2 Caracterización del agua residual

Los análisis se elaboraron en el Laboratorio de Aguas Residuales (LAR) del Centro de Estudios del Reúso y Calidad de Agua (CERCA) de la Comisión de Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (organismo operador de agua potable y saneamiento) Para conocer la composición bioquímica del agua residual se realizaron muestreos en los efluentes de la fosa séptica, filtro vertical y filtro horizontal (componentes del tren de tratamiento). En la tabla 1 se presenta el calendario de los muestreos, en la cual se observa las secuencia de las fechas para un periodo de seis meses. Esta programación se determinó en conjunto con el personal del laboratorio antes mencionado.

a) Adquisición de Muestra

El plan de muestreo consistió en la adquisición de cuatro muestras simples en los horarios de 9:00, 11:00, 13:00 y 15:00 horas para los días programados (mensuales) y que se muestran en la tabla 1. Estos tiempos fueron determinados en base a la disponibilidad en los caudales de la fosa séptica y los filtros, toda vez que durante el día el flujo es muy variado ya que depende del comportamiento en la población de la universidad. Al término de la recolección (15:00 hrs) se determinó una sola muestra llamada compuesta; esta consiste en una mezcla de todas cuya proporción en el volumen individual respecto al volumen total que es necesario para cada muestreo, está en función del caudal existente al momento

en que se toma la muestra. Esta técnica de muestreo para aguas residuales es utilizada por el LAR y cumple la norma NMX-AA-003. La adquisición de las cuatro muestras para una frecuencia de 2 horas y la elaboración de la muestra compuesta cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 1. Cronograma mensual de muestreo

Programación de muestreos (2013)					
Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Agosto
Martes 26	Miércoles 13	Martes 9	Martes 21	Miércoles 5	Jueves 8

b) Parámetros analizados

Los parámetros analizados son la DBO, SST y Grasas y Aceites, donde la DBO es el parámetro principal a remover en el diseño del sistema. Los análisis quedaron definidos buscando dar cumplimiento con la normas sanitaria NOM-003-SEMARNAT-1997.

Las técnicas y normas utilizadas en los análisis para la determinar la concentración de los parámetros arriba descritos se presentan la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos analizados en muestras de influente y efluente del sistema de humedales

Técnicas de análisis y normas utilizadas		
Parámetro	Técnica	Norma
DBO	Método de incubación por diluciones	NMX-AA-028
SST	Método gravimétrico	NMX-AA-034
GA	Método de extracción soxhlet	NMX-AA-005

3.3 Diseño experimental del humedal

Este estudio es de tipo experimental y analítico, tiene la finalidad de diseñar un sistema de humedales construidos para el tratamiento de las aguas residuales bajo las condiciones de clima propias de las regiones semiáridas del noroeste de México. Para tal efecto, se debe cumplir con los siguientes requerimientos:

3.3.1 Consideraciones de diseño

Se consideraron los siguientes aspectos partiendo de una tecnología alemana, que es recomendada para implementarse en países en transición (Hoffman y Winker 2011) y que se describen a continuación:

Filtro horizontal

- La pendiente del fondo debe ser 0.5-1.0% para asegurar un buen drenaje en el sentido del flujo.
- La profundidad del filtro es normalmente de 0.60m y un adicional de 0.15m de libre bordo para la acumulación de agua.

Filtro vertical

- La pendiente del fondo debe ser 0.5-1.0% para asegurar un buen drenaje en la dirección del flujo.
- La profundidad del filtro de arena debe ser por lo menos 0.50 m con un adicional de 0.20m de grava en la base para proteger la tubería de drenaje, 0.10m en la parte superior y 0.15m de libre bordo para la acumulación de agua.
- La parte superior de la superficie debe estar plana y la distribución de tubería debe cubrirse con una capa de grava para prevenir insectos y malos olores.
- La red de la tubería debe de estar diseñada de tal manera que asegure una distribución uniforme en toda la superficie del humedal. Esto es posible seleccionando el diámetro correcto, longitud de los tubos y espaciamiento de los orificios.

- La tubería de drenaje (recolección del agua residual) debe estar cubierta por una capa de grava para evitar el taponamiento de los orificios y permitir un buen drenaje.

3.3.2 Método de diseño

Para el diseño inicial se utilizó un criterio teórico-empírico; propuesto por Kadlec y Knight (1996), conocido como método que define un área, el cual evalúa la remoción de contaminante ya sea biológico, químico o físico para el cual fue diseñado y utiliza la superficie total del humedal. Este método es considerado modelo cinético de primer orden con flujo tipo pistón. A partir de este, se obtienen las dimensiones preliminares del área total que es requerida por el humedal, para depurar la DBO (parámetro de diseño) mediante la siguiente expresión:

$$As = \frac{365Q}{K_{DBO}} \ln \left(\frac{Ce - C^*}{Cs - C^*} \right) \dots\dots\dots (Ec 1)$$

Dónde:

As = Área requerida del humedal [m²]

Q= Caudal [m³/día]

Ce = Concentración de contaminante en la entrada [mg/L]

Cs = Concentración esperada de contaminante en la salida [mg/L]

C* = Concentración de contaminante de fondo [mg/L]

K_{DBO}= Constante de remoción de primer orden [m/año]

Los valores para la constante K_{DBO}=180 m/año y C*=3.5+0.053Ce, en mg/L (máximo 14) de acuerdo al análisis de los sistemas de tratamiento de la base de datos de Norteamérica para los límites máximos en el valor de K y C* respecto a la demanda bioquímica de oxígeno en los parámetros del modelo preliminar.

La obtención de estos parámetros para el sistema de tratamiento experimental nos permitió llevar a cabo una extrapolación en los cálculos (con la finalidad de parametrizar el proyecto) para otras comunidades que se encuentren bajo condiciones semejantes, principalmente a la región en estudio; sin embargo es

recomendable la determinación de parámetros específicos “locales” para la constante K y C* a través del modelo preliminar simple (Prueba-Error) y de flujo ideal, para el mejor desempeño en la remoción de contaminantes en los sistemas que se propondrán para cada región (Kadlec y Knight, 1996).

Este modelo es utilizado en la actualidad por diversos autores; Economopoulou y Tsihrintzis (2004); Kayombo (2005); Vymazal (2008); Arias (2009); Kadlec y Wallace (2009), entre otros.

Para el valor de área superficial determinado de acuerdo al criterio de diseño, quedo definida la configuración de largo (L) y ancho (A) de los filtros del humedal, siendo esta una relación de 2:1 y con la intención de optimizar el flujo de entrada y salida, pero también debe basarse en limitaciones y oportunidades de superficie y topografía en el sitio. Es posible encontrar relaciones L/A que van desde 2:1 a 4:1 (Kadlec 2009). Las profundidades de los filtros está en función del tamaño máximo de raíz respecto al tipo de vegetación a utilizar (ver apartado 2.2), siendo para estos de 0.50 m y 0.60 m para flujo vertical y horizontal, respectivamente.

3.4 Determinación de parámetros hidrodinámicos

Los parámetros hidrodinámicos definen en parte la eficiencia en la remoción de contaminantes del agua residual así como el comportamiento de flujo a través de los filtros del humedal. Para esto consideramos:

3.4.1 Tiempo de residencia hidráulico (TRH)

Este parámetro bajo condiciones ideales de flujo y de manera teórica se puede determinar con la ecuación 2, (Kadlec y Wallace, 2009):

$$TRH (d) = \frac{V_h}{Q} = \frac{\varepsilon \times L \times W \times h}{Q} \dots\dots\dots (Ec 2)$$

dónde:

TRH = Tiempo de residencia hidráulico (días)

Q= Es el caudal de diseño ($\text{m}^3/\text{día}$)

V_h = Es el volumen que ocupa el agua dentro del humedal (m^3).

El volumen lo determina el producto de las variables que definen la geometría del humedal, como son: la longitud (L), el ancho (W) y la profundidad (h), afectados por la porosidad (ϵ) del medio filtrante, es decir se determina multiplicando Largo x ancho x profundidad x porosidad del medio filtrante.

3.4.2 Caudales

La tabla 3.6 muestra la bitácora de registro de datos, con el programa de las mediciones de los caudales. Los caudales se determinaron de forma manual utilizando un recipiente de volumen conocido (1 L) y contabilizando el tiempo de llenado, este procedimiento se llevó a cabo a la entrada y salida del primer filtro y a la salida del segundo filtro.

Tabla 3 Bitácora de mediciones de caudales a los filtros del sistema.

ENTRADA A FILTRO VERTICAL (L/S)									
HORARIO	LUNES		MARTES		MIERCOLES		JUEVES		VIERNES
9:00									
11:30									
14:00									
16:30									
SALIDA DE FILTRO VERTICAL (L/S)									
HORARIO	LUNES		MARTES		MIERCOLES		JUEVES		VIERNES
9:00									
11:30									
14:00									
16:30									
SALIDA DE FILTRO HORIZONTAL (L/S)									
HORARIO	LUNES		MARTES		MIERCOLES		JUEVES		VIERNES
9:00									
11:30									
14:00									
16:30									

3.5 Procedimientos de Construcción

La construcción de los humedales está dada en diferentes procesos. A detalle se describen los procesos desarrollados en el estudio.

3.5.1 *Análisis Geotécnicos del suelo*

Los estudios fueron realizados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la universidad. Las muestras se tomaron a 1.15m de profundidad y se analizaron de la siguiente manera:

- Los análisis de composición granulométrica del suelo se elaboraron siguiendo el criterio de la USCS-Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM Standards, 2007), establecido en la norma ASTM D422-63 de la cual se obtienen los porcentajes de suelo retenido para cada tamiz a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Masa Retenida en el tamiz}}{\text{Masa Total}} \times 100 \dots\dots\dots (\text{Ec } 3)$$

- El coeficiente de permeabilidad se determinó utilizando el método de cabeza variable de Bowles (1981).

3.5.2 *Trabajos preliminares de limpieza, trazo y nivelación, colocación de materiales, Instalación de tuberías, plantación y obras adicionales*

Los trabajos de construcción referente a los preliminares, la colocación de los materiales, la instalación de las tuberías (red de alimentación y descarga), la plantación de las especies acuáticas y las obras adicionales, fueron elaboradas con la ayuda y colaboración de alumnos. La tabla 4 muestra los materiales, herramienta y equipo utilizado en estos procedimientos de construcción.

Tabla 4 Materiales y equipo utilizados en los procedimientos de construcción

Procedimiento constructivo	Materiales	Maquinaria y/o Herramienta	Equipo de Protección
Limpieza, trazo y nivelación del terreno	Bolsas de plástico	Pala	Botas de trabajo
	Cal hidra	Carretilla	Guantes de carnaza
	Estacas de 40 cm	Pico	Cascos
	Hilo de nylon	Manguera de Nivel	
Excavaciones		Retroexcavadora	Botas de trabajo
		Pala	Guantes de tela
		Pico	
		Carretilla	Casco
Compactación y afine	Arcilla y/o de banco	Manguera de Nivel	
		Pala	Botas de trabajo
		Carretilla	Guantes de tela
Colocación de materiales	Membrana de Polipropileno "plástico negro"	Compactadora manual	Casco
		Pala	Botas de trabajo
		Carretilla	Guantes de tela
Instalación de tuberías	Grava de 3/4"	Navaja de corte	Casco
		Arena Gruesa	
Descarga	Tubería y accesorios ABS CEDULA 40 de 4"	Arco y segueta	Botas de trabajo
		Taladro	Guantes de tela
Alimentación	Tubería ABS CEDULA 40 de 2" y 4"	Broca de 1/4"	Casco
Plantación	Tubería y accesorios ABS CEDULA 40 de 4"	Arco y segueta	Botas de trabajo
	Tubería ABS CEDULA 40 de 2" y 4"	Taladro	Guantes de tela
	Broca de 1/4"		
Obras adicionales (registros de control, protección de bordos y conexión a fosa séptica)	Tubería ABS CEDULA 40 de 2" y 4"	Nivel de mano	Casco
	Tapones de 2" y 4"		
	Codos de 2"		
	Te de 2" y 4"		
	Reductor de 4" a 2"		
	Codos de 4"		
	1 pegamento de 500 ml		
Plantación	Tule	Pala	Botas de plástico
	Alcatraz	Pico	Guantes de plástico
	Carrizo	Carretilla	maskarilla
Obras adicionales (registros de control, protección de bordos y conexión a fosa séptica)	Bloques de (15x20x40)	Pala	Botas de trabajo
	Mortero	Carretilla	Guantes de tela
	Concreto (F'c=150 kg/cm2)	Vibrador manual	Casco
	Hilo de nylon		

3.6 Operación y Mantenimiento

3.6.1 Operación

Se realizarán periódicamente (cada 3-5 días) revisiones de forma visual de los aspectos físicos dentro y en los alrededores del humedal (Rivas, 1995), para garantizar la operación adecuada del sistema, se pueden identificar:

1. Materiales flotantes.- Anotar en que parte están ubicados, si están dispersos o acumulados, tipo, área cubierta, porcentaje de grasa y aceites.
2. Olores.- Débil, regular, fuerte, unidad del sistema que se revisa, causa probable (sobrecarga, condiciones climáticas desfavorables, desbordamiento, capacidad de tratamiento aumentada).
3. Estado de los bordos.- Presencia y área cubierta de vegetación, el tipo, las condiciones (existencia de erosión) o socavamientos.
4. Aspectos en los alrededores.- Presencia de madrigueras, animales pastando, plantas invasoras.

a) Evaluación y Ajustes

La evaluación evaluar el funcionamiento del humedal, aunque requiere poca supervisión es necesario cuidar la operación al menos los primeros seis meses realizando los ajustes necesarios, principalmente en el proceso de alimentación y descarga de las aguas residuales (influentes y efluentes), ya que de esto depende que el sistema se estabilice.

3.6.2 Mantenimiento

El mantenimiento consiste principalmente en la cosecha y el deshierbe de la vegetación, los cuales varían según el tipo de humedal. En humedales de flujo superficial la cosecha o corte se realiza para evitar la incorporación de materia orgánica adicional al agua y el reciclado de nutrientes absorbidos por las plantas (Crites y Tchobanoglous, 2000). En humedales subsuperficiales de flujo vertical se

debe hacer el deshierbe durante el primer año. Una vez que las plantas están establecidas, esta operación deja de ser necesaria. En otoño se debe segar y evacuar la parte aérea de las plantas. La evacuación permite evitar su acumulación en la superficie de los filtros (OIA, 2001).

En humedales de flujo horizontal, se mantiene la misma recomendación del deshierbe, pero no así la del segado, porque los restos de vegetales muertos no dificultan el funcionamiento hidráulico del humedal; es más, permiten aislar térmicamente el sustrato, lo que es útil en invierno (OIA, 2001). Sin embargo, en caso de que las especies superen su capacidad de retención de contaminantes, se procederá al corte de la parte aérea y eliminación del humedal.

Se debe tener en cuenta que la época en la que los rizomas tienen menos reservas es a finales del verano, por lo que si se efectúa la siega, el vigor de las plantas se verá afectado. En épocas más tardías, (de marzo en adelante, y antes de la brotación) ya no es probable que el corte comprometa el crecimiento de la planta (EPA 2000).

En el caso de los humedales artificiales y, fundamentalmente, en los de flujo subsuperficial, los tratamientos previos (pretratamiento y tratamiento primario), son básicos e imprescindibles para prevenir colmataciones del sustrato filtrante y de los propios sistemas de reparto de las aguas a tratar.

