



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

HUMEDAL ARTIFICIAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

PEDRO ALBERTO MONTIEL MORALES



DIRECTOR DE TESIS:

DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ

MÉXICO D.F. 2014



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/50/2014

Señor
PEDRO ALBERTO MONTIEL MORALES
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERIA CIVIL

"HUMEDAL ARTIFICIAL"

INTRODUCCIÓN

- I. TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES Y PROCESOS BIOLÓGICOS**
- II. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y SELECCIÓN**
- III. DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL**
- IV. OPERACIÓN Y CONSERVACIÓN DEL HUMEDAL**
- V. PRESUPUESTO DE OBRA**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 21 de Marzo de 2014
EL PRESIDENTE DEL COMITÉ

M. EN I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ
JLTS/MTH

Agradecimientos

Gracias Dios por acompañarme a lo largo de mi carrera, por darme la fortaleza en momentos de debilidad y la dicha de culminar mis estudios de licenciatura.

Gracias a mis padres Ma. Guadalupe Morales y Pedro Montiel ya que detrás de éste logro está su esfuerzo, apoyo, oraciones, amor y Fe. Con mucho orgullo se que la persona que soy ahora es gracias a ustedes, los amo.

A mi hermana Diana Montiel por ser un ejemplo en mi vida, te amo.

A mi novia Pamela Torres por apoyarme en todo momento, eres una persona importante en mi vida.

A mi director de tesis gracias por la confianza y apoyo que me brindó en la realización de la misma.

Índice

Introducción.....	4
Objetivo.....	6
Alcances.....	6

Capítulo 1

Tipo de humedales artificiales y procesos biológicos.....	7
1.1 Componentes del humedal.....	8
1.2 Humedales de flujo superficial.....	13
1.3 Humedales de flujo subsuperficial.....	14

Capítulo 2

Evaluación de alternativas y selección	18
2.1 Humedales de flujo libre	18
2.2 Humedales de flujo subsuperficial	20
2.3 Ventajas y desventajas de los tipos de humedales.....	25
2.4 Selección del sistema	27

Capítulo 3

3.1 Diseño del humedal artificial	28
3.2 Cálculo y dimensionamiento.....	31
3.2. 1 Datos del diseño	36
3.3 Elementos	37
3.3.1. Materiales.....	38
3.4 Propuesta de diseño.....	44

Capítulo 4

Operación y conservación del humedal	46
--	----

Capítulo

Presupuesto de obra	47
---------------------------	----

5.1 Catálogo de conceptos	47
5.2 Generación de Precios Unitarios.....	48
5.3 Presupuesto.....	58
Referencias	59
<u>Anexos</u>	
Plano Arquitectónico.....	61
Plano de Diseño.....	62
Plano de Instalaciones.....	63

Introducción

Actualmente se dispone de una planta de tratamiento de aguas residuales en la parte posterior del edificio (Zona sur) de la División de Ingenierías Civil y Geomática, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Dicho edificio no dispone de una conexión a la red de alcantarillado, por lo que las aguas negras que se generan en sus instalaciones sanitarias se disponen de manera individual pasando primero por un tanque séptico y luego se infiltran en una grieta al subsuelo rocoso. Uno de los propósitos de la planta piloto es el saneamiento del agua residual y en paralelo tener un fin didáctico para el reforzamiento de los conocimientos impartidos por las asignaturas de ambiental.

La planta se planeó para dar tratamiento secundario a las aguas residuales empleando contactores biológicos rotatorios (CBR), un proceso biológico aerobio de biomasa adherida. La etapa de construcción duró aproximadamente tres meses. La estabilización del sistema duró aproximadamente 4 semanas y la operación se dividió en dos períodos: escolar y vacacional, de acuerdo al calendario UNAM. En cuanto al primer período escolar, donde no operó el sedimentador secundario, se obtuvieron remociones promedio de materia orgánica como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 61%, demanda química de oxígeno (DQO) de 39% y de sólidos suspendidos totales (SST) de 64%. El segundo período escolar monitoreado en el que se incluyó la operación del sedimentador secundario se obtuvo una remoción de materia orgánica como DBO de 59%, DQO de 67% y SST de 46%.

A continuación se describen los componentes de la planta, así como las condiciones de diseño en las que opera.

Tratamiento preliminar

- Obra de toma

La conducción del agua residual generada en el edificio se hace a través de una tubería de albañal, de concreto simple de 15cm de diámetro, mediante una derivación realizada en un registro de 80 cm x 60 cm por 140 cm de profundidad; las paredes son de ladrillo común y una tapa de concreto, en la parte inferior o en el fondo del registro se encuentra la obra de desvío para la conducción de las aguas residuales al cárcamo de bombeo.

- Cárcamo y equipo de bombeo

Es un tanque de polietileno de alta densidad con una capacidad de 600 litros. Se instaló una bomba de 1/3 hp para elevar un gasto de 100 L/min, aproximadamente. La bomba opera con sistema de electro-niveles.

- Tanque de igualación

Tanque de polietileno de alta densidad cilíndrico, con fondo cónico invertido con capacidad de 1,100 L, el fondo del tanque tiene una elevación de 80 cm sobre nivel del terreno con el objetivo de hacer que el sistema funcione por gravedad.

Tratamiento primario

- Tanque biodigestor de polietileno de alta densidad , de 1300 L con un medio de soporte de biomasa de material plástico de desecho, también conocido como PET, que tiene el propósito de proporcionar la degradación anaerobia de la materia orgánica hasta un 74% según las especificaciones de fabricación. En la planta de tratamiento la función principal del tanque es servir como sedimentador primario.

Tratamiento secundario

- Se dispone de contactores biológicos rotatorios (CBR) con un área superficial de 23 m², con una relación de 0.005 m³/m² nominal (volumen tanque/área superficial) con la primera etapa y 9ª cada una de las siguientes dos etapas. La flecha gira a 7 rpm y una velocidad periférica media de 0.86 m/s y cuenta con un motor Westinghouse de 155 Volts, 0.25 hp y monofásico.
- Sedimentador secundario; que consiste en un tanque de las mismas características que el tanque de igualación, al cual se le adoptaron tubos y accesorios de PVC de entrada y salida de agua y lodos, diseñado para eliminar aproximadamente 20% de DBO y SST.
- Cisterna de agua tratada, tanque de almacenamiento con una capacidad de 2 m³ construido a base de muros de mampostería (tabique común) y losa de concreto reforzado.

En lo que se refiere a los gastos de diseño, la DBO así como los SST del efluente de cada subsistema de la planta de tratamiento son los siguientes.

Tratamiento preliminar

Q (L/min)	DBO (mg/L)	SST (mg/L)
1.19	284	272

Tratamiento primario

Q (L/min)	DBO (mg/L)	SST (mg/L)
1.18	186	96

Tratamiento secundario

Q (L/min)	DBO (mg/L)	SST (mg/L)
1.17	24	62

De acuerdo a la información presentada la planta de tratamiento no tiene la eficiencia adecuada para la reducción de DBO y SST.

Debido a las bajas eficiencias obtenidas, se considera que puede recurrirse al empleo de un humedal artificial para mejorar la calidad del efluente del sistema CBR.

Objetivo

Planear y diseñar un sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas en un edificio de oficinas, mediante la tecnología de humedal artificial, logrando niveles de tratamiento consistentes con bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

Alcances

Lograr por medio de la tecnología de un humedal artificial niveles de saneamiento del agua residual para su infiltración.

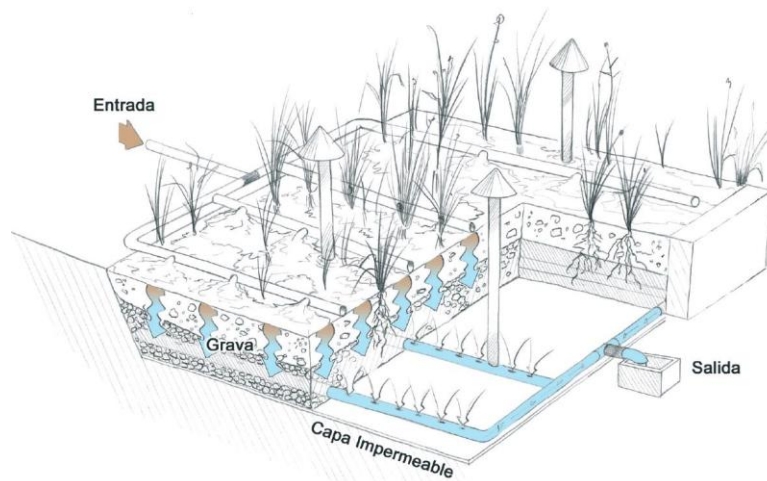
Tener una planta piloto con todos los beneficios que ésta pueda brindar y dar a los estudiantes una actividad didáctica y reforzamiento de los conocimientos adquiridos.

Capítulo 1

Tipo de humedales artificiales y procesos biológicos

Los humedales artificiales son sistemas diseñados y construidos para tratar aguas residuales, con los cuales se aumenta la eficiencia de su tratamiento mediante la optimización de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en esos ecosistemas. Mayas, Xochimilcas y Aztecas los utilizaron, inclusive a manera de islas flotantes. En Europa, los alemanes redescubrieron esta tecnología y en 1970 empezaron a estudiar este tipo de modelos, con el propósito de explorar su funcionamiento.

La mayoría de los humedales naturales son sistemas de flujo libre superficial entre los que se incluye a los fangales (principalmente con vegetación de musgos), zonas pantanosas (principalmente de vegetación arbórea), y las paredes inundadas (principalmente con vegetación herbácea y macrofitas emergentes). La observación de la mejora en la calidad del agua en humedales naturales llevó al desarrollo de humedales artificiales para tratar de reproducir en ecosistemas construidos los beneficios de calidad del agua y hábitat. Figura1-1.



Humedal artificial. Figura 1-1.

A continuación se incluyen descripciones breves de los sistemas de humedales artificiales expresadas por diversos autores:

- Sistemas preponderantemente biológicos-naturales en las cuales el filtro de materiales, las plantas de pantano y los microorganismos trabajan conjuntamente en armonía, para poder limpiar el agua residual y paralelamente filtrarla. Su componente principal es el filtro de materiales que se siembra con plantas de pantano las cuales crecen en él. Wissing & Hofmann, 2002.

- El agua residual se reparte sobre el lecho a través de una red de tuberías perforadas, se infiltran, y ya tratada es captada y enviada a un pozo de control con ayuda de una tubería de drenaje enterrada en el lecho inferior del humedal. La eficiencia del lecho filtrante en un humedal de tratamiento es afectada por el tipo de materiales que lo componen y la granulometría de estos, así como, por largos periodos sin alimentación. En los periodos sin alimentación existente, oxígeno disponible, de tal manera que el carbono y el nitrógeno puedan oxidarse. Geller & Höner, 2003.
- Para la construcción de los humedales artificiales, el suelo de la zona se remueve del sitio que ocupará el lecho, con una profundidad de entre 0.6 y 1.5 m por debajo de donde se alimenta el agua. El suelo de esta excavación se impermeabiliza con tierra, cemento, cubierta sintética (geomembrana) o asfalto para retener el agua e impedir la infiltración al subsuelo y/o a los acuíferos, al mismo tiempo que se construyen los muros de contención, que pueden hacerse con material procedente de la zona. Luna Pabello, Durán de Bazúa, Ramírez Carrillo, Fenoglio Limón, & Sánchez García 1997.

1.1 Componentes del humedal

Los humedales construidos consisten básicamente en el diseño de una cubeta que contiene agua residual, substrato y plantas emergentes. Otros componentes importantes de los humedales, como las comunidades de microbios y los invertebrados acuáticos, se desarrollan naturalmente.

El agua

Es probable que se formen humedales en donde se acumule una pequeña capa de agua sobre la superficie del terreno y donde exista una capa del substrato relativamente impermeable que prevenga la filtración del agua en el mismo. Estas condiciones pueden crearse para construir un humedal casi en cualquier parte modificando la superficie del terreno para que pueda recolectar agua y sellando la cubeta para retenerla.

La hidrología es el factor de diseño más importante porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario en su éxito o fracaso. Mientras la hidrología de un humedal construido no es muy diferente al de las aguas superficiales, si difiere en aspectos importantes, tales como:

1. Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
2. Debido al área superficial del agua y a su poca profundidad, éste sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie del agua y pérdida a través de la transpiración de las plantas respectivamente).

3. La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, primero, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces, y rizomas y, segundo, bloqueando la exposición al viento y al sol.

Substratos, sedimentos y restos de vegetación

Los substratos en los humedales construidos incluyen suelo, arena, grava, roca, y materiales orgánicos como la composta. Parte del substrato se forma con los sedimentos y restos de vegetación, los cuales se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de estos sistemas. Los elementos antes mencionados son importantes por varias razones:

1. Soportan a muchos de los organismos vivientes.
2. La permeabilidad del substrato afecta el movimiento del agua a través del suelo que lo forma.
3. Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del substrato.
4. El substrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
5. La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal, que da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos, y es una fuente de carbono, que a su vez es la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas del sistema.

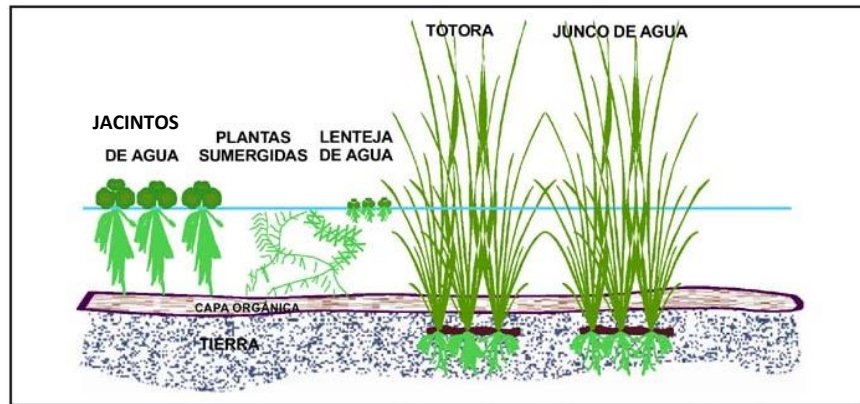
Las características físicas y químicas de los substratos del suelo se alteran cuando estos se inundan. En un substrato saturado, el agua reemplaza los gases atmosféricos por los poros contenidos y el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible; aunque se disuelve oxígeno de la atmosfera, puede darse lugar a la formación de un substrato anóxico, lo cual será importante para la remoción de contaminantes como el nitrógeno y metales.

Vegetación

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (los tallos, raíces, y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la difusión. Lo más importante en los humedales de sistema de flujo libre es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que sirven como substrato para el crecimiento de la película microbiana fija, responsable del tratamiento que ocurre. Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras. Figura 1-2.

- Estabilizan el substrato y limitan la canalización del flujo.

- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes, y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.
- Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.



