



**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.
APLICACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES.**

**AUTOR
JONATHAN LOPEZ SALAZAR**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
MÉXICO D.F.
2015**





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL**

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.
APLICACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES.**

**TESIS PROFESIONAL
para obtener el título de
INGENIERO MECÁNICO**

**PRESENTA
JONATHAN LOPEZ SALAZAR**



**ASESORA DE TESIS
M.I. ALEJANDRA MEDINA AREVALO**

Dedicatoria

A Dios, por cuidarme siempre, por permitirme ser protagonista de esta vida maravillosa y por regalarme tantas alegrías y tristezas.

A mis padres, mis besos y abrazos por confiar en mí, por haberme dado las fuerzas para continuar cuando he estado a punto de caer, por enseñarme que “Dios aprieta pero no ahorca” y que no hay otra forma de llegar lejos más que trabajando arduamente.

A mi Madre, mi adoración y eterno agradecimiento, por enseñarme valores, por haberme cuidado tanto, por levantarme temprano en mis inicios de la escuela, por ser mi amiga hasta altas horas de la noche y por enseñarme el valor de: “¿te puedo ayudar en algo?”, este éxito es para ti.

A mi Padre, mi respeto y fascinación, quien me transmitió sus conocimientos y del quien aún sigo aprendiendo, por darme todo lo que pude necesitar y por enseñarme que en épocas de crisis uno debe trabajar aún más pues como bien dice: “eso es lo que le da sabor al caldo”. El primer ingeniero que conocí, este triunfo también es para ti.

A mi clase de estática, por ser el perfecto escenario de mí destino; porque allí comenzó lo mejor de mi vida, mi amor incondicional, porque me enseñaste lo que es la felicidad, a superarme día a día y a darme cuenta que los sueños por imposibles que parezcan si uno tiene la mentalidad firme los puede cumplir.

Porque sabes el trabajo que me costó, porque confiaste en mí pues sabías que lo lograría a pesar de que incluso yo perdía la fe.

De ahora en adelante tendremos pruebas difíciles como profesionales y como esposos, pero con tu ayuda y tu motivación sé que las vamos a superar, hoy más que nunca te agradezco todo y lo reafirmo: TE AMO DANIELA Y JUNTOS PODEMOS HACER LO QUE SEA.

A mis hermanos, porque es difícil ser los hermanos mayores, gracias por estar siempre cuando los necesité sin importar la hora ni el día, saben que también pueden contar conmigo.

A mi mejor amigo Adiel, gracias por los consejos y regaños durante todos estos años.

A mis sinodales, que me soportaron tanto sin perder la paciencia y que me ayudaron a terminar esta tesis.

Y finalmente a toda persona que pudiera estar leyendo esta tesis, regalándome así un poco de su valioso tiempo.

A TODOS GRACIAS.

Variables

C_e	Concentración del contaminante en el efluente, $[\frac{mg}{l}]$
C_0	Concentración del contaminante en el afluente, $[\frac{mg}{l}]$
K_T	Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, $[d^{-1}]$
K_S	Conductividad hidráulica $[m/d]$
t	Tiempo de retención hidráulica, $[d]$
L	Largo de la celda del humedal, $[m]$
W	Ancho de la celda del humedal, $[m]$
y	Profundidad de la celda del humedal, $[m]$
n	Porosidad (porcentaje expresado como decimal), o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal.
Q	Caudal a través del humedal, $[\frac{m^3}{d}]$
A_S	Área superficial del humedal, $[m^2]$
m	Pendiente del fondo del lecho (porcentaje expresado como decimal).

Tratamiento de aguas residuales. Aplicación de humedales artificiales

Índice

<i>Variables</i>	i
<i>Índice</i>	ii
<i>Índice de tablas y figuras</i>	iii
1. Introducción	1
1.1 Problemática	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Alcances y limitaciones	2
2. Contaminación ambiental	4
2.1 Aguas residuales	7
2.1.2 Normatividad	8
2.2 Tratamiento	10
2.2.1 Primario	11
2.2.2 Secundario	14
2.2.3 Avanzado	19
2.2.4 Ventajas y desventajas comparativas	25
3. Humedales artificiales	28
3.1 Procesos	28
3.2 Clasificación	29
3.3 Diseño	31
3.4 Construcción	34
3.5 Operación y mantenimiento	37
4. Caso práctico	39
4.1 Diagnóstico	42
4.2 Diseño	43
4.3 Planeación y construcción	46
4.3.1 Costo	55
4.3 Análisis de resultados	57
5. Conclusiones y recomendaciones	58
Anexos	
A.1 Anexo fotográfico	62
A.2 Bitácora	69
Glosario	73
Referencias	80

Índice de tablas

2.1	<i>Normas Oficiales Mexicanas (NOM)</i>	9
2.2	<i>Características de los procesos de tratamiento de aguas residuales</i>	25
3.1	<i>Características típicas de material de sustrato</i>	32
4.1	<i>Valores de diagnósticos</i>	43
4.2	<i>Parámetros de diseño</i>	43
4.3	<i>Longitud promedio de las raíces</i>	44
4.4	<i>Cantidad de plantas en el humedal</i>	45
4.5	<i>Propuestas según el número de habitantes</i>	46
4.6	<i>Catálogo de precios del humedal</i>	56

Índice de figuras

2.1	<i>Diagrama de flujo de una planta de tratamiento de aguas residuales</i>	11
2.2	<i>Rejillas de protección</i>	12
2.3	<i>Proceso de sedimentación</i>	12
2.4	<i>Esquema de una cámara de flotación</i>	13
2.5	<i>Esquema de una planta de tratamiento de tratamiento con lodos activados</i>	14
2.6	<i>Depuradora de oxidación total</i>	15
2.7	<i>Estabilización por contacto</i>	15
2.8	<i>(a) Difusores de burbuja fina (b) Lagunas aireadas.</i>	16
2.9	<i>Filtro biológico horizontal</i>	17
2.10	<i>Sección transversal de un humedal artificial</i>	17
2.11	<i>Biodiscos</i>	18
2.12	<i>Esquema de un biodigestor</i>	18
2.13	<i>Máquina de microtamizado</i>	19
2.14	<i>Microfiltración en lecho de arena en doble etapa</i>	20
2.15	<i>Carbón activo granular</i>	20
2.16	<i>Esquema de intercambio iónico</i>	21
2.17	<i>Esquema de osmosis inversa</i>	22
2.18	<i>Electrodialisis</i>	23
2.19	<i>Proceso de cloración</i>	23
2.20	<i>Equipo generador de ozono</i>	24
2.21	<i>Esterilizador por rayos UV</i>	25
3.1	<i>Sección transversal de un humedal artificial</i>	28
3.2	<i>Clasificación de humedales artificiales</i>	30
3.3	<i>Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical</i>	30
3.4	<i>Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal</i>	30
3.5	<i>Entrada tipo "T" con tubo de PVC</i>	37
3.6	<i>Control de profundidad en el humedal</i>	35
3.7	<i>Recubrimiento plástico de PVC</i>	36
3.8	<i>Plantas con rizomas conectados</i>	36
4.1	<i>Mapa delegacional de la Ciudad de México</i>	39
4.2	<i>Asentamientos humanos irregulares de la delegación Tlalpan</i>	40

4.3	<i>Secciones del asentamiento Manzana 36</i>	41
4.4	<i>Distribución de lotes en la 1a sección de Manzana 36</i>	41
4.5	<i>Distribución del predio</i>	42
4.6	<i>Propuesta 1. Humedal para 2 personas, delimitando el estacionamiento</i>	48
4.7	<i>Propuesta 2. Humedal para 6 personas delimitando el predio</i>	49
4.8	<i>Propuesta 3. Humedal para 2 personas para casa A, bajo escalera</i>	50
4.9a	<i>Propuesta 4a. Humedal para 4 personas de la casa B</i>	50
4.9b	<i>Propuesta 4b. Humedal para 4 personas de la casa B</i>	51
4.9c	<i>Propuesta 4c. Humedal para 4 personas de la casa B</i>	51
4.10	<i>Propuesta para la planta alta de la casa A</i>	52
4.11	<i>Propuesta de humedal para la planta baja de la casa A</i>	53
4.12	<i>Propuesta final</i>	54
4.13	<i>Planos del humedal</i>	54
4.14	<i>Trampa de grasas</i>	55
4.15	<i>Control de salida</i>	55
A.1.1	<i>Lote baldío con espacio disponible</i>	62
A.1.2	<i>Casa deshabitada con espacio disponible</i>	62
A.1.3	<i>Lote utilizado como jardín para fiestas con espacio disponible</i>	63
A.1.4	<i>Fosa séptica comunitaria deshabilitada</i>	63
A.1.5	<i>Fachada del lote que no cuenta con espacio disponible</i>	64
A.1.6	<i>Fachada principal del lote elegido, propiedad de la Sra. Martínez</i>	64
A.1.7	<i>Planta baja de la casa habitación "A" (propiedad de la Sra. Martínez)</i>	65
A.1.8	<i>Planta alta de la casa habitación "A"</i>	65
A.1.9	<i>Casa habitación "B" (en construcción)</i>	66
A.1.10	<i>Fosa séptica de la casa habitación "A"</i>	66
A.1.11	<i>Tinaco deshabilitado que podrá aprovecharse para el agua tratada</i>	67
A.1.12	<i>Riego del jardín con aguas grises</i>	67
A.1.13	<i>Vista de la ubicación del humedal (fondo del pasillo)</i>	68
A.1.14	<i>Ubicación de la posible construcción del humedal</i>	68

1. Introducción

En la actualidad se buscan nuevas tecnologías y estrategias que permitan obtener procesos y productos con un menor impacto ambiental. Algunas de estas tecnologías involucran procesos naturales como: la depuración del ambiente por medio de plantas (fitorremediación), la sustitución de combustibles fósiles por combustibles orgánicos renovables (biocombustibles) o la utilización de energías limpias como la solar y la eólica. Para el uso de estas *tecnologías verdes* es necesario que la *eficacia* se encuentre balanceada con el *costo*.

Las *tecnologías verdes o limpias* son opciones que permiten reducir la contaminación ambiental y la generación de residuos, además de aumentar la eficiencia del uso de recursos como el agua y la energía.

En lo relativo al agua, valoramos su importancia como insumo en las actividades productivas (como la agricultura, la generación de energía eléctrica, el turismo o la industria), porque proporciona bienestar social, apoya el desarrollo económico y favorece la preservación de la flora y fauna del país (CONAGUA, 2010).

Debido a la falta de infraestructura y manejo inadecuado, las aguas residuales son actualmente un problema ambiental; contaminan los ecosistemas donde son vertidas (lagos, lagunas, ríos, manglares, mares y costas) afectando la flora y fauna local, pero también los seres humanos resultamos seriamente afectados pues muchos de estos lugares eran fuentes de agua dulce (Ramalho, 1996).

1.1 Problemática

El desperdicio en el uso del agua, el crecimiento poblacional (se ha cuadruplicado en los últimos 55 años) y la disponibilidad irregular del líquido (en el centro y norte de la República se concentra el 77% de la población y se tiene el 31% de la disponibilidad de agua; mientras que en el sureste, donde existe el 69% de la disponibilidad, únicamente se ubica el 23% de la población), han ocasionado que el agua de los ríos y lagos sea insuficiente, que las fuentes de abastecimiento subterráneas estén sobreexplotadas (se extrae el 58% del agua subterránea para todos los usos) y que su calidad se haya deteriorado (16 acuíferos en el país presentan intrusión marina y 32 sufren salinización de suelos).

La disponibilidad per cápita en México pasó, en 56 años, de 18,035 (en 1950) a tan sólo 4,090 m³/hab-año (CONAGUA, 2010). Actualmente, en donde no existe red sanitaria se construyen pozos de absorción para recibir las aguas residuales y conducir las a los mantos freáticos. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en México se generan 447 m³/s de aguas residuales, de los cuales 209.1 m³/s se colectan en la red de drenaje pero solamente 93.6 m³/s reciben algún tipo de tratamiento.

De acuerdo a la legislación, para reutilizar el agua es necesario tratar las aguas residuales mediante una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como finalidad eliminar los contaminantes presentes; el objetivo del tratamiento es producir agua limpia, o reutilizable, y atrapar los contaminantes como residuos sólidos (lodos) y disponerlos posteriormente. Las aguas residuales parcialmente tratadas pueden utilizarse para recargar los acuíferos subterráneos, como aguas de enfriamiento en aplicaciones industriales, para riego, para recreo (sin contacto directo) y uso doméstico no potable (CONAGUA, 2010).

De las 2342 plantas de tratamiento en operación en el país, el 14.02% utiliza lagunas de estabilización y 55.42% lodos activados (CONAGUA, 2010); ambos tratamientos requieren grandes superficies y, cuando no se operan correctamente, despiden olores y son focos de infección donde proliferan mosquitos. Por otra parte, el costo de las plantas de tratamiento sigue siendo elevado en comparación con la capacidad económica de los usuarios y requieren de una cantidad importante de energía para su funcionamiento, además de personal capacitado para su mantenimiento y operación; por ello, se propone utilizar una tecnología de tratamiento alterna que cuente con características sustentables (adaptabilidad, bajo costo de operación, mantenimiento y nulo consumo energético). La alternativa propuesta es conocida como *humedales artificiales*, las cuales depuran el agua por medio de plantas.

Finalmente, debemos recordar que la necesidad de vivienda en centros urbanos ha generado el surgimiento de asentamientos irregulares (María Luisa Santillán, 2013) que se caracterizan por su rápido crecimiento, falta de planeación y carencia de servicios urbanos (agua potable, drenaje, pavimentación, recolección de residuos, transporte público e iluminación). En estos asentamientos los residentes deben dotarse de servicios mediante la autoconstrucción y cooperación comunitaria (IPN, 2009), por lo que una solución al tratamiento de las aguas residuales es la utilización de *humedales artificiales* que representan un beneficio a la sociedad y se pueden adaptar en cualquier zona del país.

1.2 Objetivo

Diseño y construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas en un asentamiento irregular para verificar la viabilidad técnica y económica del mismo.

1.3 Alcances y limitaciones

Con esta tesis se adquirieron conocimientos sobre los procesos de tratamiento de aguas residuales y sobre su puesta en marcha. Sin embargo, dado el objetivo de la misma fue necesario seleccionar sólo un tratamiento y un sitio de construcción; para esto se establecieron los siguientes alcances y limitaciones:

- Para seleccionar el tratamiento se consideró la eficiencia de remoción de materia orgánica (85 a 90%), el costo de instalación y mantenimiento, la adaptabilidad, los requerimientos de mantenimiento y la facilidad de operación.
- La caracterización del agua residual a tratar (composición y gasto) se realizó a partir de entrevistas con el usuario (usos y costumbres) e información de la literatura especializada.
- El sitio propuesto para la construcción fue un lote de un asentamiento irregular de la Delegación Tlalpan que reunió las características necesarias: espacio suficiente, falta de drenaje municipal e interés del propietario por la tecnología.
- El lote se seleccionó mediante la inspección directa del asentamiento y sus lotes, una entrevista con el propietario preseleccionado y la aprobación de la Delegación.
- Para la obtención de los costos empleados en este trabajo se recurrió a precios reales de mercado y al catálogo de precios unitarios vigentes para el DF.
- Al momento de escritura de esta tesis se había diseñado el humedal, cuyo material constructivo será donado por las autoridades de la Delegación de Tlalpan, y se estaba en espera de iniciar la construcción.
- Una vez que se construya el humedal se pretende darle seguimiento, por parte de la UNAM y la Delegación, para que se emplee como modelo para otros lotes de ese y otros asentamientos irregulares del Distrito Federal.

2. Contaminación ambiental

El aprovechamiento inadecuado de los recursos naturales, junto con la agresividad ambiental de muchas actividades industriales (como la minería) y el aumento desmedido de la población, han generado una enorme cantidad de residuos que representan una crisis ambiental.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) define la contaminación como: *La presencia en el ambiente de toda materia o energía, en cualquiera de sus estados físicos y formas que, al incorporarse en el medio, altera o modifica su composición o condición natural, causando un desequilibrio ecológico* (LGEEPA, 2011).

La contaminación se clasifica según el medio en que se encuentre: aire, agua o suelo, o según el tipo de contaminante presente: residuos sólidos, gases efecto invernadero, metales pesados, etc. A continuación se presentarán brevemente los principales contaminantes, clasificados según el medio donde se encuentran (Bautista Zúñiga, 1999), para posteriormente considerar con mayor detenimiento la contaminación del agua.

Contaminación del aire. Al moverse sobre la superficie del planeta el aire recoge residuos producidos por fenómenos naturales (volcanes, erosión, etc.) y por actividad humana (industria, transporte, etc.). Estos residuos se conocen como *contaminantes primarios*, los cuales al mezclarse entre sí pueden reaccionar formando *contaminantes secundarios*. Entre los principales contaminantes del aire se tienen:

Monóxido de carbono (CO): Es un gas inodoro e incoloro, producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles (gasolina, petróleo, leña). Cuando se inhala ingresa al torrente sanguíneo donde inhiben la distribución del oxígeno entre las células del cuerpo al formar carboxihemoglobina; produciendo mareos, jaqueca, fatiga, desmayo e inclusive la muerte.

Dióxido de carbono (CO₂): Es el principal gas causante del efecto invernadero y se origina a partir de la respiración y la combustión completa de carbón, petróleo, gas natural y cualquier combustible que contenga carbono.

Óxidos de nitrógeno (NO_x): Proviene también de la combustión y se producen a través de dos procesos consecutivos. En primer lugar, las altas temperaturas alcanzadas en las combustiones provocan la combinación directa del oxígeno y el nitrógeno del aire para dar óxido nítrico (NO), y éste luego se oxida a NO₂ principalmente por reacciones fotoquímicas. La principal fuente emisora de óxidos de nitrógeno a la atmósfera urbana son los vehículos y en menor medida instalaciones de combustión como las calefacciones. Pueden producir dificultades respiratorias en personas asmáticas, tos en niños y trastornos del sistema respiratorio, además de la llamada *lluvia ácida*. (ASPB, 2012)

Dióxido de azufre (SO₂): Se produce por la presencia de azufre en los combustibles, la fabricación de ácido dodecibencensulfónico, la vulcanización y la fundición de metales. Al igual que los óxidos de nitrógeno, es causante de la lluvia ácida y daña el sistema respiratorio.

Partículas: Son todo tipo de materia sólida y líquida (aerosoles) en suspensión; su origen es diverso como: combustión incompleta, erosión e industria metal mecánica. Reducen la visibilidad y, dependiendo de su tamaño, pueden alojarse en el tejido pulmonar y producir diversas enfermedades respiratorias.

Compuestos orgánicos volátiles (COV): Se emiten por la evaporación o la quema incompleta de compuestos orgánicos; incluyen gasolina, benceno, tolueno, xileno y percloroetileno. Su efecto depende de la composición; algunos son cancerígenos, como el benceno y tolueno (Aguilar, 2007).

Ozono (O₃): Es un contaminante secundario que se forma en la tropósfera por la acción de la luz solar sobre el dióxido de nitrógeno y la presencia de COV. Es un fuerte oxidante y produce irritación del tracto respiratorio, además de ser perjudicial para la vegetación y todos los materiales, ya que oxida su superficie.

Clorofluorcarbonos (CFC): Son productos químicos antropogénicos que se utilizan en gran cantidad en la industria (sistemas de refrigeración, aire acondicionado, aerosoles, etc.). Cuando son liberados a la atmósfera ascienden a las capas superiores y, en la estratósfera, producen reacciones químicas que dan lugar a la liberación de átomos de cloro y la reducción de la capa de ozono.