3.7 Balance Hídrico

Para este apartado consideraremos las variables de precipitación, temperatura y evapotranspiración.

3.7.1 Datos meteorológicos

La información climatológica utilizada para los cálculos de los parámetros hidrológicos se obtuvo de la base de datos del Extractor Rápido de Información Climatológica, ERIC III, proporcionada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Organismo Regional. Los datos utilizados en este estudio, son las series diarias de precipitación y temperatura durante el periodo de 1991 a 2008. La estación meteorológica

considerada es denominada el Carrizo-Tecate, se localiza aproximadamente a 6.5 km al Norte de la microcuenca (Longitud Oeste 116° 42.0, Latitud Norte 32° 29.0' y una Altitud de 495.0 msnm), fue seleccionada por ser la estación más próxima a la zona en estudio y ubicarse en un área con características topográficas y morfológicas de la cuenca muy similares.

3.7.2 Capacidad de campo del suelo

Para determinar la capacidad de campo se evaluaron las características del suelo de la zona según lo descrito en el Mapa de Suelos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (escala 1: 250000) correspondiente al ejido Valle de las Palmas, así como análisis del suelo y observaciones de campo y lo descrito por Fuentes y García, (1999).

3.7.3 Definición de años tipo

Los años tipo son definidos a partir de un ajuste de datos de precipitación con la función de probabilidad Lognormal, estableciendo valores límite (más 15% y menos 15% de la media) que posteriormente determinan los años secos, medios y húmedos.

3.7.4 Determinación de variables hidrológicas

Se ha calculado la ETP y la ETR por los métodos de Thornthwaite y Turc, respectivamente.

El método de Thornthwaite utiliza datos de temperaturas medias mensuales y obtiene la ETP a partir de la siguiente expresión (Aparicio, 1992):

$$ETP = 1.6 ka \left(\frac{10 T}{I} \right)^a \dots\dots\dots (Ec. 4)$$

Dónde:

ETP = Evaporación potencial no ajustada para meses de 30 días de 12 horas luz (mm)

T = Temperatura media mensual (°C)

ka = constante que depende de la latitud y el mes del año

I = suma de (*i*) para todos los meses del año o semana anual de calor

a = constante que depende del lugar y que es función del índice de eficiencia anual de temperatura, cuyo valor es:

$$a = 0.000000675 \ I^3 - 0.0000771 \ I^2 + 0.017925 \ I + 0.49239 \dots \dots \dots \text{(Ec 5)}$$

i = eficiencia de la temperatura

I = índice anual de calor (o temperatura). Es la suma de las eficiencias mensuales de

Temperatura.

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \dots \dots \dots \text{(Ec 6)}$$

La evapotranspiración potencial no ajustada se corrige por la duración real del día en horas y los días del mes y se obtiene la evapotranspiración potencial ajustada.

El método de Turc, determina la ETR a partir de los datos de precipitación anual y de temperatura media anual mediante la siguiente expresión (Custodio y Llamas, 1983):

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \dots \dots \dots \text{(Ec 7)}$$

Dónde:

ETR = Evapotranspiración real (mm)

P = precipitación anual (mm)

L = coeficiente que depende de la temperatura media anual, y se obtiene:

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3 \dots\dots\dots (Ec 8)$$

T = temperatura media del aire (°C)

3.7.5 Balance hídrico

El balance hídrico se plantea como:

$$P = ETR + EX + AR \dots\dots\dots (Ec 9)$$

Dónde:

P= es la precipitación

ETR= es la evapotranspiración real

EX= son los excedentes de agua y,

AR= el Incremento en la reserva de agua utilizable por las plantas

CAPITULO 4

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los aspectos considerados para el estudio y que están en función del cumplimiento de los diferentes objetivos que a su vez permitirán dar respuesta a las hipótesis propuestas. Estos **aspectos** inician con el diseño del sistema; **aspectos** en la construcción como son análisis o estudios del suelo y los detalles de los diferentes procedimientos constructivos; La determinación de variables hidrológicas que nos permitió entender el comportamiento de las condiciones ambientales del sitio en estudio, pero que también nos proporcionó información para el cálculo del balance hídrico. Para este balance fueron contemplados los periodos estacionales anuales (primavera, verano, otoño e invierno) y determinado mediante el uso de un modelo hidrológico.

4.1 Diseño de humedales construidos

Las características generales del sistema HCSS se definieron siguiendo las recomendaciones de la literatura revisada así como de los alcances y recursos disponibles durante la investigación de este trabajo. **Al inicio del estudio se tenían los datos de caracterización del agua residual que se utilizó para el tratamiento.**

A continuación se presenta las formas de diseño realizadas para el sistema en estudio.

4.1.1 Diseño Experimental

La superficie total del sistema es de 34.86 m² divididos en los dos filtros, 15.66 m² para el filtro vertical y 19.20 m² en el filtro horizontal. La tabla 2 muestra los detalles y características constructivas del sistema de humedales. Se puede observar que en las dimensiones de largo-ancho de los filtros se buscó cumplir con una relación 2:1, el tamaño de raíz en las plantas Tule y Carrizo son de 40 y 60 cm, para la planta de Alcatraz de 30 cm; el tamaño de raíz del Tule y el Carrizo definieron la profundidad de los filtros (kadlec y Wallace, 2009). Los diámetros y el

tipo de material (PVC) de la red de tuberías para suministro y descarga se utilizaron siguiendo las recomendaciones de la literatura (Hoffman y Winker, 2011). Los materiales de Grava y arena que componen los sustratos de los dos filtros así como los diferentes tipos de vegetación que se manejaron, son utilizados de la región (EPA, 2000).

Tabla 5. Características constructivas del sistema de humedales

CARACTERÍSTICAS	FILTRO VERTICAL	FILTRO HORIZONTAL
Largo (m)	5.80	6.00
Ancho (m)	2.70	3.20
Profundidad (m)	0.70	0.60
Medio filtrante	Arena gruesa (0.50 m espesor) Grava $\frac{3}{4}$ "- $1\frac{1}{2}$ " (0.20 m espesor)	Grava $\frac{3}{4}$ "- $1\frac{1}{2}$ " (0.60 m espesor)
Red de tuberías de PVC:	Diámetros:	Diámetros:
- Suministro	2" (5cm)	4"(10cm)
- Recolección	4"(10cm)	4"(10cm)
Plantas macrófitas	Tule (<i>Schoenoplectus acutus</i>) Alcatraz (<i>Zantedeschia Aethiopica</i>)	Carrizo (<i>Phragmites Australis</i>)

4.1.2 Diseño Teórico

Para el diseño teórico se consideró como parámetro principal de remoción a la DBO, buscando el cumplimiento con la Normatividad Sanitaria vigente específicamente la NOM-003 SEMARNAT-1997 y que forma parte de los objetivos propuestos en este trabajo.

Los valores iniciales de la DBO para un periodo anual se muestran en la figura 4.1. Como se puede observar en la gráfica, el comportamiento en la concentración de la DBO fue muy variado durante el periodo analizado, por lo que optamos en utilizar un valor promedio (línea roja) para el diseño inicial de los humedales. Esta variabilidad se puede comprender a partir del dinamismo existente en la Universidad, que se dio por el crecimiento de la población (alumnos, maestros y personal) dentro del plantel, es una institución reciente en la cual los horarios y

actividades fueron aumentando como las concentraciones de la DBO en las descargas de las aguas residuales.

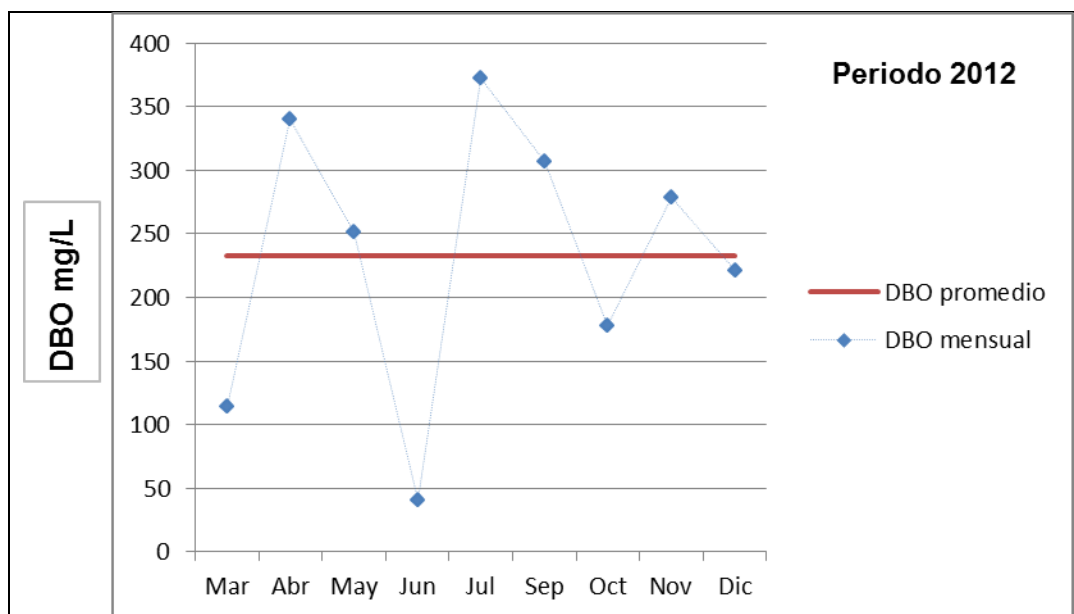


Figura 4.1 Comportamiento en la concentración y valor promedio de la DBO

Con el valor promedio de 233 mg/L, los datos de la tabla 3 y la aplicación de la ecuación 1 se obtuvo el área superficial requerida en el sistema; estos valores fueron descritos en el apartado anterior.

4.2 Parámetros Hidrodinámicos

El tiempo de residencia hidráulico para el filtro horizontal fue de 1.75 días **teórico** y 2.14 días **real**; esto obedece a que los filtros del sistema están conectados en serie y el gasto que sale en el filtro vertical es el gasto real que entra al filtro horizontal (cuadro amarillo) de esta manera el TRH aumenta (ver tabla 3). Estos parámetros fueron calculados a partir de la ecuación 2 y con los datos que se muestran en la tabla 3, referente al área, profundidad, porosidad y el caudal.

El caudal óptimo es de 2.63 m³/día para el filtro horizontal y 2.15 m³/día para el filtro vertical, estos valores fueron calculados aplicando la ecuación 1. Cabe mencionar que la ecuación 1 determina un valor de área y no de caudal, sin

embargo para este trabajo fue necesario determinar el caudal a partir de un valor de área establecido (ver apartado 4.1.1) con los cuales el sistema operaba.

Tabla 6. Calculo de Tiempo de Residencia Hidráulico (a) y Caudales (a yb)

a) Humedal de flujo horizontal								
Área	Caudal prom	Ce (DBO)	Cs (DBO)	KDBO	C*	C* (máx.)	Prof. (d)	Porosidad (n)
m ²	m ³ /d	mg/L	mg/L	m/año	mg/L	mg/L	m	Frac
19.20	2.63	233	20	180	15.85	14.00	0.60	0.40

2.15

t (d) = 1.75 tiempo de residencia teórico

t (d) = 2.14 tiempo de residencia real

b) Humedal de flujo vertical								
Área	Caudal prom	Ce (DBO)	Cs (DBO)	KDBO	C*	C* (máx.)	Prof. (d)	Porosidad (n)
m ²	m ³ /d	mg/L	mg/L	m/año	mg/L	mg/L	m	Frac
15.66	2.15	233	20	180	15.85	14.00	0.70	0.32

Los parámetros hidrodinámicos juegan un papel importante en la remoción de contaminantes (Kadlec y Wallace, 2009), entre más grande sea el TRH acelera la remoción de mayor número de contaminantes (Kayombo et al., 2005) para un mismo caudal.

El sistema durante el estudio estuvo en operación con los valores de TRH y caudal expuestos y para estos mismos datos, fue evaluada su eficiencia en remoción, pero los resultados que definen la eficiencia se discute más adelante.

4.3 Procedimientos de Construcción

Este apartado centra la atención en los procesos constructivos de los distintos elementos que constituyen la construcción de los humedales, indicando en cada uno de estos los requisitos que deben cumplir. En los humedales construidos, el término “construidos” es sinónimo de aplicación de Ingeniería; es decir, que se puede medir y por ende tener un control de las variables hidráulicas y aspectos ambientales. Se debe cuidar los trabajos en cada una de las etapas durante el desarrollo de construcción, ya que del buen funcionamiento depende la eficiencia del sistema. Una descripción de los diferentes procesos que comprenden este apartado, se presentan a continuación.

4.3.1 *Análisis geotécnicos*

Un aspecto constructivo de suma importancia es el confinamiento del suelo en los humedales de manera que no se produzcan fugas de agua. A través del análisis de las características del suelo (granulométricas y de permeabilidad) se buscaron alternativas de construcción que ayudasen en la disminución o eliminación de infiltración del agua residual al subsuelo, obteniendo lo siguiente:

a) Clasificación y características del suelo

En la Figura 4.2 se presenta la distribución porcentual en peso de los tamaños de las partículas de suelo obtenidas del análisis del suelo (línea gruesa azul), la cual muestra los porcentajes de material que pasan y se retienen en cada una de las mallas establecidas por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. En la gráfica se puede observar un contenido en gravas pequeño que son retenidas en la malla No. 4 del 14.7%, por el contrario la mayor cantidad de material de la muestra analizada lo presentan las arenas, pasando la malla No. 4 y retenidas en la malla No. 200 que constituyen un 52.7% del total de suelo y que a su vez se pueden clasificar en arenas gruesas, medias y finas donde el mayor porcentaje lo tienen las arenas medias (de la malla No.10 hasta la malla No. 40) alcanzando un 33.4 % del total de las arenas. Al final de la gráfica (pasando la malla No. 200) se observan los suelos de grano fino que, aunque tiene mayor contenido que las gravas (32.6% del total de la muestra), las arenas predominaron en la muestra.