Plantas acuáticas (adaptado de Tchobanoglous, G. *Aquatic plant systems for wastewater treatment*).

Plantas acuáticas más comunes. Figura 1-2.

Tabla 1. Especies emergentes mas utilizadas en depuración de aguas residuales.

Familia	Nombre latino	Nombres comunes más usuales	Temperatura, ≡ C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de Ph
			Deseables	Germinación de las semillas		
Ciperáceas	Carex sp.	-	14-32		20	5-7.5
	Eleocharis sp.	-	18-27			4.9
	Scirpus lacustris L.	Junco de laguna				
Gramíneas	Glyceria fluitans (L.) R. Br.	Hierba del maná	12 - 23	10 - 30	45	2 - 8
	Phragmites australis(Cav) Trin. ex Steudel	Carrizo				
Iridáceas	Iris pseudacorus L.	Lirio amarillo espadaña fina				
Juncáceas	Juncus sp.	Juncos	16-26		20	5-7.5
Tifáceas	Microorganismos Thypha sp.	Eneas, aneas, espadañas.	10 - 30	12 - 24	30	4-10

Instituto Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona 1999.

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos, y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes.

La actividad microbiana:

- Transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
- Altera las condiciones de las reacciones de reducción-oxidación, del substrato y así afecta la capacidad de proceso del humedal.
- Está involucrada en el reciclaje de nutrientes.

Algunas transformaciones microbianas son aerobias (es decir, requieren oxígeno libre) mientras otras son anaerobias (tienen lugar en ausencia de oxígeno libre). Muchas especies bacterianas son facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aerobias y anaerobias en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales.

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y pueden permanecer inactivos durante años.

La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados, y debe tenerse cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales.

Animales

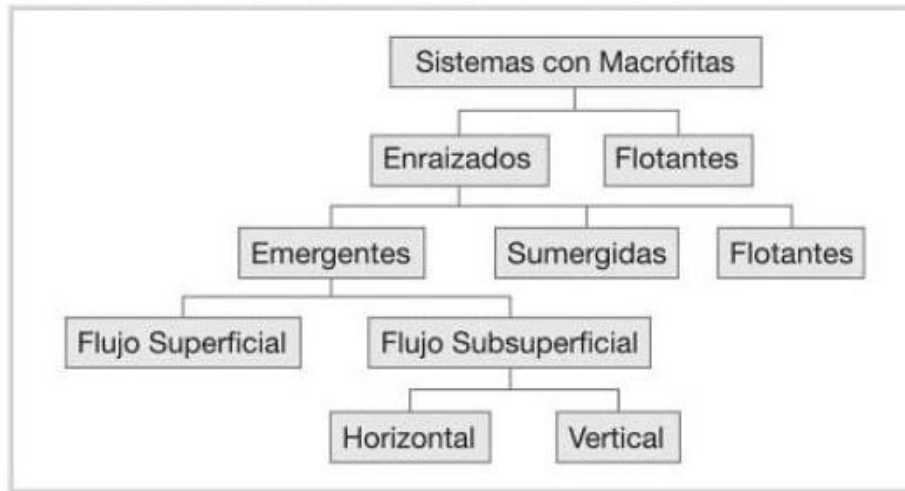
Los humedales construidos proveen un hábitat para una rica diversidad de invertebrados y vertebrados.

Los invertebrados, como insectos y gusanos, contribuyen al proceso de tratamiento fragmentando el detritus (materia muerta proveniente de vegetales y animales) consumiendo materia orgánica. Las larvas de muchos insectos son acuáticas y consumen cantidades significativas de materia orgánica durante sus fases larvales. Los invertebrados también tienen varios papeles ecológicos; por ejemplo, las ninfas de la libélula son rapaces importantes de larvas de mosquito.

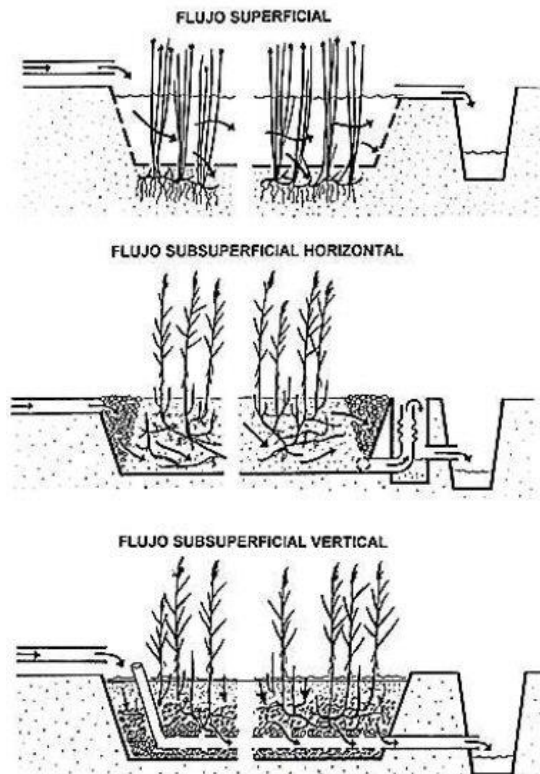
Aunque los invertebrados son los más importantes en cuanto a la mejora de la calidad del agua, los humedales construidos también atraen a una gran variedad de anfibios, tortugas, aves, y mamíferos.

Realce de la estética y paisaje

Aunque los humedales son principalmente sistemas de tratamiento, proporcionan beneficios intangibles a la estética del sitio y mejoran el paisaje. Visualmente, los humedales son ambientes extraordinariamente ricos. Introduciendo el elemento agua, el humedal construido, tanto como el natural, agrega diversidad al paisaje. Pueden construirse humedales artificiales siguiendo las formas que tienen los contornos naturales del sitio, hasta el punto de que algunos humedales, para el tratamiento de agua son indistinguibles a simple vista, de los humedales naturales.



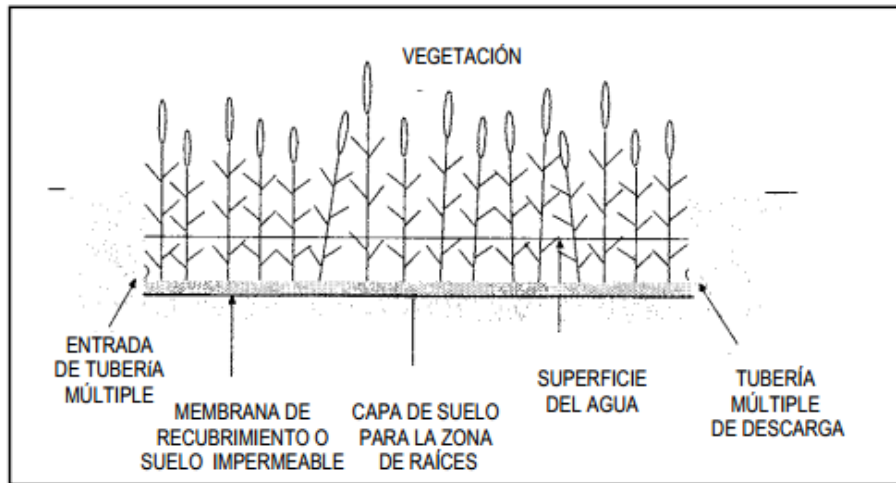
Síntesis de los diferentes tipos de humedal artificial. Figura 1-3



Tipos de sistemas de humedales artificiales emergentes. Figura1-4

1.2 Humedales de flujo superficial

El diseño de estos humedales consiste en áreas abiertas donde el agua fluye libremente y la vegetación puede ser flotante o emergente. A medida que el agua residual fluye a través del humedal, esta es tratada por procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, adsorción y precipitación. Kadlec & Wallace, 2009. Figura 1-5



Humedal superficial. Figura 1-5

Los humedales artificiales consisten normalmente en una o más cuencas o canales de poca profundidad que tienen un recubrimiento en el fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible de ser contaminada, y una capa sumergida de suelo para las raíces de la vegetación macrófita emergente seleccionada.

Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar distribución uniforme del agua residual aplicada y su recolección. La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales de flujo superficial incluye las espadañas y aneas (*Typha* spp), los juncos (*Scirpus* spp.) y los carrizos (*Phragmites* spp). En sistemas diseñados principalmente para tratamiento, es común que sólo se seleccionen una o dos especies para la siembra. La cubierta vegetal producida por la vegetación emergente da sombra a la superficie del agua, reduce la turbulencia inducida por el viento en el agua que fluye por el sistema. Quizás aun más importante son las porciones sumergidas de las plantas vivas, los ramales erguidos de las plantas muertas, y los detritos acumulados del crecimiento vegetal previo. Estas superficies sumergidas proporcionan el sustrato físico para el crecimiento de organismos periféricos adheridos que son responsables del tratamiento biológico en el sistema. La profundidad del agua en las porciones con vegetación de estos sistemas va desde los 50 cm hasta 1 m.

El afluente de estos humedales se distribuye sobre un área extensa de agua somera y vegetación emergente. La lenta velocidad que se produce y el flujo esencialmente laminar proporcionan una remoción muy efectiva del material particulado en la sección inicial del sistema. Este material particulado caracterizado como sólidos suspendidos totales (SST), contiene componentes con una demanda bioquímica de oxígeno (DBO), distintos arreglos de nitrógeno total y fósforo total, y trazas de metales y compuestos orgánicos más complejos. La oxidación o reducción de esas partículas libera formas solubles de DBO, nitrógeno total y fósforo total al humedal en donde están disponibles para la absorción por el suelo y la remoción por parte de las poblaciones microbianas y vegetales activas a lo largo del humedal. El oxígeno está disponible en la superficie del agua, en micro zonas de la superficie de plantas vivas y en superficies de raíces y rizomas, lo cual permite que se produzca actividad aerobia en el humedal. Se puede asumir, que la mayor parte líquida en el humedal es anóxica o anaerobia. Esta falta general de oxígeno limita la remoción biológica por nitrificación del amoníaco ($\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{-N}$), pero los humedales de flujo superficial sí son efectivos en cuanto a la remoción de DBO, SST, metales y algunos contaminantes orgánicos prioritarios dado que su tratamiento puede ocurrir bajo condiciones aerobias o anóxicas.

1.3 Humedales de flujo subsuperficial

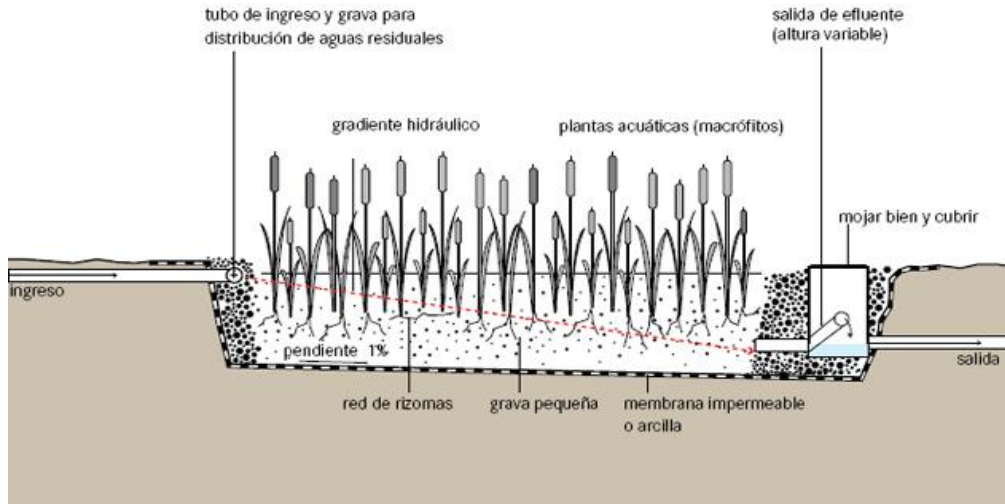
El agua residual, que permanece por debajo de la superficie en todo momento, fluye a través del filtro de materiales graduados, alrededor de los tallos y rizomas de las plantas.

Según el sentido de circulación del agua se distinguen los siguientes tipos de humedales artificiales subsuperficiales.

Humedal de flujo horizontal

El agua circula subterráneamente por un lado y sale por el opuesto mientras atraviesa el medio filtrante, formado por grava, y las raíces de las plantas, donde la biopelícula bacteriana contribuye a la degradación de la materia orgánica y a la desnitrificación.

Se dice que son humedales de flujo horizontal (horizontal surface flow) cuando el agua fluye de un lado a otro del filtro de manera horizontal. Kadlec & Wallace, 2009. Figura1-6.



Humedal artificial de flujo horizontal. Figura 1-6

El nivel del agua, en un humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial se mantiene entre 5 y 15 cm para asegurar el flujo de superficie. El lecho debe ser ancho y poco profundo para maximizar el flujo de agua. Se debe usar una zona de entrada ancha para distribuir uniformemente el flujo. Para evitar taponamientos y asegurar un tratamiento eficiente es esencial un pretratamiento.

Un recubrimiento impermeable (arcilla o geotextil) evita la infiltración. Comúnmente se usa grava pequeña, redonda y de tamaño uniforme (3-32 mm de diámetro) para rellenar el lecho hasta una profundidad de 0.5 a 1 m. La grava debe estar limpia y sin polvillo para no causar taponamientos. También es aceptable la arena, pero es más propensa a los taponamientos. En años recientes se han usado exitosamente otros materiales de filtración como el PET.

La eficiencia de remoción del humedal depende de la superficie (longitud multiplicada por ancho), mientras que el área transversal (ancho por profundidad), determina el máximo flujo posible. Es importante diseñar bien la entrada de manera que permita la distribución uniforme para prevenir el retroflujo. La salida debe ser variable de manera que se pueda ajustar la superficie de agua para optimizar el desempeño del tratamiento.

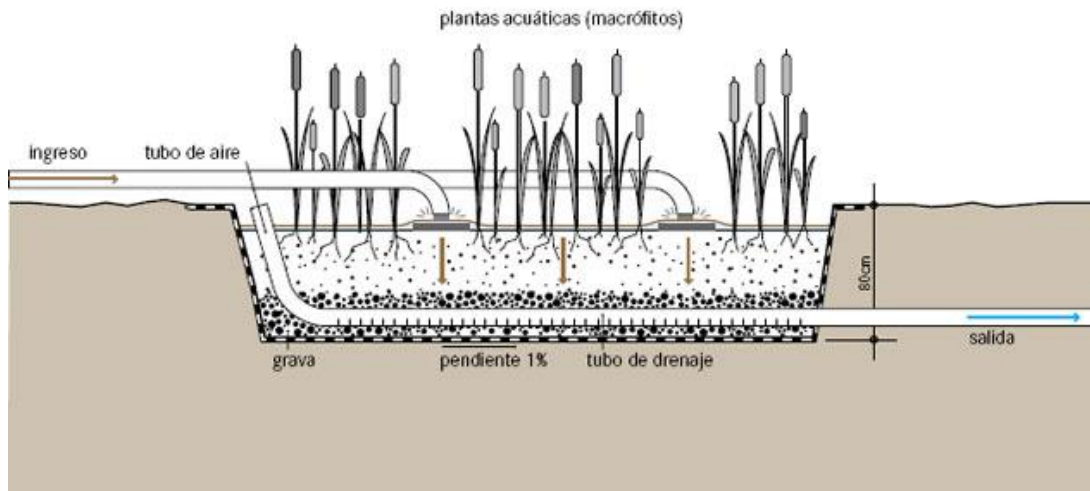
El medio filtrante actúa como filtro para eliminar sólidos, como superficie para que se adhieran las bacterias y como una base para la vegetación. Aunque las bacterias facultativas y anaerobias degradan la mayor parte de la materia orgánica, la vegetación transfiere una pequeña cantidad de oxígeno a la zona de raíces, de manera que pueden ser colonizadas por bacterias aerobias que también degradan el material orgánico. Las raíces de las plantas juegan un papel importante al mantener la permeabilidad del filtro.