Metales pesados: Estos metales (plomo, mercurio, zinc, cadmio, cromo, etc.) son bioacumulables y tóxicos, pudiendo afectar el sistema nervioso, causar problemas digestivos o producir cáncer. Estos elementos se emiten por su uso como: aditivos de gasolinas, pinturas, recubrimientos e iluminación.

Contaminación del agua. Cuando se altera la composición natural del agua y deja de ser apta para el consumo humano, se considera agua contaminada. Esta contaminación puede deberse a la presencia de microorganismos (contaminación biológica), sólidos de diferentes tamaños y densidad (contaminación física) o sustancias diluidas (contaminación química). Entre los principales contaminantes están:

Patógenos: Pueden ser bacterias, virus, protozoos y helmintos (gusanos) presentes en las aguas residuales municipales o introducidos al permitir el contacto del agua con materia fecal. Son los causantes de enfermedades gastrointestinales, infecciones en la piel e inclusive la muerte. Algunas de las enfermedades más comunes son: *tifus, cólera, disentería y gastroenteritis* (Díaz Delgado, y otros, 2001) .

Materia orgánica biodegradable: Son residuos de materia orgánica que se pueden descomponer por la acción de bacterias aerobias. Si el agua tiene gran cantidad de este tipo de residuos, la población bacteriana aumentará (requiriendo mayor cantidad de oxígeno) y con ello disminuirá la concentración de oxígeno disuelto produciendo la muerte de peces y de otras formas de vida acuáticas.

Productos químicos orgánicos: Se refiere a la contaminación por petróleo, gasolina, plaguicidas, disolventes, detergentes y otros compuestos que, aunque de origen orgánico, no son biodegradables y perjudican la salud humana y la vida acuática.

Materia inorgánica hidrosoluble: Son contaminantes como ácidos, sales y compuestos inorgánicos de metales tóxicos (mercurio, zinc, plomo) provenientes principalmente de la industria. Al no degradarse naturalmente (por medio de microorganismos) estos materiales pueden alcanzar altas concentraciones ocasionando daños a los cultivos, toxicidad a diversas formas de vida acuática y biomagnificación (Calvo, 2002).

Nutrientes inorgánicos: A diferencia de los anteriores, estos contienen nitratos y fosfatos hidrosolubles (fertilizantes agrícolas) que causan un crecimiento excesivo de algas y otras plantas acuáticas que agotan el oxígeno disuelto en el agua hasta llegar a producir eutrofización (Ramalho, 1996). Ingerir agua con niveles altos de nitratos disminuye la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, causando la muerte de fetos o niños menores de un año (Bautista Zúñiga, 1999).

Sedimentos o sólidos en suspensión: Son los principales contaminantes del agua y son aquellas partículas de suelo (provenientes de la erosión) y de otros sólidos que quedan suspendidos en el agua. Los sedimentos enturbian el agua y reducen la fotosíntesis, con lo que alteran la producción de alimentos acuáticos; además de obstruir la tuberías. Otros efectos sobre la salud humana y la vida acuática dependen de su composición.

Isótopos radiactivos solubles: Estas sustancias se concentran biológicamente en varios tejidos y órganos al pasar a través de las cadenas alimenticias (biomagnificación). La radiación emitida puede producir defectos congénitos, cancerígenos y daños genéticos.

Contaminación del suelo. El suelo es un sistema complejo de roca, arcillas, nutrientes, microorganismos, vegetales y agua, en donde se realizan procesos físicos, químicos y biológicos (oxidación, adsorción, absorción y biodegradación) que pueden eliminar o verse afectados por algunos contaminantes. Los contaminantes que llegan al suelo lo hacen a través de descargas de aguas residuales, el depósito de residuos sólidos urbanos o prácticas agrícolas; algunos son:

Fertilizantes nitrogenados fosfatados potásicos (NPK): Benefician los suelos agrícolas, aumentan su fertilidad, pero en cuerpos de agua propician la eutrofización y en capas subterráneas del suelo y mantos acuíferos pueden ocasionar la acumulación de materia orgánica.

Metales pesados: En los suelos interactúan con las arcillas, los oxi-hidróxidos. La materia orgánica, carbonatos y sulfatos, con los que se presentan los procesos de adsorción, sustitución isomórfica, quelación, oxidación, reducción, etc. que dependiendo de las propiedades particulares del suelo, pueden ser benéficos, dañinos o no presentar efecto. Por ejemplo, en los organismos ocasionan problemas de toxicidad que incluye los efectos potencialmente carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos (Bautista Zúñiga, 1999).

Lixiviados (Relleño Sanitario). Son aguas residuales formadas por la descomposición de los residuos y otros factores como la precipitación pluvial, este líquido contiene materiales contaminantes como plomo, aluminio y arsénico, afectando el medio ambiente y los recursos hídricos. En la actualidad existen graves problemas de contaminación provocados por la gran cantidad de residuos y su manejo inapropiado.

Las aguas residuales constituyen una de las principales fuentes de contaminación debido a la falta de sistemas de canalización, desalojo y tratamiento inadecuado o nulo.

2.1 Aguas residuales

Se define como *agua residual* al agua contaminada con desechos orgánicos humanos o animales u otras sustancias que ingresan a ella después de su aprovechamiento. A las aguas residuales también se les llama aguas servidas, fecales o cloacales debido a que contienen materia fecal y por la forma en la que son transportadas (del latín *cloaca*, alcantarilla) respectivamente (Acosta, 2008).

Las sustancias contaminantes que pueden aparecer son muchas y diversas. El origen de las aguas residuales determina su composición y se pueden clasificar en:

- *Domésticas*: son aquellas utilizadas con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, etc.). Consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación; también en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares.
- *Industriales*: son líquidos generados en los procesos industriales. Poseen características específicas, dependiendo del tipo de industria.
- *Infiltración y caudal adicionales*: las aguas de infiltración penetran en el sistema de alcantarillado a través de los empalmes de las tuberías, paredes de las tuberías defectuosas, tuberías de inspección y limpieza, etc. Hay también aguas pluviales que son descargadas por medio de varias fuentes como canales, drenajes y colectores de aguas de lluvias.
- *Pluviales*: son agua de lluvia, que descargan grandes cantidades de agua sobre el suelo. Parte de esta agua es drenada y otra escurre por la superficie, arrastrando arena, tierra, hojas y otros residuos que pueden estar sobre el suelo (UTN-FRBB, 2007) (UTN-FRBB, 2007).

2.1.2. Normatividad

Los contaminantes se pueden clasificar de acuerdo al elemento agresor en tres grandes grupos: químicos, físicos y biológicos. También se pueden clasificar según su estructura química en orgánicos e inorgánicos.

Contaminantes químicos. Son aquellos contaminantes que se combinan con el agua y cambian su composición química original. El elemento agresor, es la materia en sus diferentes estados y sus variadas composiciones químicas, por ejemplo:

- *Contaminación por veneno.* Actualmente se vierte gran cantidad de sustancias químicas de origen sintético que los sistemas biológicos no pueden procesar y depurar por ser nuevos en el medio, lo cual imposibilita su uso posterior. Este fenómeno se da principalmente en actividades agrícolas y pecuarias, debido a la utilización de fertilizantes y plaguicidas.

Contaminantes físicos. Son aquellos que alteran el color, olor, temperatura, sabor y demás características físicas del agua. Las alteraciones físicas más importantes que sufren las aguas como consecuencia de la contaminación son:

- *Cambios térmicos (contaminación térmica).* Es el caso de aguas procedentes de plantas industriales, relativamente calientes después de haber sido utilizadas en los intercambiadores (enfriadores).
- *El color.* Por ejemplo, los licores negros que se descargan procedentes de las plantas de fabricación de pasta química.
- *Turbidez.* Originada por la descarga de aguas que contienen sólidos en suspensión.
- *Espumas.* Los detergentes constituyen una causa importante de formación de espumas.
- *Radiactividad.* Aquí la contaminación aparecerá como radioisótopos disueltos.

Contaminantes biológicos. Son aquellos microorganismos contenidos en la materia orgánica, responsables de la transmisión de enfermedades, que se transportan a través de las aguas de abastecimiento y pueden penetrar en el organismo produciendo daños a la salud. Algunas de las enfermedades que se transmiten por contaminación biológica son el cólera, las tifoideas, paratifoideas, entre otras (Ramalho, 1996).

Contaminantes orgánicos: Son compuestos cuya estructura química está compuesta fundamentalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Son los contaminantes mayoritarios en vertidos urbanos y vertidos generados en la industria agroalimentaria. Los compuestos orgánicos que pueden aparecer en las aguas residuales son:

- *Proteínas:* Proceden fundamentalmente de excretas humanas o de desechos de productos alimentarios. Son biodegradables, bastante inestables y responsables de malos olores.
- *Carbohidratos:* En este grupo se encuentran los azúcares, almidones y fibras celulósicas. Proceden, al igual que las proteínas, de excretas y desperdicios.
- *Aceites y Grasas:* altamente estables, inmiscibles con el agua, proceden de desperdicios alimentarios en su mayoría, a excepción de los aceites minerales que proceden de otras actividades.

- *Otros*: Incluiremos varios tipos de compuestos, como los tensioactivos, fenoles, organoclorados y organofosforados. Su origen es muy variable y presentan elevada toxicidad (UPC, 2011).

Contaminantes inorgánicos: Son de origen mineral y de naturaleza variada (sales, óxidos, ácidos y bases inorgánicos, metales, etc.) aparecen en cualquier tipo de agua residual, aunque son más abundantes en los generados por la industria. Los componentes inorgánicos de las aguas residuales estarán en función del material contaminante así como de la propia naturaleza de la fuente contaminante.

El grado de tratamiento que se requiere para un agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente y es resultado del número de tratamientos primario, secundario o terciario que se le den. El tratamiento primario se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por los límites tanto de descarga al medio receptor, como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario. El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos convencionales. En cuanto al tratamiento terciario su objetivo es la eliminación de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos secundarios como por ejemplo bacterias, virus y parásitos.

Las normas de calidad de las aguas están basadas en dos criterios: calidades de las aguas superficiales o normas de limitación de vertidos.

- **Normas de calidad de aguas superficiales**. Incluyen el establecimiento de calidad de aguas de los receptores, es decir, aguas por debajo del punto de descarga.
- **Normas de limitación de vertidos**. Establecen la calidad de las aguas residuales en su punto de vertido mismo.

Las normas de calidad seleccionadas dependen de los usos del agua; algunas de éstas incluyen: concentración de oxígeno disuelto, pH, color, turbidez, dureza, sólidos disueltos totales, sólidos en suspensión, concentración de productos tóxicos, olor y temperatura (Ramalho, 1996). En México las normas oficiales vigentes en materia de aguas residuales son:

Tabla 2.1 Normas Oficiales Mexicanas (NOM)

NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE:		
DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES		D.O.F
NOM-001-ECOL-1996 NOM-001-SEMARNAT-1996 Área responsable del diseño de la norma: DIRECCIÓN GENERAL DEL SECTOR PRIMARIO Y RECURSOS NATURALES.	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.	06/ENE/07
NOM-002-ECOL-1996 NOM-002-SEMARNAT-1996 Área responsable del diseño de la norma: DIRECCIÓN GENERAL DEL SECTOR PRIMARIO Y RECURSOS NATURALES.	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL	03/JUN/98
NOM-003-ECOL-1997 NOM-003-SEMARNAT-1997	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE	21/SEP/98

NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE:		
DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES		D.O.F
Área responsable del diseño de la norma: DIRECCIÓN GENERAL DEL SECTOR PRIMARIO Y RECURSOS NATURALES.	REUSEN EN SERVICIOS AL PÚBLICO.	
COMISION NACIONAL DEL AGUA		D.O.F
NOM-014-CONAGUA-2003 Área responsable del diseño de la norma: COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA	REQUISITOS PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS CON AGUA RESIDUAL TRATADA	18/AGO/09
NOM-051-CONAGUA-2007 Área responsable del diseño de la norma: COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA	INFILTRACIÓN ARTIFICIAL DEL AGUA A LOS ACUÍFEROS- CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES DE LAS OBRAS Y DEL AGUA	18/AGO/09

Fuente: (SEMARNAT, 2009) (DOF, 2009)

2.2. Tratamiento

Actualmente se utilizan dos tipos de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales:

- *Intensivas*: Ocupan un espacio reducido en relación con el volumen de agua que tratan, presentan diversos inconvenientes como un alto consumo de energía, impacto visual y una cierta incapacidad de tratar moléculas orgánicas complejas.
- *Extensivas*: Ocupan más espacio, su impacto visual es menor y tienen una mayor capacidad de tratar compuestos recalcitrantes.

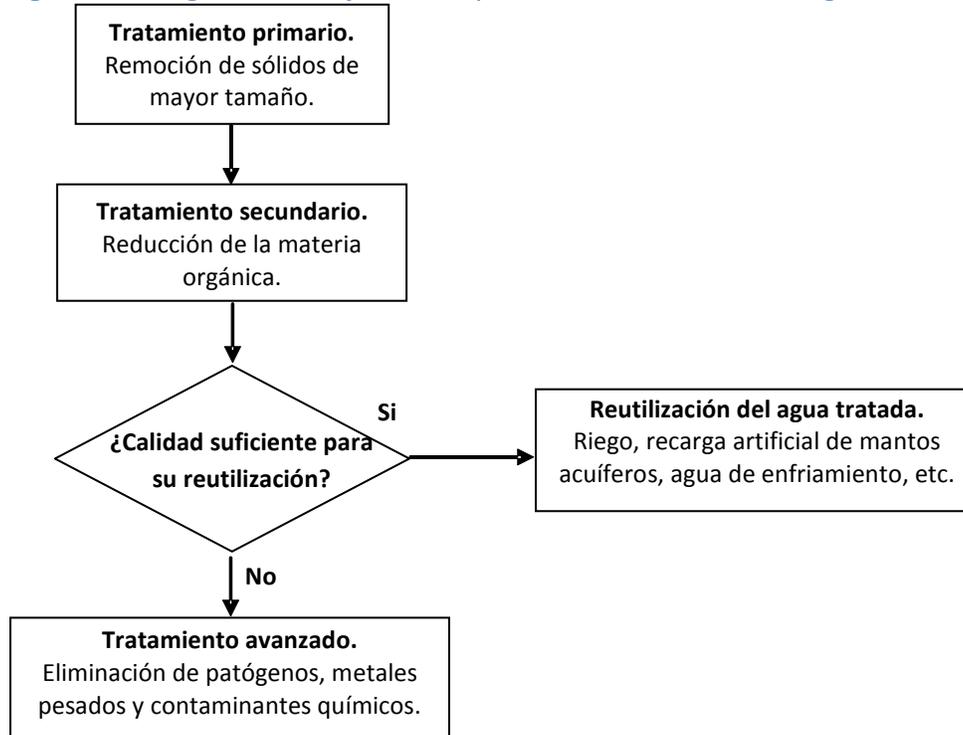
Sin importar el tipo de tecnología elegida para el tratamiento de aguas residuales, básicamente se utilizan dos tipos de procesos; el primero suele estar dedicado a eliminar casi totalmente los sólidos en suspensión (aunque en algunos casos también tratan los nutrientes o posibles tóxicos) y el segundo es el tratamiento de desinfección los cuales se centran en eliminar los indicadores de patógenos (ya que al ser muy difícil determinar todos los patógenos presentes en el agua residual, se debe recurrir a los organismos indicadores) (Barceló, y otros, 2008).

La selección de los procesos de tratamiento de aguas residuales o la serie de procesos de tratamiento dependen de factores tales como:

- *Características del agua residual*. DBO, materia en suspensión, pH, productos tóxicos.
- *Calidad del afluente de salida requerido*.
- *Costo y disponibilidad de terrenos*. Ciertos tratamientos biológicos (lagunas de sedimentación, estanques de estabilización) son económicamente viables únicamente en el caso de que se disponga de terrenos de bajo costo.
- *Consideración de las futuras ampliaciones o la previsión de límites de calidad de vertido más estrictos que necesiten el diseño de tratamientos más sofisticados en el futuro*.
- *Costo local del agua*. Tratamientos sofisticados (p. ej. ósmosis inversa) podrían justificarse en determinadas regiones en donde el costo del suministro del agua es elevado, y estarían fuera de lugar en regiones de bajo costo del agua.

No obstante, el diagrama de flujo de una planta de tratamiento de aguas residuales es usualmente el mismo: Tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado.

Figura 2.1 Diagrama de flujo de una planta de tratamiento de aguas residuales



2.2.1. Primario

Esta etapa del proceso es un tratamiento físico-químico en el cual se busca la remoción de sólidos, de arena, por medio de su precipitación con o sin ayuda de coagulantes o floculantes y para la reducción de aceites y grasas con la finalidad de ayudar con los tratamientos posteriores, ya que los tratamientos biológicos no están diseñados para tratar sólidos. Los tipos fundamentales de tratamientos primarios son:

Cribado o desbrozo. Es un proceso físico o mecánico que separa los materiales de acuerdo a su tamaño de partícula individual; consiste en filtrar el afluente en cámaras de rejillas para eliminar todos los objetos grandes que son depositados en el sistema de alcantarillado (trapos, barras, latas, frutas, papel higiénico, etc.) (figura 2.2). Se usa como elemento de protección para evitar que sólidos de grandes dimensiones dañen las bombas y otros equipos mecánicos; la distancia o apertura de las rejillas dependen del objeto de las mismas, y su limpieza se hace bien manual o mecánicamente. Las materias sólidas recogidas se suelen clasificar en finos y gruesos.

Figura 2.2 Rejillas de protección

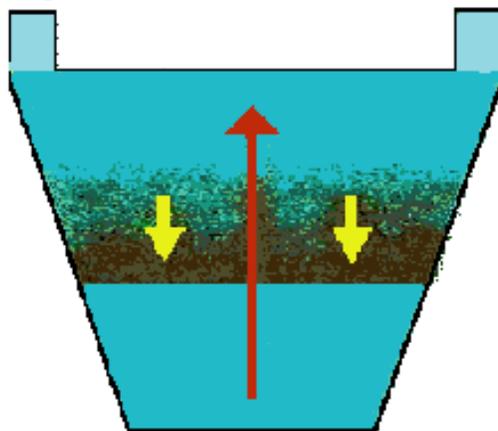


Fuente: (Saravia Asencios, 2009).

Las rejillas de finos tienen aberturas de 5 mm o menos y las rejillas o cribas de gruesos tienen aberturas que oscilan entre los 4 y 9 cm. Sin embargo, el atascamiento es normalmente un problema en las rejillas de finos, por lo que el uso de tamices finos o con aberturas pequeñas no son muy usuales. Por otra parte, se utilizan trituradoras en lugar de las rejillas de gruesos ya que estos elementos rompen o desgarran los sólidos en suspensión, que se eliminan por sedimentación. Los productos recogidos se destruyen por incineración, se tratan por procesos de digestión anaerobia o se envían al relleno sanitario. (Ramalho, 1996).

Sedimentación. Ésta se utiliza en los tratamientos de aguas residuales para separar sólidos en suspensión de las mismas, basándose en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran (figura 2.3), que acaba en el depósito de las materias en suspensión. En algunos casos, la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua residual. Este proceso puede producirse en varios puntos del tratamiento o en varias etapas.

