



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



Facultad de Ingeniería

*“Análisis de las ecuaciones de diseño de humedales
artificiales”*

TESIS

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE

Ingeniero Mecánico

PRESENTA

Marcos Manuel González Zazueta

TUTOR: Dra. Rina Guadalupe Aguirre Saldivar

2012

Agradecimientos

A quienes con su sacrificio, comprensión y amor hicieron este trabajo, posible.... mis padres.

A la memoria de Margarita Bañales.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de formarme como profesionalista.

Al Señor Daniel Medina y la M.I. Alejandra Medina por permitirme ayudar en la construcción del humedal.

A los sinodales, especialmente a la Dra. Rina Aguirre Saldivar por su paciencia y conocimientos.

Análisis de las ecuaciones de diseño de humedales artificiales

Contenido

	pág.
Índice de tablas y figuras	4
Simbología	5
Capítulo 1 Introducción	6
1.1 Objetivo	7
1.2 Alcances y limitaciones	7
Capítulo 2 Contaminación y tratamiento del agua	9
2.1 Contaminación del agua	9
2.1.1 Características del agua residual	11
2.1.2 Medición de contaminantes	12
2.2 Tratamiento de aguas residuales	13
2.2.1 Tratamiento primario	13
2.2.2 Tratamiento secundario	14
Capítulo 3 Humedales artificiales	18
3.1 Clasificación	20
3.2 Características	23
3.2.1 Componentes	23
3.2.2 Construcción	25
3.2.3 Mantenimiento	27
3.2.4 Ventajas y desventajas	29
3.3 Análisis de las ecuaciones de diseño	30
3.3.1 Ecuación de conservación de masa	30
3.3.2 Ecuación de conservación de cantidad de movimiento	32
3.3.3 Ecuación de conservación de energía	35
3.3.4 Ecuaciones de diseño	35
Capítulo 4 Caso práctico	39
4.1 Parámetros de diseño	40
4.1.1 Cálculos	44
4.2 Construcción y mantenimiento	46
4.3 Costos	47
4.4 Análisis de parámetros	48
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones	51
Mesografía	53

Anexos

- | | | |
|----|---|----|
| 1. | Normales climatológicas 1971-2000 de Yautepec, Morelos | 58 |
| 2. | Caracterización de $DBO_{5,20}$ del agua gris del caso práctico | 59 |

Índice de tablas y figuras

	pág.
<i>Tablas</i>	
2.1 Límites máximos permisibles de contaminantes	13
3.1 Procesos de remoción de contaminantes	20
3.2 Comparación entre HAFSL y HAFSS	22
3.3 Características típicas medios porosos	37
3.4 Penetración de las raíces	37
4.1 Temperaturas estimadas del agua residual	41
4.2 Características del papiro y platanillo	43
4.3 Parámetros de diseño	44
4.4 Costos del humedal	47
<i>Figuras</i>	
2.1 Proceso de lodos activados	15
2.2 Laguna de estabilización	16
2.3 Esquema de un filtro percolador	16
2.4 Funcionamiento de los discos biológicos	17
2.5 Humedal artificial	17
3.1 Humedal de flujo libre superficial	21
3.2 Humedal de flujo subsuperficial	21
3.3 Humedal de flujo subsuperficial vertical	23
3.4 Vegetación en HAFSS	24
3.5 Medio poroso (tezontle)	25
3.6 Recubrimiento plástico	26
3.7 Alimentación "T" para humedales HAFH	27
3.8 Control de profundidad en el humedal	27
3.9 Poda de vegetación seca	29
3.10 Volumen del poro en un medio granular	33
3.11 Geometría de un HAFS	36
4.1 Ubicación geográfica de Amatlán, Morelos	39
4.2 Ubicación del domicilio	40
4.3 Estimación de la temperatura del agua residual	41
4.4 Obtención de DBO ₅	42
4.5 Carrizo y alcatraz	43
4.6 Ubicación del humedal en el domicilio	44
4.7 Sección transversal del humedal	45
4.8 Tubería de distribución	46
4.9 Humedal construido	47
4.10 Conductividad hidráulica	49

Simbología

A_S : Área superficial, m^2

A_t : Área transversal, m^2

C : Concentración de contaminante, mg/l

C_e : Concentración de contaminante en el efluente, mg/l

C_o : Concentración de contaminante en el afluente, mg/l

d : día

d_p : Diámetro de grano, m

ET : Evapotranspiración, mm

e : Energía, J

f_H : fuentes o sumideros de la propiedad H

g : Gravedad, m/s^2

H : Propiedad intrínseca

J : Coeficiente de difusividad cm^2/s

k : Permeabilidad, m^2

K : Conductividad hidráulica, m/d

k_T : Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d^{-1}

L : Longitud del humedal, m

L_\emptyset : Longitud característica del volumen del poro, m

m : Pendiente, %

μ : Coeficiente de viscosidad, $kg/s \cdot m$

\mathbf{n} : Vector normal a la superficie

n : Porosidad, %

P : Precipitación, mm

p : presión, mmH_2O

ρ : densidad, kg/m^3

Q : Caudal, $m^3/día$

\dot{r} : Reacciones químicas

S : Superficie, m^2

S_\emptyset : Superficie interna del volumen del poro, m^2

S_{ext} : Superficie externa del volumen del poro, m^2

s : Gradiente hidráulico, m/m

t : Tiempo de retención, $días$

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}$: Componentes cortantes del tensor de esfuerzos

u : Energía interna, J

V : Volumen, m^3

V_\emptyset : Volumen del poro, m^3

v_x : Velocidad en dirección x , m/s

v_y : Velocidad en dirección y , m/s

v_z : Velocidad en dirección z , m/s

W : Ancho del humedal, m

y : Profundidad del humedal,

Capítulo 1

Introducción

El agua es una de las sustancias más importantes de la naturaleza. Constituye la base para la formación y supervivencia de los seres vivos, conforma el hábitat de microorganismos y grandes ecosistemas; es el medio que permite la ionización de elementos y disuelve minerales. Además, el ser humano utiliza el agua en actividades de desarrollo económico y social por lo que su contaminación e inadecuado manejo son una preocupación cada vez mayor.

La contaminación del agua es un problema que se incrementa con el avance tecnológico y el crecimiento poblacional; ya que se produce en gran medida por las actividades humanas: industriales, agrícolas y domésticas. De 1950 a la fecha, la población en México creció de 26 a 110 millones de personas y con ella la producción de bienes y servicios, aumentando notablemente el problema de las descargas de agua residual (INEGI, 2010).

Los sistemas de tratamiento de agua surgen cuando la concentración de contaminantes es muy elevada o los contaminantes son altamente tóxicos; no alcanzan a diluirse en el sitio de descarga o no pueden ser degradados naturalmente. Las descargas en México ascienden a 242,000 l/s de los cuales sólo se trata el 35% y el resto llega a ríos, lagunas, lagos y zonas costeras (SEMARNAT, 2011). Por este motivo es necesario implementar alternativas de tratamiento viables, técnica y económicamente, y que además cumplan con las disposiciones legales en materia de descargas de agua residual.

Además de los métodos convencionales de tratamiento (como sedimentación, filtración, lodos activados y filtros biológicos, entre otros), se pueden utilizar sistemas más sencillos y económicos que reduzcan los contaminantes más comunes presentes en las aguas residuales. Entre estas alternativas se encuentran los humedales artificiales, que consisten en utilizar la capacidad de algunos tipos de vegetación para absorber, almacenar o estabilizar los contaminantes del agua.

Los humedales artificiales (HA) se emplean principalmente para tratar materia orgánica, pero también pueden remover metales pesados y fósforo. Esta forma de descontaminación es efectiva, no intrusiva y de bajo costo.

Los HA fueron desarrollados a partir de reproducir el funcionamiento de humedales naturales (como pantanos, marismas y manglares), donde plantas acuáticas obtienen de la materia orgánica presente los nutrientes que necesitan (Brix y Arias, 2005). Se han empleado en la depuración de aguas residuales de origen agropecuario y también domiciliarias de comunidades pequeñas donde no se cuenta con sistema de drenaje. El interés de utilizar estos sistemas radica en que son considerablemente más económicos

que los sistemas convencionales de tratamiento. En México es oportuna la implementación de estos sistemas debido a que en más del 50% de las comunidades rurales, con menos de 2500 habitantes, no se cuenta con sistemas de tratamiento de agua residual (SEMARNAT, 2011).

En el presente trabajo se analizan las ecuaciones de diseño y el funcionamiento de un humedal artificial para tratar aguas grises, construido en un domicilio particular en Amatlán, Morelos, con el propósito de entender cabalmente el funcionamiento del sistema e identificar los factores que podrían modificarse para mejorarlo.

1.1 Objetivo

El objetivo del presente trabajo es identificar los factores prioritarios dentro del funcionamiento y construcción de los humedales artificiales mediante el análisis de las ecuaciones de diseño de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales.

1.2 Alcances y limitaciones

El objetivo planteado en este trabajo se cumplió bajo los siguientes alcances y limitaciones:

- Para este estudio se diseñó y construyó un humedal artificial para tratar aguas grises domésticas. Esto para familiarizarse con las ecuaciones de diseño y adquirir experiencia sobre la operación de estos sistemas.
- Sólo ingresan aguas grises al humedal debido a que en el domicilio seleccionado existen instalaciones hidráulicas separadas y las descargas de los inodoros se vierten a una fosa séptica.
- Se visitó el sitio de construcción para conocer las instalaciones de drenaje y los posibles emplazamientos del humedal.
- Se realizó el presupuesto de los costos de construcción para determinar la viabilidad del proyecto.
- Se compararon, a nivel bibliográfico, las características de los materiales porosos disponibles en la zona, con el fin de seleccionar el más adecuado.
- Se analizaron las ventajas de emplear *papiro*, *alcatraz* y *platanillo* como vegetación del humedal, ya que los propietarios del mismo seleccionaron estas plantas por existir en la zona y por su valor estético.
- Se caracterizó el agua residual mediante la determinación de materia orgánica presente. Sólo se tomaron tres muestras y se determinó la DBO_5 en el influente.
- Para dimensionar el humedal se emplearon las ecuaciones de diseño proporcionadas en la literatura especializada.

- Se revisaron artículos disponibles de internet para conocer el *estado del arte* en la construcción de humedales; principalmente en cuanto a la pendiente del humedal y especies vegetales utilizadas.
- Los costos del humedal construido son solo estimados, ya que su propietario lo construyó y la mayoría de los materiales empleados ya se tenían.
- Se analizaron las ecuaciones de conservación de mecánica de fluidos para entender las consideraciones incluidas en las ecuaciones de diseño y sus implicaciones sobre el funcionamiento de un humedal de flujo subsuperficial horizontal.
- No se incluyen modificaciones al humedal construido, ya que aún se encuentra en fase de *aclimatación* y no es conveniente alterar el desarrollo de la vegetación.

Para la presentación de este trabajo se le ha dividido en cinco capítulos. El primero motivo de esta introducción, donde se abordó, de manera general, el problema de contaminación del agua y la utilización de HA como alternativa de tratamiento. En el capítulo dos se presenta una compilación de los conceptos más importantes acerca de contaminación de agua y los diferentes tratamientos para eliminarla.

El capítulo tres describe las características de los humedales artificiales y en él se analizan las ecuaciones de diseño; mientras que, en el capítulo cuatro, se presenta el diseño de un HA y se determinan los posibles factores a modificar para mejorar su funcionamiento y también se presenta una estimación de costos para determinar su viabilidad como sistema de tratamiento de agua.

Finalmente, el capítulo cinco presenta las conclusiones del trabajo y algunas recomendaciones para futuros estudios.

Capítulo 2

Contaminación y tratamiento del agua

El creciente problema de la contaminación del agua ha provocado una disminución en su disponibilidad. Su deterioro implica diversas repercusiones para el equilibrio ecológico y la salud humana. Esta situación ha llevado a gobiernos de varios países a realizar acciones diversas para el tratamiento de agua, desarrollando diferentes alternativas y propuestas para reducir los problemas de contaminación del agua entre las que destacan las alternativas de bajo costo. Situación por la que surgen los humedales artificiales.

Previo a presentar el caso práctico, es importante presentar los cuatro temas principales que influyen en el desarrollo de este trabajo: contaminación del agua, tratamiento de aguas residuales, humedales artificiales y análisis de sus ecuaciones de diseño. En este capítulo se presentan los dos primeros temas.

2.1 Contaminación del agua

La contaminación del agua es la modificación de su composición o estado mediante la intrusión de sustancias, materia, energía térmica o radiaciones ionizantes que disminuyen su calidad y afectan la salud humana (SEMARNAT, 2012). La calidad del agua puede definirse como la aptitud de ésta para ser utilizada en beneficio de los seres humanos o de ecosistemas.

El agua residual presenta varios tipos de contaminantes que se describen a continuación (Metcalf y Eddy, 2005):

Contaminantes físicos: Se presentan cuando se adicionan partículas, sustancias y calor al agua. Los principales contaminantes físicos son:

Temperatura: El agua en algunos usos se ve sometida a procesos donde se adiciona calor y en consecuencia se incrementa la temperatura al final del proceso. El agua descargada al poseer energía adicional puede producir desequilibrio en el medio donde es liberada principalmente en reacciones químicas que influyen en la vida acuática.

Turbiedad: Es la concentración de partículas suspendidas y sustancias que modifican la transmisibilidad de luz del agua.

Olor: Es producto de gases de la descomposición de partículas y sustancias orgánicas presentes en el agua residual, se generan por el metabolismo anaerobio de algunos microorganismos.

Color: Es una característica que permite la identificación de partículas suspendidas, la presencia y nivel de descomposición de algunas sustancias presentes en el agua.

Densidad: Se define como la cantidad de masa por unidad de volumen y es una característica que se ve modificada por este tipo de contaminantes, es de suma importancia porque permite predecir la formación de sedimentos durante el tratamiento de agua.

Contaminantes químicos: Son sustancias que se encuentran suspendidas o disueltas en el agua residual que se pueden dividir en dos grupos: compuestos orgánicos y compuestos inorgánicos.

Compuestos inorgánicos: Están constituidos por elementos no metálicos y elementos metálicos, estos contaminantes provienen de descargas de origen doméstico e industrial. La presencia de este tipo de materia se ve reflejada en los siguientes parámetros:

Nutrientes: Son bioestimulantes necesarios para el crecimiento y desarrollo de microorganismos y seres vivos en general, constituyen la base para la síntesis de proteínas. Los nutrientes más comunes presentes en el agua contaminada son el nitrógeno y el fósforo, el exceso de estas sustancias en un medio natural producen un fenómeno denominado eutroficación.

Acidez y alcalinidad: Los contaminantes químicos promueven la presencia de hidróxidos, calcio y magnesio. El agua residual doméstica es generalmente alcalina por lo que su concentración es de suma importancia en procesos de tratamiento secundario.

Metales pesados: Son sustancias que generan alta toxicidad en el agua, estas sustancias provienen en su mayoría de industrias de manufactura. Los metales presentes en el agua contaminada más comunes son el cadmio, cromo, cobre y hierro.

Compuestos orgánicos: Están compuestos principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno. La cantidad de estos se mide por medio del oxígeno disuelto en el agua contaminada. La materia orgánica presente en el agua contaminada se compone de proteínas, carbohidratos, grasas y aceites.

Grasas y aceites: Son sustancias sólidas o líquidas que son insolubles en agua, poseen moléculas largas de ésteres de alcohol y glicéridos con ácidos grasos. Estas sustancias pueden interferir en procesos biológicos en las superficies de sistemas de tratamiento así como en la superficie del agua.