Es apropiada cualquier planta con raíces anchas y profundas que pueda crecer en el ambiente acuático rico en nutrientes. El *Phragmites australis* (carrizo) es una elección común porque forma rizomas horizontales que penetran toda la profundidad del filtro. La eliminación de patógenos se debe a: descomposición natural, depredación por organismos superiores, y sedimentación.

Humedal de flujo vertical

El agua entra por la parte superior a pulsos y circula en sentido vertical atravesando el medio filtrante con las raíces de las plantas y la biopelícula bacteriana adherida. Se instalan tubos de aireación para permitir la entrada de oxígeno al medio filtrante y propiciar la degradación de los contaminantes. Su construcción requiere menor superficie para la instalación y eliminan amoníaco (nitrificación). Figura1-7

Cuando el agua se desplaza de arriba hacia abajo a través del filtro se habla de humedales de flujo vertical (vertical flow). Kadlec & Wallace, 2009.



Humedal artificial de flujo vertical. Figura1-7

Un humedal artificial de flujo vertical es un lecho de filtración que se planta con vegetación acuática. Las aguas residuales se vierten o dosifican a la superficie del humedal desde arriba usando un sistema mecánico. El agua fluye verticalmente hacia abajo por la matriz del filtro. La diferencia importante entre el humedal vertical y el horizontal no sólo es la dirección del flujo, sino las condiciones aerobias.

Al dosificar intermitentemente el agua residual (de cuatro a diez veces al día), el filtro pasa por periodos de saturación y de no saturación y, por lo tanto, diferentes condiciones aerobias y

anaerobias. La frecuencia de dosificación se debe ajustar para que la dosis anterior de aguas residuales tenga tiempo de filtrarse por el material y el oxígeno tenga tiempo de difundirse por el medio llenando los espacios vacíos.

Se puede diseñar el humedal artificial de flujo vertical como una excavación poco profunda o como una construcción sobre el nivel del suelo. Cada filtro debe tener un recubrimiento impermeable y un sistema de recolección de efluente. Habitualmente los humedales artificiales de flujo vertical se diseñan para tratar aguas residuales que han pasado por un pretratamiento. El cual puede estar dado por tanques sépticos, lagunas, tratamiento preliminar convencional o sistemas similares. Estructuralmente, hay una capa de grava para drenar (un mínimo de 20 cm), seguida de capas de arena y grava (para efluente ya asentado) o arena y grava fina (para efluente primario).

El medio filtrante actúa tanto como filtro para eliminar sólidos, como una superficie fija para que las bacterias se sujeten, y como una base para la vegetación. La capa superior es plantada con vegetación que puede desarrollar raíces profundas y gruesas, que entran en el medio de filtración.

Dependiendo del clima, las opciones comunes son *Phragmites australis* (carrizo), *Typha cattails* (cañada) y *Typha latifolia* (tule). La vegetación transfiere una pequeña porción de oxígeno a la zona de raíces de manera que las bacterias aerobias pueden colonizar el área y degradar la materia orgánica. Sin embargo, la función primaria de la vegetación es mantener la permeabilidad en el filtro y proporcionar un hábitat para los microorganismos.

Durante la etapa de inundación, el agua residual fluye hacia abajo por el lecho no saturado y es filtrada por la mezcla de arena y grava. Los nutrientes y la materia orgánica son absorbidos y degradados por las densas poblaciones microbianas adheridas a la superficie del material del filtro y las raíces. Al forzar a los organismos a una etapa de 'hambre' entre las dosis, el crecimiento excesivo de la biomasa se reduce y se incrementa la porosidad. Una red de drenaje en la base recolecta el efluente.

El diseño y el tamaño del humedal dependen de las cargas hidráulica y orgánica. La eliminación de patógenos se logra por la descomposición natural, la depredación de organismos superiores, y la sedimentación.

Capítulo 2

Evaluación de alternativas y selección

El diseño hidráulico adecuado de un humedal artificial determina que tenga un buen funcionamiento. Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo pistón y no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento.

En un humedal de flujo subsuperficial su diseño hidráulico es necesario para asegurar que las condiciones de flujo subsuperficial se mantienen en circunstancias normales durante todo el periodo de funcionamiento del sistema.

El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la vegetación y la capa de sedimentos en los humedales de flujo libre, y el medio, las raíces de las plantas y los sólidos acumulados en los de humedales de flujo subsuperficial. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema. La mejor solución en lo referente a construcción, es que el fondo del humedal tenga suficiente inclinación para permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable con el nivel de agua.

La relación largo-ancho tiene influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. En teoría grandes relaciones largo: ancho 10:1 o mayores asegurarían flujo pistón, pero tienen el inconveniente de que en la parte alta se desbordan debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas de flujo libre, por tanto, son aceptables relaciones 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1. Para minimizar los cortocircuitos (interrupción del flujo) se requiere construir y conservar el fondo del humedal de manera adecuada, con el uso de múltiples celdas, y con la intercalación de zonas abiertas (sin vegetación) para la redistribución del flujo.

2.1 Humedales de flujo libre

El flujo de agua en un humedal de flujo libre es descrito por la ecuación de Manning, que define el flujo en canales abiertos. La velocidad de flujo en el humedal descrita por la ecuación 1, depende de la profundidad del agua, de la pendiente de la superficie del agua y de la densidad de la vegetación. Otras aplicaciones de la ecuación de Manning para canales abiertos suponen que la resistencia por fricción solamente ocurre en el fondo y en las paredes del canal. En los humedales artificiales de flujo libre la resistencia está distribuida sobre la totalidad de la columna de agua, ya que las plantas emergentes y los restos de vegetación están presentes en todo el espacio. La ecuación de Manning también asume flujo turbulento, lo que en este caso no se presenta debido a lo explicado anteriormente.

$$v = \frac{1}{n} y^{2/3} S^{1/2}$$

Ecuación 1.

donde:

v: velocidad de flujo, en [m/s]

n: coeficiente de fricción de Manning, en [s/m^{1/3}]

y: profundidad del agua en el humedal, en [m]

s: gradiente hidráulico, o pendiente de la superficie del agua, en [m/m]

Para los humedales, el número de Manning (n) es función de la profundidad del agua debido a la resistencia impuesta por la vegetación emergente. El coeficiente de fricción, también depende de la densidad de la vegetación y de la capa de residuos que puede variar según la localización o la estación. La relación está definida por la ecuación 2.

$$n = \frac{a}{y^{1/2}}$$

Ecuación 2.

donde:

a: factor de resistencia, en [s · m^{1/6}]

0.4 [s · m^{1/6}] para vegetación escasa y y > 0.4 [m]

1.6 [s · m^{1/6}] para vegetación moderadamente densa con profundidades de agua residual de y = 0.3 [m]

6.4 [s · m^{1/6}] para vegetación muy densa y capa de residuos, en humedales con y ≤ 0.3 [m]

En muchas situaciones, con vegetación emergente típica, es aceptable asumir para propósitos de diseño valores de a entre 1 y 4. Sustituyendo la ecuación 2 en la ecuación 1.

$$v = \frac{1}{a} y^{7/6} s^{1/2}$$

Ecuación 3.

Sustituyendo y reorganizando términos es posible llegar a una ecuación para determinar la longitud máxima de una celda de humedal.

$$v = \frac{Q}{Wy} \quad W = \frac{A_s}{L} \quad y \quad s = \frac{(m)(y)}{L}$$

donde:

Q: gasto, en [m³/d]

W: ancho de la celda de humedal, en [m]

A_s : área superficial de la celda de humedal, en [m²]

L: longitud de la celda de humedal, en [m]

m: pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal

Substituyendo en la ecuación y reordenando, se obtiene:

$$L = \left[\frac{A_s y^{8/3} m^{1/2} \cdot 86400}{\alpha \cdot Q} \right]^{2/3}$$

Ecuación 4.

El área superficial del humedal (A_s) se determina primero mediante el modelo de diseño de remoción del contaminante limitante. La ecuación 4 permite el cálculo directo de la longitud máxima aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado. Es aconsejable usar el gradiente hidráulico más pequeño posible para tener una reserva en caso de ajustes futuros. Una relación largo-ancho $\leq 3:1$ suele ser la mejor selección desde el punto de vista costo eficiencia, pero otras combinaciones de longitud y gradiente hidráulico son posibles también de modo que se pueda ajustar la forma del humedal al sitio y su topografía. El valor de [m] usado en la ecuación, está típicamente entre 10 y 30% de la pérdida de carga disponible. La máxima pérdida de carga disponible es igual al total de la profundidad del agua (y: en m) del humedal cuando m=100%. Éste no sería un diseño conservador, porque el humedal podría estar seco al final y no tendría capacidad de reserva si la resistencia al flujo aumentara en el futuro.

El valor de Q en la ecuación 4 es el gasto promedio entre la entrada y la salida, para tener en cuenta las pérdidas o ganancias de agua debidas a la evapotranspiración, filtración y precipitación. Es usualmente aceptable, para un diseño preliminar, suponer los caudales de entrada y salida iguales. Para el diseño final del sistema será necesario tener en cuenta estas pérdidas y ganancias.

2.2 Humedales de flujo subsuperficial

La ley de Darcy, describe el flujo en un medio poroso que es lo generalmente aceptado para el diseño de humedales de flujo subsuperficial usando suelo y arena como lecho filtrante. El mayor nivel de turbulencia en el flujo ocurre en lechos que usan piedra muy gruesa; entonces la ecuación de Ergun es más apropiada para este caso.

La ley de Darcy no es estrictamente aplicable a los humedales de flujo subsuperficial debido a las limitaciones físicas en el actual sistema. Se asumen condiciones de flujo laminar, pero el flujo turbulento puede darse con gravas muy gruesas cuando el diseño usa un gradiente hidráulico alto. La ley de Darcy también asume que el flujo en el sistema es constante y uniforme, pero en la realidad puede variar por la precipitación, evaporación y filtración; así como por los cortocircuitos en el flujo que pueden llegar a presentarse por una desigual porosidad o construcción deficiente. La ley de Darcy puede aproximarse razonablemente a las condiciones hidráulicas en el humedal de

flujo subsuperficial si se cumplen las siguientes condiciones del sistema: se utiliza una grava de tamaño pequeño o medio, construcción adecuada para minimizar cortocircuitos, está diseñado para tener una mínima dependencia del gradiente hidráulico y las pérdidas y ganancias están adecuadamente reconocidas.

$$v = k_s \cdot s$$

y dado que:

$$v = \frac{Q}{Wy}$$

Entonces:

$$Q = k_s \cdot A_c \cdot s \quad \text{Ecuación 5.}$$

donde:

Q: gasto promedio a través del humedal, en $[m^3/d [(Q_o+Q_e)/2]]$

k_s : conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, en $[m^3/m^2/d]$

A_c : área de la sección transversal perpendicular al flujo, en $[m^2]$

s: gradiente hidráulico o "pendiente" de la superficie del agua en el sistema, en $[m/m]$

v: velocidad de "Darcy", la velocidad aparente de flujo a través de la totalidad del área de la sección transversal del lecho, en $[m/d]$

Sustituyendo y reorganizando los términos es posible desarrollar una ecuación que determine de manera aceptable el ancho mínimo de una celda de humedal de flujo subsuperficial que sea compatible con el gradiente hidráulico seleccionado para el diseño, partiendo de:

$$s = \frac{(m)(y)}{L} \quad L = \frac{A_s}{W} \quad A_c = (W)(y)$$

donde:

W: ancho de una celda del humedal, en $[m]$

A_s : área superficial del humedal, en $[m^2]$

L: longitud de la celda de humedal, en $[m]$

m: pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal.

y: profundidad del agua en el humedal, en [m]

$$W = \frac{1}{y} \left[\frac{(Q)(A_s)}{(m)(k_s)} \right]^{0.5}$$

Ecuación 6.

El área superficial del humedal (A_s) se determina en primer lugar, usando el modelo de diseño limitante para remoción de contaminantes. La ecuación 6 permite calcular directamente el ancho mínimo absoluto aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado. Otras combinaciones de ancho - gradiente hidráulico pueden ser posibles a fin de ajustar el diseño a las condiciones topográficas existentes en el sitio propuesto. El valor de m en la ecuación 6 típicamente se encuentra entre 5 y 20% de la pérdida de carga potencial. En éste caso se aplica la misma recomendación acerca de la no selección de la máxima pérdida de carga disponible, ya que, tomar un valor de la conductividad hidráulica efectiva (k_s) $\leq 1/3$ y que [m] no sea mayor del 20%, ya que estos valores permiten tener un factor de seguridad suficiente contra potenciales atascamientos, efectos de la viscosidad y otras contingencias que pueden llegar a ser desconocidas en el momento del diseño.

Las ecuaciones 4 y 6 son válidas cuando el flujo es laminar a lo largo de los espacios vacíos del medio, es decir, cuando el número de Reynolds es menor a 10. El número de Reynolds es función de la velocidad de flujo, del tamaño de los espacios vacíos y de la viscosidad cinemática del agua, como se muestra en la ecuación 7. En muchos casos N_R será mucho menor de 1, en cuyo caso el flujo laminar impera y la ley de Darcy es válida. Si el flujo es turbulento, entonces la conductividad hidráulica efectiva será significativamente menor que la predicha por la ley de Darcy.

$$N_R = \frac{(v)(D)}{\nu}$$

Ecuación 7.

donde:

N_R : número de Reynolds, adimensional

v: velocidad de Darcy, en [m/s]

D: diámetro de los vacíos del medio, tomarlo igual al tamaño promedio del material del lecho, en [m]

ν : Viscosidad cinemática del agua, en [m²/s] (Ver Tabla 2)

La conductividad hidráulica (k_s) en la ecuación 6 varía directamente con la viscosidad del agua, que a su vez es función de la temperatura del agua:

$$\frac{k_{sT}}{k_{s20}} = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \text{ Ecuación 8.}$$

donde:

k_s : conductividad hidráulica a una temperatura T y 20° C.