Figura 2.3 Proceso de sedimentación



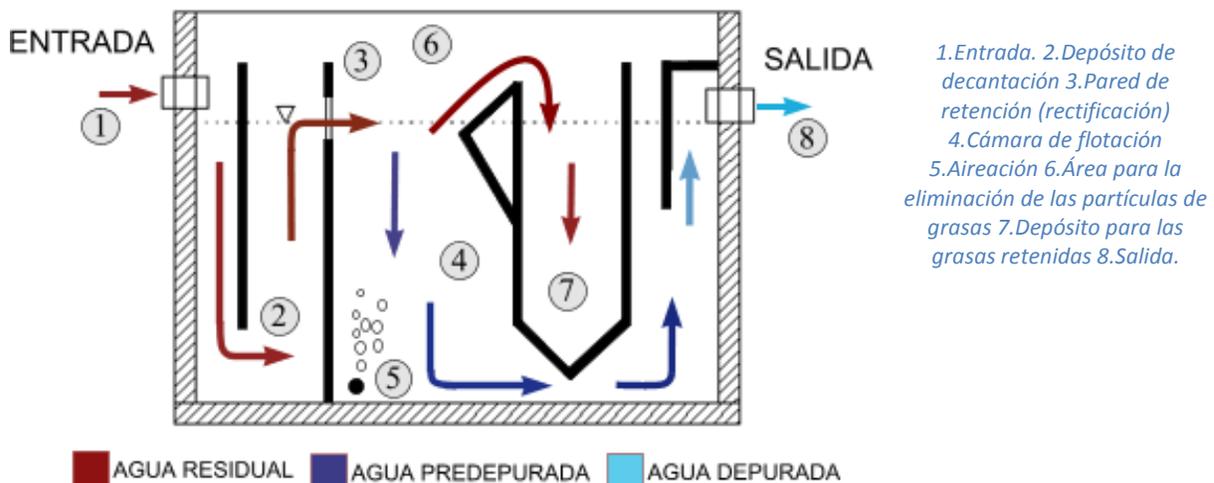
Fuente: (Hernandez B., 2010)

Tipos de sedimentación. Pueden considerarse tres tipos de mecanismos o procesos de sedimentación, dependiendo de la naturaleza de los sólidos presentes en suspensión:

- *Sedimentación discreta.* Las partículas que se depositan mantienen su individualidad, o sea, no se somete a un proceso de coalescencia con otras partículas. En este caso, las propiedades físicas de las partículas (tamaño, forma, peso específico) no cambian durante el proceso.
- *Sedimentación con floculación.* La aglomeración de las partículas va acompañada de cambios en la densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación.
- *Sedimentación por zonas.* Las partículas forman una especie de manta que sedimenta como una masa total presentando una interfase distinta con la fase líquida (Ramalho, 1996).

Flotación. La flotación se usa para separar partículas líquidas (grasas, aceites, etc.), fibras y otros sólidos de baja densidad, así como para espesar los lodos procedentes de los procesos de lodos activados. La separación se lleva a cabo introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas (figura 2.4). La fase líquida se presuriza en presencia del suficiente aire para conseguir la saturación en aire del agua. Luego, este líquido saturado de aire se lleva hasta la presión atmosférica pasándolo a través de una válvula reductora de presión, lo que provoca la formación de pequeñas burbujas de aire que se desprenden de la solución. Los sólidos en suspensión o las partículas líquidas flotan, debido a que estas pequeñas burbujas, asociándose a los mismos, les obligan a elevarse a la superficie. Los sólidos en suspensión concentrados pueden separarse de la superficie por medio de sistemas mecánicos y el líquido clarificado puede separarse cerca del fondo o parte de él reciclarse (Ramalho, 1996).

Figura 2.4 Esquema de una cámara de flotación



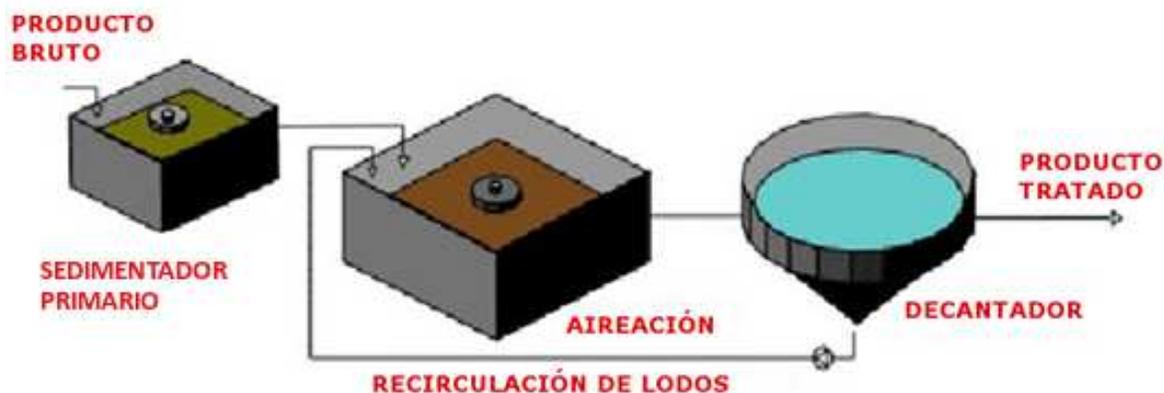
Fuente: (Iaptuk, 2011)

2.2.2. Secundario

Comprenden procesos biológicos aerobios y anaerobios cuyo propósito es reducir la mayor parte de la materia orgánica para el posterior tratamiento de potabilización o liberación al medio de efluentes, según las normas de cada jurisdicción. Algunos de los tratamientos secundarios son:

Lodos activados. Este sistema es el tratamiento biológico más habitual en el tratamiento de aguas residuales. Consta de un reactor donde se mantiene en suspensión un cultivo microbiano capaz de asimilar la materia orgánica presente en el agua residual a depurar (figura 2.5). El proceso requiere un sistema de aireación y de agitación, que suministre el oxígeno requerido por las bacterias encargadas de la depuración, evite la sedimentación de los flóculos en el reactor y permita la homogeneización de los lodos activados. Al cabo de un periodo de tiempo determinado (y una vez que la materia orgánica ha sido suficientemente oxidada) el líquido de mezcla se envía a un tanque de sedimentación (decantador secundario) donde se separa el lodo biológico del agua. Una parte de la biomasa decantada se recircula al reactor para mantener una concentración de microorganismos adecuada, mientras que el resto del lodo se extrae del sistema para evitar una acumulación excesiva de biomasa y controlar el tiempo medio de estancia celular.

Figura 2.5 Esquema de una planta de tratamiento con lodos activados



Fuente: (Hidrocomponentes, 2011).

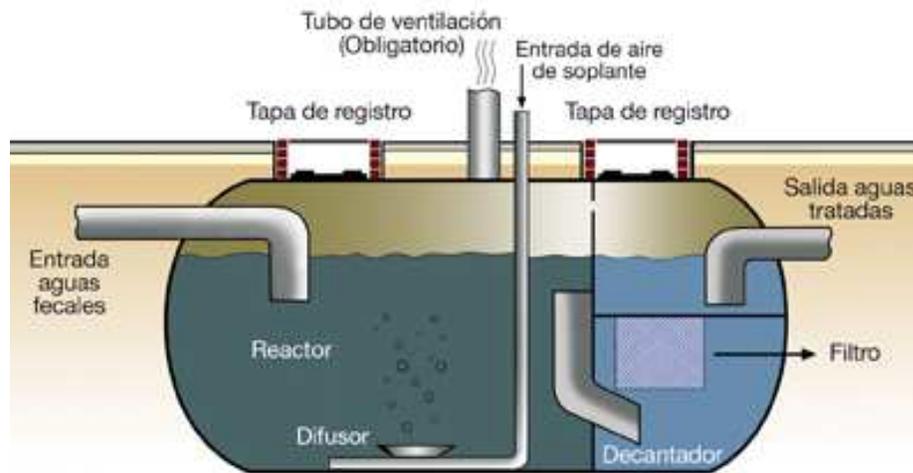
Aireación prolongada o de oxidación total. Este proceso es una modificación del proceso de lodos activados. La diferencia fundamental es disminuir la cantidad de lodo residual. Esto se consigue aumentando el tiempo de residencia; de esta forma el volumen del reactor es comparativamente mayor que el requerido en el proceso convencional de lodos activados. Como consecuencia de todo ello, el lodo formado se consume mediante respiración endógena (figura 2.6) (Ramalho, 1996).

Estabilización por contacto. Este proceso es otra modificación del proceso de lodos activados. El agua residual afluyente se mezcla con lodo estabilizado (figura 2.7) y esta mezcla se somete a aireación en el tanque de contacto inicial, para el cual, el tiempo de retención es solamente de 20 a 40 min. Durante el contacto inicial se separa una fracción

apreciable de materia orgánica, en suspensión y disuelta, mediante bio-absorción después de estar en contacto con el lodo activo suficientemente aireado.

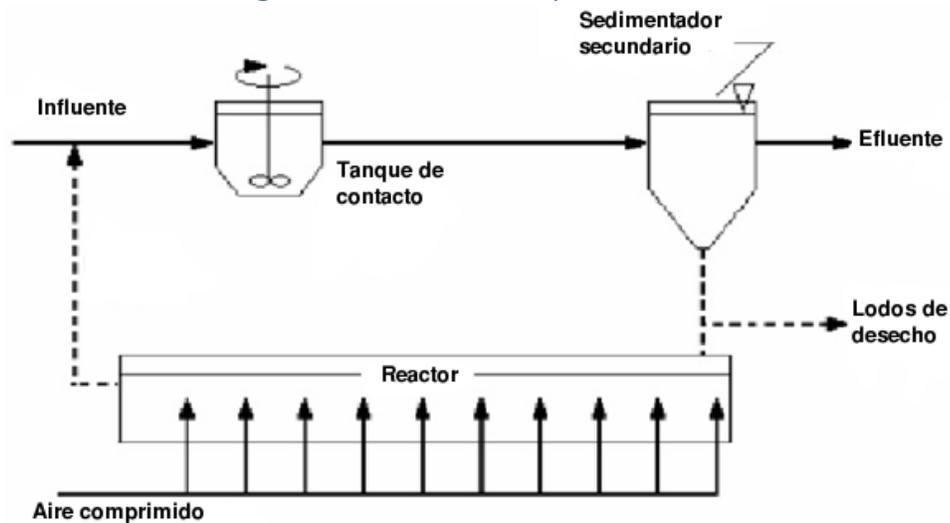
El efluente mezcla procedente del tanque de contacto inicial fluye al clarificador. Se separa el efluente clarificado y la descarga del clarificador se lleva a un tanque de estabilización en donde es aireada durante un periodo de 1.5 a 5h. Durante este periodo de estabilización los productos orgánicos adsorbidos se rompen mediante generación aerobia. El lodo estabilizado que abandona el tanque de estabilización lo hace en condiciones de inanición y, por lo tanto, dispuesto a adsorber residuos orgánicos (Ramalho, 1996).

Figura 2.6 Depuradora de oxidación total



Fuente: (Tecnofiber, 2011).

Figura 2.7 Estabilización por contacto



Fuente: (Guido Martínez, 2011).

Lagunas aireadas. Son lagunas con profundidades de 1 a 4m en las que la oxigenación de las aguas residuales se realiza mediante unidades de aireación bien sean superficiales,

turbinas o difusores (Figura 2.8). El nivel de turbulencia en las lagunas es la base para su clasificación:

- *Lagunas de mezcla completa*. El nivel de turbulencia es suficiente para mantener los sólidos en suspensión y para proporcionar oxígeno disuelto en todo el volumen del líquido. Los tiempos de residencia son normalmente menores de tres días.
- *Lagunas facultativas*. El nivel de turbulencia es insuficiente para mantener todos los sólidos en suspensión, contándose exclusivamente con el nivel necesario para suministrar oxígeno disuelto en todo el volumen del líquido. Parte de los sólidos decantan en el fondo de la laguna donde sufren descomposición anaerobia. Los tiempos de retención superan normalmente los seis días (Ramalho, 1996).

Figura 2.8 (a) Difusores de burbuja fina (b) Lagunas aireadas.



(a)

Fuente: (Aguas, 2010)



(b)

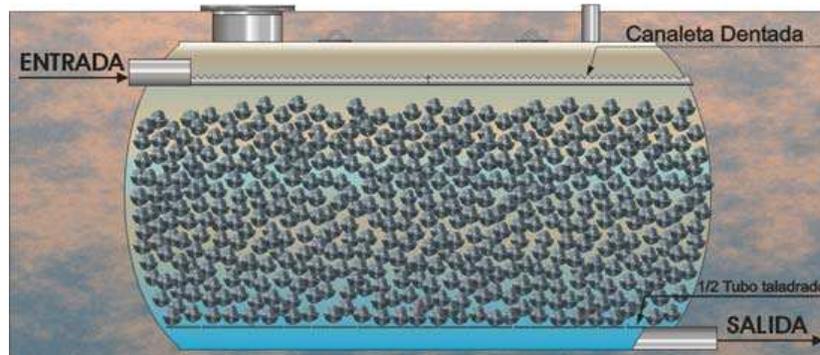
Estabilización por lagunaje o lagunas de estabilización. En este proceso no se utilizan equipos de aireación; el oxígeno necesario se obtiene de la superficie natural de aireación y de las algas que producen oxígeno por fotosíntesis. El oxígeno liberado por las algas por la fotosíntesis se utiliza por las bacterias para la degradación aerobia de la materia orgánica. Los productos de esta degradación (CO_2 , amoníaco, fosfatos) son utilizados de nuevo por las algas.

Las lagunas de estabilización de aguas residuales son factibles cuando se dispone de grandes superficies de terreno a bajo costo y cuando la calidad exigida al afluente no es muy estricta. Debido a los tiempos de retención elevados, normalmente alrededor de dos meses, la disminución de la concentración de compuestos orgánicos refractarios que no puede conseguirse en otros procesos (lodos activos, lagunas aireadas) puede lograrse en balsas de estabilización (Ramalho, 1996).

Filtros biológicos. Se basan en el paso del agua residual a través de materiales con gran superficie como piedras, plásticos, etc., que se recubren de una película o zooglea de organismos aerobios que van consumiendo la materia orgánica aportada con el agua

residual. El sistema se monta en depósitos cilíndricos, de 3 a 12 m de altura, sobre los que se distribuye el agua residual por aspersion (figura 2.9) (Calvo, 2002).

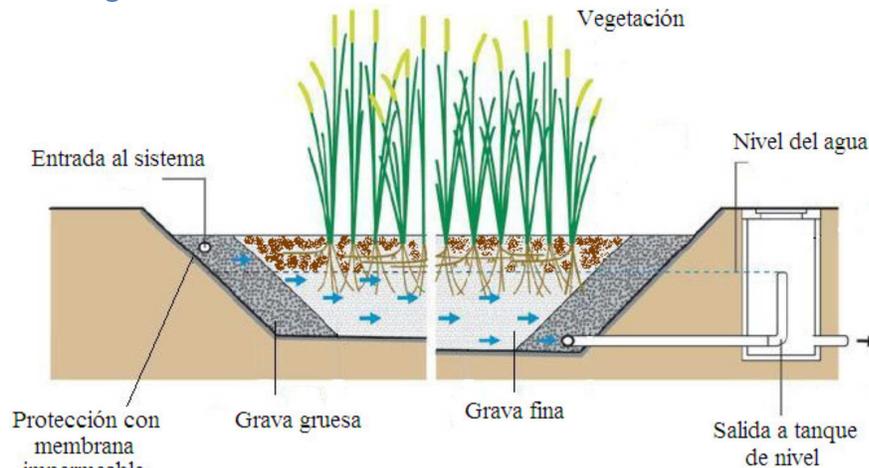
Figura 2.9 Filtro biológico horizontal



Fuente: (BUPOLSA, 2011).

Humedales artificiales. Son cuerpos de agua de baja profundidad que retienen temporalmente el agua con la finalidad de promover la degradación con ayuda de bacterias aerobias y anaerobias, oxigenar el sistema, y remover la mayor parte de los patógenos (figura 2.10). Pueden ser construidos de tal forma que el agua se ve en la superficie (superficiales) o bien, cuya superficie de agua se encuentre por debajo de un lecho de piedras, en donde el agua no se ve (subsuperficiales). Son sistemas muy sencillos de construir puesto que no requiere elementos complejos de diseño ni componentes especiales; así mismo requiere de un mínimo de energía ya que se usa sólo para el bombeo del agua para riego (Rocha Vargas, 2007).

Figura 2.10 Sección transversal de un humedal artificial



Fuente: (Rocha Vargas, 2007).

Discos biológicos o biodiscos. El sistema consiste en un cilindro de plástico de gran tamaño y superficie, que gira alrededor de un eje horizontal y está sumergido parcialmente en el agua residual a tratar (figura 2.11). Sobre su superficie se desarrollan colonias de bacterias y

otros microorganismos, formando una zooglea similar a la que recubre las superficies de relleno de los filtros biológicos. Al girar, parte del cilindro se expone al aire para recibir el aporte necesario de oxígeno, que se puede forzar o no con aire a presión (Calvo, 2002).

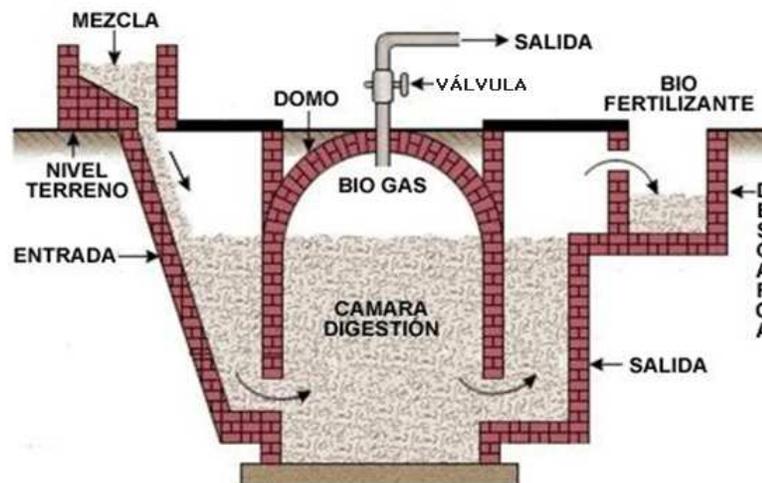
Figura 2.11 Biodiscos



Fuente: (Totagua, 2011).

Tratamiento anaerobio. Es frecuente que las aguas residuales de las industrias agroalimentarias tengan una carga orgánica elevada, en cuyo caso se utilizan sistemas anaerobios (digestores). El sistema se basa en la instalación de un reactor anaerobio, cerrado, en el que la materia orgánica se transforma en ácidos volátiles y finalmente en CO_2 y metano (2.12). El proceso de la fermentación anaerobia se puede realizar mediante filtros anaerobios, con su material de relleno cubierto de una zooglea (biomasa) anaerobia. Otro método es el de los reactores de contacto, es el más aplicado y es muy útil cuando existen grandes cantidades de sólidos en suspensión. Los lechos fluidificados constituyen otro método muy moderno y, finalmente, también se usa el sistema UASB del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket, Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente, con acción de la propia biomasa como soporte (Calvo, 2002).

Figura 2.12 Esquema de un biodigestor



Fuente: (Campos, 2010).

2.2.3. Avanzado

Están dirigidos a la reducción final de la materia orgánica, metales pesados y contaminantes químicos específicos, así como la eliminación de patógenos y parásitos.