Contaminantes biológicos: Son causa de la presencia de organismos patógenos, no obstante también existen microorganismos que promueven la estabilización y descomposición de materia orgánica en el tratamiento de agua.

Organismos patógenos: Proviene de excreciones de los seres vivos y están compuestos por bacterias, protozoarios, virus y helmintos (gusanos). Del grupo de las bacterias destaca un subgrupo denominado coliformes y junto con los protozoarios son los principales causantes de decesos por enfermedades gastrointestinales.

Organismos estabilizadores: Con las condiciones de temperatura, humedad y alimento adecuados se desarrollan microorganismos. En el tratamiento de agua se utilizan diferentes tipos de bacterias cuya función es oxidar partículas ya sea orgánicas o inorgánicas presentes en el agua contaminada para producir biomasa con una composición química simplificada. Su metabolismo puede ser aerobio o anaerobio.

2.1.1 Características del agua residual

De acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, el agua residual es aquella proveniente del sistema de abastecimiento y que es utilizada en una gran variedad de actividades humanas tras cumplir su propósito es descargada a algún cuerpo receptor. A su vez es la mezcla de desperdicios líquidos y sólidos presentes en el agua de abastecimiento mezclados con la precipitación pluvial que se pueda presentar. Dependiendo de su origen el agua residual se puede clasificar de la siguiente manera (Metcalf y Eddy, 2005):

Industrial: Son aguas residuales que se producen durante procesos industriales. Poseen características específicas con base en el tipo de industria.

Agrícola: Las actividades agrícolas producen aguas residuales que contienen insecticidas, plaguicidas, sales inorgánicas, minerales, desechos animales, fertilizantes, entre otras sustancias.

Doméstica: Es el agua residual cuyo propósito son fines higiénicos por lo que su composición es principalmente materia orgánica. Ésta es descargada de las instalaciones hidráulicas de un domicilio y con base en el tipo de materia orgánica que poseen se clasifican en aguas grises y aguas negras.

Aguas grises: Es el agua residual de uso doméstico que no contiene desechos humanos, el tratamiento y reutilización del agua gris es factible mediante la implementación de los sistemas de tratamiento apropiados (INE, 2009). Estas descargas provienen del baño, lavadora y cocina y entre los contaminantes que presentan se encuentran detergentes, champú, pasta de dientes, contaminación fecal con virus y bacterias asociados por lavado del cuerpo y ropa, partículas de alimentos, aceites y grasas representando el 80% de las descargas de aguas residuales domésticas (NEERI, 2007). Por el diseño, en el caso práctico se trata este tipo de agua residual.

Aguas negras: Son un tipo de agua que está contaminada con sustancias fecales y orina, proceden de desechos orgánicos humanos o animales. Estas aguas son negras por el color que habitualmente tienen debido a la oxidación que se lleva a cabo.

2.1.2 Medición de contaminantes

Para conocer la concentración de contaminantes presentes en el agua residual es necesario establecer parámetros que permitan cuantificar el nivel de materia orgánica e inorgánica presente en el agua residual. Además de conocer el nivel de contaminación del agua, estos parámetros permiten establecer referencias para el funcionamiento de las plantas de tratamiento (Metcalf y Eddy, 2005). A continuación se mencionan los parámetros más comunes.

Sólidos: Es un estado en el que se presentan los contaminantes de materiales orgánicos e inorgánicos. En general se presentan de manera disuelta y suspendida.

Demanda Bioquímica de Oxígeno: Es el parámetro más común para medir contaminación por materia orgánica. La prueba de DBO se realiza en 5 días y consiste en medir la cantidad de oxígeno disuelto que es necesario para que microorganismos puedan llevar a cabo su metabolismo y oxidar materia orgánica. Se expresa en miligramos por litro, este parámetro será la referencia principal para determinar la eficiencia del caso de estudio.

Oxígeno Disuelto: Es la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos aerobios puedan llevar a cabo su metabolismo. Su concentración depende de la temperatura y la salinidad del agua.

Nitrógeno: Es un nutriente que debido a su afinidad con el oxígeno y el hidrógeno se puede presentar en amonio, nitrito y nitrato. Este contaminante proviene principalmente de la urea y materia proteínica, así como el nitrógeno presente en la atmósfera.

Fósforo: Constituye un elemento para el desarrollo de algas nocivas en la superficie del agua, se clasifican en ortofosfatos, fosfitos y fosfato orgánico.

Cloruros: Son un componente contenido en aguas domiciliarias, industriales y agrícolas, este componente se encuentra principalmente en aguas negras y determina el uso final del agua tratada.

Microorganismos indicadores: Son microorganismos que se utilizan como referencia para medir la presencia de bacterias patógenas, protozoarios y virus en el agua residual. Estos microorganismos están presentes en residuos fecales generados en el intestino de seres vivos (coliformes y colífagos) y presentan características de resistencia similares a la de organismos patógenos; se miden en NMP/100ml (Numero más probable por 100ml).

El abastecimiento de agua con calidad adecuada es imprescindible para evitar daños al medio ambiente y a su vez a la salud humana, por lo que es necesario establecer límites en cuanto a las características del agua tratada.

En México, en materia de control de contaminación y uso del agua se encuentran las normas de la SEMARNAT: NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997 así como legislaciones locales establecidas por el artículo 115 de la Constitución Política Mexicana. Para esta tesis la norma pertinente es la NOM-003-SEMARNAT-1997 debido a que presenta el límite permisible para agua de riego (30 mg/l en DBO₅) para lo que será utilizada en el caso práctico (ver tabla 2.1).

Tabla 2.1 Límites máximos permisibles de contaminantes

Tipo de reuso (Servicios al público)	Promedio mensual				
	Coliformes Fecales [NMP/100ml]	Huevos de helminto [h/l]	Grasas y aceites [mg/l]	DBO ₅ [mg/l]	SST [mg/l]
con contacto directo	240	≤ 1	15	20	20
con contacto indirecto u ocasional	1000	≤ 5	15	30	30

Fuente: (SEMARNAT, 1997)

Con el fin de que las aguas residuales cumplan con la normatividad establecida se aplican diversos tipos de tratamiento que se describen en el siguiente punto.

2.2 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de agua residual es una serie de procesos que tiene como objetivo remover los diferentes tipos de contaminantes presentes. Estos procesos se clasifican con base en el orden en el que son efectuados; Inicialmente se encuentra el tratamiento primario posteriormente se realiza el tratamiento secundario y finalmente el tratamiento terciario. Este último consiste en desinfectar el agua que pasó por los procesos previos; sin embargo, para la presente tesis este tratamiento es irrelevante debido a que se requiere agua tratada con una calidad aceptable en términos de DBO₅. A continuación se describen el tratamiento primario y secundario.

2.2.1 Tratamiento primario

El tratamiento primario consiste la reducción de sólidos en suspensión, objetos flotantes, aceites y grasas o adición de sustancias químicas para que el agua residual presente condiciones adecuadas para el ingreso a la siguiente etapa. Dependiendo de las características iniciales del afluente, se llevan a cabo uno o varios de los siguientes procesos (Ramalho, 1999):

Cribado: Consiste el uso de rejillas metálicas para la remoción de sólidos suspendidos que dependiendo de su tamaño son clasificados en finos y gruesos. Las rejillas para sólidos gruesos tienen un espaciamiento alrededor de 10cm y para finos el espaciamiento es hasta de 5mm. Las rejillas se limpian de manera manual o mecánica y la materia recolectada es depositada en vertederos o se tratan en procesos anaerobios.

Sedimentación: Es el proceso en el cual se separan sólidos en suspensión mediante la diferencia de peso específico entre la partícula contaminante y el líquido donde se encuentra. Este proceso se lleva a cabo en un tanque con un depósito en la parte inferior para retirar la materia sedimentada. Dependiendo de los tipos de sólidos suspendidos se pueden realizar dos tipos de sedimentación, el primero es el desarenador para remover arena o partículas parecidas, el segundo es el sedimentador primario donde se remueven sólidos orgánicos del afluente. Se puede presentar un tercer tipo de sedimentación (secundaria) donde se remueven partículas después de un tratamiento biológico.

Flotación: Es un proceso para separar partículas de baja densidad, grasas y aceites. Se puede utilizar una trampa de grasas o un tanque de flotación, en este último la separación se realiza en un tanque donde se satura de aire por medio de burbujas al agua residual y se eleva la presión, posteriormente se despresuriza esta mezcla mediante una válvula reductora que conduce al agua a otro depósito. En esta etapa se elevan las burbujas de aire llevando con ellas a la superficie las partículas contaminantes de baja densidad. Las partículas flotantes se pueden retirar con procesos mecánicos.

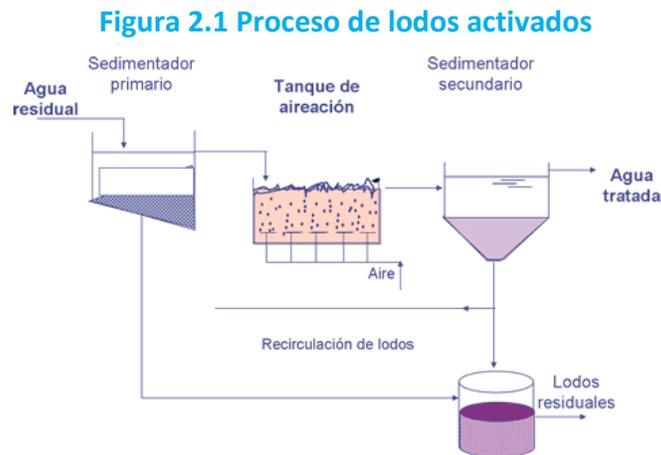
Neutralización: El propósito de este proceso es homogenizar algunas características químicas del agua residual tales como pH o DBO₅ con el fin de que se presenten condiciones adecuadas en el efluente para su tratamiento biológico. La neutralización se lleva a cabo mediante la mezcla de caudales o con ayuda de sustancias químicas.

2.2.2 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario constituye una serie de procesos biológicos tanto aerobios (con oxígeno) como anaerobios (sin oxígeno) que utilizan microorganismos para llevar a cabo la remoción de materia orgánica ya sea coloidal o disuelta, así como la eliminación de compuestos que contienen nitrógeno y fósforo (Ramalho, 1999). A continuación se describen los más importantes:

Lodos activados: Es un proceso que consiste en introducir aire a cualquier agua residual durante un cierto periodo de tiempo, con el propósito de reducir la materia orgánica presente, en el proceso se genera lodo en forma de flóculos que contienen comunidades bacterianas; los microorganismos se encuentran en suspensión junto con la materia orgánica en el agua residual.

Es importante indicar que la mezcla o agitación se efectúa por medios mecánicos como aireadores superficiales, turbinas, entre otros, los cuales tienen dos funciones: la primera es producir mezcla completa y la segunda es agregar oxígeno al medio para que el proceso se desarrolle (Sánchez, 2005). La figura 1.1 presenta el proceso de lodos activados.



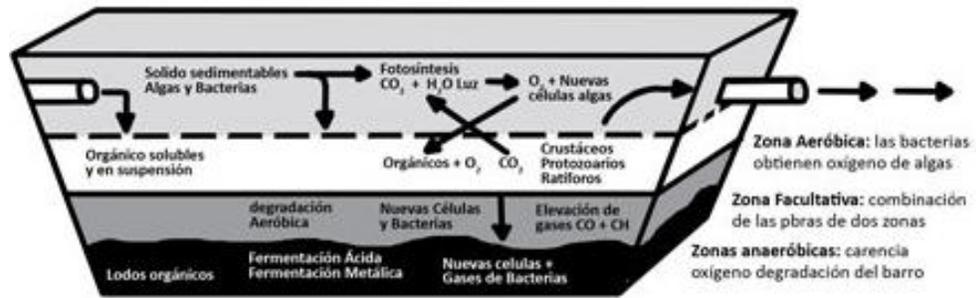
Fuente: (REMA, 2005)

En México existen 416 plantas de este tipo que tratan 46.2% del caudal tratado en el país (SEMARNAT, 2009), lo que lo constituye como el tratamiento secundario más utilizado.

Lagunas de estabilización: Las lagunas de estabilización son el método más simple de tratamiento que existe. Las lagunas de estabilización están constituidas por excavaciones poco profundas cercadas por taludes de tierra. Generalmente tiene forma rectangular o cuadrada. Este tratamiento es similar al anterior descrito, la diferencia es que no se utilizan equipos de aireación, el oxígeno necesario se obtiene en la superficie natural del estanque y de las algas que se desarrollan en su interior. El oxígeno liberado por las algas es utilizado por las bacterias para la degradación aerobia de la materia orgánica. Los productos de esta degradación son utilizados de nuevo por las algas. Debido a la actividad de algas y microorganismos, la cantidad de oxígeno disuelto y pH varían drásticamente entre el día y la noche lo que puede crear condiciones inadecuadas para la degradación y se generan condiciones de degradación anaerobia.

Las lagunas de estabilización son factibles cuando se dispone de grandes superficies y cuando la calidad del afluente no es muy estricta (Ramalho, 1999). En México se cuenta con 677 plantas de este tipo que tratan el 17.5% del caudal (SEMARNAT, 2009).

Figura 2.2 Laguna de estabilización

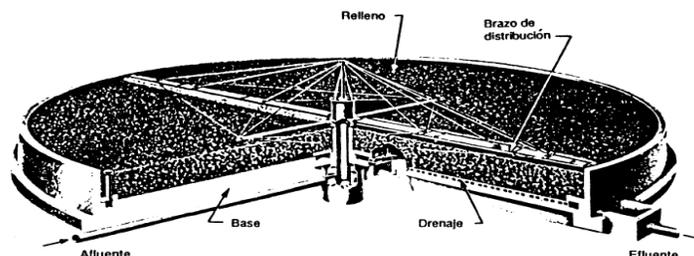


Fuente: (OPS, 2008)

Lagunas aireadas: Este proceso consiste en lagunas de 1 a 4 m de profundidad en las que la oxigenación de las aguas residuales se realiza mediante unidades de aireación bien sean superficiales, turbinas o difusores. Existe una diferencia entre lagunas aireadas y el sistema de lodos activados la cual es que en este se lleva a cabo una recirculación del lodo como forma de controlar la cantidad de lodo biológico en el reactor de aireación. Las lagunas aireadas son sistemas sin reciclado de lodos donde existen varios tipos de aireación ya sea difusa, con turbina o superficial (Sánchez, 2005). En México se tienen 24 plantas de este tipo que tratan el 7.2% del caudal tratado en el país (SEMARNAT, 2009).

Filtros percoladores: Es un tipo de tratamiento aerobio que utiliza un soporte para que se desarrollen los microorganismos degradadores de materia; también son denominados reactores de desarrollo biológico asistido (Ramalho, 1999). El filtro percolador es un relleno cubierto de limo biológico a través del cual se percola el agua residual. El agua se distribuye de manera pulverizada uniformemente sobre el lecho relleno mediante un distribuidor rotativo del flujo. El agua residual percola en forma descendente a través del relleno y el efluente tratado se recoge del fondo. En México se cuentan con 42 plantas que tratan 3.7% del caudal tratado (SEMARNAT, 2009).

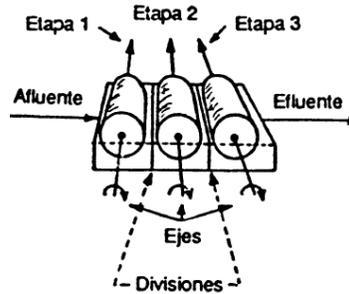
Figura 2.3 Esquema de un filtro percolador



Fuente: (Ramalho, 1999)

Discos biológicos: Es un tratamiento secundario que emplea discos que proporcionan un sistema aerobio que utiliza microorganismos en suspensión como ocurre en lodos activados y microorganismos con desarrollo asistido como en filtros percolados.