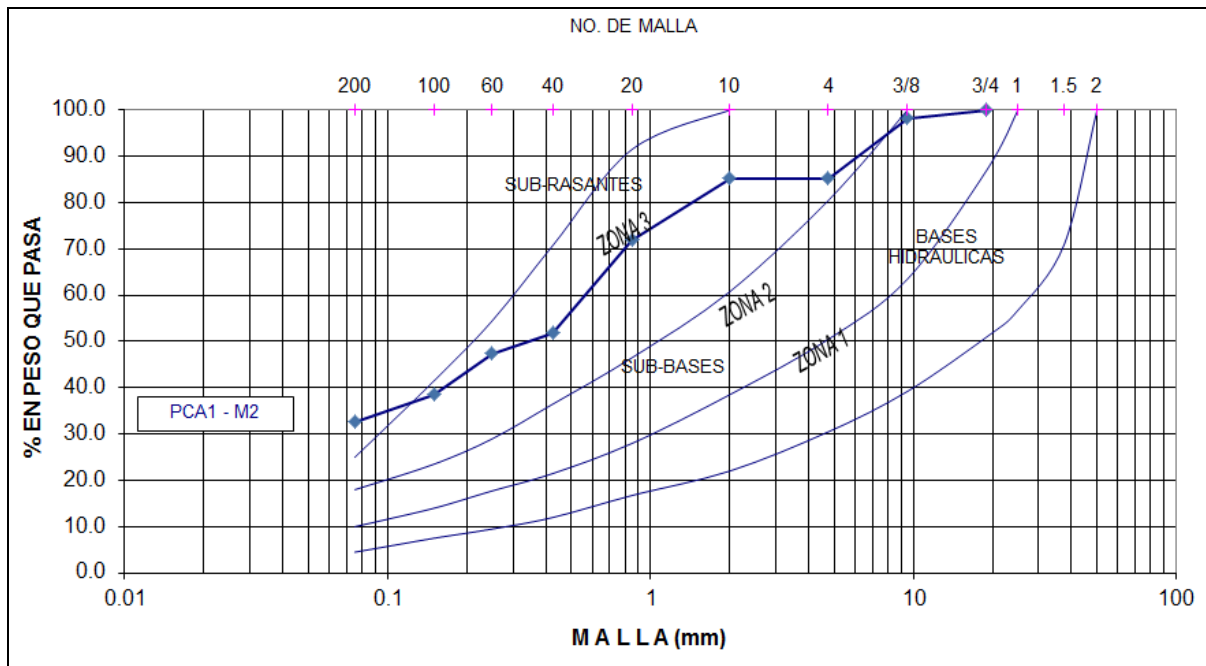


Figura 4.2. Clasificación de tamaño de grano por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Fuente: SUCS, 2007

El valor del coeficiente de permeabilidad fue de 9.03×10^{-4} cm/s. Los valores de composición granulométrica y coeficiente de permeabilidad, definen un suelo arenoso (SUCS, 2007) de baja a moderada permeabilidad o semipermeable (Bowles, 1981). Con esta descripción del suelo y en base a la experiencia en el área de Mecánica de Suelos del Ingeniero Marco Antonio Berumen, docente de la Universidad, permitió recomendar las siguientes adecuaciones al suelo:

1. La compactación en capas de 10 cm de espesor cada una (3 capas en total) con el material arcilloso producto de la excavación debidamente homogenizado en las plantillas de los filtros, y

2. La colocación de una capa impermeable con el uso de una geomembrana de PVC.

Las adecuaciones anteriores fueron alternativas o tratamientos alternos que se basaron principalmente en cómo evitar o disminuir en todo lo posible la infiltración de agua al subsuelo, aprovechando las características que el suelo proporciona.

Estas alternativas son viables para suelos con propiedades similares y se deben considerar en el proceso de construcción.

4.3.2 Trabajos preliminares a la construcción

En la figura 4.3 se muestra los trabajos realizados correspondientes a los procedimientos preliminares de construcción, excavación, compactación y afine, que a continuación son descritos en este orden.

a) Limpieza, trazo y nivelación

Estos procesos consisten en retirar la vegetación (deshierbe) que cubre el suelo con el propósito de limpiar la superficie de ubicación del HCSS, posteriormente se realizaron los trazos con cal, indicando las dimensiones de la excavación y la nivelación del terreno de acuerdo a las dimensiones definidas (ver figura 4.3a). Para hacer este proceso se utilizó equipo topográfico; herramienta menor consistente en pala, rastrillo, cinta métrica y nivel manual; la mano de obra se realizó con el apoyo de docentes y alumnos de la Universidad. Hay que asegurarse que cumple con las características de diseño.

4.3.3 Excavación, compactación y afine

a) Excavaciones

Para las excavaciones de los filtros se utilizó una máquina retroexcavadora (ver figura 4.3b), ya que este equipo es ideal para este proceso. Para realizar este trabajo fue necesaria una persona que supervisara el desarrollo y además guiara al operador de la máquina durante la excavación, asegurando cumplir con las dimensiones de diseño para cada filtro. Esta maquinaria es muy útil, sobre todo en humedales de con grandes extensiones en superficie, pero si no se cuentan con los recursos dichas excavaciones pueden hacerse a mano utilizando herramienta menor, es decir, hacerlo con pico y pala.

b) Compactación del suelo y afine

Para este trabajo y atendiendo las recomendaciones de análisis de suelo descrito anteriormente (apartado 4.3.1, inciso a), las compactaciones se realizaron en tres capas de 10 cm cada una, con relleno de material producto de la misma excavación (seleccionar únicamente material fino, libre de rocas) y equipo de compactación (ver figura 4.3c), con esto se corrige la estructura del suelo buscando eliminar los espacios vacíos, aumentar su densidad, consistencia, capacidad de soporte y estabilidad. Otra recomendación fue la de utilizar la geomembrana de PVC como recubrimiento; para este trabajo se aplicaron ambas, pero de la aplicación de la geomembrana se aborda a detalle mas adelante.

Durante el proceso de compactación fue necesario asegurarnos que el fondo o plantilla de los filtros tuvieran el afine y pendiente requerida (1-1.5%) ya que el agua fluye por gravedad a través de estos.

El corte irregular durante las excavaciones obliga a elaborar afines en paredes y plantilla dentro del filtro, el afine consistió en el corte de los grumos o terrones que sobresalen a la excavación, esta acción permite delinear el espacio interior del filtro disminuyendo la irregularidad en las dimensiones (ver figura 4.3d), ya que estas dependen los demás procesos. Para esta actividad se utilizó herramienta consistente en pala, pico y carretilla y la mano de obra con apoyo de docentes y alumnos.



Figura 4.3 Trabajos preliminares de Limpieza, trazo y nivelación (a), Excavación (b), compactación y afine (c y d)

4.3.4 Esquema representativo de los procedimientos de construcción

La figura 4.4 muestra un esquema del tren de procedimientos constructivos. Se incluyen en el esquema la composición y especificaciones de los materiales utilizados en los filtros; además, se representa la conexión del sistema y la dirección del flujo que define su funcionamiento.

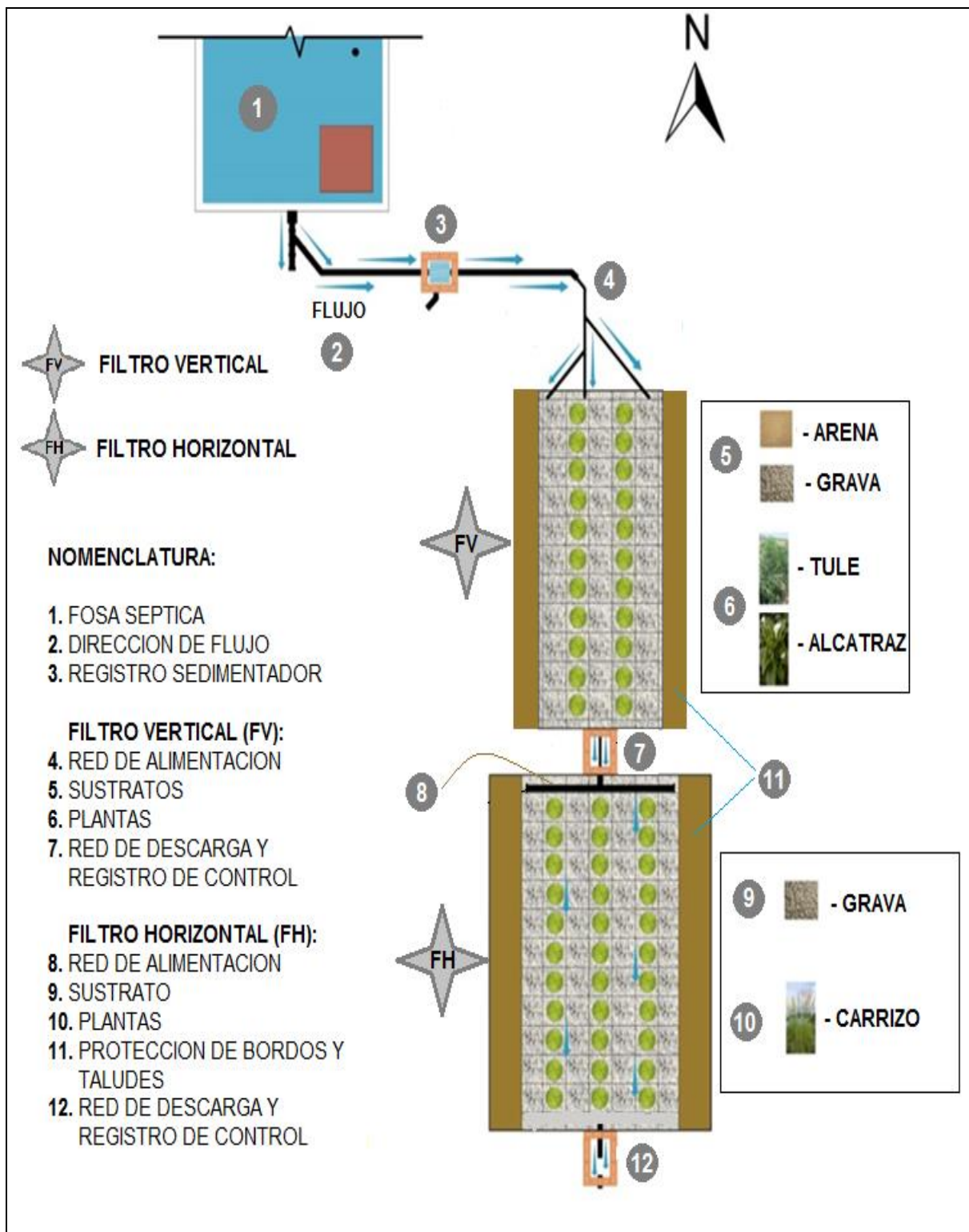


Figura 4.4 Esquema general del tren de procedimientos constructivos y funcionamiento del sistema de humedales construidos.

4.3.5 Colocación y habilitado de materiales

En este apartado se explican los procesos de recubrimiento, la colocación de los medios filtrantes y el habilitado de las tuberías.

a) Colocación de membrana impermeable

El proceso de la colocación de la membrana impermeable se llevó a cabo como parte de las adecuaciones o tratamientos alternos que ayudan en la disminución de la infiltración al subsuelo y que fueron definidos en el párrafo 4.3.1a con base en los estudios geotécnicos del suelo. La colocación de la membrana de plástico (ver figura 4.5a) se realizó en toda el área interior del filtro, se recubrió el fondo (plantilla) y paredes (taludes) para lograr la impermeabilidad en el suelo. La membrana se colocó cuidadosamente para evitar el rompimiento o maltrato del material así como no dejar espacios sin cubrir.

b) Sustrato o Medio filtrante

La figura 4.5c y d muestra los agregados pétreos que componen los sustratos de los filtros, estos materiales son propios de la región y están definidos de la siguiente manera:

Filtro Vertical.- El sustrato de este filtro se compone de tres capas, que serán descritas en el orden desde fondo hasta la superficie. La primera capa es de 15 cm de espesor en material de grava con tamaño de grano de 19 mm ($\frac{3}{4}$ " de diámetro, que protege la red de descarga contra el taponamiento en las perforaciones de la tubería y el espesor de esta capa quedo definida para cubrir los 10 cm de diámetro de este tubo, la segunda capa es de 50 cm de espesor con arena gruesa y tamaño de grano de 3-6 mm ($\frac{1}{8}$ "- $\frac{1}{4}$ " aproximadamente) y la tercera capa es de 10 cm de espesor con grava de 19 mm ($\frac{3}{4}$ " utilizada para cubrir la red de alimentación; esta capa al igual que la primera quedo definido por el diámetro de tubo de 5 cm que protege.

Filtro Horizontal.- Tiene una capa de 60 cm de espesor de material de grava con grano de 25 mm (1") de diámetro el cual protege las redes de descarga y alimentación.

El volumen total de los materiales fueron de 16.22 m³ para la grava y 7.82 m³ para la arena gruesa. La colocación de los pétreos fue utilizando herramienta manual consistente en pala y carretilla y la mano de obra con apoyo de docentes y alumnos.

c) Habilitado de tuberías y conexiones

El material utilizado para las tuberías de conducción y recolección de tipo ABS cedula 40 y fue habilitado en el taller de ingeniería civil. Este proceso consistió en el corte y perforación de los tubos, así como el pegado de algunos accesorios previo a la instalación en los filtros (ver figura 4.5b). Los orificios son de 6.35 mm (1/4") de diámetro ubicados a cada 20 cm y cada tramo de tubo cuenta con tres hileras de orificios. El trabajo se realizó conforme al detalle constructivo para las redes de alimentación y descarga y que se describen en el siguiente apartado.



Figura 4.5 Colocación de capa impermeable (a), estratos (c y d) y habilitado de tuberías (b)

4.3.6 Instalación de tuberías

Se tuvo cuidado al momento de colocar las instalaciones; para asegurar la correcta conexión entre los accesorios y las tuberías. Se procuró que la distribución del agua residual fuera uniforme en la superficie de los filtros para que, de este modo, evitar que la carga hidráulica y la carga contaminante se concentrara de una manera significativa en algún punto del humedal. Estos aspectos influyen en el desempeño hidráulico del sistema y se pueden observar en las instalaciones de las redes que a continuación se describen:

a) Red de descarga

La figura 4.6 muestra la colocación de la red de tubería ABS de 100 mm (4") de diámetro en el fondo de los filtros, esta cumplió con la pendiente descrita en el párrafo 4.3.3, inciso b. La distribución de la red del filtro vertical cubrió toda el área del fondo en forma equidistante (ver figura 4.6a), esto es, la misma separación entre los tubos (la distancia entre los tubos es 1.425 m de centro a centro), la densidad en las perforaciones de los tubos es aproximadamente de 23 orificios por m² y cuenta con un tubo de ventilación del mismo diámetro (100 mm) que sobresale la superficie del sustrato y que ayuda con la eficiencia hidráulica del filtro.

La tubería del filtro vertical tiene un arreglo que le permitió cubrir el área de fondo por la forma como se distribuye el fluido desde la superficie (red de alimentación), es decir, cubre toda el área superficial del filtro (ver figura 4.6a) y el agua fluye de igual forma hasta llegar al fondo. Una vez en la red de descarga el fluido se concentra en un punto de salida que está conectado a un registro. Este registro es un elemento de construcción en forma de caja que se utiliza para la protección y mantenimiento de los dispositivos y accesorios que complementan las instalaciones (las características constructivas del registro se describen en el apartado 4.3.8a); para este caso, el registro se utilizó como punto de control hidráulico (apertura y cierre de válvulas) y para el muestreo del agua residual.

La red de tubería de filtro horizontal es más simple, se colocó un tramo de tubo con diámetro de 100 mm (4") a lo ancho de este (ver figura 4.6b) donde el fluido es captado y que al igual que el filtro vertical, es concentrado a un punto de salida y conectado a un registro de control hidráulico.

La importancia de las redes de descarga radica en que son las que evacuan las aguas residuales tratadas del sistema. En este trabajo se protegieron contra el taponamiento con material grueso consistente en grava de 3/4" a 1 1/2" de diámetro, material que fue utilizado en los medios filtrantes descritos con anterioridad.