Algunos tipos de tratamientos avanzados son:

Microtamizado. Se construyen sobre tambores rotativos (figura 2.13). El agua residual se alimenta de forma continua en la parte interior del tambor, fluyendo hasta una cámara de almacenamiento de agua clara en la parte exterior. La limpieza de la superficie interior del tambor se lleva a cabo mediante pulverizadores de agua clara, necesitándose normalmente el 5% del volumen de alimentación para esta limpieza. Con el microtamizado se consigue la eliminación del 70 al 90 % de los sólidos en suspensión. Los materiales de relleno de los filtros más empleados son arena, antracita y tierra de diatomeas (Ramalho, 1996).

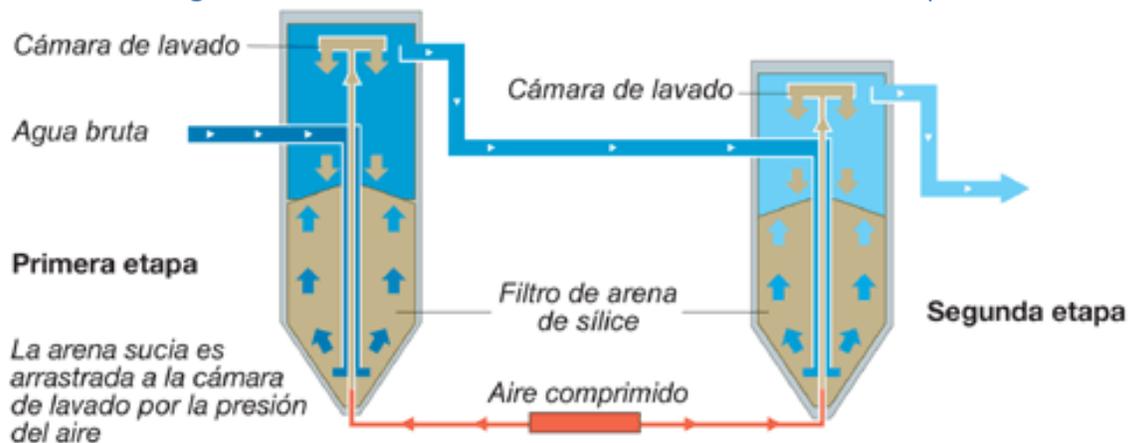
Figura 2.13 Máquina de microtamizado



Fuente: (Huber, 2011).

Lecho de arena. Consisten en lechos de material granular, con un tamaño de grano relativamente uniforme, adecuadamente drenados en el fondo. Se emplean como un sistema de afino de aguas tratadas previamente mediante otro sistema (como puede ser una fosa séptica). La tecnología de filtros de arena incluye los filtros intermitentes, en los cuales, las aguas a depurar se vierten intermitentemente mediante tuberías de distribución en un filtro granular de entre 0.5 y 1.0 m de espesor y los filtros con recirculación, en los cuales, el agua recogida en el sistema de drenaje se vierte de nuevo en el filtro mezclada con agua nueva sin depurar (figura 2.14). La disposición de los filtros puede ser muy variada, incluyendo filtros enterrados y sobre la superficie. La adecuada aireación del filtro y la temperatura ambiente son los dos factores externos al diseño que más influyen en su rendimiento (Ramalho, 1996).

Figura 2.14 Micro filtración en lecho de arena en doble etapa



Fuente: (DRACE, 2011).

Adsorción. Es la concentración de un soluto en la superficie de un sólido (el sólido, por ejemplo el carbón activo (figura 2.15), se denomina adsorbente y el soluto a adsorber se denomina adsorbato) este fenómeno tiene lugar cuando se coloca dicha superficie en contacto con una solución. Una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales. En el interior del sólido, las moléculas están rodeadas totalmente por moléculas similares y por lo tanto sujetas a fuerzas equilibradas. En la superficie, las moléculas están sometidas a fuerzas no equilibradas. Debido a que estas fuerzas residuales son suficientemente elevadas, pueden atrapar moléculas de un soluto que se halle en contacto con el sólido. La capacidad de adsorción es función de la superficie total del adsorbente, ya que cuanto mayor sea esta superficie se dispone de mayor número de fuerzas residuales no equilibradas para la adsorción (Ramalho, 1996).

Figura 2.15 Carbón activo granular

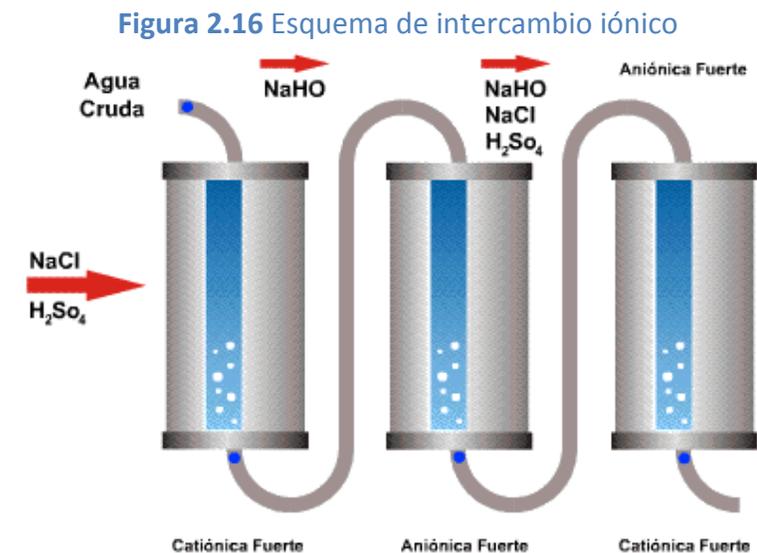


Fuente: (Aguamarket, 2011).

Intercambio iónico. Este proceso utiliza resinas especiales para eliminar contaminantes inorgánicos cargados eléctricamente como arsénico, cromo, nitrato, calcio, radio, uranio, y exceso de fluoruro del agua. Cuando el agua influente se hace pasar a través de una serie de cordones de resina, esta intercambia sus contaminantes cargados eléctricamente por los iones inocuos cargados y depositados en la superficie de la resina (figura 2.16). Entonces, las resinas de intercambio iónico almacenan los contaminantes que hayan atraído.

La resina de intercambio iónico viene en dos presentaciones: resinas catiónicas, las cuales intercambian cationes (calcio, magnesio y radio) y resinas aniónicas, utilizadas para eliminar aniones (nitratos, arsenatos, arsenitas y cromatos). Usualmente ambas se regeneran con una solución salina (cloruro de sodio). En el caso de las resinas catiónicas, el ión de sodio desplaza el catión del sitio de intercambio; mientras que en las resinas aniónicas, el ión de cloruro desplaza el anión del sitio de intercambio. Como norma, las resinas catiónicas son más resistentes a la contaminación que las resinas aniónicas.

Se pueden diseñar las resinas para tener preferencia por iones específicos, de manera que el proceso se pueda adaptar fácilmente a una amplia gama de contaminantes diferentes. Este proceso de tratamiento funciona mejor en agua con partículas libres, porque las materias particuladas se pueden acumular en la resina y limitar su eficacia. El intercambio iónico es un sistema común de tratamiento de agua que se puede adaptar a cualquier tamaño de instalación de tratamiento así como para dar tratamiento al agua en el punto de uso o en el punto de admisión (Ramalho, 1996).

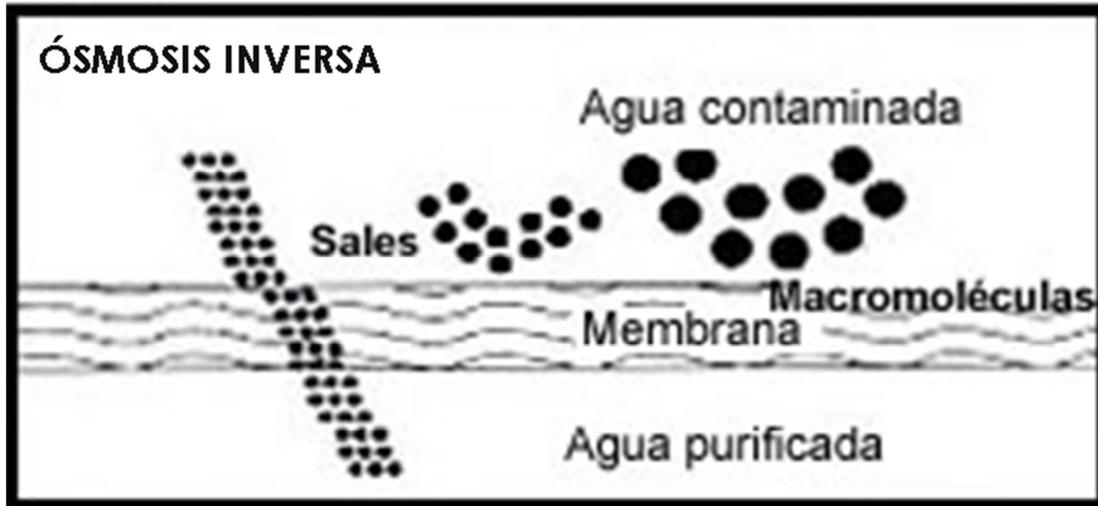


Fuente: (Inquinat, 2011).

Ósmosis inversa. En el tratamiento de las aguas residuales mediante ósmosis inversa, el proceso se lleva a cabo mediante una configuración tubular. El agua residual fluye bajo presión elevada (por encima de la presión osmótica) a través de un tubo interior formado

por material semipermeable y proyectado para soportar presiones elevadas (figura 2.17). El agua purificada se separa en el tubo exterior, que se encuentra a presión atmosférica y está fabricado de material ordinario (Ramalho, 1996).

Figura 2.17 Esquema de ósmosis inversa



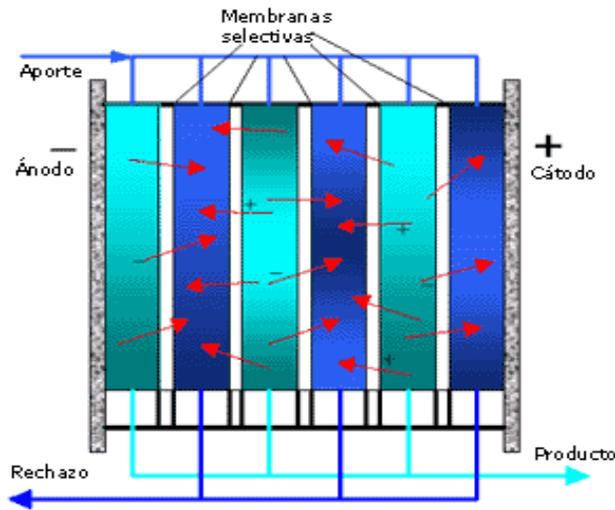
Fuente (Criotec, 2011).

Electrodiálisis. Es un método de eliminación de nutrientes inorgánicos (fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales y se efectúa en celdas de electrodiálisis. Los componentes básicos de la celda son una serie de membranas hechas de resina de intercambio iónico. Estas membranas son permeables solo a las especies iónicas (figura 2.18) y son relativamente selectivas de un tipo específico de iones. Existen dos tipos de membranas utilizadas en las celdas de electrodiálisis:

- *Membranas catiónicas.* Poseen una carga fija negativa, permitiendo a los cationes pasar a través de ellas pero repeliendo a los aniones.
- *Membranas aniónicas.* Poseen una carga positiva fija, permitiendo el paso de los aniones a través de ellas pero repeliendo a los cationes.

El paso de los iones a través de las membranas se acelera por la aplicación de una tensión constante a lo largo de una serie de membranas permeables al catión y al anión, el cátodo y el ánodo se colocan en los dos extremos de la celda de forma tal que la membrana más próxima al cátodo sea permeable a los cationes y la más próxima al ánodo sea permeable a los aniones. El agua residual cruda se alimenta continuamente en los compartimentos de concentración y el agua residual tratada se extrae continuamente de los compartimentos de dilución. Para un funcionamiento adecuado de la celda de electrodiálisis, la materia en suspensión, los iones orgánicos de gran tamaño y la materia coloidal deben separarse antes del proceso, ya que estos materiales pueden provocar el ensuciamiento de la membrana, lo que conduce a un aumento de la resistencia eléctrica total (Ramalho, 1996).

Figura 2.18 Electrodiálisis

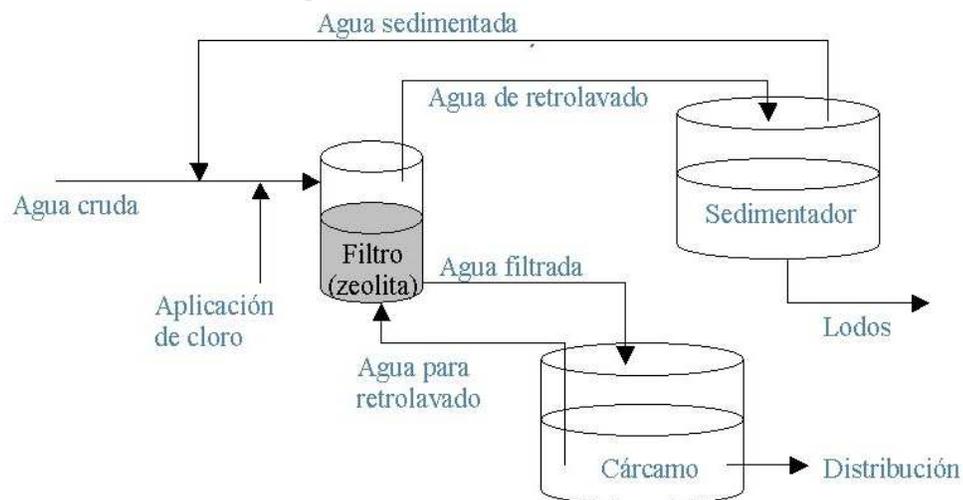


Fuente: (Hispagua, 2011).

Cloración. Es un proceso muy usado en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas (figura 2.19). Los objetivos de la cloración son:

- *Desinfección.* Fundamentalmente el cloro es un desinfectante debido a su fuerte capacidad de oxidación, por lo que destruye o inhibe el crecimiento de bacterias y algas.
- *Reducción de la DBO.* El cloro produce una reducción de la DBO por oxidación de los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales.
- *Eliminación o reducción de colores y olores.* Las sustancias que producen olor y color presentes en las aguas residuales se oxidan mediante el cloro.
- *Oxidación de los iones metálicos.* Los iones metálicos que están presentes en forma reducida se oxidan por el cloro.
- *Oxidación de los cianuros a productos inofensivos* (Ramalho, 1996).

Figura 2.19 Proceso de cloración



Fuente: (Hidrored, 2010).

Ozonización u ozonación. La oxidación química con ozono es un método efectivo para tratar las aguas residuales y se utilizan equipos generadores de ozono (figura 2.20) los cuales están basados en los siguientes factores:

- El ozono reacciona fácilmente con los productos orgánicos no saturados presentes en las aguas residuales.
- La tendencia a la formación de espuma de las aguas residuales se reduce después del tratamiento con ozono.
- La ruptura de los anillos y la oxidación parcial de los productos aromáticos deja a las aguas residuales más susceptibles de tratamiento convencional biológico.
- El ozono presente en el efluente se convierte rápidamente a oxígeno una vez que ha servido a sus fines. Este oxígeno es beneficioso para las corrientes receptoras y ayuda a mantener la vida acuática (Ramalho, 1996).

Figura 2.20 Equipo generador de ozono



Fuente: (Unitek, 2011).

Reducción de nutrientes. Estos sistemas se basan en los procesos de nitrificación, desnitrificación, acumulación potenciada de fósforo y la defosfatación; estos se combinan mediante la implantación de condiciones de cultivo diferentes en ambientes separados. Los primeros dos procesos son necesarios para la eliminación del nitrógeno, mientras que los otros dos son para la eliminación de fósforo. La eliminación biológica simultánea de nutrientes se consigue modificando el proceso de fangos activados de modo que incluya zonas con o sin aireación para crear una secuencia de zonas aerobias, anóxicas y anaerobias.

- *Nitrificación:* oxidación prolongada, en condiciones aerobias, del líquido de mezcla después de la eliminación de la materia orgánica. La realizan las bacterias autótrofas.
- *Desnitrificación:* eliminación del nitrógeno en forma de gas en presencia de materia carbonosa (agua residual) y en condiciones anóxicas.
- *Acumulación potenciada de fósforo:* acumulación de fósforo en el interior de las células en condiciones aerobias.
- *Redisolución de fósforo:* liberación de fósforo soluble en el líquido de mezcla a partir de fósforo polimérico acumulado en el interior de las células. Asimilación celular de compuestos orgánicos fácilmente asimilables para almacenarlos como sustancias de reserva. Se realiza en condiciones anaerobias (SALLAVOR, 2011).

Luz ultravioleta. La radiación UV se utiliza para dañar la estructura genética de las bacterias, virus, y otros patógenos, haciéndolos incapaces de la reproducción (figura 2.21). Se está convirtiendo en el medio más común de la desinfección debido a las preocupaciones por los impactos de las cloraminas en el tratamiento de aguas residuales, ya que es tóxica para especies acuáticas y, por tanto, el efluente tratado debe ser químicamente desclorinado (agregando complejidad y costo al tratamiento). No obstante, la luz UV requiere de un efluente altamente tratado para asegurarse de que no existan sólidos presentes en el efluente, ya que estos protegen a los microorganismos contra la luz (Paniagua García, 2009).

Figura 2.21 Esterilizador por rayos UV



Fuente: (Recova, 2011).

2.2.4. Ventajas y desventajas comparativas

Se debe tener en cuenta que para lograr una mejor calidad en el efluente tratado, es necesario utilizar una serie o combinación de procesos, que desarrollen cierto papel dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales; ya sea, separando espumas, aceites y sólidos de gran volumen, eliminando la materia orgánica o bien, como mecanismo de desinfección de microorganismos. Recordando que mientras mayor sea el número de procesos el resultado será aún mejor pero incrementará el costo de tratamiento, así como la complejidad del mantenimiento en dicha planta de tratamiento. En la tabla 2.2 se pueden observar algunas ventajas y desventajas de los distintos procesos de tratamiento.

Tabla 2.2 Características de los procesos de tratamiento de aguas residuales

Tratamiento	Proceso	Ventajas	Desventajas
Primario	<i>Cribado o desbrozo.</i>	Al separar los residuos sólidos de mayor tamaño protege los equipos.	Es necesario un tratamiento posterior para eliminar el resto de los contaminantes, materia orgánica, espumas, aceites, etc.
	<i>Sedimentación.</i>	Puede ser el único tratamiento al que se someta el agua residual o producirse en varias etapas.	No elimina microorganismos, el subproducto debe ser tratado o dispuesto de forma adecuada.
	<i>Flotación.</i>	Separa grasas, aceites, fibras y otros sólidos de baja densidad.	El costo es mayor debido al equipo necesario para su funcionamiento y no elimina patógenos.