Figura 2.4 Funcionamiento de los discos biológicos



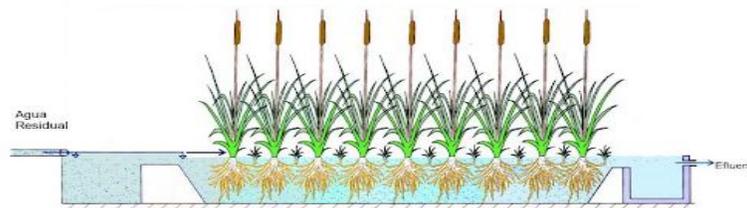
Fuente: (Ramalho, 1999)

Como se observa en la figura 2.4, este proceso está formado por una serie de discos o cilindros no muy separados entre sí, fabricados de poliestireno generalmente donde se genera una biopelícula que contiene microorganismos.

Por efecto de los procesos biológicos y por efecto de la velocidad del agua durante la rotación, se efectúa el desprendimiento de capas de la película, pasando a flóculos en suspensión en el líquido. Estos flóculos se separan posteriormente por sedimentación. En cuanto se realiza la separación, empieza inmediatamente un nuevo crecimiento de la biopelícula. En México existen 6 plantas que tratan el 0.5% del total de agua tratada (SEMARNAT, 2009).

Humedales artificiales: Son un tratamiento secundario aerobio con desarrollo asistido que consiste en un estanque relleno con un medio donde crecen microorganismos y se desarrollan las raíces de plantas que apoyan en la remoción de materia orgánica y nutrientes. En México existen 134 plantas de este tipo que tratan el 0.5% del total tratado (SEMARNAT, 2009).

Figura 2.5 Humedal artificial



Fuente (Aguado, 2009)

Debido a las características que presentan los humedales artificiales constituyen un tratamiento para tratar aguas residuales domésticas ya que son considerados de bajo costo de construcción y de mantenimiento sencillo además han probado ser eficaces para la remoción de materia orgánica y al utilizar procesos aerobios no generan gases con mal olor. En el siguiente capítulo se presentan más características de estos sistemas junto con el análisis de sus ecuaciones de diseño.

Capítulo 3

Humedales artificiales

Los humedales artificiales (HA) son sistemas empleados para tratar aguas residuales de diversos tipos: de origen doméstico, de la industria alimentaria y de la agropecuaria, principalmente. Consisten en estanques de aproximadamente 60 cm de profundidad con paredes impermeabilizadas, cuyo funcionamiento se basa en la actividad de microorganismos y plantas que se sostienen en un lecho granular, como arena o grava.

Su utilización para aguas domésticas se ha orientado a poblaciones pequeñas no mayores a cinco mil habitantes, donde generalmente no se cuenta con recursos para la instalación de plantas de tratamiento convencionales. Una característica muy importante de los HA radica en que son sistemas de bajo costo de instalación, operación y mantenimiento, además de que pueden construirse en comunidades que no cuentan con drenaje (Luna, 1998).

Desde la antigüedad las aguas contaminadas eran descargadas al ambiente: en suelos, ríos, lagos y mares, donde existían plantas y microorganismos adaptados para degradar la materia orgánica que recibían (depuración natural). Se sabe que algunas civilizaciones como las egipcia, china y azteca, utilizaron sitios específicos con arena y plantas para descargar sus aguas residuales y acelerar la depuración (Ramsar, 2010).

Uno de los primeros registros sobre sistemas de depuración, que data de 1904 en Australia, describe la construcción de un sistema a base de tierra y plantas que removía sólidos y materia orgánica; las plantas crecían y se adaptaban rápidamente a los cambios en el sistema (Brix, 1994).

En la década de 1950, en Alemania, la Dra. Seidel comenzó investigaciones para tratar aguas residuales utilizando plantas acuáticas en un medio granular; demostró que el sistema era capaz de mineralizar la materia orgánica, incrementar la población de microorganismos benéficos y estabilizar metales pesados e hidrocarburos. En 1967 se construyó en Holanda el primer sistema a gran escala para tratar las descargas de una población de 6000 habitantes. Posteriormente, a principios de los años setenta la Dra. Seidel y el Dr. Kichtkut desarrollaron una serie de investigaciones denominadas *Método de la zona de raíz* que facilitaba la remoción de materia orgánica y otros compuestos presentes en el agua residual; éste fue el origen formal de los humedales artificiales actuales (Brix, 1994). En México se tienen registros del uso de estos sistemas desde 1989, en investigaciones desarrolladas en la UNAM y la UAM, principalmente.

A pesar de los avances logrados a la fecha, se continúan las investigaciones sobre los procesos que se llevan a cabo dentro de un humedal, con el fin de mejorar las ecuaciones

de diseño y adaptarlos a las características de diferentes países (clima, vegetación y materiales nativos) y, con ello, proporcionar una alternativa de solución eficiente y económica para tratar las descargas de agua en áreas rurales y semiurbanas (Luna, 1998).

A continuación se describen brevemente los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en un humedal y mediante los cuales se remueven sustancias contaminantes. Los HA pueden tratar altos niveles de materia orgánica, sólidos suspendidos, nitrógeno, metales pesados y microorganismos patógenos, mediante sedimentación, adsorción, volatilización y evapotranspiración (Seoáñez, 1999).

Sedimentación: Debido al movimiento lento del agua los sólidos en suspensión pueden depositarse en el fondo del humedal. En algunos casos se produce floculación (agrupación de sólidos) y los sólidos se retiran fácilmente; en otros, se producen turbulencias a la entrada del humedal y los sólidos se distribuyen uniformemente en todo el humedal, sin llegar a sedimentar o haciéndolo casi a la salida de éste.

Filtración: El medio poroso, sustrato y raíces, funciona como medio filtrante y los sólidos en suspensión son separados del líquido.

Absorción de oxígeno: Si el agua en el humedal no está en saturación de oxígeno disuelto, lo tomará de la atmósfera a través de la superficie libre, mediante una aireación natural. De aquí la importancia de que el humedal posea poca profundidad y la mayor área superficial posible. La absorción de oxígeno es indispensable para garantizar las condiciones aerobias deseadas para la degradación.

Adsorción: Muchos contaminantes químicos, principalmente compuestos orgánicos en estado gaseoso o líquido, tienden a unirse por adsorción con diversos sólidos. Se trata de un proceso físico reversible que sólo es de importancia cuando el humedal opera a bajas temperaturas.

Volatilización: Los contaminantes volátiles presentes en el agua residual se transfieren a la atmósfera a través de la superficie libre (espejo de agua).

Evapotranspiración: Es el proceso mediante el cual parte del agua residual absorbida por las plantas es transferida a la atmósfera, por medio de las hojas, en forma de vapor. Dentro de este proceso, también llamado fitovolatilización, la planta emite agua y algunos contaminantes gaseosos, principalmente orgánicos, que pueden o no haber sido degradados al estar dentro del vegetal.

Actividad de microorganismos: Los microorganismos, principalmente en la raíz de las plantas (rizosfera), realizan la conversión y transformación de materia orgánica a elementos inorgánicos (nitrógeno y fósforo, principalmente) que sirven de nutrientes al vegetal.

La degradación en los humedales se inicia de manera aerobia (en presencia de oxígeno libre), transformando compuestos complejos en sustancias más simples y la terminan bacterias anóxicas que realizan la denitrificación (liberación del nitrógeno) en ausencia de oxígeno (Metcalf y Eddy, 2011). Cuando no existe oxígeno libre las bacterias pueden comportarse de manera facultativa y degradar la materia en forma anaerobia, liberándose biogás como subproducto; esto trata de reducirse en lo posible dentro de los humedales verificando que no haya estancamientos de agua y no excediendo la profundidad de diseño (Luna, 1998).

Fotosíntesis: Es la conversión de materia inorgánica, como minerales y CO₂, en materia orgánica que sirve de alimento a las plantas, este proceso se lleva a cabo gracias a la energía que aporta la luz solar.

En la tabla siguiente (3.1) se presenta un resumen de los principales procesos dentro de un humedal y los contaminantes que pueden ser removidos por estos.

Tabla 3.1 Procesos de remoción de contaminantes

Contaminante	Proceso de remoción
Sólidos suspendidos	-Sedimentación -Filtración
Materia orgánica	-Actividad de microorganismos -Adsorción -Evotranspiración
Nitrógeno	-Actividad de microorganismos -Adsorción -Volatilización
Fosfatos	-Adsorción -Fijación de las plantas
Metales pesados	-Adsorción -Actividad de microorganismos
Microorganismos patógenos	-Sedimentación -Filtración -Absorción de oxígeno -Tiempo de retención (muerte natural) -Actividad de microorganismos (depredación)

Fuente: (Seoáñez, 2002)

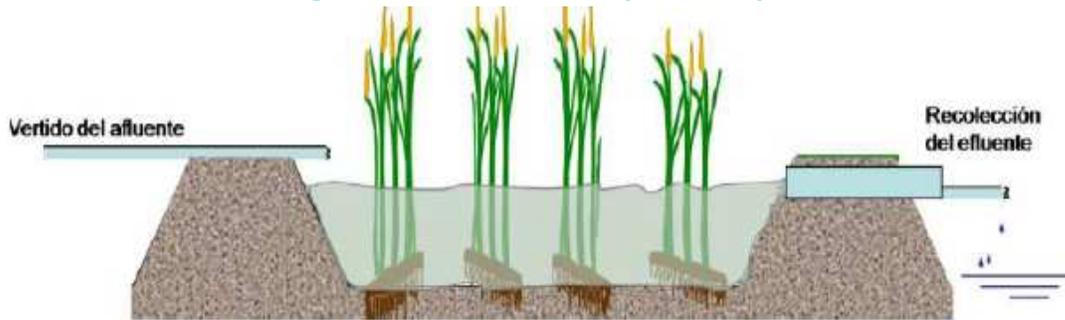
Los procesos aquí explicados son comunes a todos los HA, sin embargo su contribución específica dentro del tratamiento puede variar según el diseño y operación de cada humedal. A continuación se presentan los diferentes tipos de humedales.

3.1 Clasificación

Los HA se clasifican en función de la presencia o ausencia de una superficie de agua en contacto con la atmósfera. Según este criterio pueden ser de dos tipos:

Humedales de flujo libre superficial (HAFLS): En estos sistemas el agua residual se mantiene por encima del nivel del lecho de sustentación (existe un espejo de agua). Las raíces de las plantas se encuentran soportadas en un lecho de grava, arena, arcilla u otro material de soporte para la vegetación (Kadlec y Kingth, 1996), de manera que el flujo está en contacto no solo con las raíces sino con los tallos de las plantas (ver fig. 3.1).

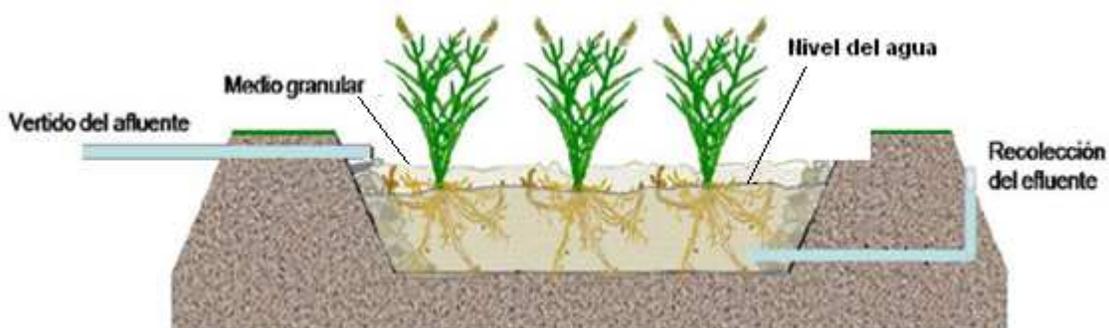
Figura 3.1 Humedal de flujo libre superficial



Fuente: (García y Corzo, 2009)

Humedales de flujo subsuperficial (HAFSS): Los humedales de flujo subsuperficial son instalaciones de menor tamaño que los humedales de flujo libre y, en la mayoría de los casos, se utilizan como sistema de tratamiento de aguas residuales de viviendas aisladas (Kadlec y Kingth, 1996). En esta configuración, el agua se filtra al interior del lecho y corre a través de éste estando en contacto con las raíces de las plantas; el nivel líquido no supera al del lecho (fig. 3.2). Por esta razón se presentan condiciones aerobias en la zona cercana a las raíces y condiciones anaerobias y anóxicas en el fondo de la celda (Tanner y otros, 2005).

Figura 3.2 Humedal de flujo subsuperficial



Fuente: (García y Corzo, 2009)

En la mayoría de los HAFSS el curso del flujo es horizontal, aunque algunos sistemas europeos usan flujo vertical. Debido a la confinación hidráulica impuesta por el sustrato, los humedales HAFSS están mejor preparados para tratar aguas con sólidos en concentraciones relativamente bajas y flujo uniforme (Aguamarket, 2010).

En general, se prefiere la construcción de HAFSS en zonas habitacionales porque el flujo está oculto, no producen malos olores y requieren menor área que los HAFSL. En la tabla siguientes (3.2) se presenta una comparación entre estos dos tipos de humedales.

Tabla 3.2 Comparación entre HAFSL y HAFSS

Flujo libre superficial (HAFSL)	Flujo subsuperficial (HAFSS)
<ul style="list-style-type: none"> -Superficie libre de agua -Son más utilizados en industrias y pequeñas comunidades -Menor costo de instalación -Hidráulica simple -Favorecen la vida animal -Deficiente funcionamiento a bajas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> -Flujo sumergido -Son más utilizados para domicilios -Su costo es mayor a los HAFSL -Hidráulica compleja -Pocos problemas con la fauna -Soportan cambios de clima -Tratamiento más eficaz -Requieren de menor espacio -No presentan malos olores

Fuente: (Akvopedia, 2011)

Dependiendo de la dirección del flujo, los humedales HAFSS se clasifican en dos tipos, humedales artificiales de flujo vertical (HAFV) y de flujo horizontal (HAFH).

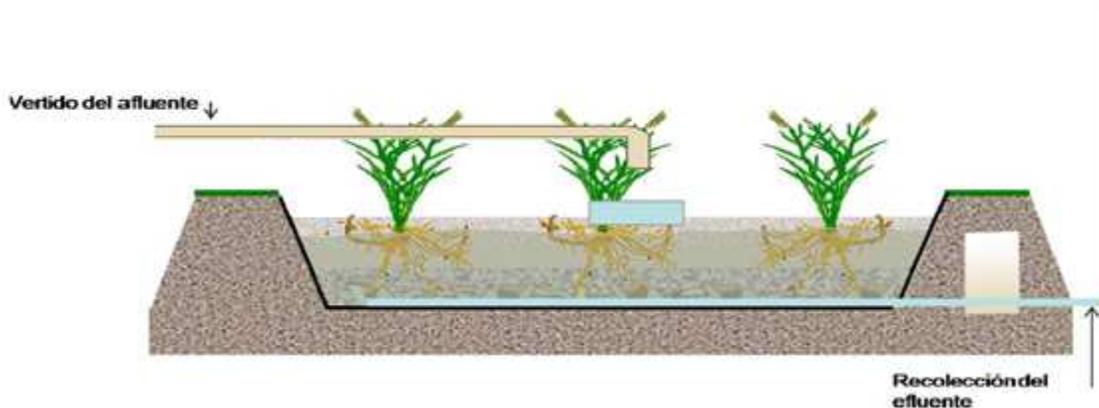
Humedales de flujo subsuperficial vertical (HAFV): En estos sistemas el agua es introducida por medio de un dispositivo que se encuentra en la parte superior de la celda y se filtra por gravedad a través del medio de soporte. En estos humedales el lecho no se satura y el influente se alimenta de manera intermitente, permitiendo que el agua fluya a través del lecho y se disperse en todas direcciones facilitando el contacto de los contaminantes con microorganismos y raíces (ver fig. 3.3). La desventaja de los HAFV es que, por no ser procesos continuos, requieren de un sistema de alimentación complejo y más costoso que en otros humedales (Kadlec y Knight, 1996); esta desventaja es una de las razones por la cual se eligió un HAFH para el caso de estudio.

Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HAFH): Estos sistemas poseen una configuración de entrada horizontal por medio de un tubo perforado colocado de manera transversal a la celda para que se distribuya uniformemente el líquido, que fluye con ayuda de una pendiente en el fondo y se filtra por gravedad a través del lecho y las raíces (ver figuras 3.7 y 3.8). Su diseño permite operar en forma continua aunque es posible la alimentación intermitente (siempre y cuando el lecho se mantenga húmedo).

En términos generales, los HAFH conjuntan las propiedades de retención del medio poroso, la actividad de microorganismos, el aporte de oxígeno y el mantenimiento de la capacidad de conducción hidráulica inducida por el crecimiento de las raíces de las plantas. Esto, favorece el desarrollo de microorganismos depuradores y aumenta la eficiencia de remoción de contaminantes (Luna, 1998).

Los HAFH son sistemas más simples y su mantenimiento es menos costoso que otros HA, por estos motivos se utiliza este tipo de humedal para el caso práctico de esta tesis (ver capítulo 4).

Figura 3.3 Humedal de flujo subsuperficial vertical



Fuente:(García, y otros, 2009)

3.2 Características

En este apartado se presentan las características constructivas, comenzando por la selección de los componentes de un humedal (vegetación y medio poroso), así como las variables de operación y mantenimiento que deben tenerse en cuenta. Se concluye con un resumen de las ventajas y desventajas de estos sistemas de tratamiento de agua. La mayoría de las características que aquí se describen son comunes a todos los tipos de humedales artificiales pero, cuando no es así, se presenta solo la correspondiente a los humedales de flujo subsuperficial horizontal.

3.2.1 Componentes

Los tres componentes principales de un humedal son los microorganismos, las plantas y el medio poroso. A continuación se describe cada uno de ellos:

Microorganismos: Son el componente más importante de los HA, debido a que su actividad metabólica remueve la mayor cantidad de la materia orgánica en el agua residual; puede convertir los compuestos orgánicos en compuestos inorgánicos que sirven de alimento a todos los organismos del sistema. Los microorganismos son capaces de transformar compuestos orgánicos, retener metales pesados y eliminar bacterias no deseables. En relación con su actividad metabólica, la principal fuente de energía proviene de la oxidación de compuestos de carbono, tanto del orgánico como del presente en el aire en forma de CO₂. Dependiendo de las condiciones donde efectúan su metabolismo se clasifican en microorganismos aerobios, anaerobios, facultativos y anóxicos. En general presentan una mayor actividad a temperaturas de entre 25 a 35°C (Tanner y otros, 2005).

Plantas: Su presencia caracteriza a los humedales. Gracias al crecimiento de las raíces se facilita la presencia de microorganismos de tipo aerobio y se agiliza la remoción de

materia orgánica; además se favorece la sedimentación y filtración de partículas sólidas y suspendidas y reducen los riesgos de erosión por efecto de los contaminantes en el lecho (Brix, 1994). Las plantas más utilizadas, por su capacidad de absorción, son los juncos de agua y los carrizos (Tchobanoglous, 1998), aunque en la actualidad se ha empleado una gran variedad de plantas de todo tipo, atendiendo muchas veces solo a razones de ornato.

Figura 3.4 Vegetación en HAFSS



Fuente: (Microplanta, 2011)

Medio poroso: Este componente es el responsable de remover los contaminantes del agua mediante interacciones físicas y favorecer el tiempo de retención para permitir los procesos que realizan las plantas y microorganismos contenidos en él. Las características del lecho (tipo y tamaño de partícula), en conjunto con las raíces de las plantas, conforman las características hidráulicas del medio y a su vez determinan el régimen de flujo del sistema (ver tabla 3.3). El tiempo de retención recomendado para aguas negras es de 5 días (Metcalf y Eddy, 2011).

En el lecho, se puede suponer la existencia de dos tipos de zonas muertas, aquellas ocasionadas por canalizaciones o cortos circuitos hidráulicos y las provocadas por el fluido estancado; las primeras se denominan *zonas muertas hidráulicas* y las segundas *zonas muertas biológicas*. Estas últimas se encuentran en los huecos del material poroso, en las esquinas de la celda y en los intersticios de la biopelícula donde las corrientes no pueden penetrar (Morgan y Maitland, 1997)..

Por otra parte, cuando se presentan obstrucciones por acumulación de sólidos en la zona de entrada o en el fondo del sistema, se reduce la porosidad del medio y el área efectiva de tratamiento; esto, incrementa la conductividad hidráulica en zonas no preferenciales, donde decrece el tiempo de residencia hidráulico. En ocasiones la baja capacidad de infiltración del lecho ocasiona la formación de un espejo de agua (flujo por encima del lecho poroso), con la consiguiente reducción en la eficiencia de remoción de contaminantes.

Durante el inicio de la operación del humedal, la acumulación de sólidos sólo depende de su concentración en el influente y de la capacidad de infiltración del medio; posteriormente (después de uno o dos meses de adaptación de las plantas) esta acumulación estará también asociada con la velocidad de depuración de la materia orgánica ya que se realizarán transformaciones químicas y biológicas. A partir de esta etapa existen: un aporte continuo de oxígeno, una temperatura estable y disponibilidad constante de nutrientes, lo que aumenta y estabiliza la eficiencia del sistema (Blazejewsk y Blazejewska, 1997).

Entre los materiales porosos más empleados están la grava gruesa y fina, piedra de río, arena y tezontle. De estos, para el humedal construido en Amatlán, se seleccionó el tezontle, principalmente por estar disponible en la zona (ver figuras 3.4 y 3.5).

Figura 3.5 Medio poroso (tezontle)



Fuente (Microplanta, 2011)

3.2.2 Construcción

Existen varios aspectos que deben ser tomados en cuenta al momento de construir un humedal, los principales son: impermeabilización de la celda; diseño y colocación de las tuberías de alimentación y de salida; colocación del medio poroso y plantación de la vegetación.

De lo anterior dependen los materiales de construcción entre los que están: equipo de excavación, impermeabilizante, tubos de PVC, medio poroso y vegetación. Sobre el medio poroso y la vegetación ya se ha hablado antes, por lo que aquí solo se mencionan algunas de las propiedades que deben reunir el material impermeabilizante y las tuberías de alimentación, salida y control de la profundidad.

Impermeabilización: Las paredes y el fondo de la celda deben contar con un recubrimiento para prevenir la infiltración del agua contaminada al suelo; el tipo de impermeabilización depende de las condiciones locales; algunas veces el recubrimiento es natural: una capa de arcilla de permeabilidad muy baja o la compactación de materiales

del sitio hasta casi la impermeabilidad. También puede emplearse un recubrimiento de cemento.

Otra alternativa es el uso de un recubrimiento plástico (geomembrana) de polietileno de alta densidad, polipropileno flexible, cloruro de polivinilo o polietileno de muy baja densidad (HDPE, FPP, PVC o VLDPE, respectivamente) (García y Corzo, 2009). Las propiedades físicas, químicas, térmicas, mecánicas y económicas de estos polímeros (ligereza, resistencia a la intemperie, degradación, precio), dependen de su formulación (proporción y tipo de aditivos plastificantes, principalmente). Este recubrimiento tiene como ventaja su rápida instalación (ver fig. 3.6) y como desventaja su elevado precio.

En la construcción del humedal de esta tesis se usó cemento, con acabado liso, utilizando impermeabilizante a base de jabón zote rayado con cal (sistema empleado en arquitectura autóctona) , el cual presenta una permeabilidad muy baja y es una alternativa más económica que una geomembrana plástica, además es más segura que el aplanado.

Figura 3.6 Recubrimiento plástico



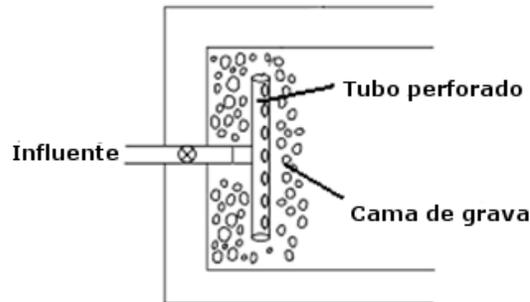
Fuente: (Selba, 2011)

Alimentación: La tubería de entrada en un HAFH consiste de un conjunto de tubos conectados en forma de “T”, donde la sección transversal al humedal se perfora y coloca rodeada de granos de mayor tamaño del material poroso, para facilitar la distribución del influente (figura 3.7). La sección de entrada usualmente tiene 20cm y allí se emplea material poroso con granos de 8 a 20mm de diámetro; este arreglo facilita la distribución homogénea del flujo dentro del lecho (Tchobanoglous, 1998).

La salida: En los humedales unidomiciliarios, generalmente el agua tratada es descargada directamente al suelo (como agua de riego), ya sea por un tubo o un arreglo de tubos perforados. También puede descargarse a una cisterna o a una fosa de almacenaje para uso posterior (como en el caso del humedal construido en Amatlán). El ducto de salida puede estar colocado longitudinalmente en la parte más baja del humedal, ser un tubo transversal perforado (como la tubería de entrada), colocarse dentro de una zanja de

salida poco profunda rellena con material granular grueso, o instalarse ligeramente por debajo del fondo de la celda del humedal para asegurar el drenaje.

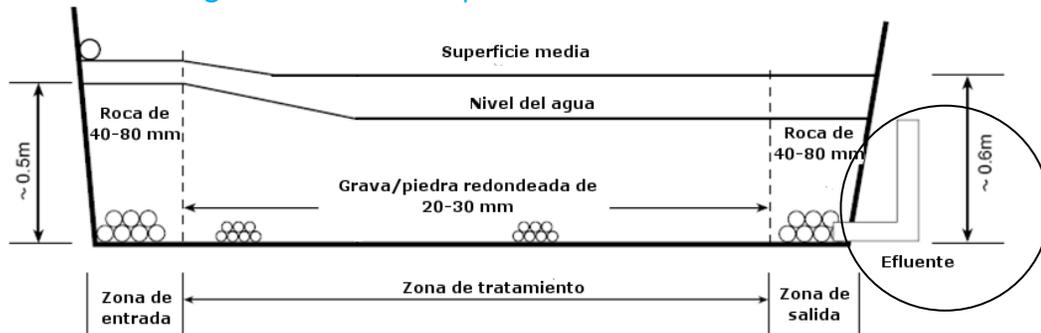
Figura 3.7 Alimentación "T" para humedales HAFH.



Fuente:(Lara, 1999)

Control de la profundidad: En un humedal artificial es muy importante controlar el nivel del agua residual, para esto se utiliza una tubería auxiliar que por *vasos comunicantes*, desborda el excedente.

Figura 3.8 Control de profundidad en el humedal.



Fuente:(Lara, 1999).

3.2.3 Mantenimiento

Cuando los humedales artificiales inician su operación comienzan su función depuradora mediante filtración a través del sustrato. Eventualmente, sobre este soporte se va desarrollando la biomasa de microorganismos e inician los procesos de degradación de los contaminantes y las plantas asimilan los nutrientes que necesitan para su crecimiento. Para la correcta operación de estos sistemas es necesario realizar un mantenimiento adecuado, el cual se describe a continuación.

Parámetros de control: Se requiere observar el desempeño del humedal al menos una vez a la semana con el fin de identificar cambios o problemas que afecten su funcionamiento.

Los principales problemas son: obstrucciones de flujo, daños a la vegetación o la presencia de especies invasoras (USEPA, 2000).

Además de la observación del aspecto exterior del humedal, se puede monitorear la eficiencia del HA mediante el muestreo del agua. Como se mencionó en el capítulo anterior los parámetros de control son: pH, oxígeno disuelto (OD), sólidos suspendidos (SS), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y coliformes (parámetros de la NOM-003-SEMARNAT-1997).

Mantenimiento hidráulico: En los HA el agua debe fluir, por gravedad, a través del sustrato; sin embargo, con el paso del tiempo se pueden presentar problemas hidráulicos tales como encharcamiento en la superficie del humedal, cortos circuitos hidráulicos o estancamientos en el interior de la celda. Los segundos propician cambios en la vegetación; en general las plantas se adaptan a la cantidad de agua que reciben por lo que un corto podría producir un crecimiento desigual de la vegetación. Es necesario la distribución homogénea del agua en el sistema para lo cual se deben dejar *zonas abiertas*, sin vegetación, para inspeccionar el flujo y permitir su redistribución (Kadlec y Knigh, 1996).

El estancamiento de agua y los encharcamientos en la superficie generan un hábitat para insectos y los nutrientes del agua estancada son propicios para el desarrollo de larvas. Además generan condiciones de anaerobias que producen malos olores.

La principal causa de los problemas hidráulicos se deben a la colmatación que se presenta debido a la acumulación de materia en suspensión de agua residual, la cual podría ser causada por un mal funcionamiento de los tratamientos previos, si estos operan correctamente, es recomendable detener la alimentación a los humedales durante dos semanas, este periodo permitirá la mineralización de los restos orgánicos retenidos en el sustrato, con lo que se podrá incrementar su capacidad de filtración nuevamente. También es importante, en lo posible, no pisar el sustrato para evitar su compactación. El correcto nivelado de la superficie superior del medio poroso evitará la aparición de flujos preferenciales, zonas inundadas y zonas sin riego.

Mantenimiento estructural: El correcto mantenimiento de la celda y de su entorno contribuye a reducir problemas en su funcionamiento. En este mantenimiento se incluye la inspección de las instalaciones hidráulicas, el cuidado de la vegetación y el control de especies invasoras.

Las instalaciones hidráulicas incluyen: las tuberías de las descargas; los tanques de tratamientos previos, si los hay; la tubería y boquillas de alimentación; tuberías de salida y de control de nivel. Todas las tuberías deberán limpiarse al menos una vez al año para evitar su obstrucción.

También es importante monitorear el estado de la vegetación, si las plantas comienzan a morir, podría ser debido a sustancias tóxicas en el agua, alguna enfermedad o la presencia de plagas. Se debe evitar la descarga de sustancias tóxicas y aplicar tratamientos fitosanitarios para resolver el problema. Cuando se presente vegetación seca, esta deberá ser retirada de forma manual o mecánica, junto con las malas hierbas que se presenten (ver fig. 3.9).

Roedores u otro tipo de animales pueden dañar la impermeabilización de la celda o alimentarse de la vegetación por lo que, de existir estos, debe instalarse una cerca para proteger el humedal.

Figura 3.9 Poda de vegetación seca



Fuente:(CENTA, 2008)

3.2.4 Ventajas y desventajas

Los HA presentan ventajas y desventajas frente a los sistemas convencionales de tratamiento, entre las cuales cabe mencionar (García y Corzo, 2009).

- *Simplicidad en la operación:* Pueden ser manejados por operarios con poca o nula experiencia en el tratamiento de aguas residuales
- *Baja producción de residuos:* Los residuos y lodos residuales suelen limitarse a los sólidos generados por el pretratamiento, que en el caso de estudio no fue necesario
- *Consumo energético:* mínimo o nulo.
- *Costo:* Bajo costo de instalación y mantenimiento
- *Impacto ambiental:* Bajo impacto y buena integración al ambiente natural
- *Valor estético:* Su instalación equivale a la creación de zonas de recreo por su valor estético.