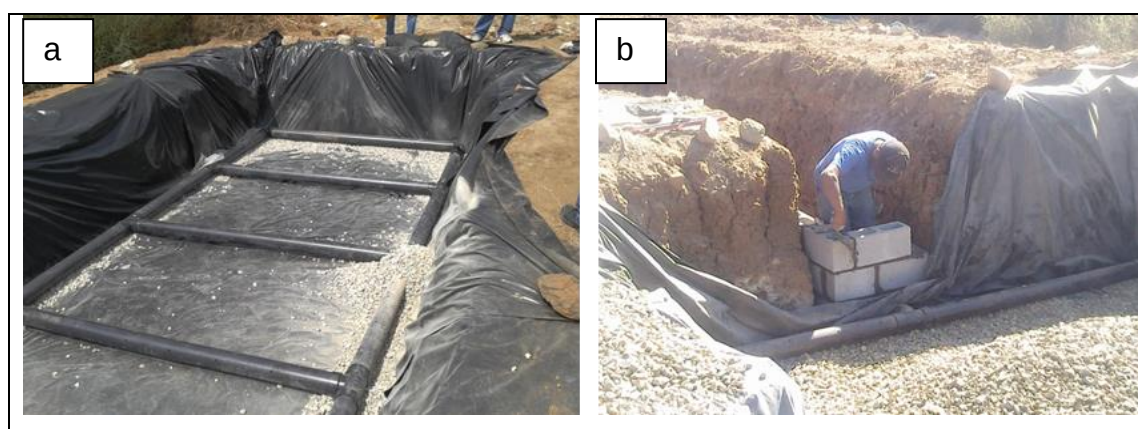


Figura 4.6 Colocación de la red de descarga en el filtro vertical (a) y el filtro horizontal (b)

b) Red de alimentación

En la figura 4.7 se muestra las redes de alimentación para ambos filtros, la figura 4.7a le corresponde al filtro vertical y la 4.7b al filtro horizontal, la instalación de estas redes se desarrolló bajo los mismos requerimientos descritos para la red de descarga, como son:

1. Colocar la tubería de manera que cubra toda el área superficial del filtro (ver figura 4.7a) para garantizar una distribución uniforme y,
2. Cumplir con el porcentaje de pendiente requerido del 1 al 1.5%, ya que el agua fluye por gravedad.
3. Cubrir las redes de alimentación con material de grava, pero a diferencia de las redes de descarga, en este, es para evitar la creación de mosquitos y acumulación de insectos.



Figura 4.7 Colocación de la red de alimentación en el filtro vertical (a) y filtro horizontal (b)

Cabe mencionar que las tuberías de alimentación y descarga para el filtro horizontal se colocaron perpendiculares a la dirección de flujo como se muestra en la figura 4.8a y que este filtro a diferencia del vertical se mantiene inundado en todo momento, para lograr esto, se realizó un arreglo en la tubería de salida de la red de descarga (ver figura 4.8b) que funciona como controlador en el nivel del agua dentro del filtro. Este arreglo consiste en elevar el tubo de salida hasta la altura que se requiera mantener el nivel de agua dentro del filtro

En la figura 4.9 se muestra un esquema con los detalles constructivos de las instalaciones de alimentación (a) y descarga (b) para el filtro vertical.

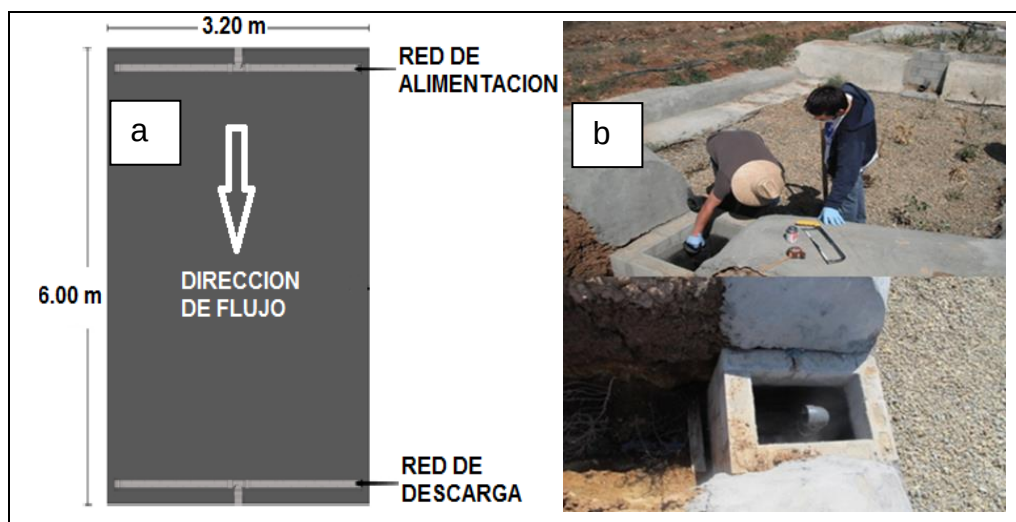


Figura 4.8 Esquema de redes (a) y control de nivel (b) en el filtro horizontal

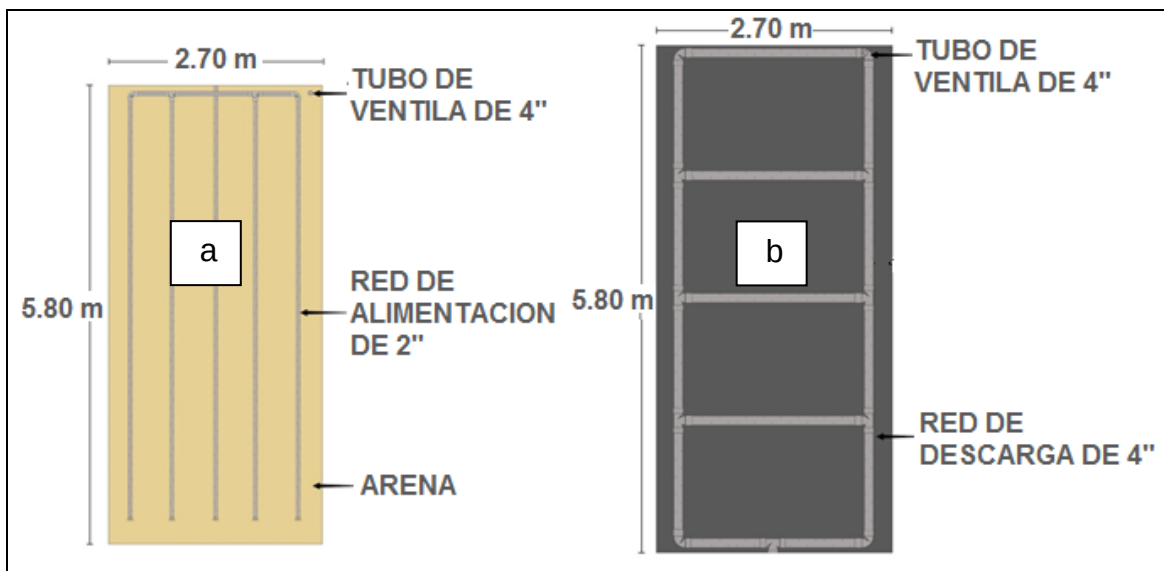


Figura 4.9 Esquema de red de alimentación (a) y descarga (b) del filtro vertical

4.3.7 Plantación

Para la selección de las plantas se han considerado especies de la región, ya que están adaptadas a las condiciones de clima, la figura 3.10 muestra el proceso de la plantación:

a) Especies utilizadas

Para el filtro vertical se utilizó la especie de tule (*Schoenoplectus lacustris* o *Scirpus lacustris*) como especie principal y el alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) como especie ornamental y para el filtro vertical la especie carrizo (*Phragmites australis*). La plantación se llevó a cabo bajo las recomendaciones del maestro Eliseo Cantellano biólogo investigador de la UNAM, invitado por la universidad como parte de los programas de vinculación y con el apoyo de alumnos (ver figura 4.10a y b). Para el filtro vertical el procedimiento consistió en la formación de filas con separación de 50 cm entre ellas a todo lo largo del filtro, una fila fue de tule y otra de alcatraz, la misma separación de 50 cm se utilizó entre planta y planta, es decir se formó una retícula cuadrícula de 50 cm que representa una densidad de 4 plantas por m². La plantación de ambas especies fue al mismo tiempo, el tule se plantó junto al alcatraz con la intención de que este le proporcionara protección contra la luz solar. Durante el proceso de adaptación de las plantas, el tule

demostró ser muy resistente pero le llevo cuatro meses en crecer y debido a esto, el alcatraz **se estreso** incluso algunas plantas se marchitaron (ver figura 4.10 c). Esta experiencia nos indica que la plantación del alcatraz debió hacerse una vez crecido el tule. Las especies de alcatraz que sobrevivieron, lograron su crecimiento una vez que el tule proporciono sombra (ver figura 4.10 d).

En este trabajo la idea de utilizar el alcatraz como planta ornamental es para fines de comercialización, el alcatraz mostro su resistencia y crecimiento con las aguas residuales, solo debemos cuidar a detalle lo que la planta requiere y así definir cómo y en qué momento utilizarla.

Para el filtro horizontal se utilizó el carrizo (*Phragmites australis*) y demostró ser más resistente que el tule y alcatraz pero su crecimiento se aproxima al del tule (cuatro meses). Su plantación fue similar al filtro vertical específicamente en la formación de la retícula cuadrangular de 50 cm. Esta especie es una de las más recomendables para uso en los humedales construidos.

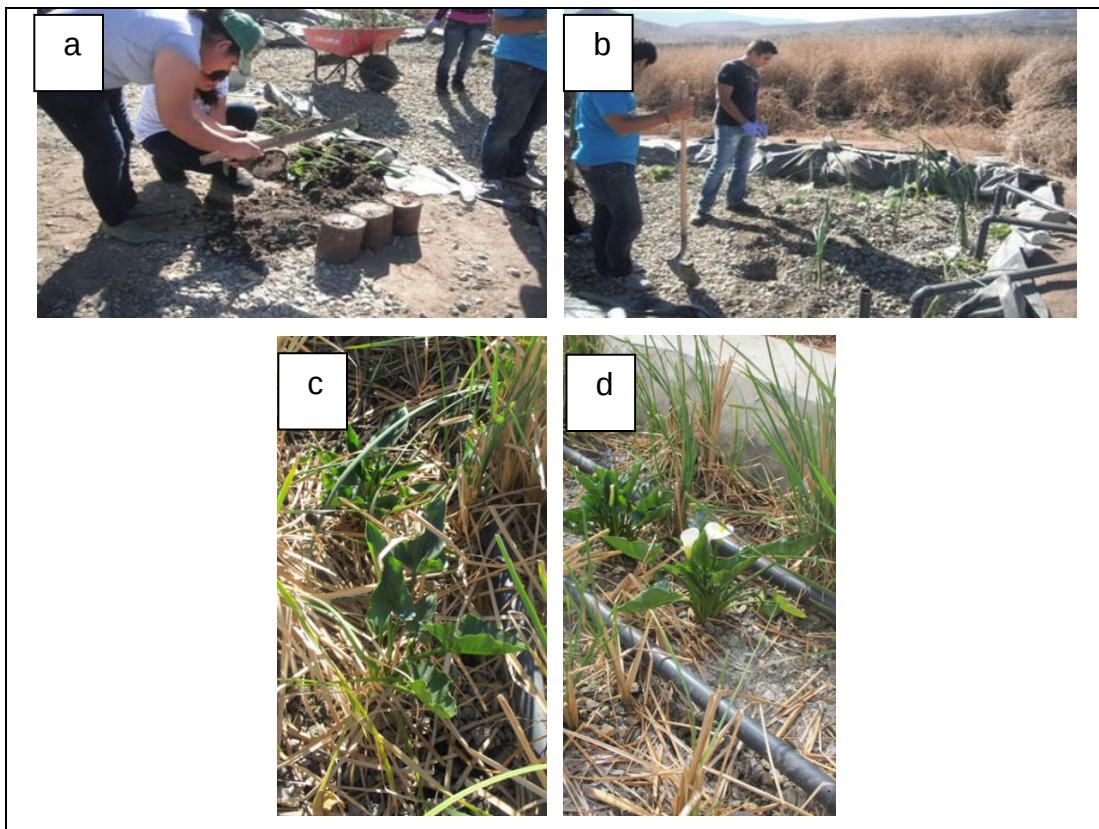


Figura 4.10 Proceso de plantación (a y b), alcatraz marchito (c) y floreciente (d)

4.3.8 Obras adicionales

La figura 4.11 muestra las obras adicionales necesarias para este estudio, como parte de un desempeño eficiente de los humedales y la figura 4.12 muestra los detalles constructivos para el registro sedimentador.

a) Registros de control

Los registros son elementos de construcción que sirven para proteger y permitir el mantenimiento a las instalaciones y sus accesorios que se colocan dentro de este. En este trabajo sirvió como punto de control para el cierre y apertura de las válvulas además funciona como punto de muestreo. Se utilizó un registro por cada filtro con características iguales, hechos con material de construcción durable y están ubicados en el punto de la descarga de los filtros. Están compuestos con muros de bloque con tamaño de pieza de 15 x 20 x 40 cm en altura, ancho y largo, respectivamente. Las dimensiones constructivas de los registros al interior de estos, son de 40 x 60 x 80 cm, en ancho, largo y altura, respectivamente (ver figura 4.11a). Estas dimensiones quedaron definidas por la facilidad que proporcionaron durante la operación de las válvulas y recuperación del agua para el muestreo y análisis fisicoquímicos.

b) Protección de bordos y taludes

Las obras de protección son necesarias porque alargan la vida útil de las instalaciones y por ende la eficiencia en el sistema. En los procesos finales se revisan y corrigen las instalaciones que lo requieran, para este trabajo se cubrieron y nivelaron los bordos con material de construcción durable en los dos filtros (ver figura 4.11b). El material consistió en una malla de metal electro-soldada que se fijó a los bordos y taludes y fue cubierto con mortero cemento-arena, con estas protecciones logro evitar los derrumbes. Como parte de esta protección se colocó una hilera de bloque en el filtro vertical para aumentar la altura del bordo, esto fue necesario para evitar el derrame del agua residual. Estas adecuaciones se determinaron en el proceso de la construcción ya que el material del suelo estaba inestable.

c) Registro sedimentador de solidos

La figura 4.11c y d muestra la ubicación del registro sedimentador, la función de los registros fue descrita en el inciso b de este apartado. Al igual que los registros de control, esta compuesto con muros de bloque con tamaño de pieza de 15 x 20 x 40 cm en altura, ancho y largo, respectivamente y dimensiones constructivas al interior de 40 x 60 x 80 cm, en ancho, largo y altura, respectivamente. La construcción del registro se desarrolló en el tramo de instalación entre la salida de la fosa y la entrada al filtro vertical. La función del registro sedimentador fue la retención de los sólidos que pudiesen escapar de la fosa séptica y se utilizó como una medida precautoria ya que en el proceso de muestreo se observaron partículas sólidas y basura que salían de esta. La construcción de este elemento fue una adecuación que se realizó durante el proceso constructivo, cuidando que el sistema funcionara adecuadamente.



Figura 4.11 Detalles de registro de control (a), protección de bordos y taludes (b) y registro sedimentador (c y d)

La figura 4.12 muestra un esquema de la conexión y funcionamiento del registro sedimentador, se observa que el flujo es de izquierda a derecha con el tubo de salida ahogado en el fluido, esta conexión permite que los sólidos que entren al registro se vayan al fondo antes de salirse hacia el humedal. Las dimensiones y características constructivas fueron descritas en el párrafo anterior. El registro cuenta con un tubo ubicado al fondo que esta sellado con un tapón que tiene rosca, es decir que se puede quitar y poner para de esta manera realizar la limpieza del registro. La línea superior del cuadro azul indica un nivel del agua de 40 cm de profundidad dentro del registro.