μ : viscosidad del agua a una temperatura T y 20° C. (Ver Tabla 2).

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m³)	Viscosidad dinámica x10 ³ (N*s/m²)	Viscosidad cinemática x10 ⁻⁶ (m²/s)
0	999.8	1.781	1.781
5	1000	1.518	1.519
10	999.7	1.307	1.306
15	999.1	1.139	1.139
20	999.2	1.102	1.103
25	997	0.89	0.893
30	995	0.708	0.8
40	992.2	0.653	0.658
50	988	0.547	0.553
60	983.2	0.466	0.474
70	977.8	0.404	0.413
80	971.8	0.354	0.364
90	965.3	0.315	0.326
100	958.4	0.282	0.294

Mecanica de Fluidos, Robert L. Mott.

Los efectos de la viscosidad pueden ser significativos en climas fríos, con humedales de flujo subsuperficial operando durante los meses de invierno. Por ejemplo, la conductividad hidráulica del agua a 5° C podría ser 66% de la correspondiente a 20° C. Este efecto ya está considerado en la recomendación previa del factor de seguridad (diseñar con $k_s \leq 1/3$ del k_s efectivo).

La conductividad hidráulica en la ecuación 6 también varía con el número y tamaño de vacíos en el medio usado para el humedal. La Tabla 3 presenta órdenes de magnitud estimados para un rango de materiales granulares que podrían ser usados en un humedal de flujo subsuperficial. Es recomendable que la conductividad hidráulica se mida en el terreno o en laboratorio antes del diseño final.

Tabla 3. Características típicas de material granular			
Tipo de material	Tamaño efectivo D ₁₀ (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, K _s (m ³ /m ² /d)
Arena gruesa	2	28-32	100-1.000
Arena gravosa	8	30-35	500-5.000
Grava fina	16	35-38	1.000-10.000
Grava media	32	36-40	1.000-50.000
Roca gruesa	128	38-45	50.000-250.000

Mecanica de Fluidos, Robert L. Mott.

Es aconsejable que la porosidad (n) del medio también se mida en el laboratorio antes de hacer el diseño final. Ésta puede ser medida usando el procedimiento estándar de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). Valores de porosidad para estos tipos de suelo y grava están publicados en muchas referencias, pero pueden ser mucho menores que los de la Tabla 3 ya que pueden estar dados para depósitos naturales de suelo y grava que han pasado por un proceso de consolidación natural y, por tanto, esos valores no son los apropiados para el diseño de un humedal de flujo subsuperficial. Es posible usar una relación basada en la ecuación de Ergun (ecuación 9), para estimar la conductividad hidráulica cuando se usan gravas gruesas o rocas ecuación 10

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g \quad \text{Ecuación 9.}$$

donde:

ε : Porosidad, [adimensional]

ρ_p : Densidad de las partículas del lecho, [kg/m³]

ρ_f : Densidad del fluido, [kg/m³]

ΔP : Caída de presión, [Pa]

L: Longitud del lecho, [m].

g: Aceleración de gravedad, [m/s²].

$$k_s = n^{3.7}$$

Ecuación 10.

La ecuación 10, así como los valores de la Tabla 3 son útiles solamente para un diseño preliminar o para estimar un orden de magnitud. El diseño final de un humedal de tipo subsuperficial debe basarse en mediciones reales de los dos parámetros, conductividad hidráulica y porosidad.

La recomendación previa de que el gradiente hidráulico de diseño se limite a no más del 20% de la pérdida de carga disponible es el efecto parcial de limitar la relación de forma del sistema a valores relativamente bajos ($\leq 3:1$ para lechos de 0.6 m de profundidad, $\leq 0.75:1$ para lechos de 0.3 m de profundidad). En Europa, se han construido sistemas SFS usando suelo en lugar de grava, con pendientes del 8% para asegurar un adecuado gradiente hidráulico y continúan experimentando flujo superficial causado por un inadecuado factor de seguridad en el diseño.

2.3 Ventajas y desventajas de los tipos de humedales

De Flujo Horizontal

Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Requiere menos espacio que un humedal artificial de flujo superficial libre 2. Alta reducción de DBO, de sólidos suspendidos y de patógenos 3. No presenta los problemas de mosquitos del humedal artificial de flujo superficial libre 4. Puede ser construido y reparado con materiales disponibles localmente 5. La construcción puede proporcionar empleo temporal a gente de la localidad 6. No requiere energía eléctrica 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Requiere diseño y supervisión de expertos 2. Costo moderado de capital dependiendo de la tierra, recubrimiento, relleno, etc.; bajo costo de operación 3. Se requiere pretatamiento para prevenir las obstrucciones

Mantenimiento

Con el tiempo se taponará la grava con los sólidos y la capa bacterial. El material del filtro requiere reemplazo entre los 8 y 15 años, o más. Las actividades de mantenimiento se deben enfocar en asegurar que el tratamiento primario es efectivo al reducir la concentración de sólidos en las aguas residuales antes de entrar en el humedal. También debe asegurar que no crezcan árboles en el área, ya que las raíces pueden dañar el recubrimiento.

Adecuación

Las obstrucciones son un problema común y por lo tanto el afluente debe estar bien sedimentado con un tratamiento primario antes de aplicarlo en el humedal. Esta tecnología no es apropiada para aguas residuales no tratadas (aguas negras). **Este es un buen tratamiento para las comunidades que cuentan con tratamiento primario** (p.ej. Fosas Sépticas) pero que buscan alcanzar una mayor calidad de efluente. Esta es una buena opción donde el terreno es barato y está disponible, aunque el humedal requerirá mantenimiento durante toda su vida útil.

Dependiendo del volumen del agua y, por lo tanto, del tamaño, este tipo de humedal puede ser adecuado para pequeñas secciones de áreas urbanas, periurbanas y comunidades rurales. También se pueden diseñar para una única vivienda.

Los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial son más adecuados para climas cálidos, pero pueden ser diseñados para tolerar algunos periodos de congelación y de baja actividad biológica.

De Flujo Vertical

Ventajas	Desventajas
1. No presenta los problemas de mosquitos del humedal artificial de flujo superficial libre	1. Se requiere una fuente constante de electricidad
2. Se presenta menos obstrucciones que en el humedal artificial del flujo horizontal subsuperficial	2. No todas las piezas y materiales pueden estar disponibles localmente
3. Requiere menos espacio que un humedal artificial de flujo superficial libre	3. Requiere diseño y supervisión de expertos
4. Alta reducción de DBO, sólidos suspendidos y de patógenos	4. Costo moderado de capital dependiendo de la tierra, recubrimiento, relleno, etc.; bajo costo de operación
5. La construcción puede proporcionar empleo temporal a gente de la localidad	5. Se requiere pretratamiento para prevenir las obstrucciones
	6. El sistema de dosificación requiere ingeniería compleja

Mantenimiento

Con el tiempo se obstruirá la grava con los sólidos acumulados y la capa bacterial. El material puede requerir ser remplazado cada 8 a 15 años, o más. Las actividades de mantenimiento se deben orientar a asegurar que el tratamiento primario baje efectivamente la concentración de la materia orgánica y de los sólidos antes de entrar en el humedal. Se pueden requerir pruebas para determinar las plantas locales más adecuadas con el agua residual específica. El sistema vertical requiere más mantenimiento y experiencia técnica que las otras tecnologías de humedal.

Los dos tipos de humedales artificiales tienen una aplicabilidad en: hogar, vecindario y ciudad.

2.4 Selección del sistema

La selección del humedal artificial como sistema para el tratamiento de las aguas residuales del edificio de la División de Ingenierías Civil y Geomática se realizó con base a las ventajas y desventajas de cada sistema descritas en el subtema anterior. Mediante la investigación bibliográfica se fundamentó la selección de este sistema.

Tomando en cuenta los requerimientos y características del sitio, a continuación se mencionan algunas de las ventajas que presenta un humedal artificial.

Toleran una amplia gama de contaminantes, lo que supone que estos sistemas son, en mayor o menor medida, eficientes en el tratamiento. Así, aunque el sistema se diseñe para la remoción de un contaminante específico, se puede asegurar la remoción de otros contaminantes sin poner especial atención en ellos gracias a los múltiples procesos que tienen lugar dentro del sistema

Tienen bajos costos de operación y bajo consumo de materiales e insumos de energía, lo cual supone gastos bajos durante todo el período de funcionamiento del sistema y que, en cierta medida, mitigan los costos medianamente altos que supone su construcción, costos que por otro lado son todavía más bajos que los requeridos en otros sistemas.

Es un sistema natural de tratamiento que no requiere de ningún tipo de sustancia química para la eliminación de los contaminantes ya que se basan únicamente en los procesos que se dan por la interacción del agua residual con las plantas y el sustrato. Sin embargo, al ser sistema natural, puede presentar variaciones en su rendimiento debido a los cambios estacionales. En el caso de este diseño, este factor no es limitante debido a las condiciones climáticas de Ciudad Universitaria ya que no presenta variaciones bruscas, manteniendo condiciones estables de temperatura

De los dos tipos de humedales artificiales se seleccionó el humedal artificial subsuperficial de flujo vertical debido a las razones siguientes:

- El flujo en este tipo de humedales se mantiene a través y por debajo de grava y arena lo que le permite que el agua no esté en contacto con la atmósfera. Al no estar al aire libre el agua residual no atrae a los mosquitos y otro tipo de insectos además de que se evita que las personas entren en contacto con aguas residuales.
- La configuración de este sistema proporciona mayor protección térmica que los humedales de flujo superficial.
- Su lecho de grava, proporciona mayor superficie específica, esto es, que requiere menor extensión de terreno para la construcción de un humedal subsuperficial.

Capítulo 3

Diseño del humedal artificial

En este capítulo se presenta el diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo vertical siguiendo el modelo propuesto por la Environmental Protection Agency (EPA) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

3.1 Metodología

Descripción del sitio

Ubicación

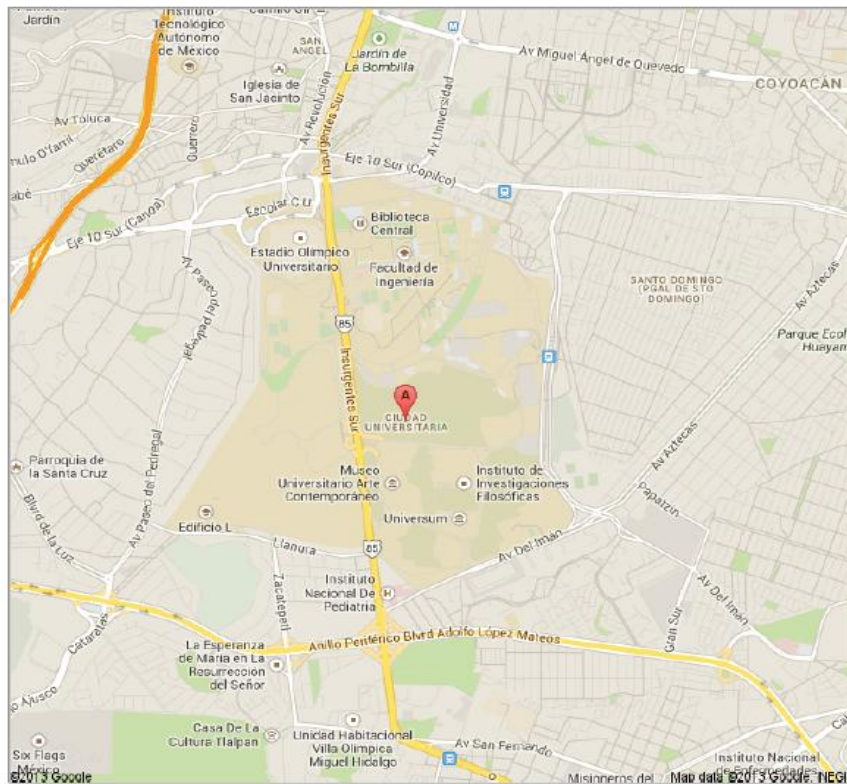
El proyecto se encuentra localizado en ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, Ciudad de México D.F. al sur de la Zona metropolitana de la Ciudad de México, en las coordenadas 19° 20' 01" latitud Norte y 99° 11' 54" longitud Oeste, a una altitud de 2268 msnm.

28/10/13

Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México - Google Maps

Dirección Ciudad Universitaria, Coyoacán
Ciudad de México, DF

División de Ingeniería Civil y Geomatica



Clima

Su clima es templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano. Topográficamente la reserva se localiza entre las isothermas de 15.3 °C y 15.6 °C y entre las isoyetas de 814.7 [mm] y 952.7 [mm], es decir, su temperatura media es de 15°C y la precipitación media anual es de 870.2 [mm] al año. La época de lluvias es de mayo a octubre y la época de secas de octubre a mayo (Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (portal REPSA), 2010). Con efecto de tener una temperatura promedio se llevo a cabo un análisis del 1 de Enero del 2013 al 1 de enero del 2014. Figura 3-2, en el cual se analizaron las temperaturas máximas y mínimas de la zona para garantizar el tipo de vegetación más adecuada.

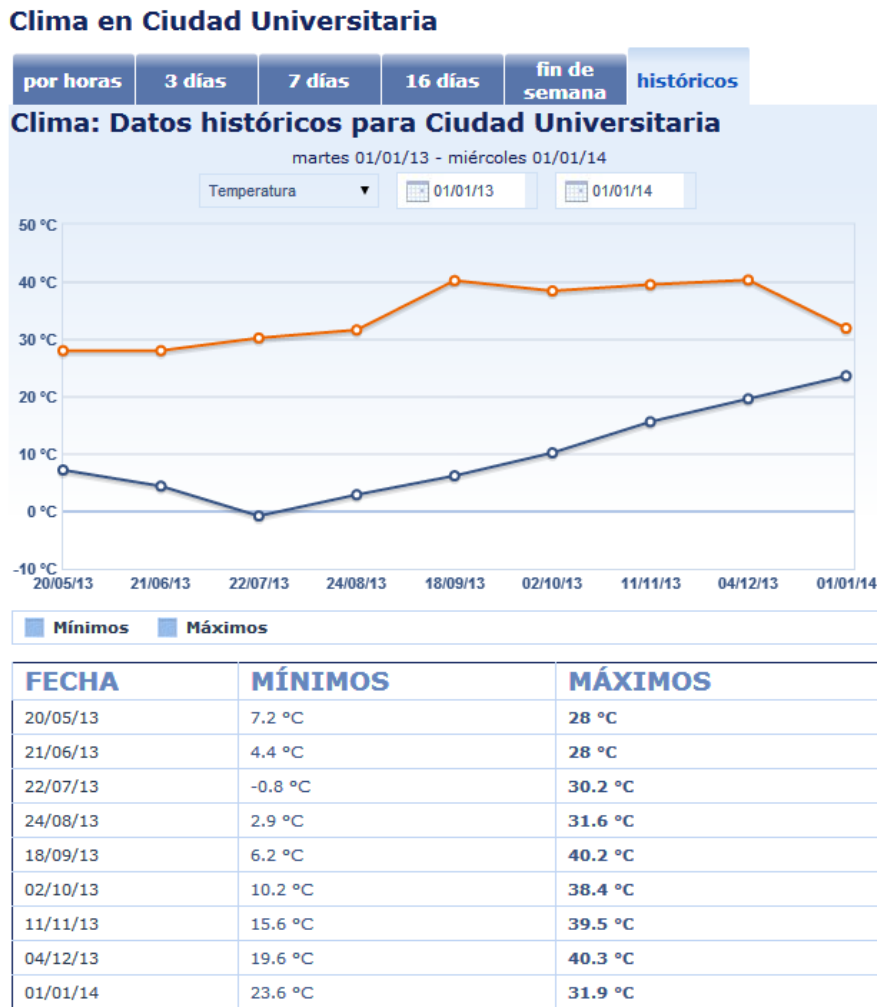


Figura 3-2.