Por otra parte los principales inconvenientes son:

- *Espacio:* Requieren una gran superficie en relación a tratamientos convencionales

- *Tiempo de arranque*: El tiempo de inicio de los procesos de degradación bioquímica puede ser largo después de la puesta en marcha; desde algunos meses hasta un año en sistemas con flujo subsuperficial
- *Diseño complejo*: Difíciles de diseñar por el alto número de procesos y mecanismos implicados en la eliminación de contaminantes
- *Errores de diseño*: Los errores de diseño o constructivos son muy difíciles de corregir; si el efluente no tiene la suficiente calidad es complicado mejorarlo sin la necesidad de hacer una buena inversión
- *Acumulación de sedimentos*: Los humedales son susceptibles a la colmatación en el medio granular si no poseen un diseño y mantenimiento adecuados.

3.3 Análisis de las ecuaciones de diseño

Comprender el diseño de un HA requiere del análisis de las ecuaciones que rigen la mecánica de fluidos; que consideran el movimiento de un fluido y su capacidad para transportar materia y energía. El principio básico de la mecánica de medios continuos es la conservación de masa, cantidad de movimiento y energía:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad} \\ \text{de acumulación} \end{array} \right\}^0 = \{ \text{Velocidad de entrada} \} - \{ \text{Velocidad de salida} \} \quad \text{ec 3.1}$$

Las ecuaciones de diseño de un humedal provienen de este principio básico, más algunas suposiciones que permiten modelar los complejos procesos de mecánica de fluidos y de reacciones bioquímicas presentes. A continuación se presentan las ecuaciones de conservación y las consideraciones específicas realizadas para obtener las ecuaciones de diseño de los HAFH.

3.3.1 Conservación de masa

Esta ecuación se deduce aplicando un balance de materia a un fluido que circula a través de un volumen de control (Bird y otros, 1982):

$$0 = \frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \mp \dot{f}_\rho \quad \text{ec 3.2}$$

donde el término $\mp \dot{f}_\rho$ representa las fuentes y sumideros de densidad masa, ρ . Dentro de un humedal es de mayor utilidad considerar, en lugar de la masa de elementos, la concentración de contaminantes (C , materia orgánica) y su transformación dentro del mismo, por lo que la ecuación anterior se reescribe como:

$$0 = \frac{\partial C}{\partial t} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} \mp \dot{f}_C \quad \text{ec 3.3}$$

La primera aproximación para simplificar esta ecuación es que el flujo es homogéneo y la concentración de materia orgánica son constantes en toda el área transversal del humedal. Utilizando la ley de Fick se podría describir la distribución de la materia orgánica, por difusión, en las tres direcciones; pero ya que la acción microbiana es más importante que la difusión, no se considera necesario incluirla.

Por otra parte al considerar flujo unidireccional se puede despreciar los términos convectivos en las direcciones transversales v_y y v_z , por lo que la ecuación 3.3 puede escribirse como:

$$0 = \frac{\partial C}{\partial t} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} \mp \dot{f}_C \quad \text{ec 3.4}$$

Las fuentes y sumideros que pueden modificar la concentración de contaminantes en el agua se relacionan con la lluvia o la evaporación (condiciones climáticas), esto es:

$$\mp \dot{f}_C = P - ET \quad \text{ec 3.5}$$

Ante la imposibilidad de representar correctamente las condiciones transitorias de estos fenómenos se ignoran dentro de la ecuación de conservación, pero se recomienda instalar mecanismos de protección para los humedales. Es conveniente usar techos o cubiertas provisionales para evitar la inundación por lluvia, o tuberías que drenen el exceso de agua; así como revisar el nivel de agua y aumentarlo cuando la evaporación sea considerable.

Por otra parte, la variación de la concentración de contaminantes con el tiempo se asume como función de las reacciones químicas asociadas con la acción de microorganismos y por lo tanto se representa por medio de una cinética de reacción de primer orden (Crites y otros, 1998). Esto es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \mp \dot{r} = -k_T C \quad \text{ec 3.6}$$

el signo negativo significa la desaparición de contaminantes con el tiempo de reacción. Los planteamientos de las ecuaciones (3.5) y (3.6) permiten reescribir la (3.4) como una expresión de dos términos solamente:

$$v_x \frac{\partial C}{\partial x} = -k_T C \quad \text{ec 3.7}$$

la cual puede resolverse separando variables, integrando entre $x_e=0$ y $x_o=x$ y sustituyendo la distancia por el tiempo, $t=x/v_x$:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k_T x/v_x} = e^{-k_T t} \quad \text{ec 3.8}$$

de donde, el tiempo de retención necesario para obtener la remoción deseada de materia orgánica es:

$$t = \frac{\ln(C_0/C_e)}{k_T} \quad \text{ec 3.9}$$

Donde k_T es la constante de velocidad de reacción y es proporcional a la velocidad con la que los microorganismos transforman el contaminante, a la temperatura del sistema y se estima a partir de datos proporcionados en literatura especializada (Crites y otros, 1998). Para el tratamiento de aguas negras en humedales usualmente se emplea como referencia k_{20} de 1.104 día^{-1} , y se corrige para la temperatura del humedal usando la siguiente ecuación (Crites y otros, 1998):

$$k_T = k_{20} 1.06^{T-20} \quad \text{ec 3.10}$$

3.3.2 Conservación de cantidad de movimiento

En el caso de la cantidad de movimiento, ρv_x , por ser una propiedad vectorial existen tres ecuaciones que describen su variación en las tres direcciones cartesianas (ecuaciones de Navier Stokes); sin embargo, al asumir flujo unidireccional, es posible desprestigiar el flujo en las direcciones transversales (ρv_y y ρv_z) y manejar solo la ecuación de momento longitudinal, ρv_x . Esto es:

$$0 = \frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x \rho}{\partial x} \mp \dot{f}_{v_x \rho} \quad \text{ec 3.11}$$

donde las posibles fuentes a considerar (fuerzas externas) están representadas por la presión y el peso del fluido y los sumideros quedan representados por la resistencia al movimiento provocado por la viscosidad del flujo:

Al asumir que, debido a la configuración del humedal, el agua fluye principalmente por acción de la pendiente en una sola dirección (eje longitudinal del humedal).

$$\dot{f}_{v_x \rho} = \rho g + \frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad \text{ec 3.12}$$

como el humedal será diseñado (y operado siempre que sea posible) en condiciones de flujo estacionario:

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial t} = 0 \quad \text{ec. 3.13}$$

la velocidad de flujo dentro del humedal es muy pequeña, por lo que el empuje inercial también lo será:

$$v_x \frac{\partial v_x \rho}{\partial x} \approx 0 \quad \text{ec. 3.14}$$

y, debido a que el peso del fluido se mantiene constante, ρg , y es muy pequeño comparado con el término que involucra la presión, es posible desprestigiar la acción de la gravedad:

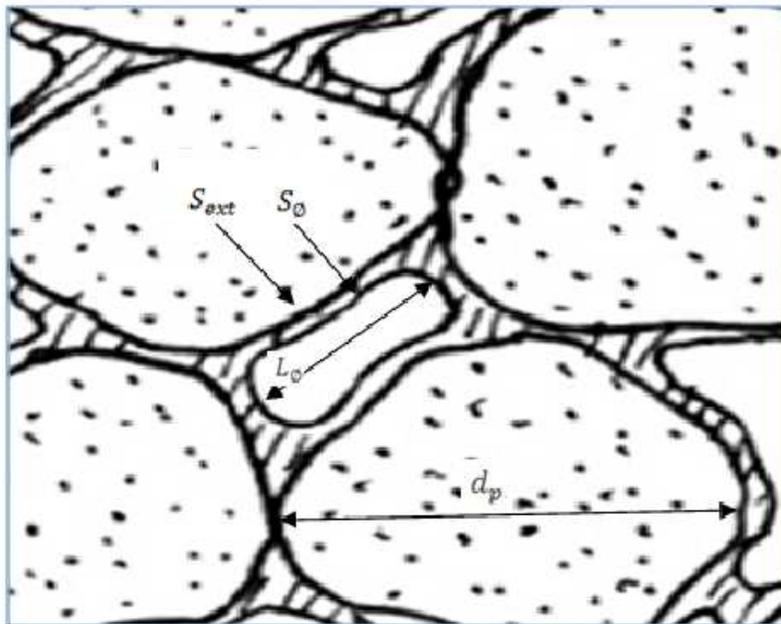
$$\frac{\partial p}{\partial x} \gg \rho g \quad \text{ec. 3.15}$$

por lo que la ecuación 3.11 puede describirse como:

$$0 = -\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right) + \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{ec 3.16}$$

A partir de esta ecuación se han realizado múltiples estudios, teóricos y experimentales, para describir el flujo en medios porosos (Vafai, 2000). Sin embargo, para los propósitos de esta tesis es suficiente aplicar el procedimiento propuesto por Hirasaki en su libro titulado *Flow and transport in porous media*, para definir las variables de permeabilidad, gradiente hidráulico y conductividad hidráulica con los que se caracterizan empíricamente los diferentes medios porosos (Hirasaki, 2002).

Figura 3.10 Volumen del poro en un medio granular



Fuente: (Hirasaki, 2002)

Al promediar la fuerza de viscosidad en el volumen del poro V_ϕ se obtiene:

$$\int_{V_\phi} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) dV_\phi = \int_{S_\phi} \left((\tau_{xx} + \tau_{xy} + \tau_{xz}) \cdot \mathbf{n} \right) dV_\phi + \int_{S_{ext}} \left((\tau_{xx} + \tau_{xy} + \tau_{xz}) \cdot \mathbf{n} \right) dV_\phi. \quad \text{ec 3.17}$$

Donde S_{\emptyset} y S_{ext} representan la pared el poro y la superficie externa respectivamente del volumen del poro y n es el vector normal a la superficie de integración de la pared del poro. Se observa que la relación de la superficie interna del volumen del poro es inversamente proporcional al diámetro de grano d_p . Y, la proporción de la superficie externa del volumen del poro es inversa a la longitud característica del volumen del poro L_{\emptyset} . Entonces, la ec 3.17 se puede aproximar a:

$$\approx \left((\tau_{xx} + \tau_{xy} + \tau_{xz}) \cdot \mathbf{n} \right) \left(\frac{1}{d_p} + \frac{1}{L_{\emptyset}} \right)$$

Sin embargo, conforme L_{\emptyset} incrementa en comparación con d_p , la segunda integral se puede despreciar y el producto escalar de los esfuerzos cortantes se pueden estimar en función de d_p , de viscosidad y velocidad media del fluido, μ y v_x , respectivamente:

$$\left((\tau_{xx} + \tau_{xy} + \tau_{xz}) \cdot \mathbf{n} \right) \approx \mu \frac{v_x}{f(d_p)} \quad \text{ec 3.18}$$

donde la función $f(d_p)$ representa la superficie disponible por donde puede existir flujo, denominada permeabilidad k . Esto es:

$$\mu \frac{v_x}{f(d_p)} \approx \mu \frac{v_x}{k} \quad \text{ec 3.19}$$

Con este resultado la ecuación 3.16 se puede describir como:

$$0 = -\frac{\mu v_x}{k} + \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{ec 3.20}$$

de la cual es posible despejar la velocidad del flujo y sustituir la conductividad hidráulica, que se define como $K=k/\mu$, así como el gradiente hidráulico, $s = \frac{\partial p}{\partial x}$, para obtener la ecuación conocida como Ley de Darcy (Hirasaki, 2002):

$$v_x = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = K \frac{\partial p}{\partial x} = Ks \quad \text{ec 3.21}$$

Esta ley describe el régimen de flujo en un medio poroso; establece que la velocidad a la cual el agua fluye a través del medio es directamente proporcional a la diferencia de altura entre los dos extremos del lecho e inversamente proporcional a la longitud del mismo. La conductividad hidráulica es la capacidad del medio poroso para transmitir flujo a través de él y depende del área disponible y la resistencia por fricción que presente (Kadlec y Kingth, 1996).

En el caso de los humedales, la resistencia al flujo es impuesta no solo por el medio poroso sino por las raíces de las plantas y los sólidos contaminantes acumulados, por lo cual considerar que permanece constante es una de las suposiciones más fuertes dentro de la ecuación de diseño.

3.3.3 Conservación de energía

Del mismo modo que se escribió la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, se escribe la ecuación de energía:

$$0 = \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial v_x e}{\partial x} + \frac{\partial v_y e}{\partial y} + \frac{\partial v_z e}{\partial z} + \dot{f}_e \quad \text{ec 3.22}$$

donde e representa la energía total, conformada por energía cinética, potencial, interna y trabajo mecánico, entre otras.

La primera consideración es que un HAFH es un sistema isotérmico, ya que aunque se presentan ganancias y pérdidas de calor (energía térmica) de varias maneras (conducción térmica del terreno al agua y viceversa; conducción de calor con el agua residual; conducción, convección y radiación entre la atmósfera y el agua), la función aislante de la capa impermeabilizante del humedal y el microclima creado por su vegetación permite desprestigiar todas las transferencias térmicas hacia o desde el humedal (Lara, 1999).

Por otro lado, el calor que genera la actividad microbiana dentro del sistema, que puede aumentar la temperatura del agua hasta los 50°C (Tchobanoglous, 1998), produce la evaporación del agua y la temperatura del sistema se equilibra.

En el presente trabajo no se desarrolla un modelo térmico para humedales, no sólo porque se sabe que hay mecanismos internos tendientes a mantener constante la temperatura, sino porque se reconoce que el mayor efecto de ésta, la temperatura, es sobre la actividad microbiana y no se poseen las herramientas teóricas o experimentales necesarias para representar adecuadamente esta afectación. En el siguiente apartado anterior se explicó cómo se modela la degradación de contaminantes orgánicos en función de la actividad microbiana.

Finalmente, ya que la velocidad dentro del humedal es muy pequeña, es posible considerar que no existe variación de la energía cinética. Por otra parte en el HAFH no se emplean bombas por lo que no hay trabajo y al considerar un sistema isotérmico se puede desprestigiar la energía interna.

3.3.4 Ecuaciones de diseño

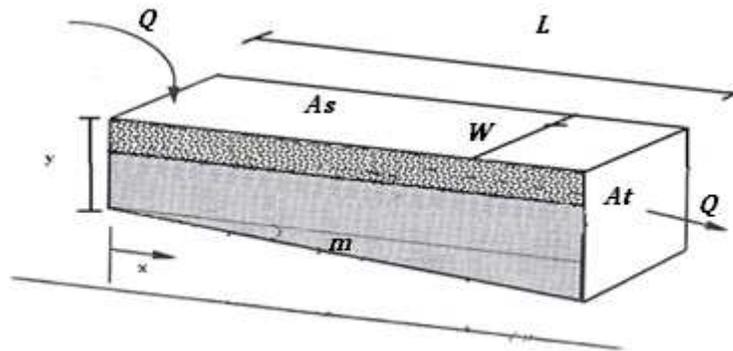
Para el diseño de humedales de flujo subsuperficial horizontal se emplean diferentes modelos; el más aceptado es el propuesto por Sherword Reed (Crites y otros, 1998), debido a que introduce una constante de reacción dependiente de la temperatura (ec. 3.9), lo cual permite predecir más aproximadamente el comportamiento microbiológico en el humedal. Además, el modelo de Reed fue ligeramente modificado en esta tesis al

hacer uso de datos más específicos obtenidos de manuales para humedales en Latinoamérica (Francia, 2000).