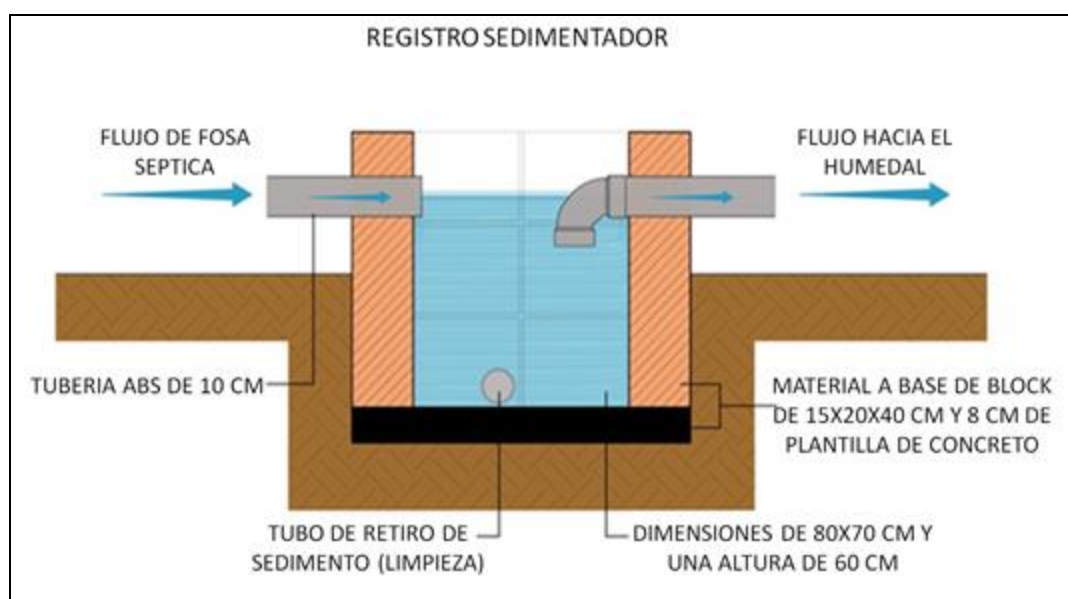


Figura 4.12 Esquema y detalles constructivos de registro sedimentador

La figura 4.13 muestra los detalles constructivos del funcionamiento de los filtros. Las dimensiones del filtro vertical son de 5.80 de largo por 2.70 de ancho y 0.70 m de profundidad, las flechas en azul indican la dirección del flujo a través del medio filtrante y al fondo del filtro la red de descarga. Las capas y materiales del sustrato son, de la superficie al fondo; capa de grava de 10 cm para protección de la red de alimentación contra la presencia de mosquitos e insectos; capa de arena gruesa de 50 cm como medio filtrante; capa de 20 cm de grava como protección de la red de descarga contra el taponamiento (ver figura 4.13a).

En la figura 4.13b se presentan los detalles constructivos para el filtro horizontal, la línea en azul muestra el nivel de agua dentro del filtro de 55 cm, es decir 5 cm debajo de la superficie del sustrato. En el fondo se observa la red de descarga y el medio filtrante a base de grava con 60 cm de espesor.

En las dos figuras se indican en verde el detalle en el sembrado de las plantas acuáticas.

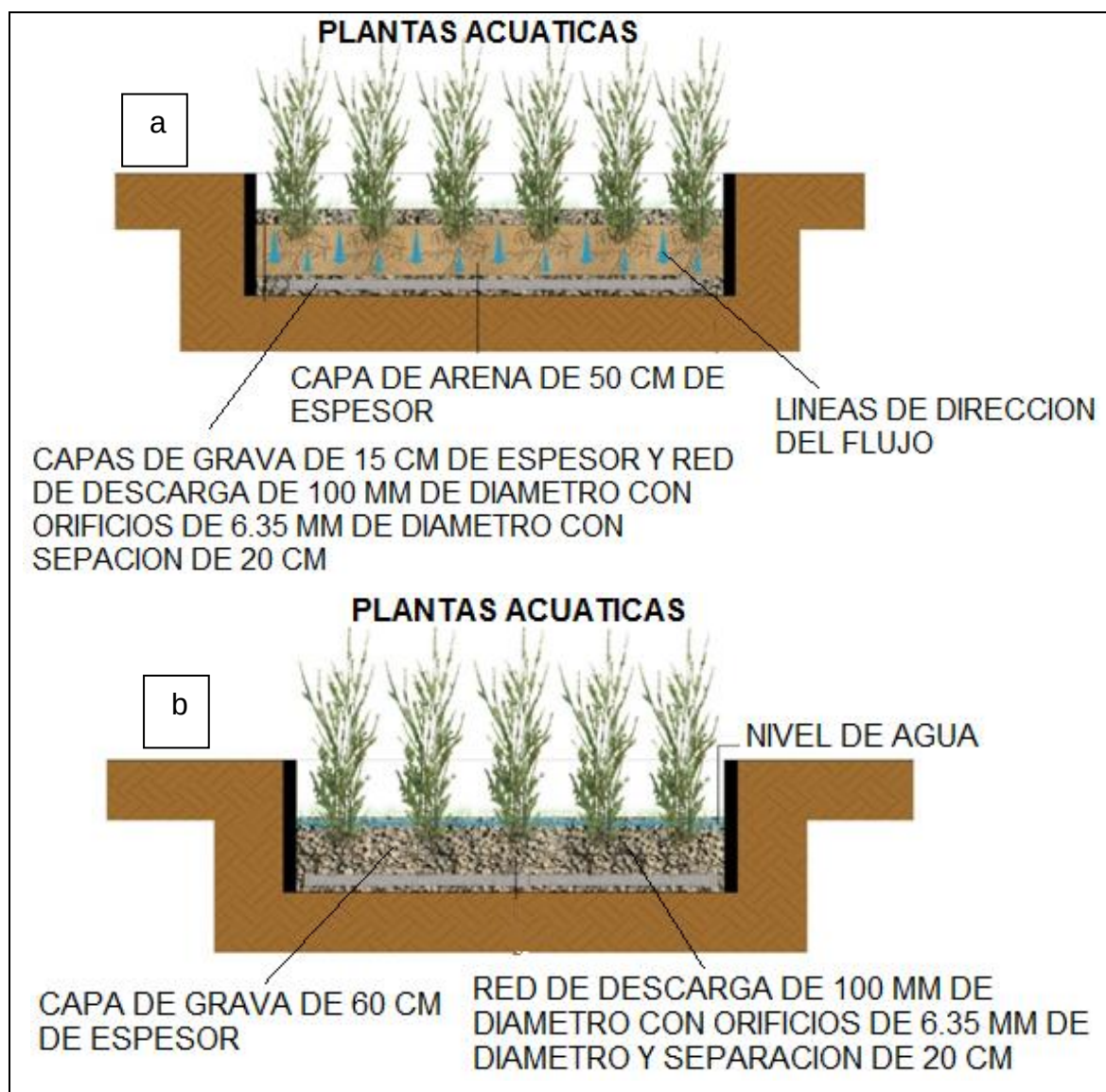


Figura 4.13 Detalles constructivos de los filtros vertical (a) y horizontal (b)

4.4 Operación y mantenimiento

En este apartado se presentan las actividades referentes a la operación, ajustes y mantenimiento del sistema.

4.4.1 Operación

Durante los primeros 30 días de funcionamiento se realizaron revisiones de forma visual atendiendo los aspectos físicos en el área superficial y en los alrededores del sistema de humedales, así como la operación de este. Como parte del control hidráulico la supervisión consistió en monitorear la distribución del agua residual en el filtro vertical, el nivel del agua dentro del filtro horizontal y la limpieza de las estructuras de entrada y descarga. Durante este mismo periodo se observó el comportamiento de la vegetación respecto a la adaptación y crecimiento.

El sistema funciono en forma adecuada durante la operación, esto es, que el fluido entra, pasa a través del sistema y sale, sin embargo para lograr esto se requirió realizar algunos ajustes y modificaciones, que se presentan a continuación:

a) Evaluación y Ajustes

La figura 4.14 muestra los ajustes que se realizaron como parte de las correcciones en la operación.

1.- El filtro vertical presento infiltración por uno de los bordos, esta fuga de agua se debió a un rompimiento en la membrana impermeable y se pudo detectar visualmente porque a un costado del bordo de la fuga se realizó una excavación en forma de zanja. La figura 4.14a muestra la corrección de la fuga, el cual consistió en la remoción del estrato y reparación de la membrana, este ajuste se realizó con el apoyo de alumnos.

2. La corrección en la red de alimentación el filtro vertical consistió en el aumento de las líneas de tubos de la red, esta modificación permitió distribuir en forma uniforme el agua en el área superficial del filtro (ver figura 4.14b), este ajuste se realizó con el apoyo de alumnos.

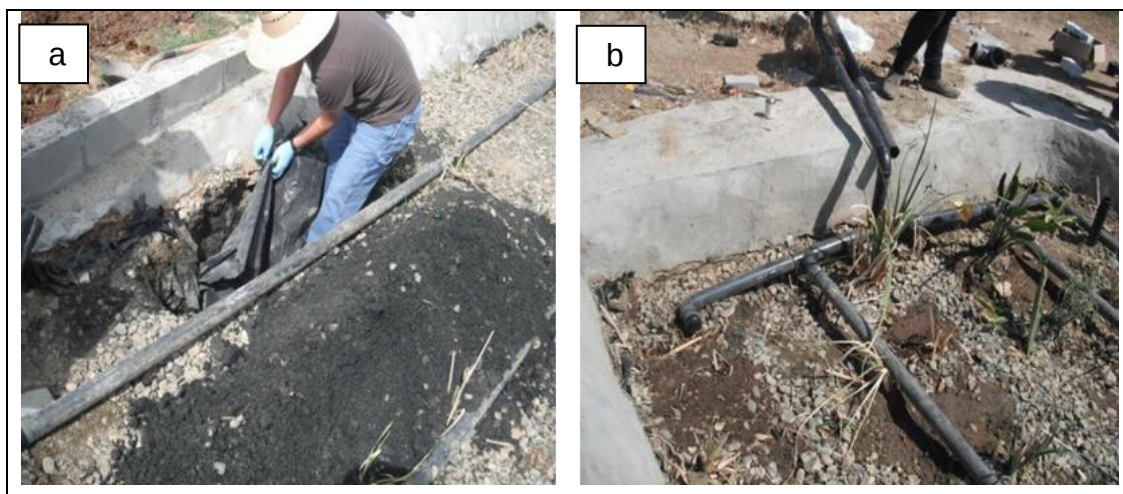


Figura 4.14 Detalles de ajustes y correcciones en la operación del sistema

4.4.2 Mantenimiento

El mantenimiento ha consistido en el retiro de hierba y limpieza en los alrededores de los humedales como se muestra en la figura 4.15a y b, seis meses después de la plantación se realizaron actividades de poda en el tule y carrizo y consistieron únicamente en el corte de las hojas, ya que estas plantas mostraron un crecimiento rápido en clima cálido, es decir la plantación se realizó en el mes de marzo, el crecimiento de marzo a mayo fue la mitad de lo que creció de junio a julio. Esta actividad se realizó con el apoyo de alumnos.



Figura 4.15 Detalle de limpieza y deshierbe en el entorno al humedal.

4.5 Eficiencia del sistema

La eficiencia del sistema en estudio, fue evaluado en base a la capacidad de remoción de contaminantes, en específico para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los análisis físicos y bioquímicos que determinaron este parámetro fueron elaborados mes a mes, para un periodo total de siete meses. Este periodo de evaluación correspondió a los alcances que permitió el proyecto, particularmente en la elaboración de los análisis (a través de un convenio con el laboratorio de aguas residuales). La eficiencia bioquímica está dada por la función simultánea de diferentes procesos como son: la filtración del agua residual al paso por los filtros, la actividad microbiana contenida en el medio filtrante y no menos importante la plantas acuáticas. La figura 4.16 muestra una imagen de las condiciones del sistema de tratamiento a siete meses de la puesta en marcha (periodo evaluado) para los diferentes filtros así como las características del entorno en que está ubicado respecto al tipo de vegetación y clima, que define una región semiárida.

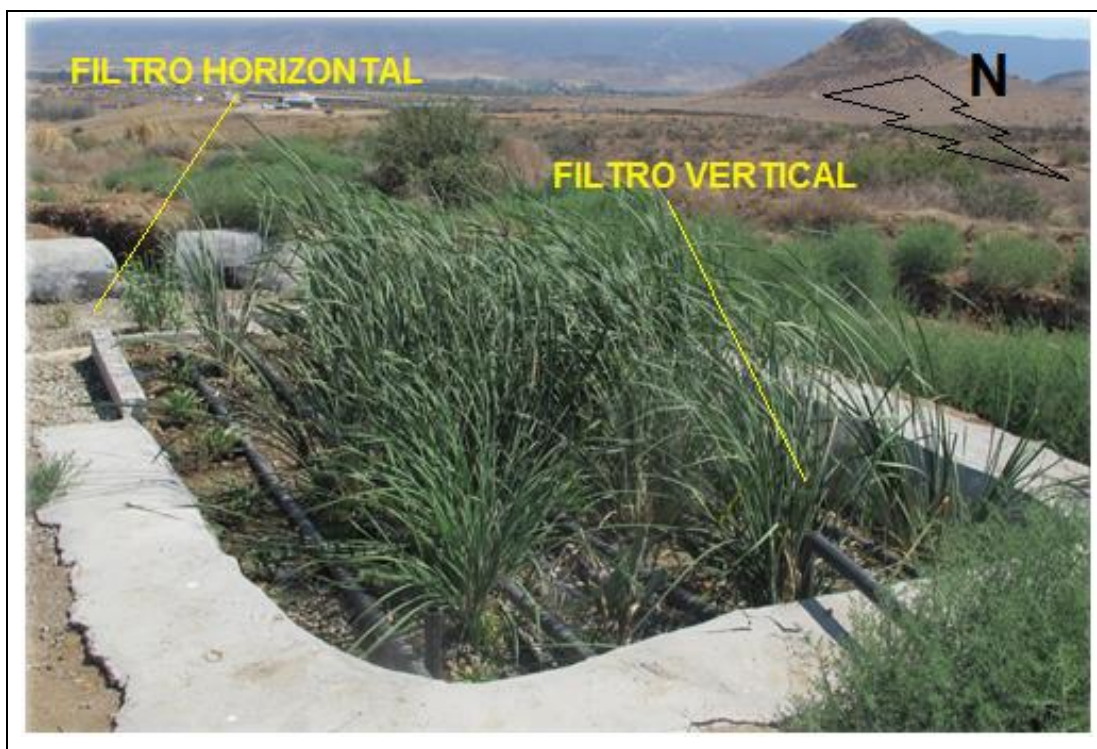


Figura 4.16 Fotografía del sistema de humedales al final del periodo evaluado

4.5.1 Remoción de DBO

En la tabla 4 se muestran los valores y porcentajes de remoción para la DBO que se obtuvieron en este trabajo. Estos valores corresponden al tren de tratamiento; que fue descrito con anterioridad, el cual fue evaluado a la salida de la fosa séptica y en las salidas de los filtros vertical y horizontal.