Secundario	Lodos activos.	Sistema de tratamiento de mayor velocidad de degradación debido a la biomasa contenida en el reactor. Los residuos sólidos generados pueden servir de abono.	Depende de personal capacitado y debe contarse con un plan para la disposición de los residuos sólidos generados.
	Aireación prolongada o de oxidación total.	Modificación de lodos activos. Se genera una menor cantidad de residuos sólidos.	Depende de personal capacitado y el costo del equipo es alto.
	Estabilización por contacto.	Otra modificación de lodos activos. Parte de los residuos son aprovechados por lo que se genera una menor cantidad de estos.	Nuevamente depende de la capacitación del personal, el costo del equipo es alto y su supervisión debe ser constante.
	Lagunas aireadas.	Mayor capacidad de carga. Reduce el tiempo de retención. Procedimiento natural.	Necesita grandes extensiones de terreno. Pérdida de agua por evaporación. Acumulación de materia flotante.
	Estabilización por lagunaje o balsas de estabilización.	Puede lograr la disminución de la concentración de compuestos orgánicos refractarios que no puede conseguirse en otros procesos (lodos activos, lagunas aireadas).	Son factibles cuando se dispone de grandes superficies de terreno a bajo coste y cuando la calidad exigida al afluente no es muy estricta.
	Filtros biológicos.	Costo de inversión bajo, así como de requerimientos de área de terreno. Produce lodos de más alta concentración (abono).	No es posible variar la carga. Costos de operación por el bombeo y la fabricación de oxígeno.
	Humedales artificiales.	<i>Sistema muy sencillo de construir. Se integra totalmente con el paisaje. Proceso totalmente natural. Generación de un mínimo de residuos sólidos. Uso de un mínimo de energía. Requiere de personal con conocimientos sobre jardinería a fin de mantener en buenas condiciones a las plantas. Su operación y mantenimiento son mínimos.</i>	<i>Para un correcto tratamiento de agua residual requiere de 1.5 m² de área por persona, por lo que para familias de 4 ó 5 integrantes la disponibilidad de espacio podría ser un limitante. Se recomienda la instalación de una fosa séptica como pre tratamiento para sedimentar los sólidos gruesos y finos, de tal forma que estos ya no aparezcan en la descarga del tanque.</i>
	Discos biológicos o biodiscos.	Facilidad de operación. Ausencia de ruidos. Menor dimensión y menor coste.	Alto gasto de inversión inicial. Necesidad de material de soporte inicial.
	Tratamiento anaerobio.	Genera biogás	El largo plazo requerido para el proceso y el costo del capital inicial.
Avanzado	Microtamizado.	Se adapta fácilmente a cualquier caudal. Se emplea también como un nivel terciario final para obtener un efluente de agua residual de alta calidad.	El costo del equipo es alto y debe considerarse una obra civil especializada.
	Lecho de arena.	Son los elementos más utilizados para filtración de aguas con cargas bajas o medianas de contaminantes. Una vez que el filtro se haya cargado de impurezas, puede ser regenerado por lavado a contra corriente.	Si no se elimina el material (arena) en su totalidad puede causar daño a las partes mecánicas de la planta de tratamiento. La calidad de la filtración depende de varios parámetros, la forma del filtro, altura del lecho filtrante, características y granulometría de la masa filtrante, velocidad de filtración, etc.

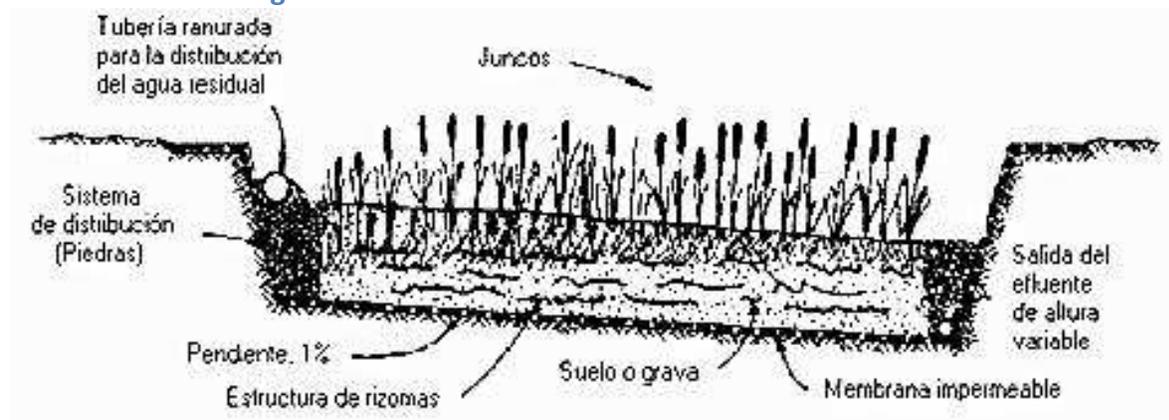
Adsorción.	Bajo costo del material (carbón activo). Un filtro usado se puede regenerar de diversas maneras, el carbón granular puede ser regenerado fácilmente oxidando la materia orgánica.	La actividad del material depende de la temperatura y de la naturaleza de las sustancias. Se puede producir una acumulación de sustancias en el filtro.
Intercambio iónico.	El agua está disponible cuando es necesaria. Cuando se utilizan materiales de resina de alta pureza, todo el material iónico se eliminará con eficacia del agua	Debido a que las bacterias crecen rápidamente en el agua estancada, los cartuchos se pueden contaminar si no se utilizan frecuentemente.
Ósmosis inversa.	Se logra la eliminación de materia orgánica e inorgánica, el resultado es un flujo de agua pura, esencialmente libre de minerales, coloides, partículas de materia y bacterias.	Altos costos del equipo. La vida de la membrana es de uno a tres años dependiendo del pH y la presión.
Electrodialisis.	Este proceso es más competitivo que el proceso de ósmosis inversa para la desalinización de aguas salobres. Se puede ajustar para el uso con sistemas pequeños, por lo general funciona automáticamente con pocos requisitos de mantenimiento y funcionamiento. Se puede obtener agua ultra purificada.	La operación y mantenimiento deben ser realizados por personal especializado. Muy alto costo del equipo. Requiere gran cantidad de energía para producir la corriente constante que impulsa la purificación y bombea el agua a través del sistema. Necesita purificación previa.
Cloración.	Es la forma más común de desinfección debido a su bajo costo y del largo plazo de la eficacia.	Altamente venenoso en caso de un lanzamiento accidental
Ozonización.	Oxida la mayoría del material orgánico y no necesita almacenamiento ya que es colocado según lo necesitado.	Alto costo del equipo y el operario debe estar capacitado.
Reducción de nutrientes.	Al contener varios procesos, estos permiten la recuperación de parte de la alcalinidad y del oxígeno consumido en nitrificación. Mejoras de la sedimentabilidad de los fangos. Favorece la eliminación de fósforo y de nitrógeno.	Se necesita de un mayor espacio de terreno para poder alternar los diferentes procesos. Es necesaria la supervisión diaria y el operario debe contar con cierta capacitación.
Ultravioleta	Elimina casi en su totalidad cualquier patógeno, virus o bacteria causante de enfermedad.	Necesidad de mantenimiento y reemplazo frecuente de la lámpara. Cualquier sólido en el efluente tratado puede proteger a los microorganismos contra la luz UV.

Después de comparar las diferentes tecnologías el proceso más efectivo debería ser el que está basado en la depuración con plantas ya que este tipo de tecnología presenta una serie de ventajas como son menor costo, no requiere de instalaciones complejas y cualquier persona que cuente con los conocimientos mínimos de jardinería puede operar y mantener en buenas condiciones el humedal.

3. Humedales artificiales

Son sistemas construidos por el hombre que consisten en zanjas o pequeños estanques saturados por aguas superficiales o subterráneas, cuya profundidad es menor a 60 cm, en donde se plantan diferentes especies vegetales para retener contaminantes (figura 3.1). Estos sistemas de depuración con plantas no requieren de conocimientos especializados para su construcción o manejo y su consumo energético es mínimo; por lo que la creación de humedales artificiales puede ser una solución para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades. Sin embargo, requieren de una superficie aproximada de 1.5m² por habitante, lo podría convertir el espacio en un factor limitante (Ramalho, 1983).

Figura 3.1 Sección transversal de un humedal artificial



Fuente: (Lara Borrero, 1999)

3.1 Procesos

Los humedales artificiales realizan procesos físicos, químicos y biológicos, basados en la *fitorremediación* (uso de plantas para descontaminar suelos y cuerpos de agua). Esta tecnología reúne un gran número de ventajas: especialmente la limpieza y el bajo costo de operación y mantenimiento; no utiliza reactivos químicos peligrosos; no afecta negativamente a la estructura del suelo; sólo aplica prácticas agrícolas comunes como la construcción de barreras vivas, aprovechamiento de pendientes naturales para el transporte del agua para riego y la conservación de la productividad de los suelos y el medio ambiente; el proceso se realiza *in situ* evitando costos de transporte; y se aplica tanto a contaminantes orgánicos como inorgánicos. Entre los procesos involucrados en el humedal artificial se distinguen:

Volatilización. Es un proceso de evaporación en el cual los contaminantes volátiles disueltos en las aguas residuales se transfieren a la atmósfera al entrar en contacto con ésta. Al tener una cantidad adecuada de superficie de contacto se promueve la eliminación de gases como el metano (IUPA, 2007).

Filtración. Consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso o filtrante. Se le considera como un proceso de clarificación y es el resultado de fenómenos físicos e hidráulicos, afectados principalmente por la adherencia entre partículas y granos. Básicamente es un fenómeno de acción superficial, en donde las partículas por remover, permanecen adheridas a la superficie de los granos por la acción de las fuerzas de cizallamiento (Yactayo, 2005).

Absorción y desorción de oxígeno. Son procesos en los cuales se transfiere el oxígeno entre la atmósfera y las aguas residuales a través de la superficie de contacto; se producen por la carencia (absorción) o el exceso (desorción) de oxígeno disuelto en el agua y, cuanto mayor sea la superficie de contacto, mayor será el intercambio de oxígeno (Calvo, 2002).

Adsorción y desorción. La adsorción se utiliza para eliminar sustancias solubles en agua que se adhieren a la superficie de un sólido. El sólido más utilizado es el carbón activado (PAC, carbón activado en polvo, y GAC, carbón activado granular, este último es el más utilizado para el tratamiento de aguas). La operación contraria es la desorción y se realiza calentando el sólido adsorbente (Lenntech, 2011).

Fotosíntesis. La fotosíntesis es un proceso químico mediante el cual las plantas fabrican su propio alimento. Básicamente consiste en la elaboración de azúcares, en presencia de la luz solar, a partir de CO₂, minerales y agua (Botanical-online, 2011).

Acción bacteriana. Como resultado de la actividad bacteriana los residuos orgánicos se pueden transformar en partículas inorgánicas (nutrientes) necesarias para la alimentación de las plantas. Por ejemplo, las leguminosas enriquecen el suelo al incrementar el contenido de nitrógeno gracias a bacterias que originan nódulos de fijación en sus raíces (Apoyofq, 2011).

3.2 Clasificación

La clasificación de humedales artificiales se hace en función de la presencia o ausencia de superficie libre de agua en contacto con la atmósfera:

Sistemas de superficie libre (FWS, Free Water Surface). En estos sistemas las plantas acuáticas están enraizadas en el fondo del humedal y normalmente se les aplica agua residual pretratada en forma continua (figura 3.2a). El tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente (Lahora, 2005).

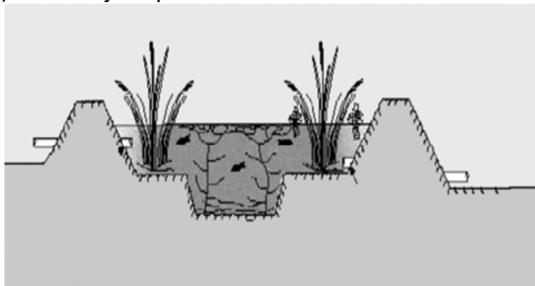
Sistemas de flujo subsuperficial (SFS o VSB, Vegetated Submerged Bed). La lámina de agua no es visible y el flujo atraviesa un lecho relleno con arena, grava o suelo, donde crecen

plantas que tienen las raíces y rizomas en contacto con el agua (figura 3.2b). Debido a la dirección del flujo estos humedales se dividen en (Akvopedia, 2011):

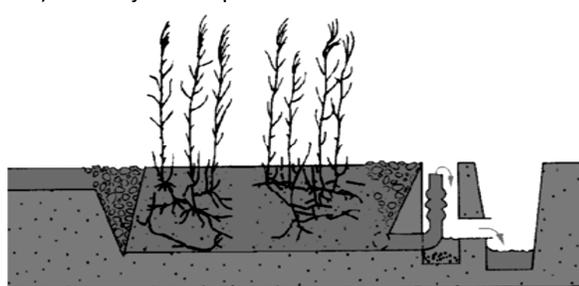
- *Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical*. Es un lecho de filtración con vegetación acuática donde las aguas residuales se vierten o dosifican sobre la superficie del humedal (figura 3.3). El agua fluye verticalmente hacia abajo por la matriz del filtro.
- *Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal*. Es un canal relleno con grava y arena donde se planta vegetación acuática. Al fluir el agua residual horizontalmente por el canal el material de soporte actúa como filtro y la materia orgánica se degrada en la rizósfera (figura 3.4).

Figura 3.2 Clasificación de humedales artificiales

a) FWS- flujo superficial libre

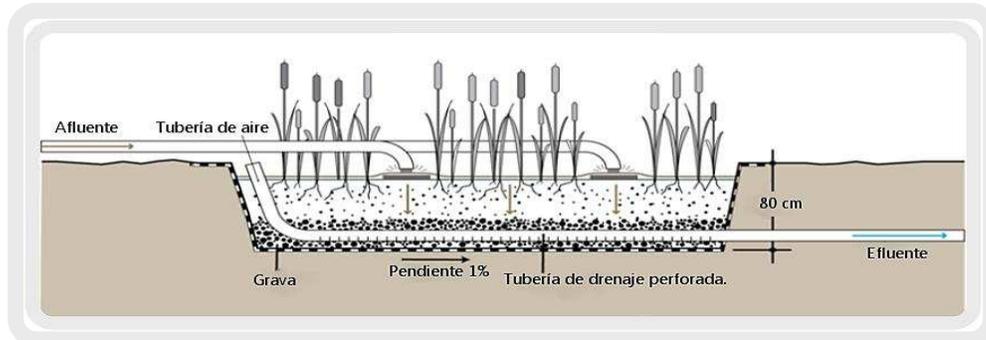


b) SFS- flujo subsuperficial



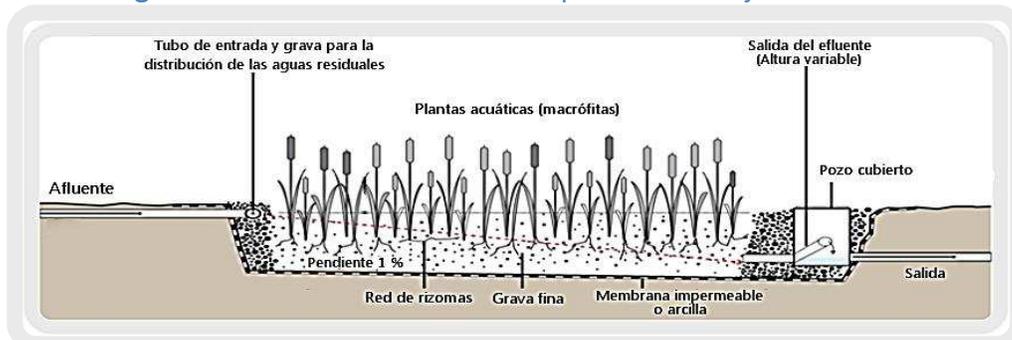
Fuente: (Lahora, 2005)

Figura 3.3 Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.



Fuente: (Akvopedia, 2011)

Figura 3.4 Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.



Fuente: (Akvopedia, 2011)

Cada uno de estos humedales posee ventajas y desventajas dependiendo del caso de aplicación (Lara Borrero, 1999), las principales son:

- 1) disponibilidad del medio granular; en el caso del *SFS* es mejor y eficiente
- 2) el costo; el sustrato del *SFS* implica un costo adicional
- 3) la temperatura del lugar; en los *FWS* es mayor el riesgo de congelamiento del agua
- 4) la carga contaminante; por el sustrato, los *SFS* son más eficientes
- 5) eliminación de nitrógeno; ambos humedales requieren más área para eliminar nitrógeno que para la degradación de materia orgánica (aproximadamente 4:1)
- 6) presencia de fósforo; la eliminación de fósforo requiere mayor área que la degradación de materia orgánica (6:1 los *FWS* y 8:1 los *SFS*)
- 7) el espacio disponible; los *FWS* requieren mayor espacio.

Considerando cada una de estas características y las condiciones específicas de la zona de estudio (ver sección 4.1), se eligieron los humedales tipo *SFS*, principalmente por el área de tratamiento y la eficiencia requeridas y porque el agua tratada se mantiene por debajo del sustrato previniendo la aparición de mosquitos.

3.3 Diseño

El diseño de un humedal depende del tipo y concentración de los contaminantes presentes (materia orgánica medida en DBO_5 , nitrógeno y fósforo, entre otros). Existen diferentes metodologías de diseño según el contaminante de que se trate y el autor que lo propone; en el presente trabajo se empleó la materia orgánica (DBO_5) como parámetro de diseño y la metodología propuesta por Sherwood Reed en su libro *Natural Systems for Waste Management and Treatment* (Reed, 1998).

Esta metodología se basa en que la remoción de materia orgánica (C_e/C_o) en los humedales artificiales, por ser *reactores biológicos*, puede ser estimada mediante una reacción cinética de primer orden de flujo pistón:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t} \quad (\text{ec. 3.1})$$

y que, el tiempo de retención hidráulica, t , está dado por las dimensiones del humedal y caudal del flujo; esto es:

$$t = \frac{L \cdot W \cdot y \cdot n}{Q} \quad (\text{ec. 3.2})$$

Por lo tanto, en estas dos ecuaciones (3.1 y 3.2) deberán relacionarse de tal modo que el tiempo de retención no sea menor de 5 días y la remoción de materia orgánica sea la requerida (ver Reed, 1998). A partir de estos criterios el procedimiento de diseño es el siguiente:

- *Establecer eficiencia requerida.* La eficiencia del humedal se define como la relación entre la concentración de materia orgánica de entrada y la de salida (C_e/C_o). La concentración de materia orgánica en un efluente doméstico varía de 200 a 250 mg/l (Reed, 1998); mientras que la concentración de salida debe ser menor a 20 mg/l (NOM-002-SEMARNAT-1996).
- *Selección del sustrato.* De acuerdo con la disponibilidad de materiales en la zona y las plantas escogidas para el humedal, deberá seleccionarse el sustrato entre: arena grueso o fina, grava fina o medio, o roca gruesa.
- *Cálculo de porosidad.* La porosidad del lecho, n , se mide en laboratorio o se estima de acuerdo con las características típicas del sustrato (tabla 3.1).

Tabla 3.1 Características típicas de material de sustrato

Tipo de material	Diámetro promedio [mm]	Porosidad n	Conductividad hidráulica k_s [$m^3/m^2 \cdot d$]; [m/d]
Arena gruesa	2	0.28-0.32	1-100
Arena fina	8	0.30-0.35	0.01-1
Grava fina	16	0.35-0.38	0.1-1000
Grava media	32	0.36-0.40	0.1-1000
Roca gruesa	128	0.40-0.45	10-1000

Fuente: (Fetter, 2000)

- *Cálculo de la conductividad hidráulica.* La conductividad, " k_s ", puede también ser medida en laboratorio o estimarse a partir de las características del sustrato (ver tabla 3.1).
- *Establecer la profundidad del lecho.* De acuerdo con estudios de campo se ha llegado a determinar que la profundidad del lecho, " y ", debe encontrarse entre 45 y 60 cm (Ramalho, 1983).
- *Determinación del caudal.* Mediante mediciones directas del gasto de agua residual a tratar o la estimación indirecta a partir de las dimensiones de los depósitos de agua potable o estadísticas de la zona se deberá fijar el gasto de diseño, " Q " [$m^3/día$]. Se recomienda suponer que: 1) no existirán pérdidas por filtración dentro del humedal, 2) las pérdidas por evaporación y las ganancias por lluvias son iguales y 3) si el gasto fluctúa se realizarán los cálculos con el valor promedio.
- *Establecer la temperatura de operación.* Se recomienda usar la temperatura mínima promedio anual de la zona para la etapa de diseño del humedal. Haciendo esto se subestima la velocidad de degradación de la materia orgánica; esto es, se sobre-diseña el humedal y se asegura la eficiencia del mismo.