Considerando la geometría del HAFH, el tiempo de retención hidráulica, t , se obtiene del volumen de la celda y el caudal que fluye a través de la misma (ver figura 3.10). Esto es, para una geometría rectangular y la presencia de un medio poroso (Kadlec y Kingth, 1996):

$$t = \frac{L \cdot W \cdot y \cdot n}{Q} \quad \text{ec 3.23}$$

Figura 3.11 Geometría de un HAFS



Fuente:(Kadlec, y otros, 1996)

Al igualar el tiempo biológico de retención (ec. 3.9) con este tiempo hidráulico (ec. 3.23), se obtienen las características geométricas del humedal, necesarias para obtener la remoción requerida. El área superficial, A_s , está dada por:

$$A_s = LW = \frac{Q \cdot \ln(C_0/C_e)}{k_T y n} \quad \text{ec 3.24}$$

Para propósitos de diseño el caudal, Q , se debe considerar constante: puede ser el valor promedio del caudal producido en la vivienda, el valor máximo esperado o un valor estimado a partir de la dotación recomendada para la zona climática de interés (CNA, 2010); y el % de aguas grises (o negras) equivalentes a esa dotación (NEERI, 2007):

$$Q = (\text{Dotación}/\text{hab})(\text{No. hab})(\% \text{ descarga}) \quad \text{ec 3.25}$$

De manera que, de este caudal depende el área transversal de la celda, A_t , la cual está también asociada con la conductividad y el gradiente hidráulicos (ver ec. 3.20):

$$Q = v_x A_t = K s A_t \quad \text{ec 3.26}$$

La tabla 3.3 presenta la conductividad hidráulica, K , y la porosidad, n , para diferentes medios porosos; los valores se obtuvieron de un estudio experimental realizado en varios

sitios de Latinoamérica y varios humedales donde se usó lirio acuático como vegetación y lechos de arena, grava y tezontle (Francia, 2000).

Tabla 3.3 Características típicas medios porosos

Tipo de material	Diámetro promedio [mm]	Porosidad, n	Conductividad hidráulica, K [m/d]
Arena	2	0.28	100
Grava	8	0.34	960
Tezontle	16	0.45	1038

Fuente (Francia, 2000)

El gradiente hidráulico, s , que tiene un humedal, es función de su pendiente, m , la profundidad, y , y el largo, L :

$$s = \frac{my}{L} = \frac{Wmy}{A_s} \quad \text{ec 3.27}$$

El valor de m para la ecuación anterior ha sido sugerido por Metcalf, quien recomienda un valor entre 0.5 y 2% (Metcalf y Eddy, 2011), mientras que Reed recomienda del 1 a 3% (Crites y otros, 1998). En el presente trabajo se utiliza 1% (ver capítulo 4) ya que el criterio que recomienda Reed es más utilizado en la construcción de humedales artificiales en Latinoamérica.

La profundidad del medio en los sistemas con flujo subsuperficial está directamente relacionada con la profundidad de penetración de las raíces y rizomas de las plantas, pues estas son las que suministran el oxígeno al sistema. La penetración de las raíces de las principales plantas utilizadas en los humedales construidos son las que se muestran en la tabla 3.4

Tabla 3.4 Penetración de las raíces

Plantas	Penetración [cm]
Junco	80
Papiro	60
Totora	30

Fuente:(Tchobanoglous, 1998)

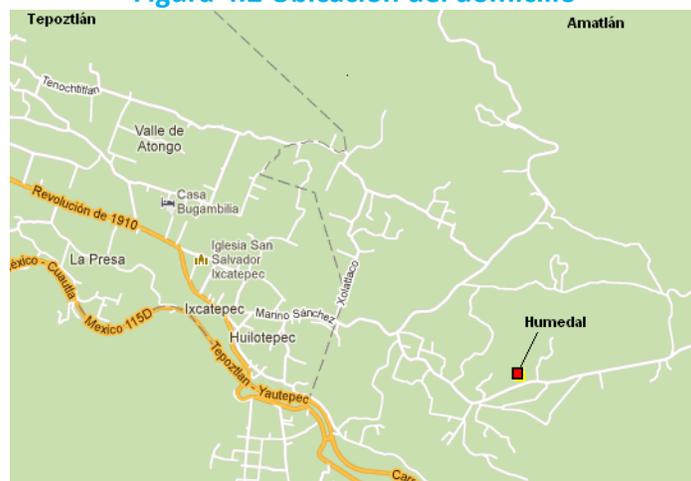
Finalmente, sustituyendo la ecuación 3.26 en la 3.27 y despejando el ancho del humedal se obtiene:

$$W = \frac{1}{y} \left[\frac{Q \cdot A_s}{m \cdot K} \right]^{0.5} \quad \text{ec 3.28}$$

Ecuación que permite calcular el ancho mínimo, W , adecuado para lograr el gradiente hidráulico y el tiempo de retención requeridos. La relación entre largo y ancho en un humedal tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. Las relaciones más comunes son 1:1, 2:1 y 3:1 (Metcalf y Eddy, 2011).

En el capítulo siguiente se muestra el diseño de un humedal a partir de las ecuaciones aquí presentadas, para posteriormente discutir nuevamente las suposiciones consideradas en este trabajo y analizar sus posibles consecuencias sobre el funcionamiento del humedal construido.

Figura 4.2 Ubicación del domicilio



Fuente: (INEGI, 2012)

Clima y características hidrológicas: De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional en la estación de Yautepec (localizada a 18 km de Amatlán) la temperatura media anual es de 21.4°C y la temperatura mínima promedio es de 12.7°C, por lo que se considera clima cálido. La precipitación promedio es de 906 mm y la evaporación media anual de 1545mm (ver anexo 1).

Con estos datos se obtienen algunos de los parámetros de diseño del humedal: la temperatura de diseño se consideró igual a la temperatura mínima promedio de la zona, 12.7°C. La dotación de agua para satisfacer la demanda de los habitantes podría estimarse de acuerdo con el clima (150 l/hab-día, según la CNA (2010)); sin embargo, para el caso de estudio se calculó la cantidad de agua que se utiliza en el domicilio y, a partir de ésta, el caudal que ingresa al HAFH (80% de la dotación, según NEERI (2007)).

En cuanto a la precipitación en el área es importante estar preparados para drenar rápidamente el exceso de líquido en época de lluvias, ya que es muy probable que se rebase el borde del humedal. Por otra parte, la evaporación es también considerable y la reducción del caudal será importante, por lo que debe revisarse continuamente que las plantas cuentan con suficiente líquido.

4.1 Parámetros de diseño

Considerando que los humedales son sistemas dinámicos con condiciones de operación variables, dependiendo de la zona y las características del agua residual a tratar, a continuación se mencionan los criterios con los cuales se diseñó el humedal para este caso de estudio.

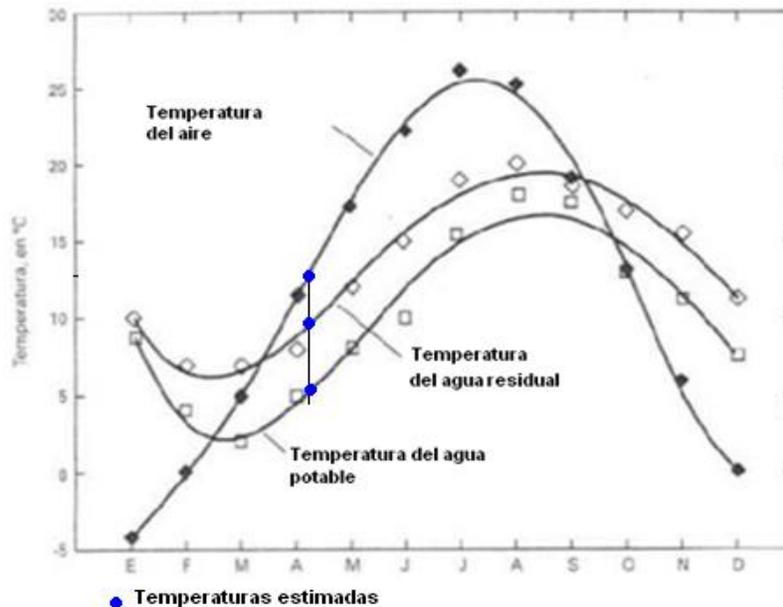
Pretratamiento: El influente del humedal proviene de la regadera, lavabos, lavadora y cocina. Cada uno de estos sitios posee rejillas y filtros que proporcionan un

pretratamiento al agua. En el caso de la tarja de la cocina ésta cuenta con una trampa de grasas; además, por los hábitos de lavado de trastes de la familia, la cantidad de sólidos suspendidos es baja y no representa un inconveniente para el funcionamiento del humedal. Por lo anterior no se requiere de un pretratamiento y el agua gris domiciliaria puede ingresar directamente al humedal.

Temperatura atmosférica: En la ocasión que se realizó la visita al domicilio se midió esta temperatura y se obtuvo un resultado de 26°C; sin embargo, ya que los microorganismos disminuyen su actividad con menores temperaturas se decidió considerar como temperatura de operación (de diseño), la temperatura mínima anual (ver anexo 1).

Temperatura del agua residual: Con base en la temperatura atmosférica, se puede estimar la temperatura del agua potable y la temperatura del agua residual doméstica. Para calcular la temperatura de diseño se debe considerar la temperatura mínima posible, ya que es donde se encuentra la menor actividad de microorganismos. La figura 4.3 (Metcalf, y otros, 2011), presenta las curvas típicas de la relación entre la temperatura del agua y la atmosférica; a partir de este gráfico se estimaron los datos de la tabla 4.1.

Figura 4.3 Estimación de la temperatura del agua residual



Fuente: (Metcalf, y otros, 2011)

Tabla 4.1 Temperatura estimada del agua residual

Mínima aire [°C]	Agua potable[°C]	Agua residual [°C]
12.7	6	10

Constante de reacción: La velocidad de degradación de contaminantes depende de la temperatura del agua, la cantidad de materia orgánica y el tipo de microorganismos que realizan la degradación. Para estimarla existe un amplio campo de investigación, pero para

el diseño de humedales se aproxima su valor mediante el empleo de una constante empírica ajustada para las condiciones de temperatura mínima. Utilizando la ecuación 3.27 y el valor de k_{20} propuesto en el capítulo 3 de esta tesis, se obtiene:

$$k_{10} = (1.104 \text{ d}^{-1})(1.06)^{(10-20)} = 0.616 \text{ d}^{-1}$$

Concentración de materia orgánica: Para estimar la materia orgánica (como DBO_5) en el influente del humedal se tomaron tres muestras de agua gris, en un día típico de actividad, y se siguió el procedimiento estándar de análisis (LISA, 2012) para determinar el valor que debía usarse en las ecuaciones de diseño (ver fig. 4.3 y anexo 2). Como resultado de estas pruebas se obtuvo una concentración de 180mg/l (valor de C_o) y, de acuerdo con la norma para agua de riego C_e , la concentración de materia orgánica en el efluente, debe tener un valor de 30mg/l (ver capítulo 2).

Figura 4.4 Obtención de DBO_5



Caudal: Con base en las consideraciones del capítulo anterior se asume que el caudal es constante y, aunque se podría calcular un caudal medio a partir de la dotación recomendada para clima cálido (ver capítulo 3), se prefirió usar los datos proporcionados por el propietario.

El domicilio cuenta con un tinaco de 2200 litros que es llenado cada 4 días. Considerando que el 80% del agua que se utiliza será descargada como agua gris se obtiene el caudal que ingresa al humedal:

$$Q = \frac{2.2 \text{ m}^3 * 0.8}{4 \text{ días}} = 0.44 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Vegetación: Considerando su presencia en la zona, las condiciones climatológicas y los gustos de los moradores, se utilizó papiro y ave del paraíso. La tabla 4.2 presenta las características de estas plantas y la figura 4.5 una fotografía de las mismas antes de ser colocadas en el HA:

Tabla 4.2 Características del papiro y platanillo

	Papiro	Platanillo
Descripción	Planta de tallo grueso con hojas delgadas envainadas	Planta herbácea perenne de hojas grandes de color verde grisáceo
Floración	No produce flores	Flores de grandes sépalos de color amarillo y anaranjado
Otros usos	Se utilizan las hojas para la elaboración de cestería y tapetes	Obtención de flores
Riego	Se desarrolla en lugares húmedos y cursos de agua	Riegos moderados durante todo el año
Exposición	Luz solar	Luz solar
Temperatura	De 5 a 35°C	De 10 a 35°C
Profundidad	60 cm	40 cm
Sustrato	Cualquiera que posea un pH de 7	Cualquiera que posea un pH de 7

Fuente: (Infojardin, 2011)

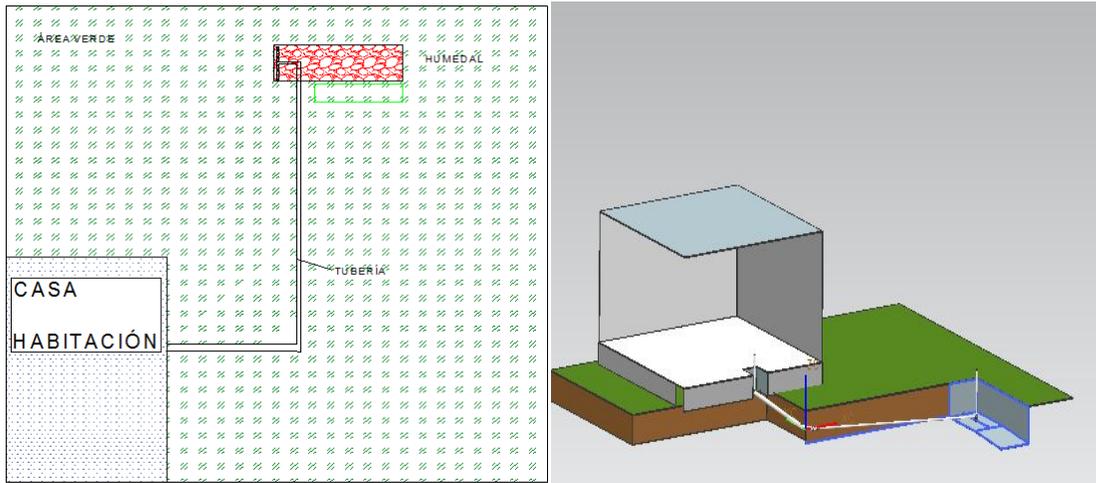
Figura 4.5 Papiro y alcatraz



Porosidad y conductividad hidráulica: Se empleó tezontle por ser un material fácil de conseguir en la zona y económico. Cuya porosidad y conductividad hidráulica (de la tabla 3.3) son: $n = 45\%$ y $K = 1038 \left[\frac{m}{d} \right]$ (ver tabla 3.3).

Área: En el domicilio se cuenta con área suficiente para construir el humedal, sin embargo con el propósito de minimizar los costos de construcción, operación y mantenimiento se diseñó la celda de la mínima área posible (Crites, 1998). La figura 4.6 presenta esquemáticamente, sin escala, la ubicación del HA dentro del predio.

Figura 4.6 Ubicación del humedal en el domicilio



Profundidad: La profundidad requerida depende de la longitud de las raíces de las plantas utilizadas, sin embargo se recomienda una profundidad no mayor a 0.6m (Crites, 1998), y este fue el valor usado.

Pendiente: Se buscó un valor adecuado para tener suficiente carga hidráulica y evitar estancamientos. Se realizaron diferentes cálculos, con valores entre 0.5 y 3%, para ver con cual se obtenía la menor área superficial (lo cual ocurre para 0.5%); sin embargo, se optó construir con una pendiente de 1%, para eliminar cualquier posibilidad de estancamiento.

4.1.1 Cálculos

A continuación se presentan las operaciones matemáticas y las dimensiones resultantes empleadas para la construcción del HAFH. En la tabla siguiente (4.3), se resumen los parámetros de diseño.