Tabla 7 concentración de la demanda bioquímica de oxígeno a la entrada al humedal (salida de fosa séptica), a la salida del FV y FH y el porcentaje de depuración (reducción de DBO)

Mes	Parámetro DBO (mg/L)					
	FECHA	Fosa Séptica	FV	% Depuración	FH	% Depuración
1	Febrero	410	200	51.22	S/R	S/R
2	Marzo	470	280	40.43	S/R	S/R
3	Abril	214	33	84.58	30	85.98
4	Mayo	290	203	30.00	57	80.34
5	Junio	554	41	92.60	13	97.65
6	Julio	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
7	Agosto	147	84	42.86	24	83.67
S/R = Sin registro FV = Filtro Vertical FH = Filtro Horizontal						

Puede observarse que la evaluación en los primeros dos meses, los resultados fueron del 45 % en promedio correspondientes al FV, ya que durante este tiempo la depuración del sistema fue únicamente con este filtro, por esta razón no se presenta registro de datos para el FH. Del tercer mes en adelante el sistema estuvo operando con el tren de tratamiento completo; es decir conexión en serie de fosa séptica, FV y FH, donde la depuración alcanzo un 82% en promedio a la salida del FH y para el periodo completo de los siete meses fue del 86% en promedio también a la salida del FH como se muestra en la tabla 4. De estos valores promedios se puede destacar que el porcentaje en la depuración fue incrementando, lo cual se puede traducir en eficiencia en la depuración del sistema.

Presentando los porcentajes anteriores en valores de concentración de la DBO, se puede analizar lo siguiente:

Se observa en la tabla 4 que los valores para el mes 3, es de 30 mg/L y para el mes 5 y 7, son de 13 y 24 mg/L, respectivamente. La tabla 5 muestra los valores máximos permisibles de acuerdo a la NOM -003-SEMARNAT-1997 para los tipos de reúso, estos valores son de 30 mg/L para contacto indirecto al público y de 20 mg/L para contacto directo al público.

Tabla 8. Límites máximos permisibles de acuerdo a Norma NOM-003-SEMARNAT- 1997

Tipo de Reúso	Promedio Mensual				
	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Huevos de Helminto (h/l)	Grasas y aceites (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	SST (mg/l)
Servicios al público con contacto directo	240	≤ 1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1000	≤ 5	15	30	30

Es importante observar que los resultados de la tabla 4 presentan porcentajes en la depuración que son mayores (92.60 y 97,65) al 86% en promedio, sin embargo, como no se aprecia en estos porcentajes una depuración gradual como se muestra en la figura 4.17, por lo tanto, se determinó en presentar los resultados como valor promedio de la depuración.

La representación en amarillo (tabla 4) para el valor que corresponde al mes de abril indica el cambio en forma considerable que mostro la concentración, la disminución respecto a los meses anteriores se debió a la limpieza de la fosa séptica como parte del programa de mantenimiento que lleva a cabo la universidad. Es importante mencionar que la disminución se vio reflejada en los resultados de la depuración por los humedales.

La falta de datos para el mes de julio, se debió al periodo de vacaciones de verano que se presentó en la universidad durante el estudio.

En la figura 4.17 se observa que las concentraciones para la DBO en los puntos de análisis (fosa séptica, filtros vertical y horizontal) presentan un comportamiento en forma similar en los valores mensuales para el periodo evaluado, es decir, conforme aumenta o disminuye la gráfica que representa a la fosa séptica (línea azul) similarmente se comportan las gráficas que representan a los filtros.

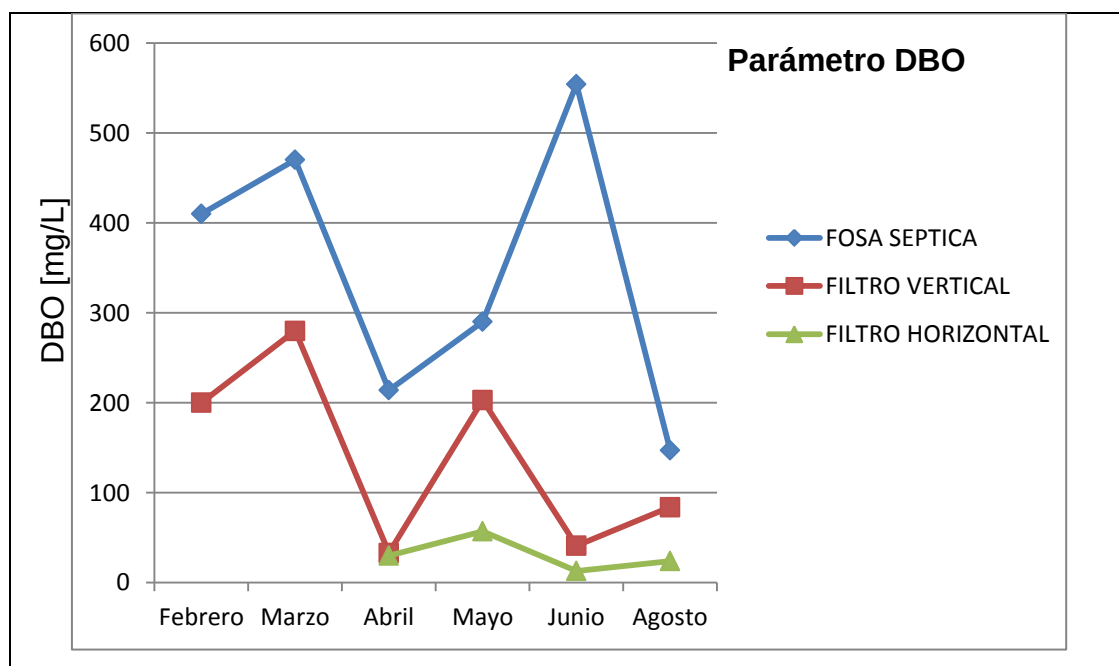


Figura 4.17 Representación gráfica del comportamiento de la DBO en los puntos y periodo evaluados.

Para los parámetros de Solidos Suspendidos Totales (SST), Grasas y Aceites (GA) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DQO) el comportamiento en las gráficas se presenta similar a la DBO.

La SST presento remoción de 72.9% en promedio, que se puede observar en la gráfica 4.18 además muestra que los porcentajes de remoción fueron en aumento, para las GA presentaron un 55% de remoción, no tan favorable que los anteriores (ver figura 4.19).

Es importante resaltar que los SST y las GA presentan concentraciones en valores promedio menores a los 30 mg/L y 15 mg/L, respectivamente.

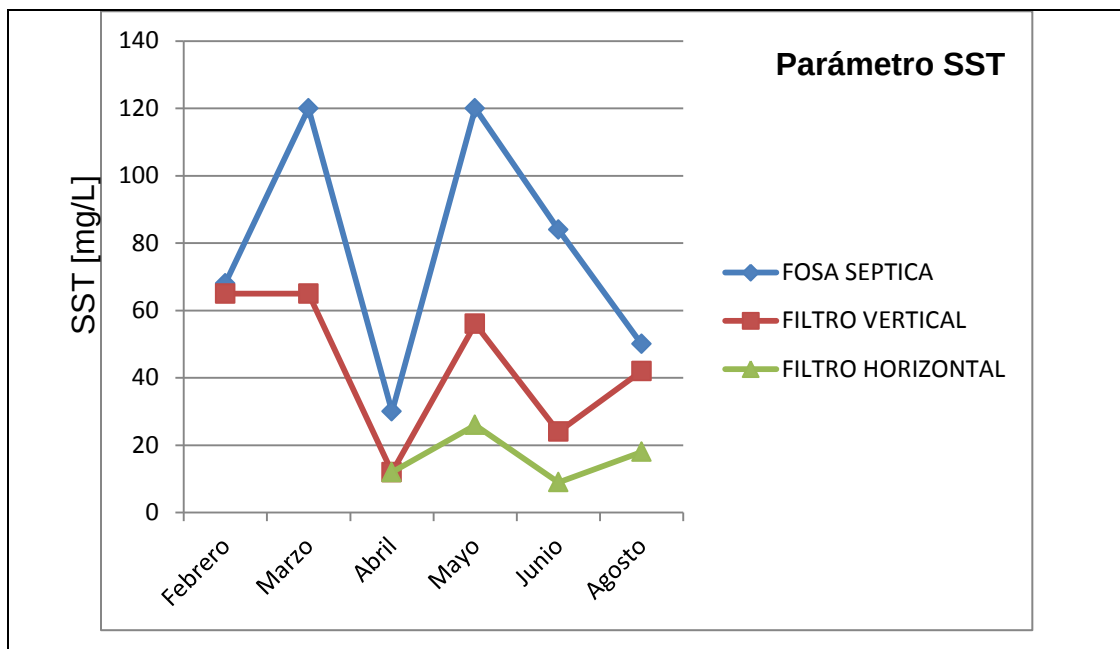


Figura 4.18 Representación gráfica del comportamiento de los SST en los puntos y periodo evaluados.

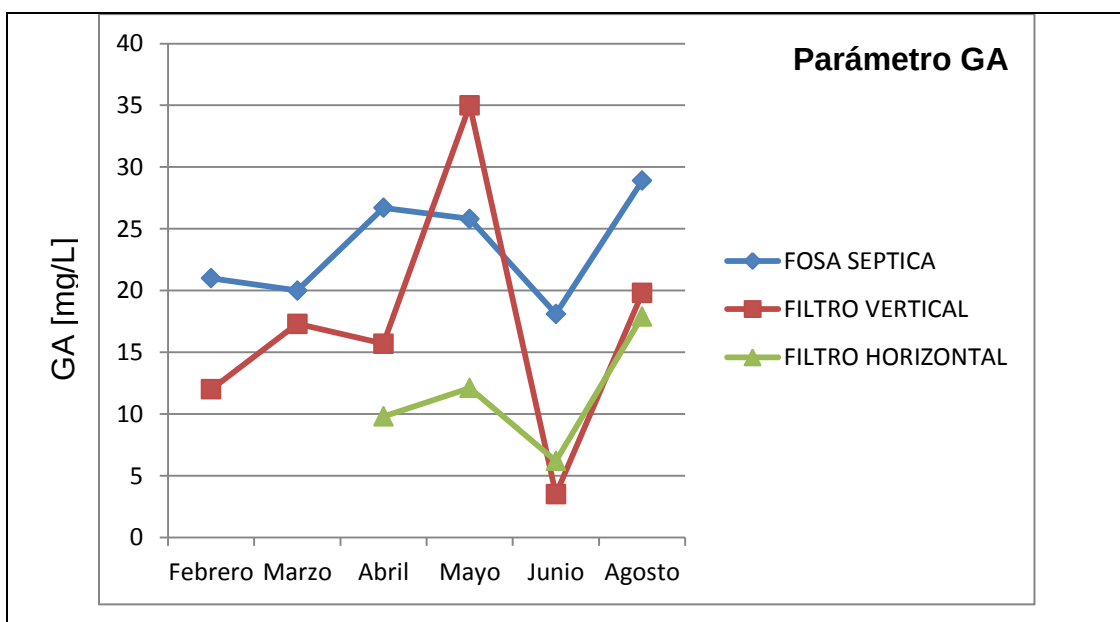


Figura 4.19 Representación gráfica del comportamiento para las GA en los puntos y periodo evaluados.

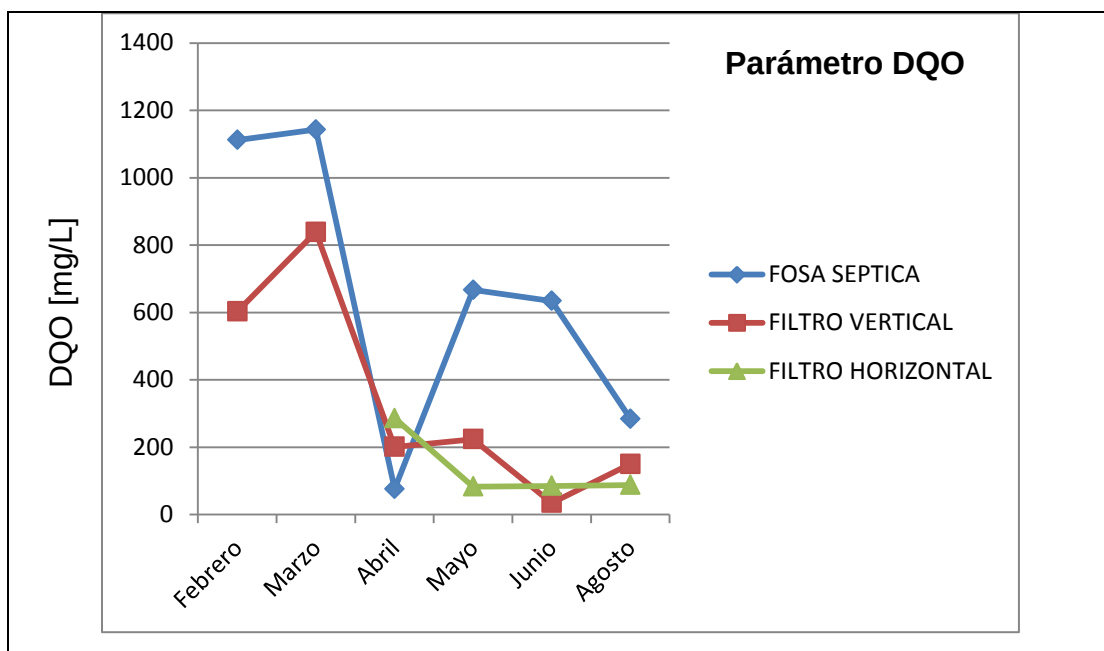


Figura 4.20 Representación gráfica del comportamiento de la DQO en los puntos y periodo evaluados.

Con esta presentación en los resultados para la DBO, SST y GA, permite establecer el cumplimiento en estos parámetros con la norma NOM-003-SMARNAT-1997 (ver tabla 8) referente a los límites máximos permisibles.

Cabe mencionar que aunque no lo establece la NOM-003-SEMARNAT-1997, en el estudio se incluyeron análisis de la Demanda Química de Oxígeno con resultados promedio de remoción 89% y se puede observar en la figura 4.20 un comportamiento similar de remoción a los demás parámetros.

Los resultados obtenidos por trabajos similares al de este estudio, han presentado remoción hasta un 91% para el parámetro de la DBO, 98% para SST y 89% para DQO (Vymazal, 2005) y utilizaron sistemas de humedales híbridos compuesto con filtro vertical y horizontal conectados en serie al igual que nuestro trabajo. En base a esto se puede determinar que nuestro sistema fue sido eficiente.

Los parámetros de coliformes fecales y huevos de helminto no se analizaron por falta de recursos.

4.6 Balance Hídrico

En este apartado se presenta el balance hídrico que se obtuvo con el modelo hidrológico HIDROBAS, donde determina las variables de ETP, ETR y en conjunto con los datos de precipitación realiza el balance.