Estos datos históricos climáticos son basados en mediciones reales de estaciones meteorológicas avalados por las agencias de meteorología en los distintos países.

Vegetación.

El Pedregal de San Ángel incluye dos zonas de vegetación:

- a) Matorral xerófilo que forma parte de los matorrales semiáridos del altiplano
- b) Zona de bosques de montaña en la porción montañosa sur occidental.

El matorral xerófilo es la comunidad característica y también la que cuenta con mayor número de especies, es un matorral muy heterogéneo en el que el estrato arbóreo es casi inexistente debido a la escasez de suelo, el herbáceo formado por pastos, hierbas erguidas y hierbas trepadoras es el más abundante y el estrato arbustivo está bien representado por la especie típica llamada “palo loco”, (*Senecio praecox*).

Población (edificio de la división de Ingenierías Civil y Geomática).

Debido a las condiciones estructurales del edificio, no es posible un crecimiento de su población fija. Por lo cual se llevó a cabo un conteo directo.

Población fija=100 habitantes.

Población flotante, ésta se ve dividida durante el año ya que en el período vacacional su porcentaje en base a la población fija es de un 30%, sin embargo en el período de clases es de un 100% tomando en cuenta a los alumnos que hacen servicio social, visitantes, etc.

Población flotante (periodo vacacional)=30 habitantes.

Población flotante (periodo escolar)=100 habitantes.

3.2 Cálculo y dimensionamiento

Se obtendrán las dimensiones necesarias para llevar a cabo la construcción del humedal como son el ancho, largo, área superficial, área transversal, y se calculara el tiempo de retención hidráulico para estimar la reducción de DBO para el humedal artificial subsuperficial de flujo vertical de una celda.

Datos de partida:

$$\text{DBO entrada} = 284 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$\text{DBO salida} = 24 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$\text{SST entrada} = 272 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$\text{Gasto } Q = 1.17 \text{ l/min} = 1.68 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Con la siguiente ecuación podremos hacer el ajuste de la temperatura, para llevar a cabo el cálculo del área superficial.

$$K_T = K_{20}(1.06)^{T-20}$$

El valor de la constante de temperatura (a 20° C) para humedales subsuperficiales es de $1.104d^{-1}$

La temperatura del agua es $T=16.8^\circ\text{C}$.

$$K_T = 1.104d^{-1}(1.06)^{16.8-20}$$

$$K_T = 0.91[d^{-1}]$$

Conocido K_T se obtiene el valor del área superficial la cual se obtiene con:

$$A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_T(h)(n)}$$

Donde:

K_T =constante de temperatura en d^{-1} .

h =profundidad de diseño del sistema en m.

n =porosidad del lecho de material del humedal (%).

Q =gasto en $\frac{\text{m}^3}{\text{d}}$.

C_o =concentración de entrada de DBO en $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$.

C_e = concentración de salida de DBO en $\frac{mg}{L}$.

Tabla 4. Características típicas del medio de humedales de flujo subsuperficial

Tipo de medio	Tamaño efectivo D10 (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, Ks (pie ³ /pie ² /d)
Arena gruesa	2	28 a 32	300 a 3.000
Arena con grava	8	30 a 35	1600 a 16.000
Grava fina	16	35 a 38	3000 a 32.000
Grava mediana	32	36 a 40	32000 a 160.000
Roca triturada	128	38 a 45	16×10^4 a 82×10^4

Reed et al.. 1995

De la tabla 4 las equivalencias son.

$$mm * 0.03937 = \text{pulgadas}$$

$$\frac{\text{pie}^3}{\text{pie}^2} * 0.3047 = \frac{m^3}{m^2}, \quad \text{ó,} \quad * 7.48 = \frac{\text{galones}}{d}$$

Se propone el empleo de un coeficiente de porosidad de 0.35 para un material de arena con grava, entonces.

$$A_s = \frac{1.68(\ln 284 - \ln 24)}{0.91(0.6)(0.35)}$$

$$A_s = 21.72[m^2]$$

Obtenido A_s , se calcula el tiempo de retención hidráulico.

$$TRH = \frac{A_s * h * n}{Q}$$

$$TRH = \frac{21.72 * 0.6 * 0.35}{1.68}$$

$$TRH = 2.71[\text{dias}]$$

Temperatura (°C)	Tiempo de retención (d)	Reducción de DBO (%)
10	5	0 - 10
10 - 15	4 - 5	30 - 40
15 - 20	2 - 3	40 - 50
20 - 25	1 - 2	40 - 60
25 - 30	1 - 2	60 - 80

Wastewater Stabilization Ponds, Principles of Planning & Practice, WAO, 1987.

Por lo que se comprueba que el TRH obtenido cumple con el ámbito recomendado.

Los resultados obtenidos suponen una visión general de lo que sería el humedal artificial. A partir del valor de área superficial se lleva a cabo el diseño hidráulico que es crítico en el éxito del rendimiento del sistema.

La relación largo –ancho tiene gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia del flujo del sistema. Las relaciones 1:1, 1:3 y 4:1 son aceptables.

A continuación se realiza el cálculo de los valores largo, ancho y área transversal del humedal.

Las expresiones y cálculos que se muestran a continuación son únicamente para el dimensionamiento de un humedal de una sola celda.

$$w = \frac{1}{h} \left[\frac{QA_s}{mK_s} \right]^{0.5}$$

Donde:

m=pendiente del fondo del lecho expresada como decimales. Se recomienda 1%

h= profundidad del agua del humedal en [m]

K_s =conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección del flujo en [$m^3/m^2/dia$], para el caso en estudio se empleará 9750.4 [$m^3/m^2/dia$]

$$w = \frac{1}{0.6} \left[\frac{1.68 * 21.72}{0.01 * 9750.4} \right]^5$$

$$w = 1.01 [m]$$

El largo de la celda está definido por la siguiente expresión.

$$L = \frac{A_s}{w}$$

$$L = \frac{21.72}{1.01}$$

$$L = 21.50 [m]$$

Se realiza el cálculo del gradiente hidráulico, necesario para determinar el cálculo área transversal.

$$s = \frac{mh}{L}$$

$$s = \frac{0.01 * 0.6}{21.5}$$

$$s = 2.7 \times 10^{-4} [m/m]$$

Área transversal.

$$A_c = \frac{Q}{K_s * s}$$

$$A_c = \frac{1.68}{9750.4 * 2.7 \times 10^{-4}}$$

$$A_c = 0.63 [m]$$

O también se puede calcular por.

$$A_c = wh$$

$$A_c = 1.01 * 0.6$$

$$A_c = 0.6 [m^2]$$

Conocidos el largo-ancho se puede deducir la relación que existe entre estos valores.

$$L:W: \frac{21.5 [m]}{1.01 [m]} = 21.8$$

Por lo tanto la relación es.

$$21.28:1$$

La relación NO es considerada aceptable dentro de los rangos establecidos

Pero una ventaja que presentan los sistemas de humedales es que se pueden ajustar a las necesidades del sitio. Tomando como base la amplia gama de relaciones largo-ancho que se presentan, con unas simples operaciones se pueden calcular y ajustar los valores a las necesidades y condiciones del terreno.

Ahora se realiza el cálculo de los valores largo-ancho y área transversal para una celda con una relación 3:1 (recomendado para humedales artificiales con profundidad de 0.6m).

$$L: 3W$$

$$A_s = LW$$

$$A_s = (3W)W$$

$$A_s = 3W^2$$

$$W = \sqrt{\frac{A_s}{3}}$$

$$W = \sqrt{\frac{21.72}{3}}$$

$$W = 2.69[m]$$

Por lo tanto.

$$L = 3(2.69)$$

$$L = 8.07[m]$$

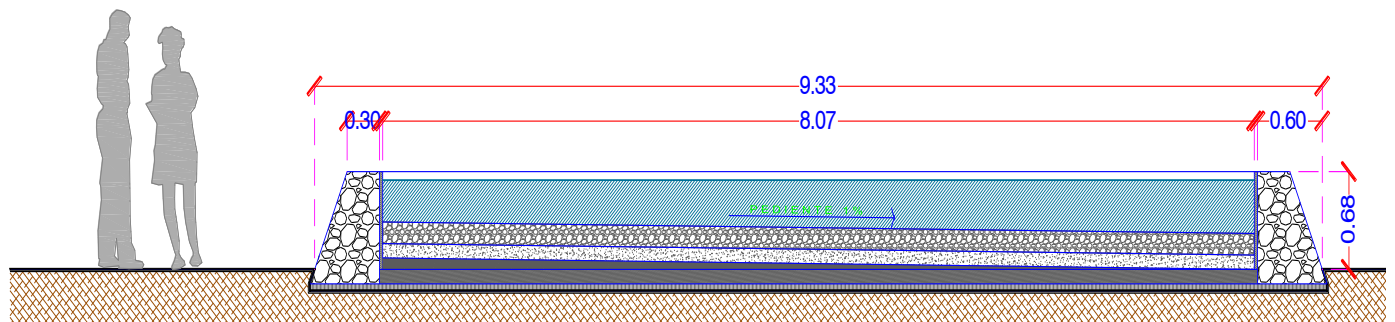
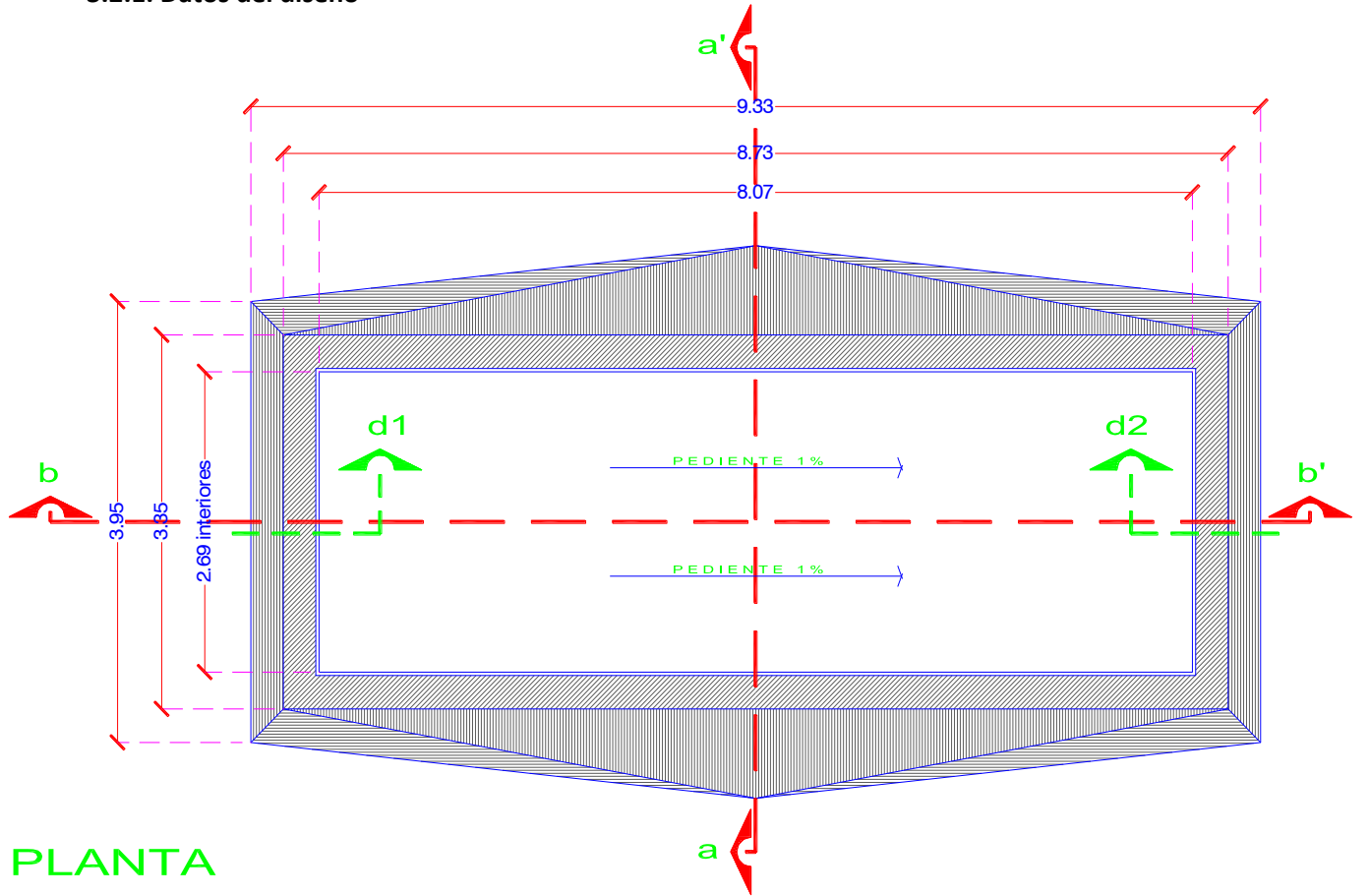
Cálculo del área transversal.