- *Determinación de la constante de reacción.* El valor de la constante de reacción, K_T , depende del contaminante y de la temperatura; es común emplear para humedales *SFS* el siguiente valor de la constante y la ecuación (3.3) para corregir dicha constante de acuerdo con la temperatura de operación:

$$K_{20} = 1.104 [d^{-1}]$$

$$K_T = K_{20} 1.06^{T-20} \quad (\text{ec. 3.3})$$

- *Cálculo del área superficial.* A partir de todos los datos anteriores se evalúa el área superficial del humedal. Esto es:

$$A_S = \frac{Q \cdot \ln(C_0/C_e)}{K_T \cdot n} \quad (\text{ec. 3.4})$$

- *Establecimiento de la pendiente.* Otra variable hidráulica de importancia es la pendiente del fondo del humedal, “m”. Este parámetro se determina a partir de las recomendaciones en literatura especializada, Reed, Middlebrooks y Crites recomiendan valores entre 1% y 3%; ya que, valores menores provocan estancamientos y malos olores, mientras que pendientes mayores no permiten que se alcance el tiempo necesario para la degradación (Reed, 1998). Esto concuerda con lo recomendado en el manual de construcción de humedales de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency, 1988) que dice que la pendiente debe ser del 1 % o ligeramente mayor.

En contraparte con la tesis de Lara Borrero, en la que se hace la recomendación de una pendiente del 10 al 30% y se mencionan humedales construidos con pendientes del 8 % en Europa que tienen fallas de diseño, sin embargo no señala sus referencias por lo que el valor del 10 al 30 % pudiera estar equivocado o solamente es aplicable en casos particulares.

- *Determinación del ancho del humedal.* Una vez determinada el área superficial, con la constante hidráulica correspondiente al sustrato (tabla 3.1) y la pendiente establecida se calcula el ancho del humedal a partir de la siguiente ecuación:

$$W = \frac{1}{y} \left[\frac{Q \cdot A_S}{k_s} \right]^{0.5} \quad (\text{ec. 3.5})$$

- *Determinación del largo.* A partir del área y el ancho del humedal el largo se calcula directamente:

$$L = A_S W \quad (\text{ec. 3.6})$$

- *Cálculo y comprobación del tiempo de retención.* Finalmente se calcula el tiempo de retención dentro del humedal, a partir de la ecuación 3.2. Si el valor resultante es igual o mayor a cinco días se considera que el diseño es satisfactorio. De no serlo se inicia el diseño empleando condiciones diferentes para el sustrato (n y k_s), o se acepta otra eficiencia para el humedal (relación C_e/C_0).

3.4 Construcción

Los materiales básicos para la construcción de un humedal artificial incluyen: equipo de construcción, recubrimiento, grava, tuberías de PVC, sustrato y vegetación. Los costos variarán dependiendo del sitio, de los materiales utilizados y la mano de obra. A continuación se describen algunas de las características constructivas a tomar en cuenta.

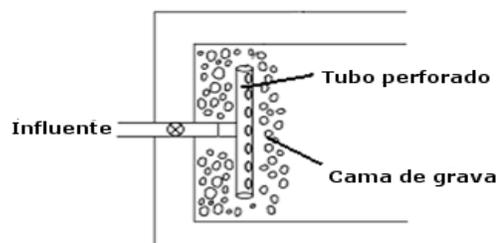
Cuerpo del humedal. La construcción del humedal requiere de los siguientes pasos sugeridos:

1. *Reconocimiento del terreno.* Es necesario realizar una inspección visual del terreno con la finalidad de conocer las características del terreno (pendiente, disponibilidad de espacio y accesibilidad al área de trabajo) y adaptar el diseño a las condiciones del lugar.
2. *Levantamiento del terreno.* Es necesario realizar un levantamiento para poder obtener un plano en el cual se proyecten las propuestas de la obra para el trazo posterior sobre el terreno de los elementos diseñados y establecidos en dicho plano.
3. *Desyerbe y limpia de terreno.* Consiste en realizar la limpieza, desyerbe y extracción de malezas, árboles o arbustos que obstruyan el área de construcción de la obra.
4. *Trazo y nivelación.* Consiste en delimitar y marcar las áreas en las cuales se ubicarán y construirán los distintos elementos que conforman el humedal (registros, fosa del humedal y tuberías).
5. *Excavación de la fosa.* Después del trazo de los componentes del humedal, se realiza la excavación de la fosa que formara el canal del humedal. Sin embargo, en el caso de que se considere la construcción a un nivel más elevado al terreno, no será necesaria esta excavación pero requerirá la construcción de las paredes del humedal.
6. *Construcción de registros (trampa de grasas y control de salida).* La construcción y materiales de los registros dependerá del diseñador, quien determinará si se tratarán de registros prefabricados o contruidos para cada aplicación en particular.
7. *Compactación y nivelación.* La superficie del humedal deberá ser lisa y sin elementos que puedan perforar o cortar la membrana utilizada para impermeabilizar, por tanto es necesaria la compactación de las superficies de apoyo en un porcentaje igual o mayor al 90 %, considerando también que la base del humedal debe tener una pendiente hacia la tubería de salida a través de todo lo largo de la fosa.
8. *Impermeabilización de la fosa del humedal.* Es necesaria la colocación de una geomembrana en sentido de la máxima pendiente de la superficie y sujeta a través

- de la realización de una zanja de anclaje perimetral (compactada, nivelada, libre de rocas, grietas, depresiones y cambios abruptos de pendiente), que será rellenada con el material proveniente de la excavación de dicha zanja. Es posible realizar la impermeabilización con otros métodos (compactación con arcilla o revestimiento con cemento) siempre y cuando se garantice la máxima duración en la impermeabilización, con la finalidad de evitar la contaminación de acuíferos.
9. *Instalación hidráulica.* El sistema de drenaje es construido con tubería de PVC de 4" perforada según el tamaño de la grava utilizada y será ubicada en el extremo de salida del humedal.
 10. *Llenado de fosa con grava o arena.* Para proteger la geomembrana de cortaduras se recomienda colocar una capa de 5 cm de arena y posteriormente ir acumulando capa del material gravoso dispuesto en toda la superficie del humedal hasta llenar la cantidad de grava.
 11. *Ensamblado del sistema de aplicación.* El sistema de entrada de agua residual también consiste en tubos perforados por medio de los cuales ingresa el agua residual a los humedales y puede ser construido con tubería de 2 ó 4 pulgadas dependiendo del diseño.
 12. *Plantación.* Una vez terminado el armado del sistema de aplicación se puede proceder con la plantación de las especies elegidas, ya que en este momento se puede garantizar el suministro de agua necesaria para la adaptación y manutención de las plantas.

Características de ductos de entrada y salida. Las configuraciones de la entrada y salida deben promover la uniformidad del flujo a través del cuerpo del humedal. Se recomienda una formación en "T" (figura 3.5), ya que permite el ajuste rápido de la distribución del flujo y facilita el paso de sólidos asentados. Las perforaciones en el tubo de entrada deben ser espaciadas uniformemente (a una distancia aproximada de 10% del ancho del humedal) y ser de la misma forma o tamaño (suficientemente grande para prevenir que se tape).

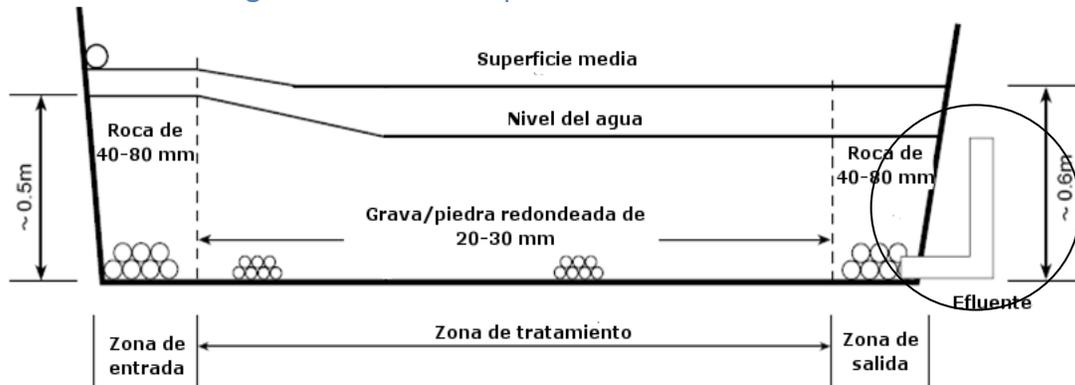
Figura 3.5 Entrada tipo "T" con tubo de PVC.



Fuente: (Lara Borrero, 1999).

Por otro lado, la salida para humedales domésticos (donde el agua tratada se descarga al suelo) puede ser un tubo simple. Pero, para recolectar el agua se recomienda colocar tubos perforados a través del fondo del canal, debajo de la grava; las perforaciones pueden ser pequeñas ya que los materiales sólidos se habrán asentado antes de que el agua salga del sistema. Es necesario que la descarga esté elevada (fig. 3.6) para controlar el nivel del agua dentro del humedal (Setty, 2011).

Figura 3.6 Control de profundidad en el humedal.



Fuente: (Lara Borrero, 1999).

Recubrimiento. Los materiales de recubrimiento pueden ser de tierra, arcilla o material sintético, con una permeabilidad muy baja (como bentonita, asfalto o plásticos sintéticos). El recubrimiento debe ser fuerte, grueso, liso y estar protegido de la perforación por piedras puntiagudas o grava (Setty, 2011).

Actualmente la mayoría de los humedales utilizan materiales plásticos como son geomembranas de cloruro de polivinilo (PVC) o polietileno de alta densidad (HDP) fabricadas especialmente (fig. 3.7) y posteriormente una capa delgada de arena o tela, para proteger la geomembrana de cualquier rasgadura o perforación; esto, para evitar que el terreno absorba el agua residual.

Figura 3.7 Recubrimiento plástico de PVC.



Fuente: (Lara Borrero, 1999)

La vegetación. Los juncos, las cañas y las aneas son los tipos de vegetación más recomendados para humedales (crecen rápidamente y esparcen sistemas extensos de raíz),

aunque existen otras muchas especies que han sido utilizadas. Se recomienda emplear plantas trasplantadas de un humedal natural cerca del sitio, de viveros o de terrenos de la zona (fig. 3.8); con el fin de evitar la introducción de vegetación ajena al sitio o alterar la estética del lugar.

Figura 3.8 Plantas con rizomas conectados



Fuente: (Lara Borrero, 1999)

3.5 Operación y mantenimiento

La operación y mantenimiento de un humedal va dirigida hacia las siguientes características de funcionamiento:

Integridad estructural. Deben inspeccionarse paredes, diques y vertederos del humedal para evitar cualquier daño, corrosión u obstrucción y corregirla lo más pronto posible para prevenir el deterioro de la vegetación, lo cual provocaría el reinicio completo del sistema.

Contacto agua/microorganismos. La eficiencia del humedal depende de proporcionar una amplia oportunidad de contacto entre el agua residual y con la comunidad microbiana que se encuentra en el sustrato y la vegetación.

Flujo homogéneo. Se debe asegurar que el agua residual se distribuya uniformemente en el sustrato del humedal. Tiene que verificarse periódicamente que el agua se mueve a través de todo el humedal y que los sólidos residuales no bloquean el flujo para evitar generar áreas de estancamiento que favorezcan la aparición de mosquitos.

Ambiente saludable. Debe asegurarse la salud de la población microbiana y vegetal, evitando males olores, asegurando la aireación del lecho, realizando labores de jardinería en las plantas.

El manejo del nivel del agua es primordial para la vegetación. Aunque algunas plantas pueden tolerar cambios temporales en la profundidad del agua, debe cuidarse no exceder los límites de tolerancia. La vegetación debe ser inspeccionada regularmente y quitarse las

especies invasoras. No deben usarse herbicidas excepto en circunstancias extremas, ya que dañan la población microbiana.

La diversidad y densidad de plantas se determina por inspección directa. Se deben evitar especies no deseadas o agresivas, la disminución acelerada de la capa vegetativa o la permanencia de plantas enfermas (Lara Borrero, 1999).

Debe evitarse la presencia de plagas: ratas y mosquitos; para esto es importante mantener el movimiento y aireación del agua. El control de mosquitos con insecticidas no se recomienda por el daño a la vegetación.

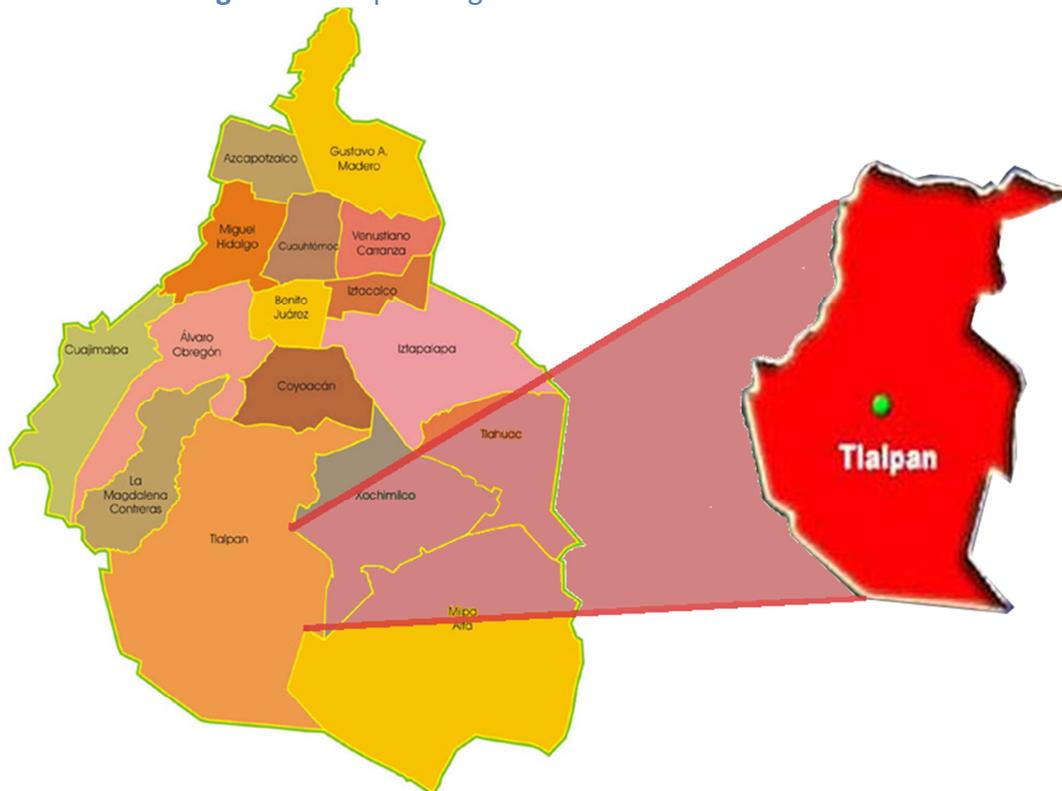
El nivel de detalle y periodicidad del mantenimiento dependerá del tamaño y la complejidad del sistema y podrá cambiar cuando el sistema madure y se conoce mejor su comportamiento. La supervisión tiene que ser más frecuente durante el arranque y cuando se presenten variaciones importantes de la descarga (cantidad o calidad del agua residual), pues los sedimentos acumulados así como la capa de residuos podrían disminuir la capacidad de tratamiento de agua.

4. Caso práctico

Para la construcción de un humedal artificial se seleccionó uno de los asentamientos irregulares localizados en la delegación Tlalpan de Ciudad de México, donde no existe el servicio de drenaje y por lo tanto es conveniente buscar alternativas para el tratamiento de las aguas residuales.

La delegación Tlalpan, ubicada al sur de la ciudad (figura 4.1), cuenta con una superficie de 30 941 ha (20.6% del Distrito Federal) de la cual el 83.4% estaba destinada a la conservación ecológica (SIDESO, 2011) (figura 4.2). Esta delegación tiene una población de 607 545 habitantes (7% del D.F.); se encuentra dividida en 125 colonias, 11 pueblos, 7 barrios y un parque nacional (GODF, 2008).

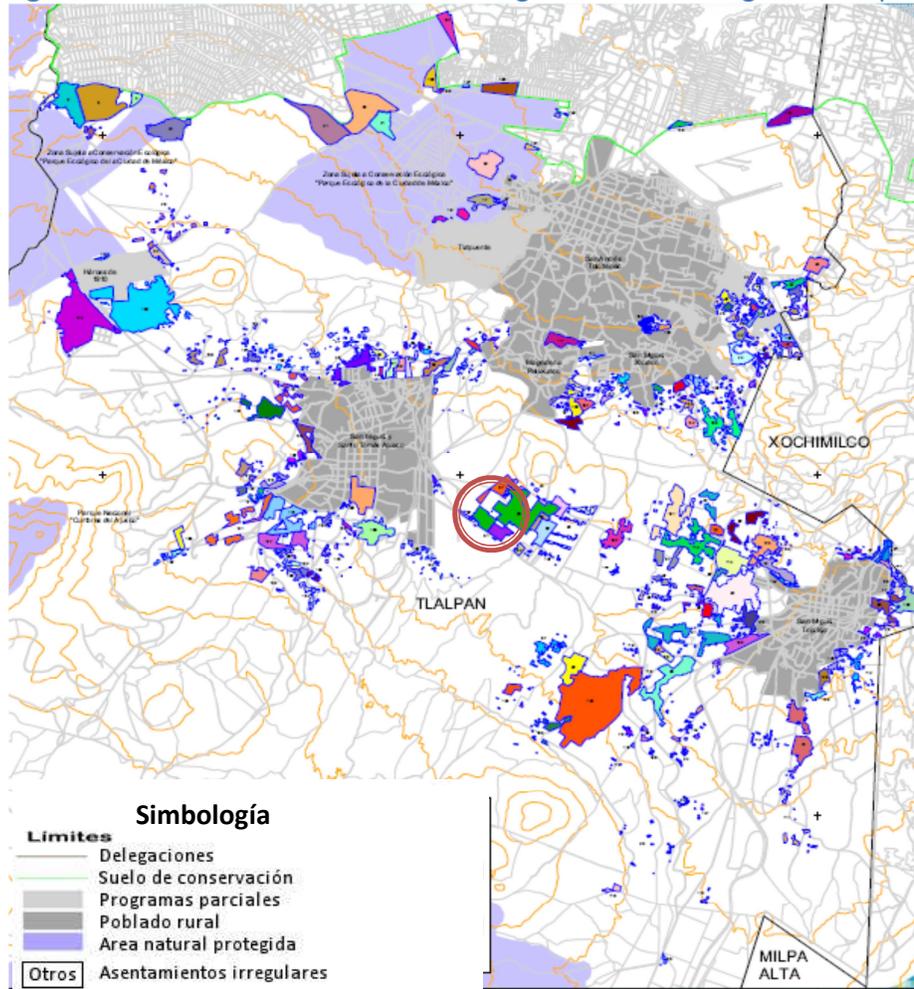
Figura 4.1 Mapa delegacional de la Ciudad de México



Fuente: (Ambientalista, 2011)

Debido al crecimiento acelerado de la ciudad, hasta el 2012 la delegación Tlalpan tenía 186 asentamientos irregulares (aproximadamente 981 ha) que deberán, entre otras cosas, reducir su impacto ambiental para ser candidatos a la regularización (ver fig. 4.2). Dentro de este número de asentamientos existen algunos tan grandes como el Oyameyo (82.2 ha) y otros más pequeños como Rancho la Esperanza (0.17 ha) o Unixco (0.21 ha). De estos, se eligió una vivienda del asentamiento identificado como *Manzana 36 ex Finca La Venta* (5.96 ha) que forma parte del pueblo de San Miguel Ajusco, y que posee las características necesarias para la construcción de un humedal artificial.