Tabla 4.3 Parámetros de diseño

Parámetro	Valor
Materia orgánica en la entrada	180 [mg/l]
Materia orgánica en la salida	30 [mg/l]
Temperatura en el humedal	10 [°C]
Profundidad	0.6 [m]
Pendiente	1 [%]
Porosidad	45 [%]
Conductividad hidráulica	1038 [m/d]
Caudal	0.44 [m ³ /día]

Y, a partir de estos valores se calculó el área superficial, ancho y largo de la celda del humedal; así como el tiempo de retención.

Área superficial: Con la ecuación 3.24:

$$A_s = \frac{0.44 \cdot \ln(180/30)}{(0.616)(0.6)(0.45)} = 4.7[m^2]$$

Ancho: Con la ecuación 3.28:

$$W = \frac{1}{0.6} \left[\frac{0.44 \cdot 4.7}{0.01 \cdot 45} \right]^{0.5} = 0.75[m]$$

Por motivos de construcción se decide hacer la celda de 1m de ancho, entonces $W = 1[m]$

Largo: A partir del área superficial y el ancho se puede obtener el largo del humedal

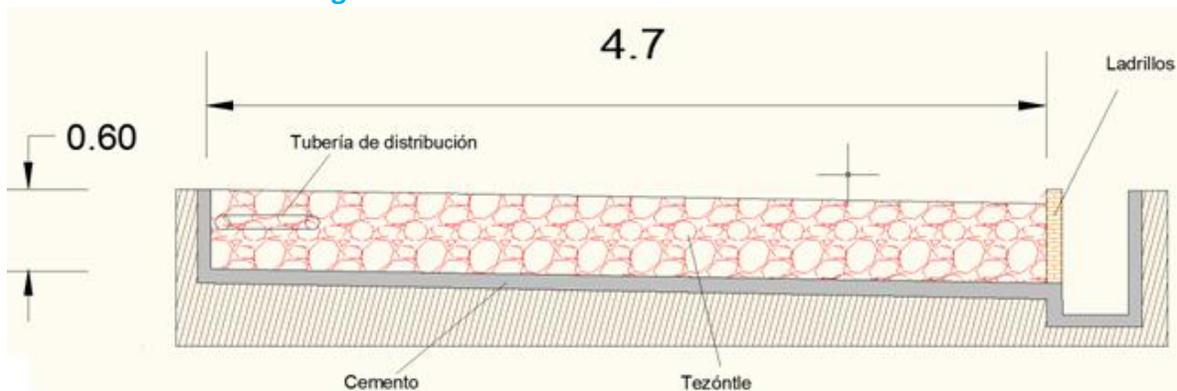
$$L = \frac{4.7m^2}{1m} = 4.7[m]$$

Tiempo de retención: Ecuación 3.23:

$$t = \frac{4.7 \cdot 0.75 \cdot 0.6 \cdot 0.45}{0.44} = 2.9 \text{ días}$$

En cuanto al tiempo de retención necesario para el buen funcionamiento de un humedal Tchobanoglous recomienda de 2 a 4 días (Tchobanoglous, 1998), pero S. Reed establece que se requieren 5 días para asegurar la remoción de contaminantes (Crites, 1998); como para este diseño se buscaban las mínimas dimensiones de celda se optó por construir con las dimensiones arriba presentadas y un tiempo de retención de casi 3 días.

Figura 4.7 Sección transversal del humedal



4.2 Construcción y mantenimiento

Además del cálculo de las dimensiones del humedal existen otros aspectos constructivos que deben satisfacerse. Bajo la supervisión de la M.I. Alejandra Medina y con el apoyo y asesoría de su padre (Sr. Daniel Medina), se realizaron las siguientes actividades:

Desmonte y despalle: Consiste en quitar toda la vegetación dentro del área de construcción y extraer la capa vegetal.

Excavación de la zanja: Se realizó el trazo y localización, y el Sr. Medina hizo la excavación con pico y pala.

Nivelación: Se realizó con equipo de topografía de tal forma que el terreno quedó completamente nivelado y libre de palos, rocas, piedras o cualquier elemento que pudiera alterar el impermeabilizado.

Impermeabilizado: Se impermeabilizó utilizando cemento con jabón zote rayado y con cal, (sistema empleado en arquitectura autóctona), para prevenir la posible percolación a la capa freática.

Estructuras de entrada y descarga: Se emplearon tubos de PVC de 2" de diámetro para la "T" de entrada, con 48 perforaciones de ½", para asegurar la distribución adecuada del flujo (ver figura 4.7). Para la recolección de agua se acondicionó un desnivel hacia una pila de almacenamiento.

Figura 4.8 Tubería de distribución



Colocado de tezontle: Una vez que la capa de cemento se endureció se agregó el medio granular, colocando los granos más gruesos en la zona de entrada para evitar obstrucciones en el tubo distribuidor. La granulometría del tezontle empleado fue de aproximadamente 30 mm de diámetro. A la salida de la celda se colocó una barrera de ladrillos para evitar el arrastre de granos a la zona de recolección del agua.

Plantación de la vegetación: Con el propósito de que las raíces de las plantas no compitan entre sí, el espaciado entre ellas es de 20cm; se colocaron 4 plantas distribuidas en 2 hileras (ver figura 4.8).

Figura 4.9 Construcción del humedal



4.3 Costos

Aunque los costos construcción del humedal se abatieron considerablemente porque la mano de obra estuvo a cargo de los propietarios del predio y gran parte del material ya se tenía, a continuación se presenta el desglose de todos los posibles costos a partir del catálogo de precios unitarios de junio del 2011 del Distrito Federal (GDF, 2011), incluyendo la mano de obra, material de construcción, adquisición de plantas y trabajos auxiliares (ver tabla 4.4).

Tabla 4.4 Costos del humedal

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario [€]	Total [€]
Trazo y nivelación para desplante de estructura para edificación, con equipo de topografía, incluye materiales para señalamiento	m ²	5	9.57	47.8
Desyerbe y limpia del terreno a mano, incluye acarreo libre a 20 m	m ²	5	4.96	24.84
Despalme de material seco clase II, por medios mecánicos, todas las zonas	m ³	0.3	67.48	20.24
Excavación a mano, clase II de 0.00 a 2.00 m de profundidad	m ²	2.6	122.32	318.03
Afine de taludes y fondo del corte en canales, con un espesor promedio de 5 cm, efectuado a mano, en terreno seco clase II	m ²	0.6	9.25	5.55
Carga y acarreo en carretilla y descarga a primera estación de 20.0 m de material producto de extracción en bancos, cortes o excavaciones, volumen medido en banco	m ³	1.4	35.89	50.24
Tubo de PVC tipo sanitario con perforaciones de 1/2" @15 cm, unión cementar, extremos lisos de 100 mm de diámetro	m	1	103.73	103.73
Tubo de PVC tipo sanitario, unión cementar, extremos lisos de	m	6	79.79	478.74

100 mm de diámetro				
Tubo de PVC tipo sanitario, unión cementar, extremos lisos de 50 mm de diámetro	m	10	37.36	373.60
Codo de PVC tipo sanitario unión cementar de 90°x100 mm de diámetro	Pza	1	56.02	56.02
T sencilla de PVC tipo sanitario unión cementar, de 50x50mm de diámetro	Pza	1	59.08	59.08
Cemento gris	Pza	3	85.00	255.00
Grava	m ³	0.5	190.00	95.00
Arena	m ³	0.5	180.00	90.00
Ladrillos	Pza	25	2.00	50.00
Tezontle	m ³	1.8	180.00	324.00
Suministro y colocación de papiro de 100 cm	Pza	2	35.00	70.00
Suministro y colocación de platanillo de 70 cm	Pza	1	50.00	50.00
			TOTAL	2471.35

El costo del humedal es de 2,471 pesos debiendo recordar que en este caso la construcción la realizó el propietario, razón por la cual no se pago mano de obra (467.18 pesos) y las plantas fueron trasplantadas (120 pesos por que ya se tenía el alcatraz), entonces el costo total fue de tan solo 1,885 pesos.

4.4 Análisis de parámetros

A partir del análisis de las ecuaciones de diseño presentado en el capítulo 3, es interesante recordar aquí las suposiciones realizadas para llegar a esas ecuaciones y plantear las consecuencias prácticas que cada suposición pudo acarrear en el funcionamiento del sistema.

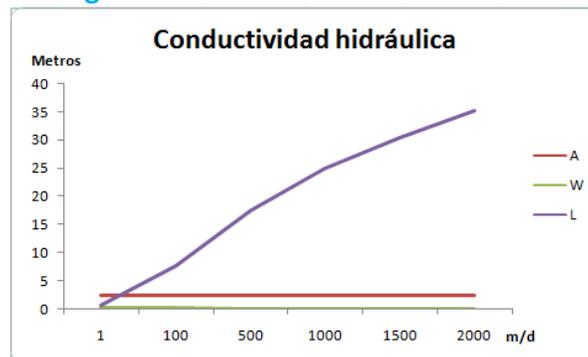
Conservación de masa: Debido a que es un principio fundamental, esta consideración ayuda a determinar las variaciones de masa que ocurren dentro del humedal ya que no hay transformaciones de masa en energía o viceversa en el humedal.

Flujo unidimensional: Esta suposición simplifica considerablemente el análisis, sin embargo hay que tener presente que las variaciones del flujo ocurren en las tres direcciones y el efecto que representa, se tiene que obtener experimentalmente y reflejarlo por medio de constantes (conductividad hidráulica) para que el funcionamiento del sistema sea como el que se espera.

Medio poroso isotrópico: Esta consideración implica que el flujo es uniforme en cualquier dirección lo cual no ocurre en realidad, sin embargo gracias a la pendiente la velocidad de flujo es muy baja por lo que es válido considerar la conductividad hidráulica, la velocidad de reacción y todas las variables en general uniformes en el sistema (a menos que se presenten problemas hidráulicos).

La conductividad hidráulica es el factor que determina la facilidad con la que el agua fluye a través del medio poroso y tiene una influencia importante en la operación eficiente para la eliminación de contaminantes. Este factor es muy sensible a los patrones de arreglo de las partículas en el lecho. La reducción en la conductividad hidráulica indica que la porosidad en el humedal artificial disminuye, lo cual provocará la disminución de la eficiencia. La conductividad hidráulica depende del diámetro promedio, la distribución de tamaño y la forma de la partícula, así como de la permeabilidad del lecho y la velocidad del flujo. En la figura 4.9 se puede observar que la conductividad hidráulica determina la longitud del humedal.

Figura 4.10 Conductividad hidráulica



Como se mencionó previamente, en el diseño de este humedal se utilizaron datos de bibliografía donde se determina la conductividad hidráulica del tezontle y las raíces de la vegetación, sin embargo esta variable cambia durante la operación del humedal y es necesario realizar experimentos cuando el humedal está operando para obtener datos más precisos para diseñar.

Flujo estacionario: La condición de flujo estacionario no se cumple durante la operación del humedal, por la presencia de precipitaciones, evaporación y los hábitos del propietario; sin embargo, esta consideración es indispensable para el diseño y no repercutirá en el funcionamiento del humedal mientras se consideren como condiciones de flujo estacionario el flujo crítico.

Empuje inercial despreciable: Bajo las velocidades de flujo del humedal y, tratándose de un flujo en medio poroso, esta suposición es oportuna.

Gravedad despreciable: Dadas las dimensiones del humedal y a que el movimiento del fluido se debe a la diferencia de alturas, el efecto de la gravedad despreciado en la etapa de diseño no afecta de modo alguno la etapa de operación.

Permeabilidad constante: El área disponible de flujo, porosidad, no es homogénea ni constante dentro del humedal, pero no existe forma alguna de considerar esta variación durante el diseño del humedal por lo que se recomienda, como parte de las labores de

mantenimiento, revisar la integridad del tezontle y distribuirlo lo más uniformemente posible dentro del lecho del humedal. Además, cuando el tamaño de grano del tezontle disminuya demasiado habrá que sustituirlo.

Despreciar flujos de calor: A pesar de que el humedal posee un microclima que ayuda a estabilizar la temperatura, es necesario verificar que bajo condiciones extremas el funcionamiento del humedal se mantiene aceptable. Debemos recordar que la velocidad de reacción microbiológica es muy sensible a los cambios térmicos y que esta suposición es quizá la más difícil de adoptar en la etapa de diseño. De comprobarse que la constante de reacción empleada en el diseño no es la adecuada, se modifique el medio poroso para alterar la velocidad de flujo y compensar el tiempo de reacción requerido.

Trabajo despreciable: Puesto que no existe bombeo dentro del humedal, el despreciar el trabajo sobre o desde el sistema en las ecuaciones de diseño no tiene efecto alguno sobre su operación.

Reacción de primer orden: El asumir que la descomposición microbiológica de materia orgánica dentro de un humedal es una reacción de primer orden es una práctica común, ya que ante un sistema tan complejo (la materia orgánica puede estar en forma soluble, coloidal o insoluble, bajo condiciones aerobias o anaerobias) la temperatura se considera como la única variable de control. Por lo anterior se recomienda observar la eficiencia de remoción en función de las variaciones térmicas y, como se dijo antes, recalcular el tiempo de reacción para intentar igualarlo al tiempo de retención mediante modificaciones en la conductividad hidráulica (cambios en el medio poroso).

La revisión anterior nos permite concluir que aún hay muchas consideraciones que deben introducirse para mejorar las ecuaciones de diseño de un humedal, pero que el conocimiento sobre la complejidad y practicidad de estos sistemas no permite mayores sofisticaciones, por lo que su operación continúa siendo de carácter empírico y la manipulación del medio poroso es, hasta la fecha, la mejor forma de alcanzar la eficiencia requerida.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

Los humedales artificiales son sistemas muy complejos en el que intervienen múltiples variables físicas, químicas y biológicas. Por lo tanto, analizar las ecuaciones que describen sus principios de operación permitió entender mejor su funcionamiento y las limitaciones que existen en las ecuaciones de diseño; de lo cual debe desprenderse el poder identificar los posibles problemas que surjan durante su operación y sugerir modificaciones.

Al realizar este estudio se llegó a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Las ecuaciones de diseño de humedales artificiales, cuyo fin es el diseño y posterior construcción, utilizan criterios muy generales para describir el flujo en medios porosos y las reacciones biológicas.
- El flujo dentro de un humedal es muy complejo, ya que existe un medio poroso variable. Los parámetros usados para representarlo son resultado de experimentación, pero aún faltan estudios para mejorar los datos disponibles.
- Uno de los parámetros más importantes en un humedal es la conductividad hidráulica ya que de ésta depende su longitud. A la fecha existen pocos valores de conductividad hidráulica en la literatura, solo para algunos medios porosos y algunas especies vegetales, por lo que es necesario realizar experimentos para obtener y publicar más de estos datos.
- El tezontle es un material que por sus características y disponibilidad resultó adecuado para la construcción del humedal, además de que en la bibliografía existen datos de su conductividad hidráulica. Sin embargo falta documentar el desgaste que puede sufrir dentro de un humedal.
- Para el diseño del humedal referido en esta tesis se empleó una k_{20} de 1.104 día^{-1} , sugerido para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo cada día surgen nuevos valores para sistemas específicos, por lo que debe consultarse continuamente la bibliografía especializada durante la etapa de diseño en busca del mejor valor disponible.
- El tiempo de retención usado en este diseño fue de tres días, aunque algunos autores, como Sherword Reed, recomiendan tiempos mínimos de 5 días. Sin

embargo, datos experimentales reportados en la literatura consultadas se consideran suficientes para justificar el diseño con un tiempo de retención menor.