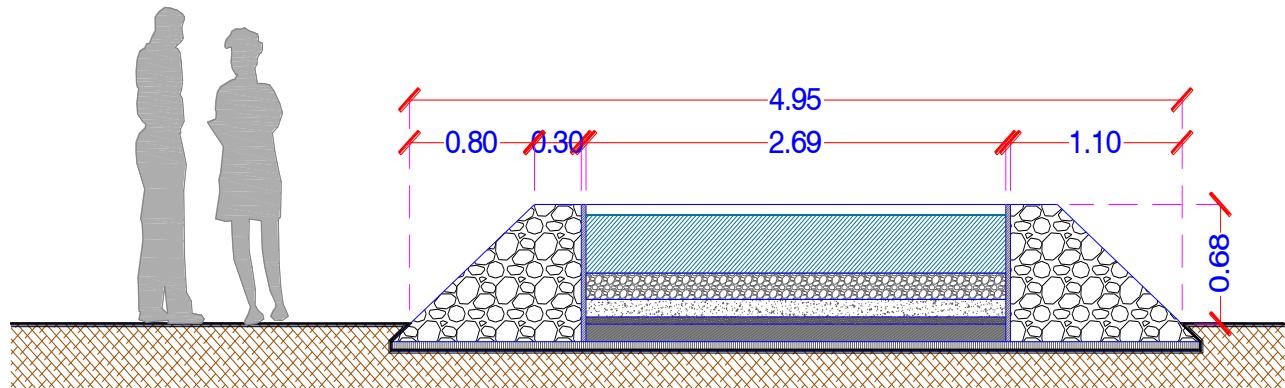
$$A_c = wh$$

$$A_c = 2.69 * 0.6$$

$$A_c = 1.61[m^2]$$

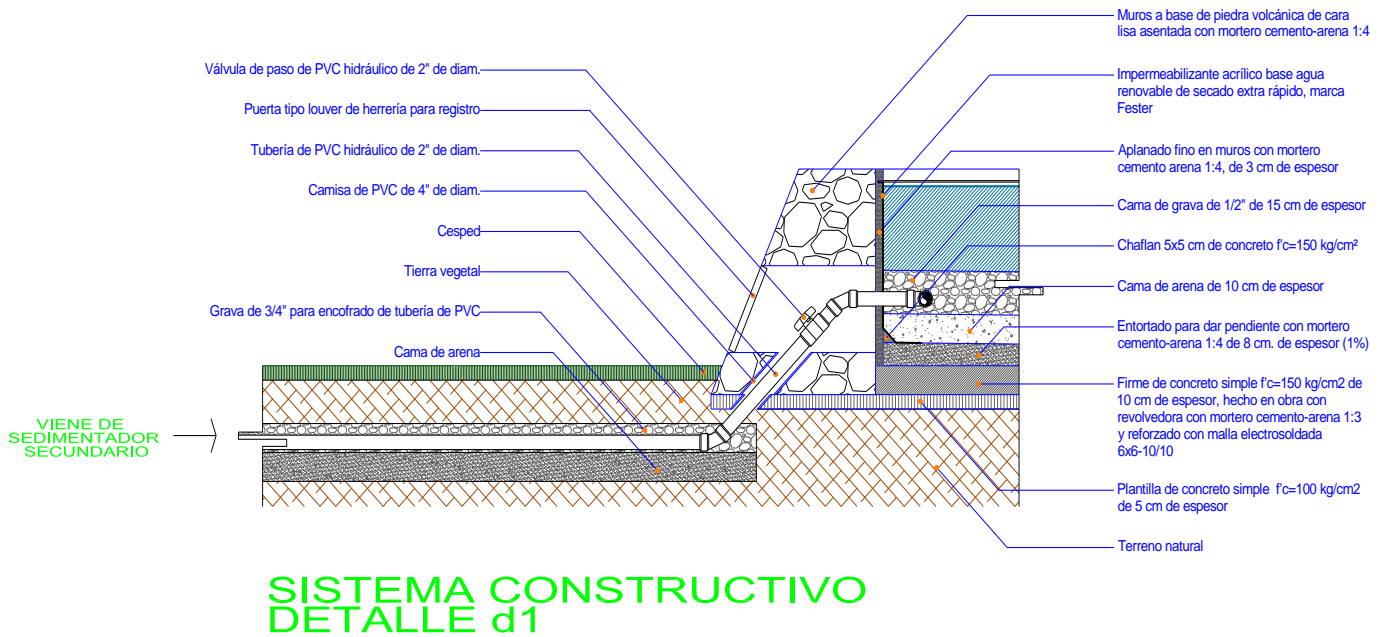
3.2.1. Datos del diseño





CORTE a-a'

3.3 Elementos



Dibujo detallado de los diferentes componentes del humedal. Figura 3-3.

3.3.1. Materiales

Vegetación

Se utilizarán tules y carrizos ya que son plantas con las cuales el Instituto de Química de la UNAM, ha hecho estudios de su eficiencia dentro de los humedales, y son las más convenientes. En el Instituto de Química se encuentra un semillero creado exclusivamente para reproducción de este tipo de vegetación. Una razón fundamental por las cuales este tipo de plantas se adecuan mas al diseño del humedal, es debido a que crecen y se esparcen rápidamente, tienen sistemas extensos de raíz, característica que es muy apreciada. Las plantas serán trasplantadas del semillero al sitio.



Figura 3-4. Semillero del Instituto de Química, UNAM.

Agua

El agua es uno de los elementos más importantes de un humedal ya que para que pueda ser considerado como tal ésta debe estar presente permanentemente.

Sustrato

Los materiales a utilizar son las arenas y las gravas, además de los sedimentos y residuos que se van depositando a medida que el efluente circula lentamente por toda la superficie.

La importancia del sustrato en un humedal radica en el hecho de que sirve de sustento a todos los seres vivos que habitan en él, incluyendo los microorganismos encargados del tratamiento de las

aguas residuales. Asimismo, la impermeabilidad del humedal depende del sustrato que lo compone y del suelo que lo sustenta.

- Se colocará una capa de arena de 10 cm compactada para tener una superficie firme.
- Se utilizará una capa de 15 cm de grava de ½" por especificación de diseño.

Muros perimetrales

Se construirá muros de mampostería con roca volcánica de 0.6 m desde el nivel de desplante del humedal, por la abundancia en sitio y estética del humedal. Y a su vez se tendrán que aplanar con mortero, cemento y arena fina.

Recubrimiento

Se debe utilizar en humedales de este tipo para prevenir la infiltración de agua contaminada en manto subterráneo, el material del recubrimiento puede ser impermeabilizante acrílico base de agua renovable de secado extra rápido, marca preferente (Comex, Fester etc.).

Plantilla

Llevará una plantilla de concreto simple $f'c=100$ [kg/cm²] de 5 [cm] de espesor, con fin de estabilización uniforme de la estructura para evitar el hundimiento del mismo.

Firme de concreto

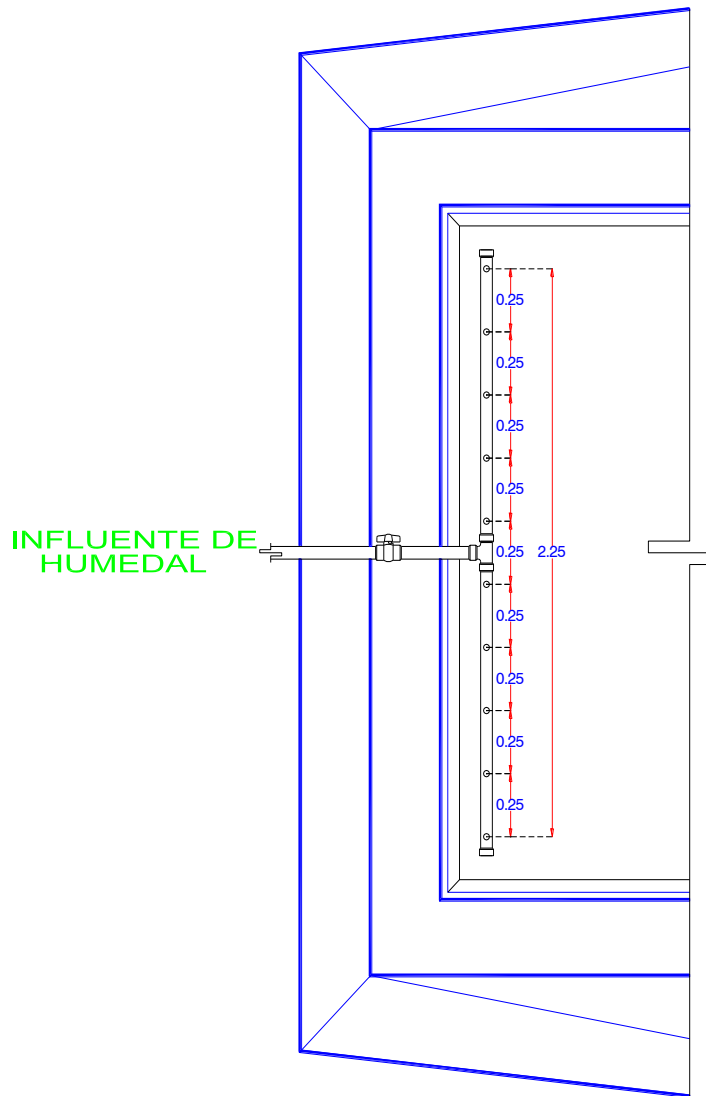
Se le colocará un firme de concreto simple $f'c=100$ [kg/m²] de 10[cm] de espesor, para la base inferior de la estructura.

Entortado

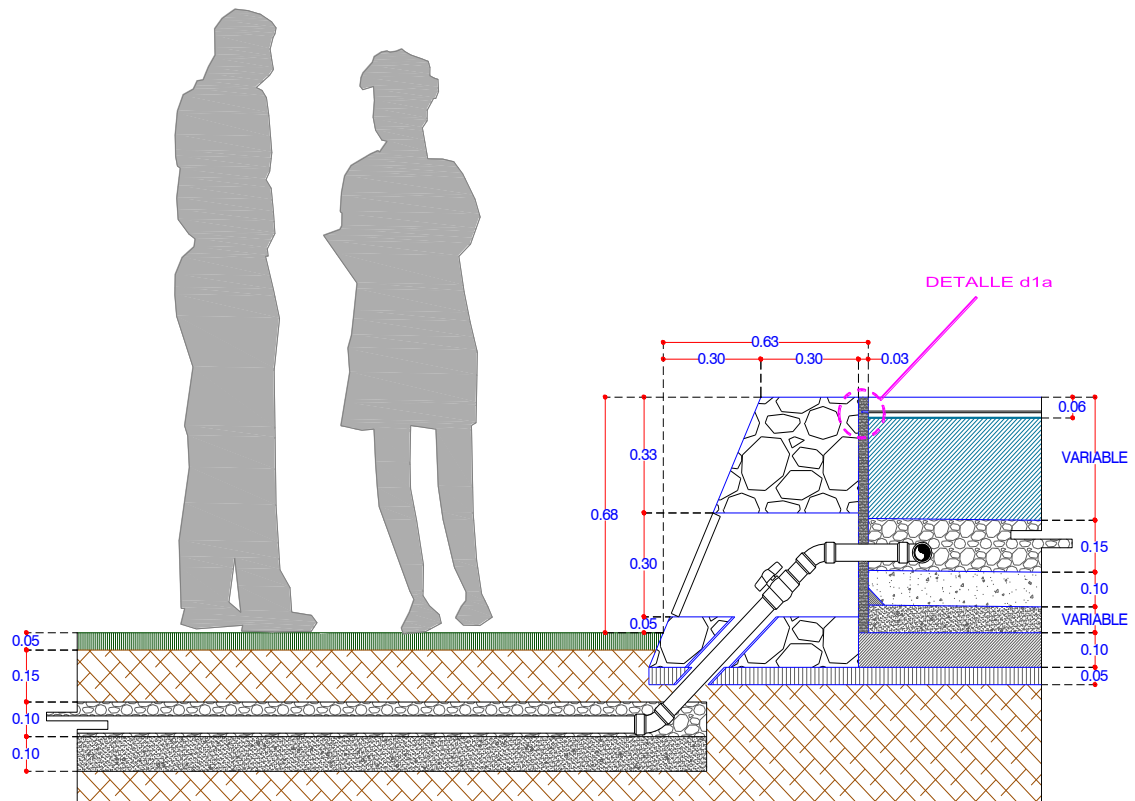
Anticipando un buen funcionamiento se le dará la pendiente del 1%, con un entortado con mortero, cemento-arena, proporción 1:4 de 8 [cm] de espesor.

Dispositivos de entrada

La configuración de la entrada debe promover la uniformidad del flujo a través del canal. Se recomienda una formación "T" (Figura 3-5), ya que permite el ajuste rápido de la distribución del flujo y facilita el pasaje de sólidos asentados. Los hoyos en el tubo deben ser espaciados uniformemente a una distancia aproximadamente del 10% de la anchura de la celda, mismo tamaño y forma, suficientemente grande para prevenir que se tape.



Configuración de entrada con tubo de PVC de 2" de diámetro perforado. Figura 3-5.