4.6.1 Datos meteorológicos

La Tabla 6 y 7 muestran los datos de las series de precipitación mensual y anual así como los de temperatura media mensual y media anual utilizados para determinar las ETP y ETR,

Tabla 9 Datos de Precipitación mensual y anual (en mm)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1991	24.2	31.1	132.4	1.6	0	0	24.5	1	0.4	14.9	16.7	36.1	282.9
1992	45.2	70.2	89.1	8.5	1.6	0.1	0.2	4.4	0	11.9	3	65	299.2
1993	131.6	63	29.5	0.1	0.6	4.5	0.4	0	0	1.1	14.1	8.4	253.3
1994	18.1	65.6	76.6	26	0.5	0	0	2	0	0.6	16.8	21.2	227.4
1995	139.9	33.2	101.7	28.8	17.7	3.9	1.3	0	0	0	2.8	11.6	340.9
1996	31.8	29.4	19.2	3.4	0	0	0.1	0	0.1	13.4	26.7	11.8	135.9
1997	69.8	7.6	0.3	4.6	0.3	3.6	0.1	0	19.4	1.8	24.9	95.8	228.2
1998	30.9	220.5	70.4	34.4	18.7	0	0.2	3	2.8	15.8	25.2	9.2	431.1
1999	34.8	16.6	21.7	49.2	0.2	5.8	0	0	9.1	0	0	9.7	147.1
2000	4.2	65	21.9	7.9	0.3	3	0	1.2	0	11.9	3.9	2	121.3
2001	73.7	73.8	22.3	28.8	0	0	0	0	0	0	14	16.5	229.1
2002	15	2.5	18.8	14.1	0	0	0	0	13.4	1.6	26.2	39.6	131.2
2003	0	117	34.4	33.1	10.7	0	3.3	0	0	0	11.8	16.4	226.7
2004	11.3	89.9	13.7	25.8	0	0	0	0	0	130.5	19.2	65.5	355.9
2005	83.9	90.3	19.7	7.4	0.2	0	0	0	2	10.5	0.7	2.9	217.6
2006	4.2	24.8	61.1	22.5	14.1	0	1.2	0	0	0	6.5	13.7	148.1
2007	27.9	41.9	6.3	8.8	0.1	0	0	0	13.6	1	18.3	26.5	144.4
2008	58.8	29.6	7.5	0.7	2.5	0	0	8.8	0	0.8	57.9	112.7	279.3

Tabla 10 Datos de Temperatura media mensual y anual (en mm)

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Media Anua
1991	16.2	14.1	9.4	9.1	10.2	8.1	9.9	10.4	12.3	14.5	17.9	17.2	12.5
1992	15	14	8.9	10	11	9.9	13	14.1	14.9	17.5	20.1	17.4	13.8
1993	15	11.1	9.2	9.6	9.7	9.8	11.4	13.4	14.8	15.7	16.2	16	12.7
1994	14.1	9.1	9.3	9.7	8.4	10.2	10.2	11.3	15.1	15.2	19.2	17.5	12.4
1995	14.3	12.6	9.9	9.9	12.7	10.3	10.7	11.9	14.1	17	18.3	18.2	13.3
1996	14.7	13.1	11.4	10.1	11.2	11	12.9	14.5	15.4	18.9	19.4	17.9	14.2
1997	16.9	13	9.8	10.6	9.7	11.4	11.6	15.7	15.7	16.9	19.6	20.6	14.3
1998	14	10.6	8.4	9.4	9.2	10.9	9.9	11.7	13.7	17.8	20.5	17.6	12.8
1999	17.5	12.3	11.1	10	8.4	8.1	9.9	11.6	12.6	16.6	15.9	15.9	12.5
2000	13.8	9.9	10.9	10.3	10.4	9.4	11.4	13.6	15.5	15.8	18.4	17.4	13.1
2001	15	11.8	8.1	8.5	8.4	10	9.7	14	14.9	15.7	17	16.4	12.5
2002	13	13.9	8.1	8.7	10.2	8.9	10.6	11.7	13.1	15.9	15.9	18	12.3
2003	17	10.3	9	11.7	10	9.5	9.1	12.1	13.8	16.9	18.8	16.3	12.9
2004	13.5	9	10.3	8.5	7.8	11.7	11.5	13.7	13.6	16.1	15.9	17.8	12.5
2005	13.5	13.1	10.1	10.1	9.5	9.3	9.8	12.5	13.4	15.7	17.3	14.7	12.4
2006	13.8	12.3	9.8	9.3	9.3	6.9	9.6	12.6	16.6	20.2	16.9	16.8	12.8
2007	16.3	13.1	7.5	9.5	10.8	11.2	11.9	13.8	14.2	17.7	19.4	17.9	13.6
2008	16.4	13.4	8.7	8.6	7.8	9	11.1	12.5	14.2	17.9	16.4	16.9	12.7

4.6.2 Capacidad de campo-Hipótesis de Reserva de Agua

El rango del valor de reserva de agua en el suelo que se obtuvo esta entre 40 y 60 mm, determinados a partir del método descrito por Fuentes y García (1999). Para aplicar esta metodología fue necesario obtener las características de composición de la textura y la profundidad del suelo; en este último se complementó con observaciones realizadas en campo. Para la estimación de la reserva de agua se consideraron los siguientes valores promedio: espesor medio del suelo de 60 cm, capacidad de campo de 18.6%, punto de marchitamiento de 8% y densidad del suelo de 1.30 gr/cm³.

4.6.3 Años Tipo (secos, medios y húmedos)

El registro de los datos de precipitación media anual obtenida de la estación El Carrizo-Tecate para el periodo de 1991 a 2008 se muestran en la figura 4.18, Se observa valores de precipitación anuales bajos casi en la mitad del periodo (1991-2008) y además muy variantes, de esto se puede entender el reflejo en los valores bajos de los años húmedos y secos (15% por arriba y debajo de la media). A partir de esta variación se puede justificar la necesidad de caracterizar los años “tipo” secos, medios y húmedos y la importancia de determinar estos límites con el modelo.

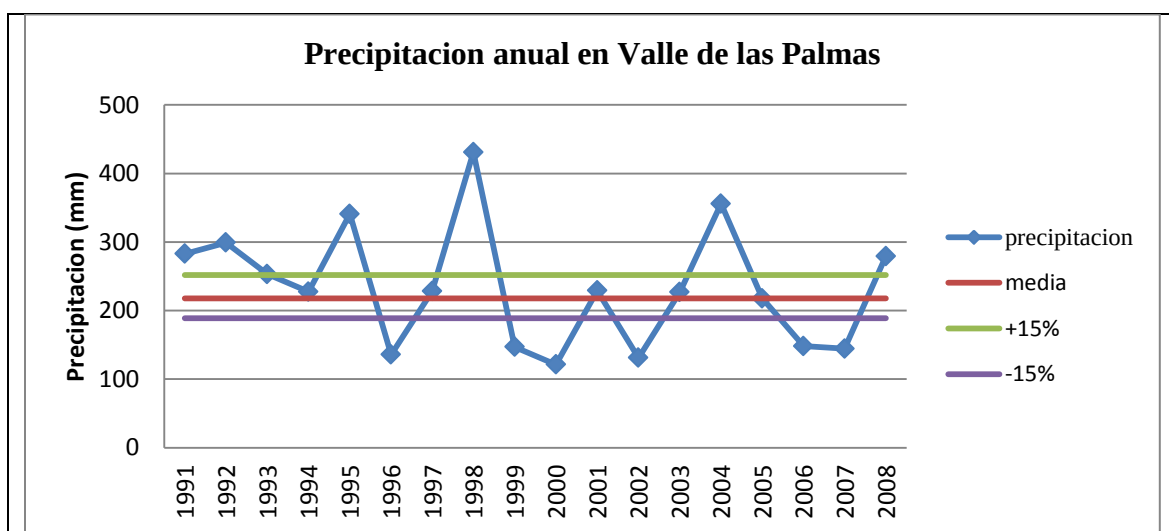


Figura 4.21 Precipitación anual en la estación el Carrizo-Tecate

4.6.4 Evapotranspiración Potencial (ETP), Evapotranspiración Real (ETR) y Balance Hídrico (BH)

En la Tabla 6 se muestran los valores para la ETP, ETR y BH, puede observarse resultados que representan únicamente el valor de 40 mm en hipótesis de reserva, por la razón los resultados de las dos hipótesis de reserva 40 y 60 mm fueron similares y la determinación de discutir el valor más pequeño (40 mm) es porque esta hipótesis representa menor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, los que nos lleva a obtener mayor escurrimiento superficial hacia el sistema. A continuación se muestra la interpretación de los resultados de años tipo a partir de las variables hidrológicas.

Tabla 11 Balance mensual para los años “TIPO” (en mm)

Hipótesis de reserva= 40													
Año seco	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
Precipitación	4.65	13.60	17.22	19.65	30.03	24.83	17.65	2.45	1.47	0.22	0.20	6.03	138.00
ETP	66.30	49.00	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	66.20	71.60	91.20	105.30	77.00	706.90
ETR	4.65	13.60	17.22	19.65	30.03	24.83	17.65	2.45	1.47	0.22	0.20	6.03	138.00
Reserva	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exc. o Def.	-61.65	-35.40	-10.18	-10.95	-3.77	-10.07	-35.95	-63.75	-70.13	-90.98	-105.10	-70.97	
Año medio													
Precipitación	11.99	16.04	31.37	44.74	59.56	41.48	16.98	3.75	1.16	1.74	1.13	3.38	233.31
ETP	66.30	49.00	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	66.20	71.60	91.20	105.30	77.00	706.90
ETR	11.99	16.04	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	7.13	1.16	1.74	1.13	3.38	222.87
Reserva	0.00	0.00	3.97	18.11	40.00	40.00	3.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exc. o Def.	-54.31	-32.96	0.00	0.00	3.86	6.58	0.00	-59.07	-70.44	-89.46	-104.17	-73.62	
Año húmedo													
Precipitación	25.00	19.84	44.07	63.13	76.79	63.47	14.27	5.87	1.21	3.80	2.46	0.46	320.37
ETP	66.30	49.00	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	66.20	71.60	91.20	105.30	77.00	706.90
ETR	25.00	19.84	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	6.54	1.21	3.80	2.46	0.46	239.61
Reserva	0.00	0.00	16.67	40.00	40.00	40.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exc. o Def.	-41.30	-29.16	0.00	9.20	42.99	28.57	0.00	-59.66	-70.39	-87.40	-102.84	-76.54	

Durante los años secos, el balance presentó para las dos hipótesis de reserva los mismos resultados; es decir, existe un déficit de agua igual durante todo el periodo de análisis, lo que nos permite determinar que en ningún momento habrá volumen disponible para el humedal.

Para los años medios; sucede algo similar que los años secos; se puede observar que en los meses de mayor precipitación (enero, febrero y marzo) llega a presentarse ligeramente un excedente de agua, sin embargo esto sucede para los resultados de la hipótesis de reserva que se discute (de 40 mm). Aun con el excedente, muestran una pequeña diferencia del 4.7% entre los volúmenes totales de precipitación y de ETR, repartidos en un 37% en el mes de febrero y 63% en el mes de marzo, en este año tipo no existe consideración de volumen disponible porque la ETR en los meses de excedencia es máxima y toma los valores de ETP y durante los meses de déficit (que son el 83% de los meses del año) los valores de ETP son altos, lo que significa que la ETP es predominante.

En los años húmedos, los excedentes corresponden a los meses de mayor precipitación como en los años medios, sin embargo, en este año tipo incremento 20.0 % la diferencia entre los valores anuales de precipitación y ETR respecto a los años medios, esta diferencia de volumen es del 25% la cual está distribuida en 11.3% en enero, 52.9% en febrero y 35.8% en marzo. Sin embargo, considerando los resultados de la tabla 6 y los análisis presentados para los años medios, donde la ETR es máxima al momento que toma los valores de ETP durante los meses de excedencia y para los meses de déficit la ETP presenta volúmenes altos, se descarta la posibilidad de que exista volumen de agua disponible como aportación al humedal, es decir, los valores de precipitación que comprenden el periodo utilizado en este trabajo, muestran una igualdad en la mayoría de los meses con respecto a los valores de ETR pero muy por debajo que los valores de ETP, con esto se determina que, toda el agua que entra a la microcuenca se pierde por el proceso hidrológico de evapotranspiración.

CAPITULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

Esta investigación permitió la implementación de un sistema de tratamiento de agua residual de alta eficiencia y bajo costo en operación y mantenimiento, como caso de estudio de una Universidad que tiene la finalidad de promover una educación ambiental y que el agua tratada sea reutilizada en riego de áreas verdes. A continuación se enumeran las etapas que concluyen este estudio:

1. Área de Estudio

Es una región semiárida con temperaturas hasta 35°C en verano y de 5 °C en invierno con presencia de lluvias con características de clima mediterráneo.

2. Diseño de humedales construidos

Sistema de humedales construidos con superficie total de 34.86 m² de tipo flujo subsuperficial compuesto con filtro vertical y horizontal y áreas superficiales de 15.66 m² y 19.20 m², respectivamente, plantado con tule, carrizo y como planta ornamental el alcatraz, diseñado principalmente para la remoción de la DBO, con tiempo de residencia hidráulico de 2.14 días y un caudal de 4.59 m³/día en capacidad de tratamiento.

3. Construcción de humedales

Construcción de humedales en un terreno con características de un suelo arenoso con baja a moderada permeabilidad que determino una compactación en el fondo de los filtros de tres capas de 10 cm de espesor cada una y recubrimiento con membrana de plástico para evitar la infiltración y pendiente del fondo de 1%; compuestos con sustratos de arena gruesa y grava; con instalaciones de alimentación y descarga de fluidos con diámetros de 5 cm y 10 cm, respectivamente con material de PVC tipo ABS; la plantación es una retícula de 50 cm de separación entre plantas, los registros para protección de válvulas de control hidráulico y registro sedimentador de sólidos son de material durable y

protección de bordos y taludes con malla electrosoldada y cubierta con mortero para evitar erosión.

4. Operación y mantenimiento

La operación del sistema se desarrolló satisfactoriamente durante el proceso de la investigación. Las condiciones de flujo fueron ideales con algunos ajustes en la red de alimentación; para mejorar la distribución del fluido y una reparación de fuga por el rompimiento de membrana impermeable. Parte importante fue, el mantenimiento de los humedales dentro y alrededor de ellos con el retiro de plantas silvestres y arbustos.

5. Eficiencia de los humedales construidos

Para la evaluación de la eficiencia en el sistema intervienen todas las etapas que formaron parte de este estudio y que fueron descritas con anterioridad, para el tipo de humedales considerados en el diseño, la ejecución precisa de los procesos de construcción así como los ajustes y mantenimiento para la óptima operación. La eficiencia se representó en la capacidad de remoción en los parámetros de DBO, SST y GA. El sistema obtuvo una eficiencia en la remoción con resultados promedios de 86% (31 mg/L), 72.9% (16 mg/L) y 35.3% (11.5 mg/L) para DBO, SST y GA, respectivamente. Se cumplió con la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 en los parámetros de DBO, SST y GA, pero los parámetros de Coliformes Fecales y Huevos de Helminto no fueron analizados.

6. Balance hídrico

La estimación del balance hídrico es una componente primaria para el desarrollo de sistemas de humedales artificiales que influye en su permanencia y ecología. El balance determinó déficit en los escurrimientos superficiales en la mayor parte del año, por lo que no representa aportación de agua adicional al sistema, solo el caudal de diseño para tratamiento. Se concluye que para el diseño e implementación de humedales construidos en regiones semiáridas similares a la

de este estudio quedan definidos únicamente por la aportación de las aguas residuales que se suministre al sistema para su depuración y contar con este fluido durante su vida útil, sobre todo en los meses de mayor déficit, a fin de mantener el hábitat que en él se genera y que forme parte del ecosistema natural

Recomendaciones

Esta tecnología es viable para zonas o regiones características similares a la de este estudio. Sin embargo es importante considerar las siguientes recomendaciones:

1. Transferir esta tecnología a comunidades rurales con las mismas condiciones climáticas con la finalidad de que cuenten con servicios de saneamiento.
2. La selección del lugar para la construcción debe cumplir con pendientes de terreno adecuada ya que estos sistemas funcionan por gravedad.
3. Construir una laguna después del tren tratamiento del sistema de humedales donde se almacene el agua tratada y reciba un tratamiento terciario con el aprovechamiento de la luz solar y disminuir la concentración de coliformes fecales y huevos de helminto.