- Para reducir los costos se empleo cemento para la impermeabilizar el fondo y paredes del humedal, realizándose pruebas de infiltración las cuales demostraron que este tratamiento es posible.
- Las plantas seleccionadas: Alcatraz, platanillo y papiro, resultaron convenientes para el clima y composición del agua residual.

Finalmente, es importante que nuestra Universidad continúe con la investigación de estos sistemas ya que las constantes de diseño, como la conductividad hidráulica y la de velocidad de reacción, pueden ser obtenidas experimentalmente y así mejorar sustancialmente el diseño de humedales artificiales.

Mesografía

Aguado, Jose, *Tratamiento y reutilización de aguas residuales mediante humedales: Alternativa ecológica para poblaciones con problemas de abastecimiento*, Madrid, Mi+d, 2009.

Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2009/04/02/115734>

Consultado en: Junio del 2012.

Aguamarket, *Humedales de Flujo Subsuperficial SSF*, Aguamarket, 2010.

Disponible en: <http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=4416&termino=Humedales+de+Flujo+Subsuperficial,+SSF>

Consultado en: Junio del 2012.

Akvopedia, *Humedal Artificial de Flujo Vertical*, Holanda, Akvo.org, 2011.

Disponible en: http://www.akvo.org/wiki/index.php/Humedal_Artificial_de_Flujo_Vertical

Consultado en: Abril del 2012.

Bird, Byron, Stewart, Warren, Lightfoot, Edwin, *Fenómenos de transporte*, Nueva York, Reverté, 1982.

Blazejewski, Ryszard y Blazejewska, Murat, *Soil Clogging Phenomena in Constructed Wetlands with Subsurface Flow*, Risskov, IWA Publishing, 1997.

Brix, Hans, *Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives*, Risskov, IWA Publishing, 1994.

Disponible en: [http://mit.biology.au.dk/~biohbn/cv/pdf_files/Wat_Sci_Tech_30%20\(1994\)%20209-223.pdf](http://mit.biology.au.dk/~biohbn/cv/pdf_files/Wat_Sci_Tech_30%20(1994)%20209-223.pdf)

Consultado en: Mayo del 2012.

Brix, Hans y Arias, Carlos, *Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage*, Risskov, IWA Publishing, 2005.

CENTA, *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*, Sevilla, Centro de las Nuevas Tecnologías por el Agua, Ideasmares, 2008.

CONAGUA, *Dotación de agua potable por clima y número de habitantes que establece la Gerencia de Normas Técnicas de la Comisión Nacional del Agua*, México, Comisión Nacional del Agua, 2010.

Crites, Ronald, Reed, Sherwood y Middlebrooks, Joe, *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, Nueva York, Mc Graw-Hill, 1998.

Francia, Delfino, *Determinación de la conductividad hidráulica en pantanos artificiales de flujo subsuperficial horizontal*, Irapuato, Universidad de Guanajuato, Instituto de Ciencias Agrícolas, 2002.

García, Juan y Corzo, Angélica, *Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*, Barcelona, UPCommons, 2008.

GDF, *Catalogo de Precios Unitarios*, México, Gobierno del Distrito Federal, 2011.

Hirasaki, George, *Flow and transport in porous media*. Owl.net.com, 2002.

Disponible en: <http://www.owl.net.rice.edu/ceng571/>

Consultado en: Agosto del 2012.

INE, *Aprovechamiento de aguas grises*, México, Instituto Nacional de Ecología, 2009.

Disponible en: <http://vivienda.ine.gob.mx/index.php/agua/recoleccion-recliclado-y-reuso-de-agua/aguas-grises>

Consultado en: Mayo del 2012.

INEGI, *Resultados principales del censo de población y vivienda 2010*, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010.

INEGI, *Mapa digital de México*, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2012.

Disponible en: <http://galileo.inegi.gob.mx/website/mexico/viewer.htm>

Consultado en: Agosto del 2012.

INEGI, *Marco geoestadístico municipal: Morelos*, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2005.

Disponible en: www.cuentame.inegi.org.mx

Consultado en: Agosto del 2012.

Infojardin, *Plantas acuáticas: Carrizo*, Infojardin, 2011.

Disponible en: <http://www.infojardin.com/>

Consultado en: Mayo del 2012.

InfoMorelos, *Los estados de Morelos: Tepoztlán*, InfoMorelos: Información turística y de negocios, 2010.

Disponible en: <http://infomorelos.com/municipio/tepoztlan.html>

Consultado en: Mayo del 2012.

Kadlec, Ronald y Knight, Ronald, *Treatment wetlands*, Florida, Lewis publishers, 1996.

Lara, Jaime, *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales [Tesis de maestría]*, Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999.

LISA, *Práctica 1 Caracterización del agua residual*, México, Laboratorio de ingeniería sanitaria y ambiental, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2012.

Luna, Víctor, *Humedales artificiales de flujo horizontal o vertical, procedimiento para tratar aguas residuales*, México, Facultad de Química UNAM, 1998.

Luna, Víctor, *Estado del arte y perspectivas de aplicación para humedales artificiales de flujo horizontal en México [Tesis de maestría]*, México, Facultad de Química UNAM, 2001.

Mena, Javier, *Tratamiento de aguas residuales urbanas y vinícolas con humedales artificiales de flujo subsuperficial*, Castilla, Universidad de Castilla, 2008.

Metcalf y Eddy, *Wastewater engineering treatment, disposal and reuse*, Nueva York, McGraw Hill, 2011.

México clásico, *Turismo e Historia del Estado de Morelos*, México clásico, 2010.

Disponible en: <http://www.estadodemorelos.mexicoclasico.com>

Consultado en: Mayo del 2012.

Microplanta, *El tezontle como sustrato*, Microplanta, 2011.

Disponible en: <http://www.microplanta.com/articulos/2006/03/12/el-tezontle-como-sustrato/>

Consultado en: Mayo del 2012

Morgan, Neville y Maitland, Peter, *Conservation Management of freshwater habitat: lakes, rivers and wetlands*, Londres, Kluwer Academic Publishers, 1997.

NEERI, *Greywater reuse guidance manual*, Nagpur, National environmental engineering research institute, 2007.

NEERI, *Greywater reuse in rural schools*, Nagpur, National environmental engineering research institute, 2007.

OPS, *Guía de orientación en saneamiento básico*, Organización Panamericana de la Salud, 2008. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/2-4sas.htm>

Consultado en: Agosto de 2012.

Pedraza, Lucía, *Limpiarán el agua "sucia" que sale de casa*, Bogotá, Noticias de la Universidad Nacional de Colombia, 2009.

Disponible en: <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/en/detalle/article/limpiaran-el-agua-sucia-que-sale-de-casa.html>

Consultado en: Mayo del 2012.

Ramalho, Rubens, *Tratamiento de Aguas Residuales*, Barcelona, Reverté, 1999.

Ramsar, *La historia de los humedales y de los seres humanos*, Convenio de Ramsar, International Union for the Conservation of Nature, 2010.

Disponible en: http://www.ramsar.org/pdf/info/cultural_heritage_s02.pdf

Consultado en: Junio del 2012.

REMA, *Soluciones en purificación y tratamiento de agua: Lodos activados*, México, 2005.

Disponible en: <http://www.rema.com.mx/plantaaguasnegras.html>

Consultado en: Agosto de 2012.

Rodríguez, Celia, *Humedales contruidos: Estado del arte*, La habana, Ingeniería hidráulica y ambiental No.3, 2003.

Sánchez, Francisco, *Software para diseñar sistemas de lodos activados y lagunas aireadas*, Conciencia tecnológica nº 27, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, 2005.

Selba, *Depuración por humedales artificiales*, Selba: Organismo ecológico no gubernamental, 2011.

Disponible en: <http://www.selba.org/esptaster/ecologica/agua/DepurHumedArtif.html>

Consultado en: Junio del 2012.

SEMARNAT, *Reglas de operación para los programas de infraestructura hidroagrícola y de agua potable, alcantarillado y saneamiento a cargo de la comisión nacional del agua, aplicables a partir de 2012*, México, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011.

SEMARNAT, *Aguas residuales*, México, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009.

SEMARNAT. *Ley de aguas nacionales*, México, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012.

SEMARNAT, *SEMARNAT NOM 003 ECOL-1997*, México, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1997.

SMN, *Climatología: Temperatura y precipitación de los últimos 30 años en Yuutepec*, México, Sistema Meteorológico Nacional, 2010.

Disponible en: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=12:temperatura-y-precipitacion&catid=6:slider&Itemid=65

Consultado en: Mayo del 2012.

Seoáñez, Mariano, *Aguas Residuales: Tratamiento Humedales*, Madrid, Mundi-Prensa, 1999.

Seoáñez, Mariano, *Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimentarias*, Madrid, Mundi-Prensa, 2002.

Tanner, Chris, Kadlec, Robert, Hally, Vera y Gibb, Max, *Nitrogen spiraling in subsurface-flow constructed wetlands implications for treatment response*, Ecological Engineering no. 25, págs. 365–381, 2005.

Tchobanoglous, George, *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. Boston : Mcgraw hill, 1998.

USEPA, *Constructed wetlands treatment for municipal wastewater*, Cincinnati, United States Environmental Pollution Agency, 2000.

Vafai, Kambiz, *Handbook of porous media*. New York : Marcel Dekker Inc., 2000.

Yocum, Glenn, *Manual de Diseño: Humedal Construido para el Tratamiento de las Aguas Grises por Biofiltración*, Santa Barbara, University of California, 2006.

Anexo 1: Normales Climatológicas 1971-2000 de Yautepec, Morelos

Para tener una referencia de las condiciones promedio en las que funciona el humedal del caso práctico, se utilizan las normales climatológicas de los últimos 30 años de la estación meteorológica de Yautepec que se encuentra a 18 kilómetros de la ubicación del humedal. Se utilizan la temperatura mínima promedio anual registrada en este periodo para obtener la corrección de la constante de reacción y la temperatura anual promedio para establecer que el humedal se encuentra en clima cálido. Por otra parte se puede observar que la evaporación es elevada y también lo es la precipitación, por lo que a partir de estos datos que deben prever excesos de estas dos variables.

ESTADO DE: MORELOS

ESTACION: 00017024 YAUTEPEC, YAUTEPEC		LATITUD: 18°31'16" N.					LONGITUD: 099°11'18" W.				ALTURA: 1,015.0 MSNM.		
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MAXIMA													
NORMAL	28.7	30.5	32.6	33.7	33.0	30.0	28.8	28.8	28.2	28.8	28.8	28.4	30.0
MAXIMA MENSUAL	34.7	34.9	35.7	37.3	35.8	33.9	33.9	33.7	34.6	33.4	33.9	34.8	
AÑO DE MAXIMA	1989	1989	1991	1991	1998	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	
MAXIMA DIARIA	36.0	36.0	38.5	39.5	39.0	38.5	36.0	35.5	36.0	38.5	35.5	36.0	
FECHA MAXIMA DIARIA	13/1989	17/1986	26/1994	28/1991	08/1998	01/1993	05/1988	28/1988	08/1988	21/1989	02/1988	16/1988	
AÑOS CON DATOS	30	30	30	29	29	29	30	30	30	30	30	30	
TEMPERATURA MEDIA													
NORMAL	18.3	19.8	21.7	23.4	24.1	23.2	22.2	22.2	21.9	21.2	19.9	18.7	21.4
AÑOS CON DATOS	30	30	30	29	29	29	30	30	30	30	30	30	
TEMPERATURA MINIMA													
NORMAL	7.9	9.0	10.9	13.0	15.2	16.3	15.5	15.6	15.7	13.7	10.9	9.0	12.7
MINIMA MENSUAL	5.5	5.4	7.0	9.8	11.9	11.6	12.6	13.4	13.2	10.9	7.9	5.0	
AÑO DE MINIMA	1986	1983	1983	1983	1989	1989	1989	1972	1972	1979	1981	1973	
MINIMA DIARIA	0.0	2.0	3.0	7.0	8.0	9.0	10.0	8.5	7.5	5.0	3.0	1.0	
FECHA MINIMA DIARIA	14/1986	02/1986	07/1983	18/1971	10/1989	21/1989	12/1973	26/1982	30/1979	01/1979	24/1981	21/1982	
AÑOS CON DATOS	30	30	30	29	29	29	30	30	30	30	30	30	
PRECIPITACION													
NORMAL	11.5	2.7	3.7	11.0	57.8	186.7	170.3	174.7	192.4	77.0	13.4	5.1	906.3
MAXIMA MENSUAL	108.7	20.3	31.0	59.4	198.3	318.3	438.5	312.8	428.1	181.7	40.7	58.4	
AÑO DE MAXIMA	1992	1992	1978	1997	1995	1988	1976	1999	1998	1996	1995	1995	
MAXIMA DIARIA	35.0	9.5	29.0	25.2	75.5	99.0	100.5	87.5	86.0	74.0	27.4	34.9	
FECHA MAXIMA DIARIA	25/1980	11/1983	16/1978	10/1997	29/1995	20/1974	08/1976	05/1984	06/1973	13/1990	03/1991	31/1995	
AÑOS CON DATOS	30	30	30	29	30	29	30	30	30	30	30	30	
EVAPORACION TOTAL													
NORMAL	92.9	119.5	169.5	182.0	172.5	142.5	141.4	134.4	111.7	106.0	90.3	82.2	1,544.9
AÑOS CON DATOS	29	29	28	28	28	29	29	29	29	29	28	28	
NUMERO DE DIAS CON LLUVIA													
NORMAL	1.0	0.7	0.8	2.1	7.4	15.4	16.2	17.2	16.6	7.6	2.0	0.9	87.9
AÑOS CON DATOS	30	30	30	29	30	29	30	30	30	30	30	30	
NIEBLA													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.7	1.0	0.3	0.0	0.0	2.4
AÑOS CON DATOS	30	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
GRANIZO													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
AÑOS CON DATOS	30	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
TORRENTA E.													
NORMAL	3.5	2.0	1.4	1.6	1.9	2.6	3.8	4.3	4.6	3.5	3.7	4.4	37.3
AÑOS CON DATOS	30	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	

Anexo 2: Caracterización de $DBO_{5,20}$ del agua gris del caso práctico

Para tener una referencia de la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual del caso práctico, se tomaron tres muestras de agua gris. Se utilizó el procedimiento que indica la práctica 1 de la materia de tratamiento de aguas residuales del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental con apoyo de la Ing. Dulce Cisneros.

Se almacenaron las muestras en un refrigerador durante 7 días a una temperatura de 20°C y se obtuvo la cantidad de oxígeno disuelto al inicio y después de este periodo. Posteriormente se calculó DBO_5 como el cociente de la diferencia de oxígeno disuelto en el agua de muestra en el primer día (ODI) menos el oxígeno disuelto al quinto día (ODF), sobre el porcentaje de dilución (2 litros de agua con 2 ml de solución amortiguadora, 2ml de sulfato de magnesio, 2ml de cloruro de calcio, 2ml de cloruro férrico, 2ml de sulfato manganeso y 2ml de álcali-yoduro-nitruro).

Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días y 20 °C

$$DBO_{t,T} = \frac{ODI-ODF}{\%disolucion}$$

pero como se caracterizó el agua en 7 días se corrige el valor anterior con la demanda última a 7 días y 20 °C

$$L = \frac{DBO_{t,T}}{1-e^{(-0.23*7)}}$$

Partiendo de la demanda última se estandariza el valor de DBO , corrigiendo el valor a 5 días y 20 °C con la siguiente ecuación:

$$DBO_{5,20} = (L)(1 - e^{(-0.23*5)})$$

A partir de la DBO última (L) se puede obtener el valor de $DBO_{t,T}$ (a cualquier tiempo y temperatura de incubación).

Muestra	$DBO_{5,20}$ [mg/l]
1	222
2	151
3	163
Promedio	180