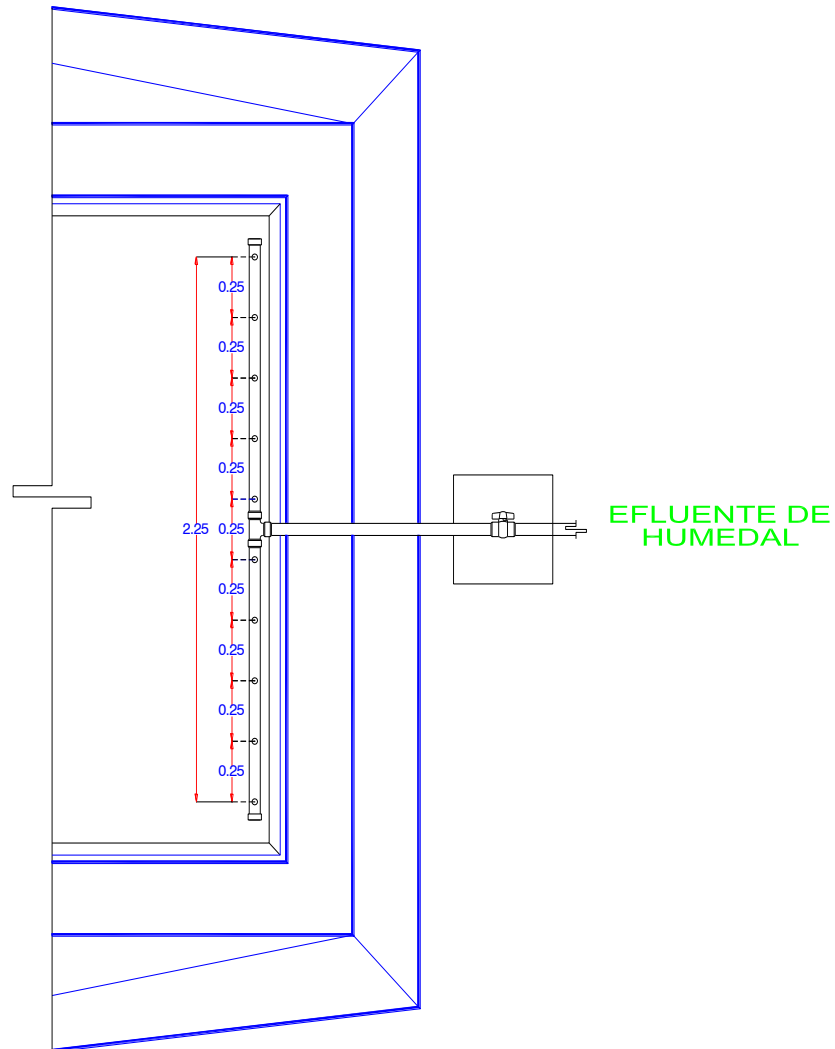


DETALLE d1

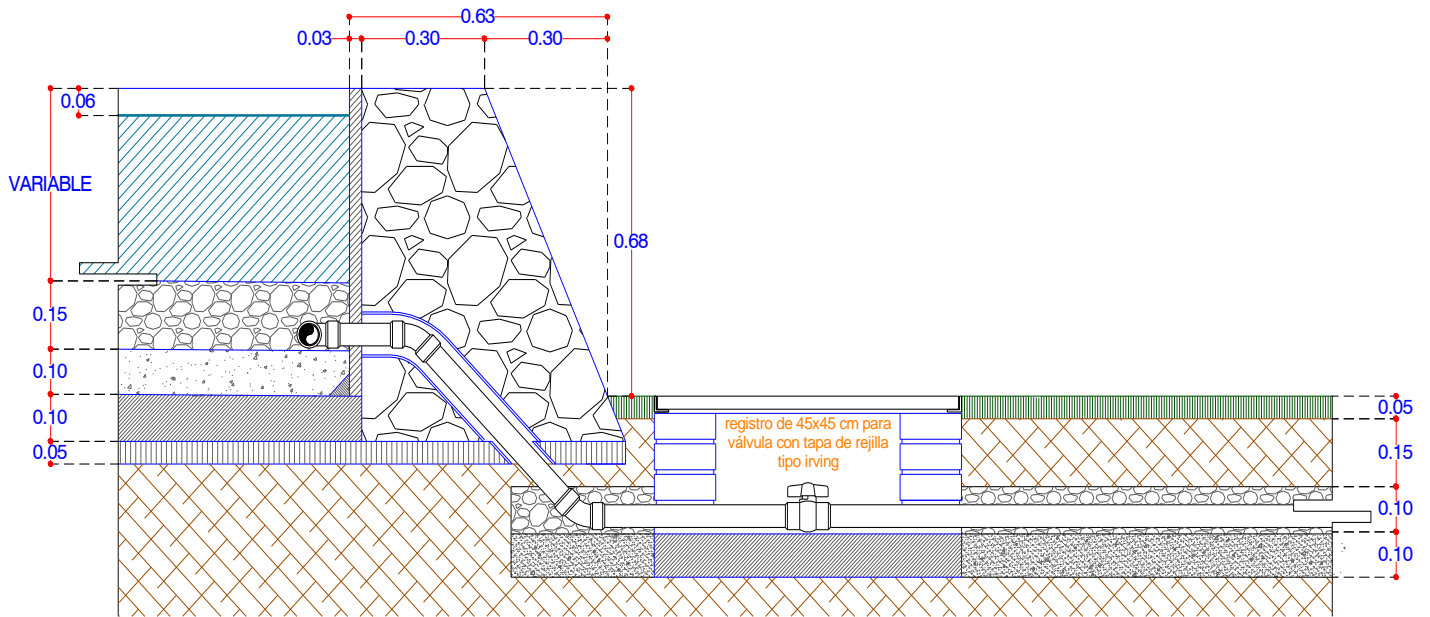
Dibujo detallado en la configuración de entrada del humedal. Figura 3-6.

Dispositivos de salida

Debido a que el efluente del humedal será infiltrado, en el sitio se encuentra un registro al cual se hará una conducción del humedal con tubo de PVC y la toma para la salida será un tubo a lo largo de la celda perforada y por debajo de la capa de grava para garantizar un mejor filtrado. Figura 3-7



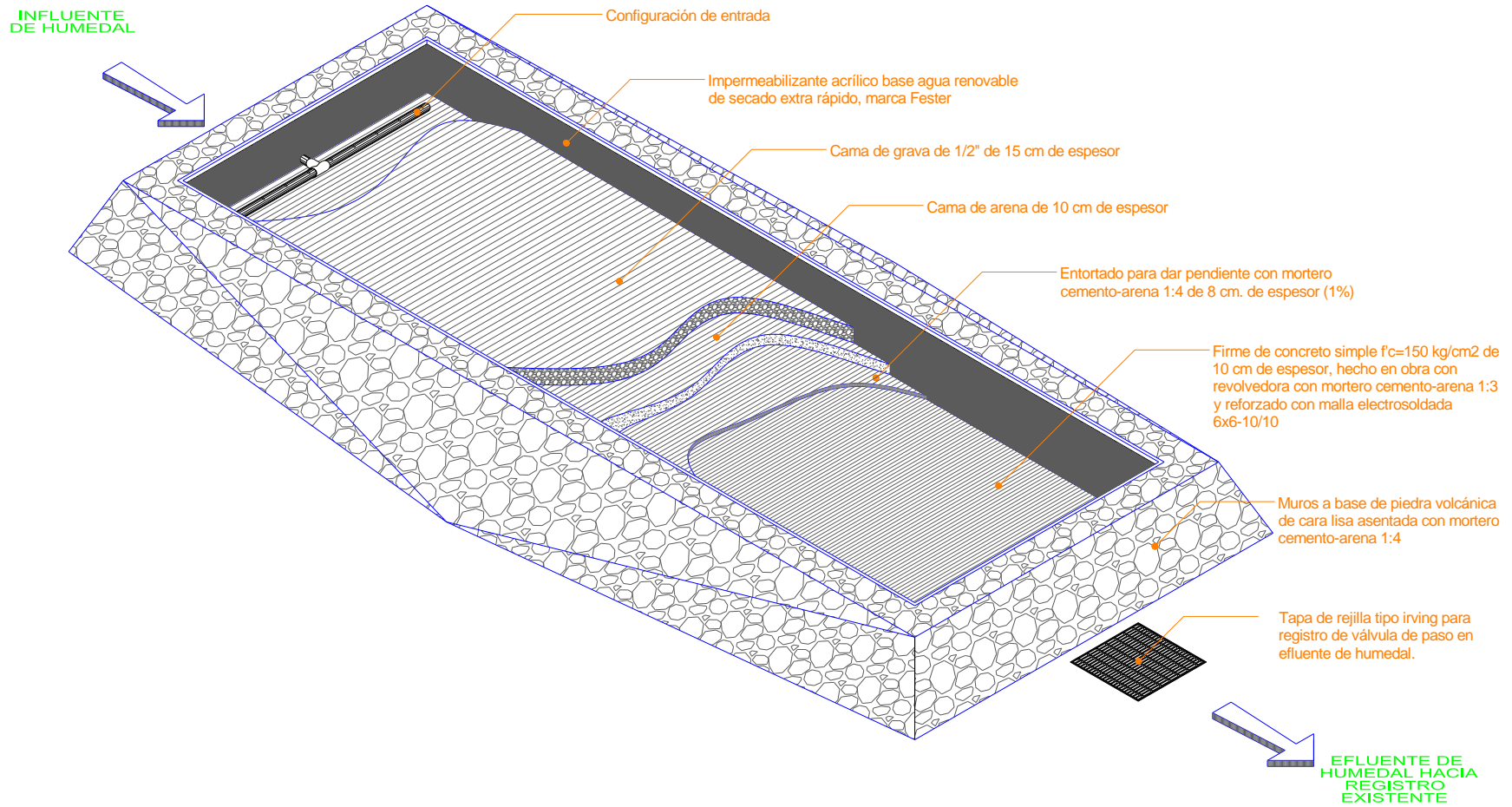
Configuración de salida con tubo de PVC de 2" de diámetro perforado. Figura 3-7.



DETALLE d2

Dibujo detallado en la configuración de salida del humedal. Figura 3-8.

3.4 Propuesta de diseño para humedal artificial subsuperficial.



Microorganismos

La eficiencia del humedal como sistemas de tratamiento está condicionada fundamentalmente por la actividad microbiológica que en ellos se lleva a cabo. Es por esto que, al diseñar y construir un humedal artificial, se toma muy en cuenta la creación de un ambiente propicio para el crecimiento de los microorganismos.

Los protozoos, las bacterias y las algas microscópicas son sólo algunos de los tipos de microorganismos que crecen en el humedal y que se encargan de tratar el agua residual.

Proceso de Remoción Físico

El humedal es capaz de proporcionar una alta remoción de contaminantes asociados con material sedimentable. Esto se debe a que el flujo es muy lento y por lo general laminar, dando suficiente tiempo a los materiales para sedimentar.

La sedimentación en un humedal es considerada un proceso irreversible pero puede ocurrir una re-suspensión del material sedimentado, especialmente cuando se dan períodos de velocidad alta del flujo a causa de turbulencias y cambios bruscos en la dirección del viento.

Proceso de remoción químico

El proceso químico de mayor importancia en los humedales es la absorción, que logra la retención a corto plazo y/o la inmovilización a largo plazo de algunas clases de contaminantes. Se entiende como absorción al proceso de transferencia de las moléculas con cargas positivas o negativas (iones) a partir de la fase líquida a la fase sólida.

Proceso de remoción biológico

El proceso de remoción biológico se basa en el hecho de que los contaminantes son formas de nutrientes esenciales para las plantas. Ejemplo de esto lo constituyen el nitrato y el fosfato que las plantas son capaces de captar fácilmente del humedal.

Capítulo 4.

Operación y conservación del humedal

Aunque los humedales artificiales subsuperficiales son sistemas de fácil operación, requiere de un mantenimiento adecuado. Las siguientes indicaciones fueron proporcionadas por el Instituto de Química de la UNAM, en base a su experiencia en la operación de humedales artificiales subsuperficiales, específicamente en el plantel CCH sur ubicado en Cataratas y Llanura s/n, Jardines del Pedregal, Coyoacán, 04500 Ciudad de México.

- Controlar regularmente el color y olor del efluente del humedal que da información importante acerca de la calidad y el funcionamiento del lecho.
- La detección de turbiedad y/o color grisáceo, indica un insuficiente suministro de oxígeno. La reacción debe ser: El drenaje del efluente debe reducirse con la finalidad de permitir una mayor entrada de oxígeno.
- El mal olor del agua tratadas (como “huevos en descomposición”) indica procesos anaeróbicos y por lo tanto una situación muy crítica. El lecho debe estar en reposo y la recarga debe disminuir o el suministro de oxígeno en el humedal debe ser mejorado (como fue indicado en el punto anterior).
- Efluentes claros pero con color, ligeramente amarillo o marrón, es una situación normal en los tratamientos biológicos, especialmente en humedales (por los ácidos húmicos).
- Inspeccionar en la vegetación de los humedales que no haya “enfermedades”, insectos, etc.
- Se debe prestar atención a las malezas o plantas depredadoras hasta que la vegetación del humedal esté plenamente establecida.

Mantenimiento

Requiere un mínimo de mantenimiento empezando por la recolección periódica de los restos vegetales como varas y hojas muertas, operación que debe practicarse cada quince días en el verano, cada semana en el otoño y una vez al mes en el invierno. De no hacerse lo anterior los sólidos en pudrición podrían contribuir al azolvamiento del mismo. Con lo que respecta a la densidad de las plantas esta será según la especie; para el caso de carrizos (*Phragmites spp.*), se deberán mantener de 8 a 10 plantas/m², para las espadañas o tule (*Typha spp.*), de 10 a 12 plantas, y para los juncos de 8 a 10 plantas/m². La sobrepoblación de plantas puede llevar a que las raíces aprieten el medio y tapen los poros de las piedras.

Por lo que concierne a las tuberías de desfogue para evitar inundaciones deben limpiarse en verano cada semana y en invierno cada quince días de hojas y varas, para evitar que el humedal pudiera inundarse y derramarse.

Capítulo 5

Presupuesto de obra

5.1 Catálogo de conceptos para la realización del humedal artificial

Catálogo de conceptos para la realización de humedal artificial subsuperficial de una celda en el edificio Division de Ingeniería Civil y Geomatica			
Num. de concepto	Concepto	Unidad	Cantidad
1	Trazo y nivelación de terreno. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ²	46.07
2	Excavación por medio manuales, material tipo I, profundidad de 30 cm. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ³	11.9
3	Plantilla de concreto simple f'c=100 [Kg/cm ²] de 5 cm de espesor. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ³	1.09
4	Firme de concreto simple f'c=150 [Kg/cm ²] de 10 [cm] de espesor, hecho en obra con revolveora con mortero cemento-arena 1:3 y reforzado con malla electrosoldada 6x6-10/10. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ³	2.17
5	Entortado para dar pendiente con mortero cemento-arena 1:4 de 8 cm de espesor con pendiente del 1(%). Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ³	2.17
6	Aplanado fino en muros con mortero cemento-arena 1:4, de 3 cm de espesor. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ²	13.02
7	Impermeabilizante acrílico base de agua renovable de secado extra rápido. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ²	34.72
8	Muro a base de piedra volcanica de cara lisa asentada con mortero cemento arena 1:4. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ³	18.84
9	Instalación hidrosanitaria, Incluye válvula de paso de PVC hidraulico de 2" de diametro, Conexión en T de PVC 1/2", Tuberia de PVC de 2" de diametro y mano de obra, herramienta equipo para su correcta ejecución.	LOTE	1
10	Chaflan 5 x 5 cm de concreto f'c=150 [Kg/cm ²]. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	ml	21.52
11	Tapa tipo louver de herrería para registro. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	PZA	1
12	Corte con disco de 6 mm de ancho por 2 cm de profundidad para remate de impermeabilizante. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	ml	21.52
13	Registro de 45 x 45 cm incluye tapa tipo louver de herreria. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su	PZA	1

1.2 Generación de precios unitarios

Los siguientes precios unitarios se calcularán únicamente a costos directos (costos de material más mano de obra más herramienta más equipo) para llegar a un costo indicativo, el cual refleje de una manera real el presupuesto a costo directo necesario para llevar a cabo la construcción del humedal artificial subsuperficial de flujo vertical de una celda, en el edificio de la división de Ingenierías Civil y Geomática. Cabe denotar que está a costo directo debido a que no es un trabajo que realice una empresa particular.