Figura 4.2 Asentamientos humanos irregulares de la delegación Tlalpan



Fuente: (SMA, 2010)

El asentamiento seleccionado se divide en 3 secciones perfectamente delimitadas (ver fig. 4.3) de las cuales la primera tiene mayor antigüedad y sus habitantes se encuentran mejor organizados; motivo por el cual se decidió trabajar en ella. La 1ª sección cuenta con 32 lotes, 24 habitados, 4 deshabitados y 4 baldíos en el momento de la visita preliminar (11 junio 2011, ver bitácora en el anexo A.2).

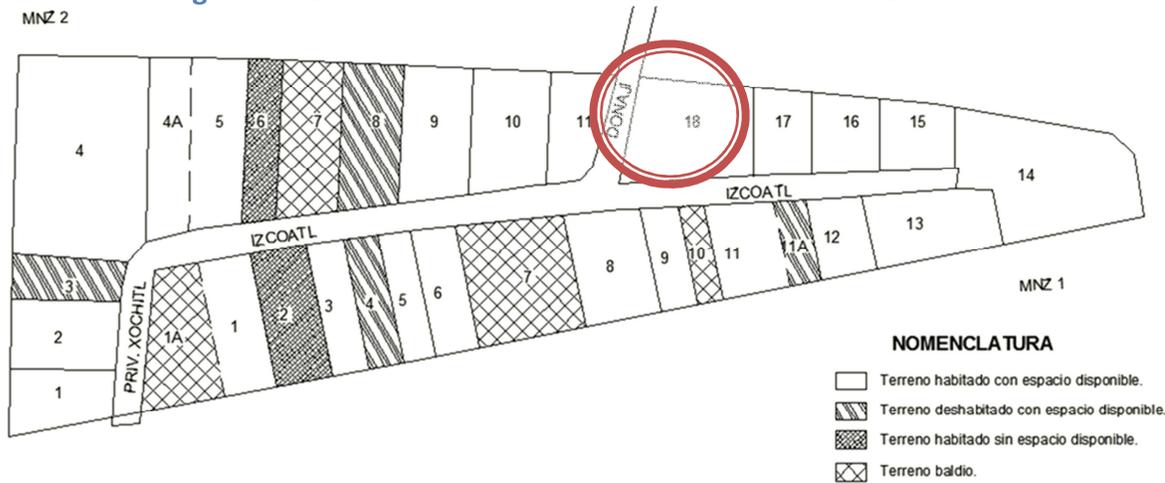
Durante la visita de reconocimiento se determinó que de los 32 lotes, 30 cuentan con espacio suficiente para construir un humedal (fig. 4.4) por lo que se considera que en todos ellos podría reproducirse los pasos de diseño y construcción que se siguen en este capítulo. La sección de trabajo tiene una población de 120 personas (en promedio 5 habitantes por lote), pero seguramente se incrementará con los años ya que los lotes son grandes (mayores de 300 m²) y existe la costumbre de subdividirlos para vender o dotar de vivienda a familiares. Este aumento poblacional está directamente relacionado con el aumento en la generación de aguas residuales y la amenaza de infiltraciones hacia el manto acuífero, contaminándolo, reblandeciendo la tierra y provocando hundimientos.

Figura 4.3 Secciones del asentamiento *Manzana 36*



El lote seleccionado para la construcción del humedal artificial fue el domicilio ubicado en *Donaji #4, sección 1ª, colonia ex Finca La Venta* esquina con calle *Itzcoatl* propiedad de la *Sra. Cristina Martínez* (ver fig. 4.4), quien es actualmente la representante del asentamiento y mostró gran interés en el proyecto, por lo que se considera promoverá esta tecnología dentro de su comunidad.

Figura 4.4 Distribución de lotes en la 1ª sección de *Manzana 36*



En la figura siguiente (4.5) se muestra la distribución general del predio dentro del que se ha iniciado la construcción de una nueva vivienda (b) que se planea sea habitada por la familia de un hijo de la Sra. Martínez.

Figura 4.5 Distribución del predio



A) Casa habitación de Sra. Martínez e hija, B) Casa habitación en construcción

4.1 Diagnóstico

Después de realizadas las pláticas con las autoridades de la Delegación Tlalpan, seleccionado el predio de estudio y la presentación del proyecto ante la propietaria del mismo, se realizó el *levantamiento* del lugar; el cual resaltó el hundimiento de la casa habitada (60 cm por debajo de nivel de suelo terminado) y la existencia de una considerable pendiente hacia el punto de entrada al predio (ver fig. 4.5).

El lote de la Sra. Martínez tiene una superficie de 650m²; con 200m² construidos (2 casas habitación, de dos pisos cada una). Una de las casas (casa habitación A), la de mayor superficie, la habitan la Sra. Martínez y su hija, mientras que la otra (casa habitación B), aún en construcción, será habitada por un hijo de la señora y su familia (4 personas).

Para determinar el consumo de agua potable en la vivienda se consideró la información proporcionada por la propietaria sobre el suministro mensual (2 pipas de 5,000 litros cada una); esto es:

$$Q = 5.0 \times 2 \left[\frac{m^3}{mes} \right] \left[\frac{mes}{30 \text{ días}} \right] \left[\frac{1}{2 \text{ hab}} \right]$$

$$Q = 0.17 [m^3/día \cdot hab]$$

Dicho valor se encuentra por debajo del consumo diario promedio de agua por habitante en la Ciudad de México que es de 0.36 [m³/día · hab] pero por encima del consumo diario recomendado para las grandes ciudades que es de 0.15 [m³/día · hab] (SMA, 2010).

Además del gasto de agua potable, que será considerado igual al agua residual, se determinaron otros parámetros que podrían afectar el diseño del humedal como: la temperatura de la localidad, la cantidad de agua de lluvia, el área disponible para la construcción del humedal e inclusive las costumbres de los habitantes para determinar si cuentan con el tiempo necesario para brindar atención y cuidado al humedal. La tabla 4.1 presenta los valores de estos parámetros considerados para el diseño.

Tabla 4.1 Valores de diagnósticos

Factor	Casa (A)	Casa (B)
Habitantes	2	4
Área construida [m ²]	140	60
Área disponible [m ²]	165.88	146.49
Tiempo disponible [hrs]	1-2 (entre 7 am y 9 pm)	1 hr (entre 3 y 9 pm)
Temperatura mínima media anual ¹ [°C]	9, en las partes más altas de la Delegación	
Precipitación media anual ¹ [mm]	211.9 Sep. – 237.1 Ago.	
Carga orgánica* [mg/l]	250	
Consumo de agua [m ³ /día]	0.34	0.68*

* Dato supuesto ya que en la casa "b" habrá el doble de gente cuando sea habitada y el valor de la carga orgánica es el promedio.

¹ (SEDUVI, 2010)

4.2 Diseño

Para el diseño del humedal se eligió la concentración de materia orgánica (DBO₅) como el parámetro fundamental y a partir de éste se siguió la metodología de diseño presentada en el capítulo anterior (sección 3.3). Esto es:

- *Eficiencia requerida.* Como margen de seguridad se consideró un valor inferior al establecido en la norma para la concentración de materia orgánica a la salida del agua tratada:

$$C_e = 10 \text{ [mg/l]}$$

- *Sustrato.* El sustrato seleccionado fue el tezontle (o piedra de río si la propietaria está dispuesta a cubrir su costo).
- *Porosidad.* De acuerdo con el sustrato elegido y la tabla 3.1 se determinó usar, al igual que para la conductividad hidráulica, el valor más alto posible (lo que garantiza la eficiencia de remoción).

Tabla 4.2 Parámetros de diseño

Variable	Notación	Valor
Materia orgánica en la entrada	C _o	250 [mg/l]
Materia orgánica en la salida	C _e	10 [mg/l]
Temperatura en el humedal	T	5 [°C]
Profundidad	Y	0.6 [m]
Pendiente	M	0.02

Porosidad del sustrato ¹	N	0.45
Conductividad hidráulica ¹	k _s	1000
Diámetro del sustrato ¹	φ	35 - 128 [mm]

1) Sustrato: tezontle o piedra de río

Plantas sugeridas: Carrizo, tule, ave del paraíso y otras plantas ornamentales

- **Conductividad hidráulica.** La k_s, se seleccionó de acuerdo con el tipo de sustrato. De los valores proporcionados en la tabla 3.1 se usó el valor más alto como parámetro de seguridad del diseño, ya que mayor conductividad significa menor tiempo de retención y por lo tanto si en operación el tiempo es mayor al de diseño la remoción de materia orgánica será mayor.
- **Profundidad del lecho.** De acuerdo con la literatura especializada, la profundidad del humedal debe estar entre 45 y 60 cm (60 cm es la más común) dependiendo de la longitud de las raíces de las plantas (ver tabla 4.3). Al diseñar con 60 cm es posible seleccionar la mayoría de juncos y carrizos recomendados.

Tabla 4.3 Longitud promedio de las raíces

Tipo de vegetación	Profundidad de las raíces [m]
Bulrush, Scirpus (juncos)	0.8
Reeds, Phragmites (carrizos)	0.6
Cattails, Typha (juncos)	0.3

Fuente: (USEPA, 1993)

- **Caudal.** Para la familia completa, 6 personas:

$$Q = 0.17 [m^3/día \cdot persona] \cdot 6 [personas] = 1.02 [m^3/día]$$

- **Temperatura de operación.** Se consideró conveniente usar 5 [°C], ya que es la temperatura más baja registrada anualmente en esta zona (SIEGE, 2007).
- **Constante de reacción.** El valor de la constante de reacción es:

$$K_T = 1.104(1.06)^{(5-20)}$$

$$K_T = 0.4606[día^{-1}]$$

- **Área superficial.** A partir de todos los datos anteriores se tiene

$$A_s = \frac{1.02 \cdot (\ln(250) - \ln(20))}{0.4606 \cdot 0.60 \cdot 0.45} = 20.7157 [m^2]$$

Y, redondeando: $A_s = 21 [m^2]$

- **Distribución espacial del humedal.** Una vez conocida el área total requerida se realizaron algunas propuestas sobre los espacios del terreno disponible donde pudiera ser construido y los puntos de descarga de aguas residuales que lo alimentarían.

Considerando que existen tuberías independientes para cada piso de cada casa se decidió considerar, desde este punto, la construcción de tres humedales dentro del predio para mejor aprovechamiento del área disponible (junto a las bardas que limitan la propiedad).

$$A_H = \frac{A_S}{3} = \frac{21}{3} = 7 \text{ [m}^2\text{]}$$

- *Pendiente.* Para el diseño del humedal se eligió una pendiente igual a 0.02 (2%) que es ligeramente mayor a la recomendada por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos), facilita la construcción y garantiza el gradiente hidráulico adecuado.
- *Ancho del humedal.* El ancho de cada humedal es:

$$W = \frac{1}{0.6} \left[\frac{0.34}{0.02} \cdot \frac{7}{1000} \right]^{0.5} = 0.57 \approx 0.6 \text{ [m]}$$

- *Largo.* A partir del área y el ancho del humedal el largo se calcula directamente:

$$L = \frac{7}{0.6} = 11.66 \approx 12 \text{ [m]}$$

- *Tiempo de retención.* Finalmente, el tiempo de retención para cada humedal es:

$$t = \frac{12 \cdot 1.8 \cdot 0.6 \cdot 0.45}{1.02} = 5.72 \approx 6 \text{ [días]}$$

Al ser mayor a 5 días el tiempo de retención calculado, se aceptan las dimensiones del diseño y se procede a seleccionar la colocación y detalles de instalación de las tres secciones del humedal diseñado.

- *Distribución de la vegetación.* Una vez diseñado el humedal es necesario determinar el número y distribución de las plantas dentro del mismo. Se recomienda distribuir las en hileras, dejando 5 cm libres hacia los bordes laterales, 15 cm entre cada planta a lo largo y 10 cm a lo ancho; esto es: 108 plantas en tres hileras con 36 plantas en cada hilera (ver tabla 4.4).

Tabla 4.4 Cantidad de plantas en el humedal

Distribución en hileras con separación de 15 y 10 cm	Largo = 5.40 m	Ancho = 0.30 m	Total
	5.40 / 0.15 = 36	0.30 / 0.10 = 3	3 x 36 = 108

La propietaria del predio indicó que las plantas que le gustaría tener son: ave del paraíso, alcatraz, cuna de moisés, lirio acuático e incluso un rosal; este último deberá ser vigilado cuidadosamente, ya que a pesar de ser una planta muy resistente a bajas temperaturas se desconoce cómo se comportará en un medio húmedo saturado.

De acuerdo con las necesidades particulares de la propietaria, adaptar el humedal al sitio y facilitar la construcción se diseñaron varias propuestas de humedales de distintos tamaños, formas y ubicaciones; la tabla 4.5 resume las características de las propuestas que se detallan más adelante.

Tabla 4.5 Propuestas de humedales según el número de habitantes.

Número de habitantes	Área [m ²]	Ancho [m]	Largo [m]	Tiempo de retención [días]
1	1.62	0.30	5.40	5.64
2	3.20	0.40	8.00	5.70
4	6.30	0.45	14.00	5.81
6	7.20	0.60	12.00	6.23

4.3 Planeación y construcción

Para elegir la mejor ubicación y geometría de construcción del humedal se consideraron los siguientes factores:

Instalación hidrosanitaria. Al realizar el levantamiento del lugar se obtuvieron la localización de las tuberías de agua potable, la cisterna de agua potable y un tinaco deshabilitado; además de los registros sanitarios, las salidas de los drenajes y una fosa séptica. A partir de la instalación hidrosanitaria ya existente se propuso la ubicación del humedal, para que el costo de la construcción fuera el menor posible y aprovechar las instalaciones existentes (tubería y tinaco principalmente).

Nivel de terreno. El asentamiento, y el lote, elegido poseen un desnivel natural, por lo que las primeras propuestas pretendían aprovecharlo para evitar la excavación y reducir el costo de mano de obra. Por otra parte, existe una zanja a lo largo del límite posterior del predio, cerca de una de las descargas principales por lo que la construcción del humedal en esta zona se consideró como otra opción a evaluar, ya no se requeriría excavación.

Además, como se mencionó con anterioridad, después de realizar el levantamiento y obtener los niveles constructivos se constató que el nivel de la casa (A) se encuentra a 40 cm por debajo del piso terminado, lo que es un importante factor limitante ya que al tratarse de una zona con suelo rocoso es poco factible realizar una excavación profunda para obtener la pendiente necesaria para el humedal.

Gasto hídrico. Ya que dentro de este estudio no se consideró la mediación directa del gasto de agua, se entrevistó a la propietaria para conocer la frecuencia y cantidad de agua comprada y así tener un cálculo aproximado de su consumo e, indirectamente, de la descarga de aguas residuales.

Facilidad constructiva y de mantenimiento. El desnivel del asentamiento, el suelo rocoso y la ubicación de los registros sanitarios fueron consideraciones importantes para reducir el

costo de mano de obra y material, pero sin perder de vista la funcionalidad del sistema. Atendiendo la facilidad constructiva y que una de las descargas es elevada.

Reutilización del agua tratada. La ubicación del humedal también consideró el posible aprovechamiento del agua tratada y surgieron dos propuestas a este respecto: reutilización del agua para regar parte de la huerta (descarga directa) o uso en sanitarios y regaderas (mediante el bombeo hacia un tinaco elevado).

Valor estético. Es importante recordar que el humedal, además de su función depuradora, posee un alto valor estético y por lo tanto debe considerarse que el sitio en donde se coloque permita que las plantas que lo conforman luzcan lo mejor posible.

Optimización de espacios. Por otro lado, a pesar de la posición de las tuberías de descarga y el valor estético del humedal, es importante recordar el valor que los espacios libres tienen dentro de un predio habitacional, por lo que el humedal no debe bloquear accesos o reducir espacios necesarios. Es común construir estos sistemas junto a bardas o como separadores de espacios.

Opinión de la propietaria. Un factor más a considerar, y en más de una ocasión determinante, es la opinión, gustos y costumbres de la propietaria, ya que será ella quien se encargue del funcionamiento del humedal y si no está de acuerdo con alguna de sus características (ubicación, aspecto, plantas y tamaño) es prácticamente imposible suponer que el sistema funcionará.

Tomando en cuenta los factores anteriores se realizaron diferentes propuestas para seleccionar aquella que se considerara la más conveniente, esto, para ser presentada para su aprobación y construcción a la Delegación Tlalpan y a la propietaria del predio.

Propuesta 1. La primera propuesta fue construir un pequeño humedal, para las dos habitantes actuales del predio y ubicarlo entre las dos casas habitación (ver figura 4.6). Esta ubicación serviría como separación entre las dos viviendas del predio, no invadiría el espacio del estacionamiento y el valor estético de las plantas resaltaría. Los inconvenientes de esta propuesta fueron: i) el nivel del depósito de alimentación del humedal (fosa séptica actual) exige una excavación profunda y costosa; ii) la instalación de la tubería requeriría derribar la escalera de comunicación entre ambas casas, la cual está fabricada con piedra volcánica, lo que incrementaría el costo de la mano de obra.

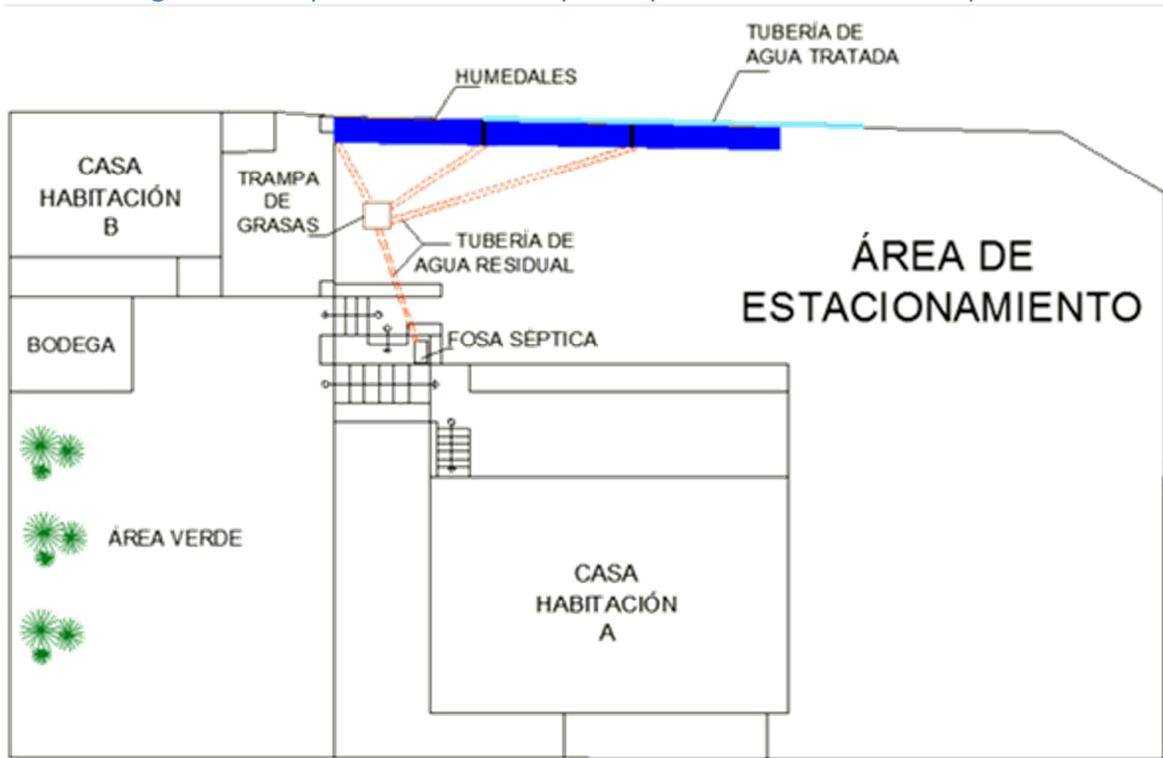
Figura 4.6 Propuesta 1. Humedal para 2 personas, delimitando el estacionamiento



Propuesta 2. Posteriormente se analizó la posibilidad de construir tres humedales (con flujos separados), para satisfacer a los seis habitantes. En esta propuesta los humedales estarían contiguos, en el área del estacionamiento (ver figura 4.7) y servirían para delimitar el predio. Sin embargo, esta propuesta también presentó inconvenientes: i) se requiere de una excavación profunda porque la actual fosa séptica serviría como depósito de alimentación; ii) necesidad de romper la escalera actual; iii) romper y excavar en el área del estacionamiento; iv) transportar la roca volcánica que la propietaria almacena actualmente en el área de estacionamiento y que desea conservar para emplearla en la construcción de una barda perimetral (ver fotografía A.1.15 del anexo 1).