Bibliografía

- Alvarez, J.A., Ruiz, I., Soto, M. (2008). Anaerobic digesters as a pretreatment for constructed wetlands. *Ecological engineering*, 33, 54-67.
- Ambast, S., Keshari A. and Gosain, A. (2008). Estimating Regional Evapotranspiration using Remote Sensing: Application to Sone Low Level Canal System, India. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(1).
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrologia de Superficie*. Mexico: Limusa.
- Arias, C. (2009). *Humedales construidos consideraciones generales de diseño*. Universidad AARHUS e Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua.
- Arias, C.A., Brix, H. (2003). *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. Rev. Ciencia e Ingenieria Neogranadina, 13, 17-24.
- ASTM Standards. (2012). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. In *Annual Book of ASTM Standards-Soil and Rocks* (p. Volume 04.08). ASTM International.
- Ayaz, S.Ç., Aktaş, Ö., Fındık, N., Akça, L., Kinacı, C. (2012). Effect of recirculation on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system. *Ecological Engineering* 40, 1– 5.
- Barclay, W., Huddleston, S., Boudreau, C. and O'Reilly, A. (2008). Sensitivity of wetland saturated hydraulic heads and water budgets to evapotranspiration wetlands. *The Society of Wetlands Scientist*, 28,(4), 1040-1047.
- Bowles, J. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingenieria Civil* (ISBN 968-451-046-2 ed.). McGraw-Hill de Mexico, S.A. de C.V.
- Cantellano R., E., Ramirez H., E., Blancas A., G., Ramirez M., N., Artega M., M. y Belmont, M. (2008). *Sistema para el tratamiento y reuso florícola y piscícola de aguas residuales en el Valle de Mezquital, Hidalgo, Mexico. Memorias del Segundo Congreso Internaiconal de casos exitosos*. Educacion para el desarrollo de sociedades sustentables. Veracruz, Ver.,Mexico.
- Centro de Estudios del Reuso y Calidad del Agua. (CERCA, 2014). *de la Comision Estatal de Servicios Publicos de Tijuana. Organismo operador de agua potable y saneamiento*.

- Chung, A.K.C., Wu, Y., Tam, N.F.Y., Wong, M.H.,. (2008). Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater. *ecological engineering* 32, 81–89.
- Comín, F.A., Romero, J.A., V. Astorga & C. García. (1997). Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff. . *Water Science Technology* 35(5), 255-261.
- Comisión nacional del Agua, CONAGUA . (2007). Programa Nacional Hídrico 2007-2012. www.conagua.goc.mx.
- Comisión nacional del Agua, CONAGUA. (2011). “Situación del sector agua potable, alcantarillado y saneamiento” en tratamiento de aguas residuales. *Comisión Nacional de Agua, México.*, 52-53.
- Comision Nacional del Agua-Gerencia Organismo de Cuenca Peninsula de Baja California. (2013. <http://www.conagua.gob.mx/>). CONAGUA.
- Crites, R.W., Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para nucleos pequeños y descentralizados*. Mc Graw-Hill. 1082 pp.
- Custodio, M. y LLamas, E. (1983). *Hidrología Subterránea, Tomo I* (Vol. Tomo I). Barcelona: Omega.
- Dugan, P. J. (1992). conservación de humedales un analisis de temas de actualidad y acciones necesarias. *UICN, Gland Suiza*, 110 pp, ISBN: 2-8317-0118-X.
- Economopoulou M.A. y Tsihrintzis V.A. (2004). *Design Methodology of Free Water Surface Constructed Wetlands*. Springer. Water Resources Management, Volume 18. pp 541-565.
- Eiji E., Wilberg D., Pellikka P. (2011). Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenia. *Applied Geography*, 31, 251-258.
- EPA. (1988). Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. EPA/625/1-88/022.
- EPA. (Septiembre de 2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, humedales de flujo libre superficial. *Obtenido de*

http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2003_07_10_mtb_cs_00_024.pdf.

- Fuentes J. y Garcia G. (1999). *Tecnicas de Riego-Sistemas de Riego en la Agricultura*. Mexico y Espana: Mundi-Prensa Mexico, S.A de C.V.
- Gaeta-Lara, A. (2006). Productividad de la vid en función del aprovechamiento del agua subterránea en el Valle de Guadalupe 1994-2004. , . *Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, México*, 61.
- Gilman, K. (1994). *Hydrology and wetland conservation*, Chichester. *Wiley*.
- Glenn, E., Mexicano, L., Garcia-Hernandez, J., Naglerc, P., Gomez, M., Tanga, D., Lomeli, M., Ramirez, J. y Zamora, F. (2013). Evapotranspiration and water balance of an anthropogenic coastal desert wetland: Responses to fire, inflows and salinities. *Ecological Engineering, Article in Press*.
- Hallack-Alegria, M., Ramirez-Hernandez, J. and Watkins Jr, D.W. (2011). ENSO-conditioned rainfall drought frequency analysis in northwest Baja California, Mexico. *Royal Meteorological Society, International Journal of Climatology*.
- Hidrobas v 3.0 win, J. Alonso, J. Arjona, A. Ballester, F. Elorza, M. Gomez, R. Hernandez, M. Hervas, A. Iglesias, T. Iglesias, J. Lopez, J.A. Lopez, A. de Mera, J. Ortiz. (2000). Hidrobas v 3.0 win. *Instituto Geologico y Minero de Espana y Universidad Politecnica de Madrid*.
- Hoffman H., Winker M., Platzer C. y Von Muench E. (2011). *Technology review of constructed wetlands. Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Sustainable Sanitation-ecosan program. 36 pp.
- Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua. (IMTA, 2013).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI, 2010). *Principales Resultados del Censo de Poblacion y Vivienda, Baja California*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI, 2014). *Mapas Digitales*. www.inegi.org.mx.

- Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuaria. (INTA, 2012). *Plantas acuaticas extraen metal del agua. Recuperado de <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=13936>*.
- Jianbo, L., Zhihui, F., Zhaozheng, Y. (2008). Performance of a water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) system in the treatment of wastewater from a duck farm and the effects of using water hyacinth as duck feed, . *Journal of Environmental Sciences* 20, 513–519.
- Kadlec R.H. y Wallace S.D. (2009). *Treatment Wetlands, second ed.* Taylor and Francis Group, Boca Raton, USA ISBN 978-1-56670-526-4.
- Kadlec, R.H. y Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Kayombo S., Mbvette T.S.A., Katima J.H.Y, Ladegaard N. y Jørgensen S.E. (2005). *Waste Stabilization Ponds and Constructed Wetlands Design Manual*. University of Dar es Salaam y Danish University of Pharmaceutical Sciences.
- Knight, R. L., Kadlec, R. H. y Ohlendorf, H.M. (1999). the Use of Treatment Wetlands for Petroleum Industry Effluents. *Environmental science & technology*, 33 (7), 973-980.
- Lakatos, M., Czudar, A. y Szlavik, L. (2011). Forecast of changes concerning the Water Budget in a Wetland of Danube Floodplain. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 5, 523-532.
- Lot, A., Novelo, R.A., Olvera, G.M. y Ramirez-Garcia, P. (1999). *Catalogo de angiospermas acuaticas de Mexico: Hidrofitas estrictas emergentes, sumergidas y flotantes. Cuadernos del Instituto de Biologia* 33. Mexico, D.F., 200 pp.: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- McCartney M., Morardet S., Rebelo L. M., Finlayson C.M. y Masiyandima M. (2011). A study of wetland hydrology and ecosystem service provision: GaMampa wetland, South Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 56(8).
- McCartney, M.P. y Acreman, M.C. (2009). Wetlands and water resources. In: E. Maltby and T. Barker, editors. *Tha Wetlands handbook*. Oxford, Wiley-Blackwell, 357-381.

- Merlin, G., Jean-Luc Pajean y Thierry Lissolo. (2002). *Performances of constructed wetlands for municipal wastewater treatment in rural mountainous area*. *Hydrobiologia* 469, 87-98.
- Mitsch W.J. y Gosselink J.G. (editors 1993). *Wetlands*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Molles Jr, M.C., Dahm C.N. y Crocker M.T. . (1992). Climatic variability and streams and rivers in semi-arid regions: implications for resource management. Saskatoon: NHRI Symposium series. *Environment Canada*, 197–202.
- Morari F. y Giardini, L. (2009). Municipal wastewater treatment with vertical flow constructed wetlands for irrigation reuse. *Ecological Engineering* 35, 643–653.
- Nivala, J., Knowles, P., Dotro, G., García, J. y Wallace, S. (2012). Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Measurement, modeling and management. *Water research*, 46, 1625-1640.
- O'Connell Jessica L., Johnson Lacreia A., Smith Loren M., McMurry Scott T., Haukos David A. (2012). Influence of land-use and conservation programs on wetland plant communities of the semiarid United States Great Plains. *Biological Conservation*, 146, 108–115.
- OIA. (2001). *Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales adaptadas a las pequeñas y medias colectividades*. Obtenido de http://www.pedz.uni-mannheim.de/daten/edz-bn/gdu/02/waterguide_es.pdf.
- Pineda, N. (2002). La política urbana del agua potable en México. Del centralismo y subsidios a la municipalización, la autosuficiencia y la privatización. . *Regio y Sociedad*, , 14(24), 41-69.
- Ramos, L.J. y Novelo, R.A. (1993). Vegetación y flora acuáticas de la laguna de Yuriria, Guanajuato, Mexico.
- Ramos-Espinosa, M. G., Rodríguez-Sánchez, L. M. y Martínez-Cruz, P. (2007). Uso de macrofitas acuáticas en el tratamiento de aguas para el cultivo de maíz y sorgo. *Hidrobiológica* 17 (1 Suplemento), 7-15.

- Ramsar, Secretaria de la convencion. (2013). Manual de la Conservacion de Ramsar: Guia a la Convencion sobre Humedales (Sexta edicion) de Gland, Suiza. *Secretaria de la Convencion de Humedales. Obtenido de convencion de ramsar sitio web: www.ramsar.org.*
- Rivas, H.A. (1995). *Tratamiento de aguas residuales mediante humedales*. Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua (IMTA) y Semarnat.
- Rodriguez-Monroy J. y Duran de Bazua C. (2006). Remocion de Nitrogeno en un sistema de Tratamiento de Aguas Residuales usando humedales artificiales de flujo vertical escala de banco. *Tecnol. Ciencia y Ed. (IMIQ)*, 21(1), 25-33.
- Romero-Aguilar, M., Colin-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E. y Ortiz-Hernández, M.L. . (2009). Tratamiento de Aguas Residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Ambiental*, 25(3), 15.
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (SEMARNAT, 1997). *Leyes y Normas en materia de Aguas Residuales. NOM-003-SEMARNAT-1997. Limites maximos permisibles*.
- Tee H.C., Seng C.E., Noor A. Md. y Lim P.E. (2009). Performance comparison of constructed wetlands with gravel- and rice husk-based media for phenol and nitrogen removal. *Science of the Total Environment* 407, 3563–3571.
- Urquiza Marín E., Guzmán Rodríguez R., Sánchez Quispe S.T., Domínguez Sánchez C., Rivas H. A. . (2006). Los humedales artificiales; una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales en Michoacan, Mexico. *2do Foro Academico Nacional de Ingenierias y Arquitectura*, Morelia, Michoacán, México.
- Urquiza, E., Domínguez, C., Guzmán, R. y Ángel, J.L. (2005). Instalación de un humedal experimental para el tratamiento de las aguas residuales de la Comunidad de Cucuchucho, Mpio. de Tzintzuntzan, Michoacán. *1° Foro Académico de la DES de Ingenierias y Arquitectura de la Universidad Michoacana*, de san Nicolas de Hidalgo Morelia, Michoacan, Mexico.
- Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological engineering*, 25(5), 478-490.

- Vymazal, J. (2009). the use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological engineering*, 35(1), 1-17.
- Vymazal, J. y Kröpfelová L. (2008). *Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal subsurface flow* (Environmental Pollution, ISBN: 978-1-4020-8579-6 ed., Vol. 14). Springer.
- Vymazal, J., Greenway, M., Tonderski, K., Brix H. y Mander, Ü. (2006). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Wetlands and Natural Resource Management, Ecological Studies, 2006, Volume 190, Section II*, 69-96.
- Wu, S., Austin, D., Liu, L. y Dong, R. (2011). Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas. *Ecological Engineering* 37, 948–954.
- Yalcuk & Ugurlu. (2009). Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource Technology*, 100, 2521-2526.
- Ye, F. y Li, Y. (2009). Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities. *Ecological Engineering* 35, 1043–1050.
- Yunhao, C., Xiaobing, L., Jing, L., Peijun, S. y Wen ,D. (2005). Estimation of daily evapotranspiration using a two-layer remote sensing model. *International Journal of Remote Sensing*, 1755-1762.
- Zhao, Y., Liu, B., Zhang, W., Hu, C. y An, S. (2010). Effects of plant and influent C:N:P ratio on microbial diversity in pilot-scale constructed wetlands. *Ecological Engineering* 36, 441–449.
- Zurita, F., De Anda, J. y Belmont, M.A. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35, 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. *Rev. Méx. de Ciencias Agrícolas, Pub. Esp. Num.1*, 139-150.

Anexo 1

Tabla 12 Balance mensual para los años “TIPO” (en mm)

Hipótesis de reserva= 60

Hipótesis de reserva= 60													
Año seco	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
Precipitación	4.65	13.60	17.22	19.65	30.03	24.83	17.65	2.45	1.47	0.22	0.20	6.03	138.00
ETP	66.30	49.00	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	66.20	71.60	91.20	105.30	77.00	706.90
ETR	4.65	13.60	17.22	19.65	30.03	24.83	17.65	2.45	1.47	0.22	0.20	6.03	138.00
Reserva	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exc. o Def.	-61.65	-35.40	-10.18	-10.95	-3.77	-10.07	-35.95	-63.75	-70.13	-90.98	-105.10	-70.97	
Año medio													
Precipitación	11.99	16.04	31.37	44.74	59.56	41.48	16.98	3.75	1.16	1.74	1.13	3.38	233.31
ETP	66.30	49.00	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	66.20	71.60	91.20	105.30	77.00	706.90
ETR	11.99	16.04	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	17.57	1.16	1.74	1.13	3.38	233.31
Reserva	0.00	0.00	3.97	18.11	43.86	50.44	13.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exc. o Def.	-54.31	-32.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-48.63	-70.44	-89.46	-104.17	-73.62	
Año húmedo													
Precipitación	25.00	19.84	44.07	63.13	76.79	63.47	14.27	5.87	1.21	3.80	2.46	0.46	320.37
ETP	66.30	49.00	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	66.20	71.60	91.20	105.30	77.00	706.90
ETR	25.00	19.84	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	26.54	1.21	3.80	2.46	0.46	259.61
Reserva	0.00	0.00	16.67	49.20	60.00	60.00	20.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exc. o Def.	-41.30	-29.16	0.00	0.00	32.19	28.57	0.00	-39.66	-70.39	-87.40	-102.84	-76.54	