Dependencia: Facultad de Ingeniería (UNAM), Edificio División de Ingeniería Civil y Geomática.				
Obra: Humedal Artificial				
Concepto:				Unidad:
Trazo y nivelación de terreno, por medio manuales, con hilo y manguera de nivel.				m ²
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material				
Calhidra	ton	0.000083	\$1,586.96	\$0.13
Varilla corrugada acero de refuerzo del #3 (3/8") fy=4200 [kg/cm ²]	kg	0.028375	\$11.63	\$0.33
Hilo cáñamo o de plástico presentación de rollo de 300 [m]	pza	0.003125	\$16.00	\$0.05
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$0.51
Mano de Obra				
Albañil	jor	0.011751	\$435.70	\$5.12
Peón 1	jor	0.011743	\$267.39	\$3.14
Cabo de oficios	jor	0.001184	\$574.19	\$0.68
Costo Directo Mano de Obra (C.D.M.O.)=				\$8.94
Herramienta				
Herramienta menor	(%) mo	0.0302	\$8.94	\$0.27
Porcentaje de equipo de seguridad	(%) mo	0.02013	\$8.94	\$0.18
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$0.45
Costo Directo= C.D.Mat+C.D.M.O.+C.D.Eq=				\$9.90

Dependencia: Facultad de Ingeniería, Edificio División de Ingeniería Civil y Geomática.
 Obra: Humedal Artificial

Concepto: Excavación por medio manuales, material tipo I, profundidad de o a 30[cm].
 Unidad: m³

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Mano de Obra				
Ayudante general	jor	0.36359	\$267.39	\$97.22
Cabo de oficios	jor	0.018182	\$574.19	\$10.44
Costo Directo Mano de Obra (C.D.M.O.)=				\$107.66
Herramienta				
Herramienta menor	(%) mo	0.02997	\$117.79	\$3.53
Porcentaje de equipo de seguridad	(%) mo	0.02013	\$117.79	\$2.37
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$5.90
Costo Directo= C.D.M.O.+C.D.Eq=				\$113.56

Dependencia: Facultad de Ingeniería (UNAM), Edificio División de Ingeniería Civil y Geomática.
 Obra: Humedal Artificial

Concepto: Unidad:
 Plantilla de concreto simple $f'c=100[\text{kg}/\text{cm}^2]$ de 5 [cm] de espesor. m^3

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material				
Cemento gris normal	ton	0.013657	\$2,129.31	\$29.08
Arena en camión de 6 [m ³]	m ³	0.027515	\$183.90	\$5.06
Agua potable	m ³	0.012643	\$16.61	\$0.21
Grava de 3/4" (19 mm) en camión de [m ³]	m ³	0.037466	\$183.90	\$6.89
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$41.24
Mano de Obra				
Albañil	jor	0.066583	\$435.70	\$29.01
Peón 1	jor	0.020382	\$267.39	\$5.45
Cabo de oficios	jor	0.006461	\$574.19	\$3.71
Costo Directo Mano de Obra (C.D.M.O.)=				\$38.17
Herramienta				
Herramienta menor	(%) mo	0.03002	\$56.62	\$1.70
Porcentaje de equipo de seguridad	(%) mo	0.02013	\$56.62	\$1.14
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$2.84
Costo Directo= C.D.Mat+C.D.M.O.+C.D.Eq=				\$82.25

Dependencia: Facultad de Ingeniería (UNAM), Edificio División de Ingeniería Civil y Geomática.
 Obra: Humedal Artificial

Concepto: Firme de concreto simple f'c=150[kg/cm²] de 10 cm de espesor. Unidad: m³

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material				
Cemento gris normal	ton	0.029164	\$2,129.31	\$62.10
Arena en camión de 6 [m ³]	m ³	0.04932	\$183.90	\$9.07
Agua potable	m ³	0.035521	\$16.61	\$0.59
Tablón 1 1/2" x 10" x 8 1/4" de madera de pino de segunda	pt	0.028512	\$14.38	\$0.41
Grava de 3/4" (19 mm) en camión de [m ³]	m ³	0.069549	\$183.90	\$12.79
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$84.96
Mano de Obra				
Albañil	jor	0.047625	\$435.70	\$20.75
Peón 1	jor	0.047608	\$267.39	\$12.73
Cabo de oficios	jor	0.004755	\$574.19	\$2.73
Costo Directo Mano de Obra (C.D.M.O.)=				\$36.21
Herramienta				
Herramienta menor	(%) mo	0.0301	\$36.21	\$1.09
Porcentaje de equipo de seguridad	(%) mo	0.01988	\$36.21	\$0.72
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$1.81

Costo Directo= C.D.Mat+C.D.M.O.+C.D.Eq= \$122.98

Dependencia: Facultad de Ingeniería (UNAM), Edificio División de Ingeniería Civil y Geomática.
 Obra: Humedal Artificial

Concepto: Entortado para dar pendiente de 8 [cm] de espesor con pendiente del 1%, a base de mezcla cemento-arena 1:4. Unidad: m³

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material				
Cemento gris normal	ton	0.008857	\$2,129.31	\$18.86
Arena en camión de 6 [m ³]	m ³	0.047308	\$183.90	\$8.70
Agua potable	m ³	0.014449	\$16.61	\$0.24
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$27.80
Mano de Obra				
Albañil	jor	0.056989	\$435.70	\$24.83
Peón 1	jor	0.056995	\$267.39	\$15.24
Cabo de oficios	jor	0.005695	\$574.19	\$3.27
Costo Directo Mano de Obra (C.D.M.O.)=				\$43.34
Herramienta				
Herramienta menor	(%) mo	0.03	\$43.34	\$1.30
Porcentaje de equipo de seguridad	(%) mo	0.02007	\$43.34	\$0.87
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$2.17
Costo Directo= C.D.Mat+C.D.M.O.+C.D.Eq=				\$73.31

Dependencia: Facultad de Ingeniería (UNAM), Edificio División de Ingeniería Civil y Geomática.
 Obra: Humedal Artificial

Concepto: Aplanado fino en muros con mortero cemento-arena 1:4 de 3 [cm] de espesor. Unidad: m²

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material				
Cemento gris normal	ton	0.002268	\$2,129.31	\$4.83
Arena en camión de 6 [m ³]	m ³	0.027515	\$183.90	\$5.06
Agua potable	m ³	0.0258	\$16.61	\$0.43
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$10.32
Mano de Obra				
Ayudante general	jor	0.054508	\$436.45	\$23.79
Cabo de oficios	jor	0.005451	\$574.19	\$3.13
Costo Directo Mano de Obra (C.D.M.O.)=				\$26.92
Herramienta				
Herramienta menor	(%) mo	0.02999	\$43.01	\$1.29
Porcentaje de equipo de seguridad	(%) mo	0.02	\$43.01	\$0.86
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$2.15

Costo Directo= C.D.Mat+C.D.M.O.+C.D.Eq=	\$39.39
--	----------------

Dependencia: Facultad de Ingeniería (UNAM), Edificio División de Ingeniería Civil y Geomática.
 Obra: Humedal Artificial

Concepto:

Unidad:

Impermeabilización a base acitrón impermeable 3 años, incluye preparación suministro y aplicación.

m²

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material				
Acitrón impermeable 3 años en cubeta de 19 lts	cb	0.079004	\$1,206.90	\$95.35
Agua potable	m ³	0.000	\$16.61	\$0.00
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$95.35
Mano de Obra				
Albañil	jor	0.040005	\$435.70	\$17.43
Peón 1	jor	0.040016	\$267.39	\$10.70
Cabo de oficios	jor	0.004006	\$574.19	\$2.30
Costo Directo Mano de Obra (C.D.M.O.)=				\$30.43
Herramienta				
Herramienta menor	(%) mo	0.0299	\$30.43	\$0.91
Porcentaje de equipo de seguridad	(%) mo	0.02005	\$30.43	\$0.61
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$1.52
Costo Directo= C.D.Mat+C.D.M.O.+C.D.Eq=				\$127.30

Dependencia: Facultad de Ingeniería (UNAM), Edificio División de Ingeniería Civil y Geomática.
 Obra: Humedal Artificial

Concepto:

Unidad:

Muro a base de piedra volcánica de cara lisa asentada con mortero cemento arena 1:4, acabado común.

m³

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material				
Piedra braza	m ³	0.66400	\$560.00	\$371.84
Arena en camión de 6 [m ³]	m ³	0.169657	\$183.90	\$31.20
Agua potable	m ³	0.043949	\$16.61	\$0.73
cemento gris normal	ton	0.040788	\$2,129.31	\$86.85
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$490.62
Mano de Obra				
Albañil	jor	0.363645	\$435.70	\$158.44
Ayudante general	jor	0.363624	\$295.25	\$107.36
Cabo de oficios	jor	0.036364	\$574.19	\$20.88
Costo Directo Mano de Obra (C.D.M.O.)=				\$286.68
Herramienta				
Herramienta menor	(%) mo	0.03	\$286.68	\$8.60
Porcentaje de equipo de seguridad	(%) mo	0.01999	\$286.68	\$5.73
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$14.33

Costo Directo= C.D.Mat+C.D.M.O.+C.D.Eq=	\$791.63
--	-----------------

Dependencia: Facultad de Ingeniería (UNAM), Edificio División de Ingeniería Civil y Geomática.

Obra: Humedal Artificial

Concepto:

Unidad:

Chaflan de 5 x 5 [cm] de concreto f'c=150[kg/cm²].

ml

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material				
Cemento gris normal	ton	0.006913	\$2,129.31	\$14.72
Arena en camión de 6 m ³	m ³	0.00745	\$183.90	\$1.37
Agua potable	m ³	0.006002	\$16.00	\$0.10
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$16.19
Mano de Obra				
Albañil	jor	0.035713	\$435.70	\$15.56
Ayudante general	jor	0.035699	\$295.25	\$10.54
Cabo de oficios	jor	0.00357	\$574.19	\$2.05
Costo Directo Mano de Obra (C.D.M.O.)=				\$28.15
Herramienta				
Herramienta menor	(%) mo	0.02984	\$28.15	\$0.84
Porcentaje de equipo de seguridad	(%) mo	0.01989	\$28.15	\$0.56
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$1.40

Costo Directo= C.D.Mat+C.D.M.O.+C.D.Eq=

\$45.74

Dependencia: Facultad de Ingeniería (UNAM), Edificio División de Ingeniería Civil y Geomática.
 Obra: Humedal Artificial

Concepto: Unidad:
 Corte con disco de 6 mm de ancho por 2 cm de profundidad para remate de impermeabilizante. ml

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Material				
Disco de diamante cev 300 30950	pza	0.002501	\$3,039.29	\$7.60
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$7.60
Mano de Obra				
Albañil	jor	0.001675	\$435.70	\$0.73
Peón 1	jor	0.001683	\$267.39	\$0.45
Cabo de oficios	jor	0.000174	\$574.19	\$0.10
Costo Directo Mano de Obra (C.D.M.O.)=				\$1.28
Herramienta				
Herramienta menor	(%) mo	0.03125	\$1.28	\$0.04
Porcentaje de equipo de seguridad	(%) mo	0.02344	\$1.28	\$0.03
Costo Directo Materiales (C.D.Mat.)=				\$0.07

Costo Directo= C.D.Mat+C.D.M.O.+C.D.Eq=	\$8.95
--	---------------

5.3 Presupuesto

Num. de concepto	Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	IMPORTE
1	Trazo y nivelación de terreno. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ²	46.07	\$9.90	\$456.09
2	Excavación por medio manuales, material tipo I, profundidad de 30 cm. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ³	11.9	\$113.56	\$1,349.77
3	Plantilla de concreto simple f'c=100 Kg/cm2 de 5 cm de espesor. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ³	1.09	\$82.25	\$89.24
4	Firme de concreto simple f'c=150 kg/cm2 de 10 cm de espesor, hecho en obra con revolveora con mortero cemento-arena 1:3 y reforzado con malla electrosoldada 6x6-10/10. Incluye material,	m ³	2.17	\$122.98	\$266.87
5	Entortado para dar pendiente con mortero cemento-arena 1:4 de 8 cm de espesor con pendiente del 1(%). Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ³	2.17	\$73.31	\$159.08
6	Aplanado fino en muros con mortero cemento-arena 1:4, de 3 cm de espesor. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ²	13.02	\$39.39	\$512.86
7	Impermeabilizante acrílico base de agua renovable de secado extra rápido, marca Fester. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ²	34.72	\$127.30	\$4,419.86
8	Muro a base de piedra volcanica de cara lisa asentada con mortero cemento arena 1:4. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	m ³	18.84	\$791.63	\$14,918.11
9	Instalación hidrosanitaria, Incluye válvula de paso de PVC hidraulico de 2" de diametro, Conexión en T de PVC 1/2", Tuberia de PVC de 2" de diametro y mano de obra, herramienta	LOTE	1	\$5,500.00	\$5,500.00
10	Chaflan 5 x 5 cm de concreto f'c=150 kg/cm2. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	ml	21.52	\$45.74	\$984.32
11	Tapa tipo louver de herrería para registro. Incluye material,	PZA	1	\$790.00	\$790.00
12	Corte con disco de 6 mm de ancho por 2 cm de profundidad para remate de impermeabilizante. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su correcta ejecución.	ml	21.52	\$8.95	\$192.60
13	Registro de 45 x 45 cm incluye tapa tipo louver de herreria. Incluye material, mano de obra, herramienta y equipo para su	PZA	1	\$1,950.00	\$1,950.00
				PRESUPUESTO TOTAL=	\$31,588.81

Referencias.

- Wissing & Hofmann. Tratamiento de aguas residuales usando plantas .Stuttgar:Ulmer. 2002.
- Geller, G. & Höner, G. Manual de usuario para la construcción de humedales. Heidelberg, Alemania. 2003.
- Luna Pabello, V.M. Dúran de Bazúa, C. Ramírez Carrillo, H.F., Fenoglio Limón, F.E. & Sánchez García. Los humedales artificiales una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Facultad de Química, UNAM, Programa de Ingeniería química ambiental, México D.F. 1997.
- Kadlec & Wallace, Treatment Wetlands 2da Edición. Boca Ratón, FI, USA. 2009.
- García J, Ruiz A, Junqueras X, Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales construidos, en Tecnología del agua No.165, Junio de 1997.
- Martínez M. Depuración de aguas con plantas emergentes. 1989
- Diario Oficial de la Federación (<http://dof.gob.mx/>)
- Jaime Andrés Lara Borrero, Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental. Depuración de aguas residuales Municipales con Humedales Artificiales.
- EPA. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial. Washington, D.C. Septiembre de 2000
- EPA. Guide to septage treatment systems manual. Cincinnati, U.S. 1994.
- EPA. División de manejo de aguas rama de instalaciones municipales sección técnica. Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales.
- Biol. Irma Gonzales López, Ing. Jesús García Ollervides. Estimación de la capacidad de carga en humedales. CONAGUA, Noviembre 2008.
- Karen Setty. Manual de construcción. Humedales construidos para el tratamiento de aguas negras, bren school of environmental science and Management, University of California, Santa Barbara. 2000

- Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol. 15 N° 17. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en el UNMSM. 2006.
- Calidad del aire (df.gob.mx) temperatura del agua en ambiente.
- Tesis de licenciatura, Pedro Fabián Lazcano Navarro. Tratamiento del agua residual generada en un edificio mediante contactores biológicos rotatorios. 2013.
- Tesis de Maestría, Luis Antonio Mata Amaro. Empleo de biodiscos en el tratamiento de aguas residuales generadas en un edificio de aguas residuales. 2013.

Mesografía.

- <http://sedaqua.com/los-humedales/tipos/>, Septiembre 2013
- http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2003_07_10_mtb_cs_00_024.pdf, Septiembre 2013.
- <http://www.alianzaporelagua.org/Compendio/tecnologias/t/t7.html>, Septiembre 2013.
- <https://sites.google.com/site/humedalesartificiales/7-diseno-hidraulico>, Septiembre 2013.