Mientras se desarrollaba esta propuesta, la Sra. Martínez sugirió la posibilidad de construir el humedal en la parte exterior a su predio, a todo lo largo del área de estacionamiento, haciéndosele ver los inconvenientes que se tendrían, para su correcto funcionamiento, si estuviera en la vía pública.

Figura 4.7 Propuesta 2. Humedal para 6 personas delimitando el predio



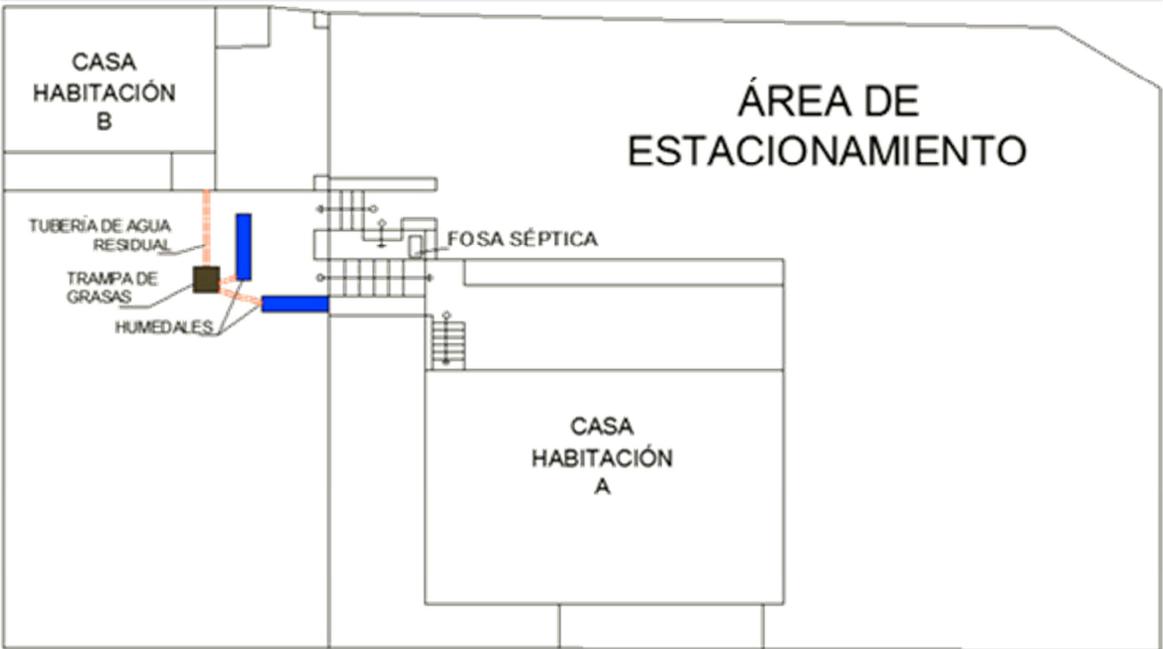
Propuesta 3. Para no excavar bajo la escalera de acceso a la casa B, y considerando que la instalación hidrosanitaria de esa casa aún no estaba construida se analizaron diferentes propuestas para el manejo separado de las descargas de las dos casas del predio. La primera de estas propuestas es la construcción de un humedal debajo de la escalera que lleva al primer piso de la casa A (ver figura 4.8 y fotografía A.1.7) para las dos habitantes actuales y así aprovechar la ubicación de la fosa séptica. Sin embargo, se tendría que realizar una excavación importante (aproximadamente 1.40 m), debido a la profundidad de la descarga de agua de la planta baja. Es conveniente recordar aquí que el suelo de la zona es rocoso y que una de las posibles ventajas del humedal es su valor estético, el cual es reducido por esta opción.

Propuesta 4a. En cuanto al humedal para las cuatro personas que habitarán la casa B se realizaron tres propuestas. La primera fue, a sugerencia de la Sra. Martínez, la construcción de dos humedales en escuadra (ver figura 4.9a), en la zona de las escaleras (para que se aprecie desde ambas casas y sirva para delimitar las escaleras que no cuentan con barandal).

Figura 4.8 Propuesta 3. Humedal para 2 personas para casa A, bajo escalera



Figura 4.9a Propuesta 4a. Humedal para 4 personas de la casa B



Propuesta 4b. Otra propuesta para la casa B es construir el humedal cerca de las plantas que actualmente hay en el jardín (ver figura 4.9b). En esa ubicación existen además cuatro troncos de árboles que deberán talarse pero, que a decir de la propietaria, están secos y sus raíces amenazan con derribar la barda perimetral.

Figura 4.9b Propuesta 4b. Humedal para 4 personas de la casa B



Propuesta 4c. Una variante a la propuesta anterior es la construcción del humedal en la parte posterior del jardín (ver figura 4.9c), para delimitar el predio ya que no existe barda perimetral.

Figura 4.9c Propuesta 4c. Humedal para 4 personas de la casa B



Propuesta 5. Una vez comprobados los inconvenientes asociados al uso de la fosa séptica actual como tanque de almacenamiento y trampa de grasas, se analizaron otras propuestas, llegando a la conclusión de que conviene integrar poco a poco este sistema de tratamiento a ambas casas habitaciones, aprovechar el espacio disponible, reducir el costo de construcción y reaprovechar el agua tratada. Esta propuesta consiste en la construcción de tres humedales:

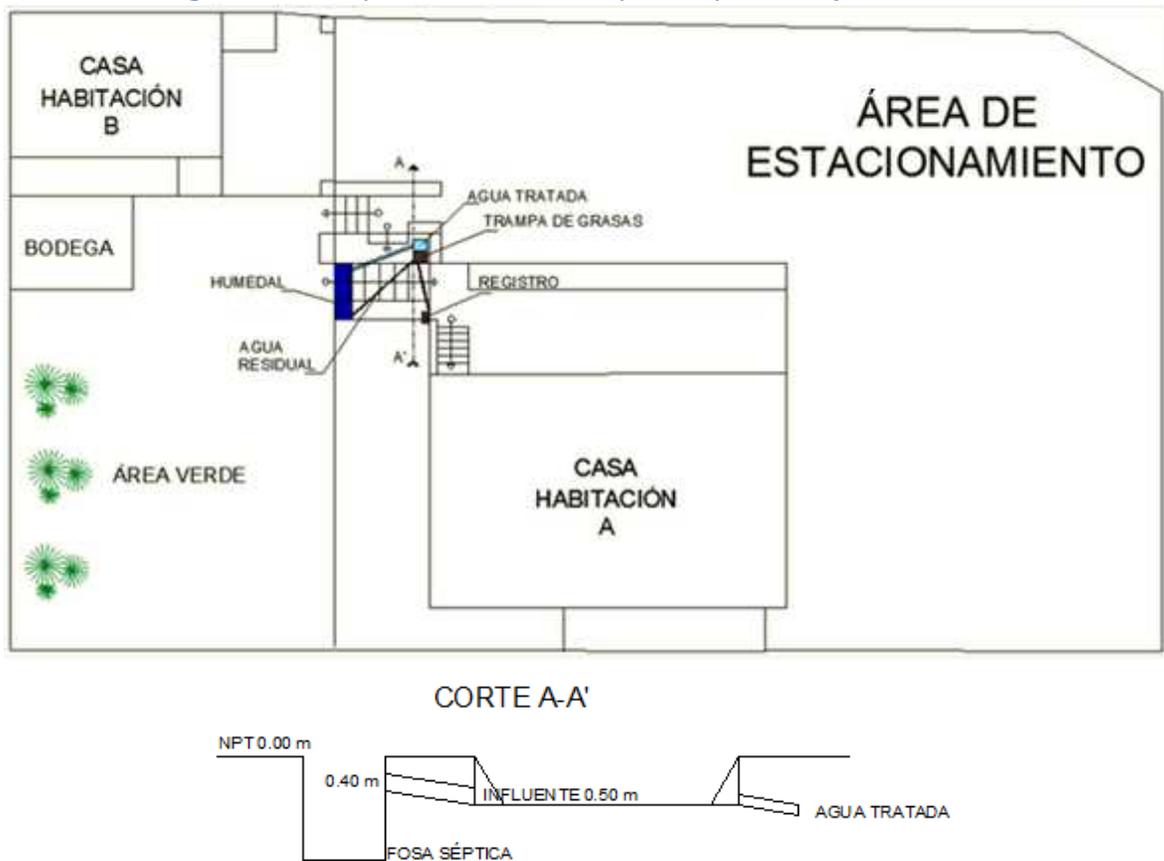
Humedal 1. Considerando la localización del drenaje (de la planta alta de la casa A) en la parte trasera de la casa habitación, se propuso aprovechar este espacio para construir el humedal artificial sobre el piso terminado (figura 4.10). El agua tratada regaría parte de una huerta construida en una sección que actualmente intenta cumplir con esta función. Este humedal sólo funcionaría para una persona: señora Martínez.

Figura 4.10 Propuesta para la planta alta de la casa A



Humedal 2. Debido al nivel del piso terminado de la planta baja (casa A, habitada por la hija de la Sra. Martínez), se propuso la construcción de un humedal que funcionará sólo para una persona y aprovechará la cisterna (actualmente utilizada por madre e hija); así como construir la trampa de grasas y una cisterna para el agua tratada (figura 4.11).

Figura 4.11 Propuesta de humedal para la planta baja de la casa A



Humedal 3. Para la casa B que será habitada por cuatro personas se planteó la construcción de un humedal artificial y que también ayudará a regar la huerta (figura 4.9a y 4.10).

Propuesta final. Con base en la propuesta anterior, los beneficios de regar la huerta, la posibilidad de ahorro en la adecuación de la instalación hidráulica y la estética; se elaboró la propuesta final (figura 4.12), que incluye la instalación de una cisterna independiente (que permitirá el reaprovechamiento del agua tratada para los inodoros y riego) un cuarto de bombas y la instalación hidráulica necesaria para su correcto funcionamiento.

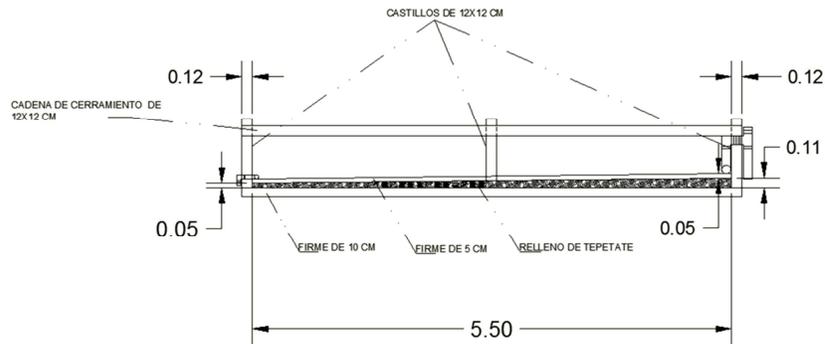
Con esta propuesta final se elaboraron los planos del humedal (las medidas fueron adaptadas al espacio disponible), trampa de grasas y el control de salida (figura 4.13, 4.14 y 4.15, respectivamente). Con respecto a la cisterna de agua tratada se determinó que por espacio y economía lo mejor sería una cisterna prefabricada de 800 litros, la cual posiblemente sea provista por la Delegación.

Figura 4.12 Propuesta final



Figura 4.13 Planos del humedal

a. Corte lateral



b. Corte transversal

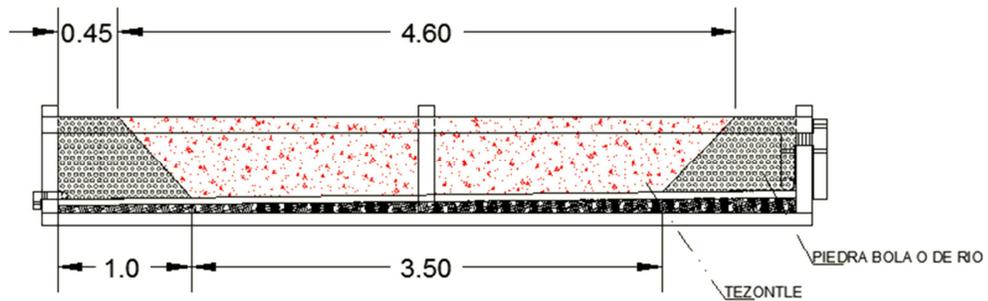


Figura 4.14 Trampa de grasas

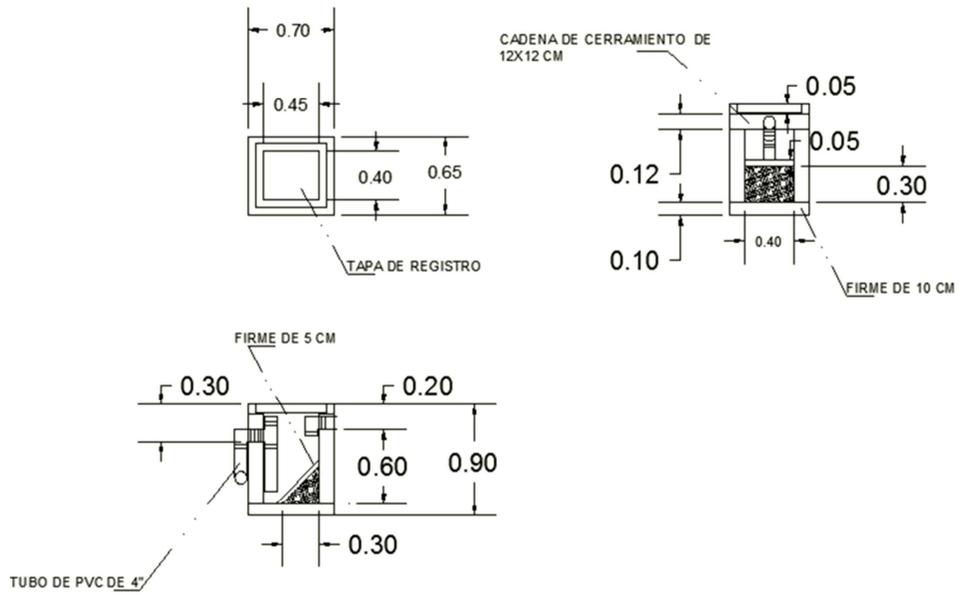
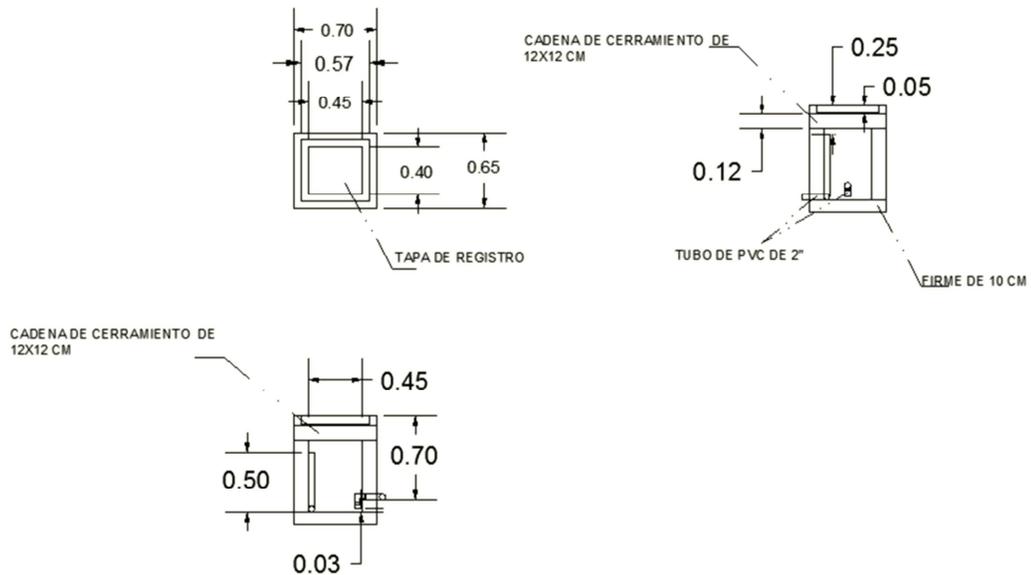


Figura 4.15 Control de salida



4.3.1 Costo

Para verificar la factibilidad de la construcción del humedal se realizó un análisis de costos (tabla 4.6) utilizando el catálogo de precios unitarios de junio del 2011 del Distrito Federal (GDF, 2011), que incluye la mano de obra, material de construcción y adquisición de plantas; además de los diferentes

trabajos necesarios para la correcta ejecución de la obra (desyerbe y limpia de terreno, trazo y nivelación, excavación y la impermeabilización de la base del humedal).

Tabla 4.6 Catálogo de precios del humedal

No.	Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
1	Trazo y nivelación para desplante de estructura para edificación, con equipo de topografía, incluye materiales para señalamiento.	m ²	22.00	\$1.92	\$42.24
2	Desyerbe y limpia del terreno a mano, incluye acarreo libre a 20 m.	m ²	22.00	\$4.96	\$109.12
3	Despalme de material seco clase II, por medios mecánicos, todas las zonas.	m ³	2.20	\$67.48	\$148.46
4	Excavación a mano zona "B", clase II de 0.00 a 2.00 m de profundidad.	m ²	18.06	\$122.32	\$2,208.61
5	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	22.00	\$9.25	\$203.50
6	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	9.50	\$35.89	\$341.07
7	Carga manual, acarreo en camión al primer kilómetro y descarga de material fino o granular, volumen medido en banco.	m ³	9.50	\$69.48	\$660.28
8	Acarreo en camión de material fino o granular, kilómetros subsecuentes, zona urbana.	m ³ -km	190.06	\$5.99	\$1,138.48
9	Relleno de zanjas con material producto de la excavación, compactado al 85% proctor, con rodillo vibratorio, incluye acarreo libre hasta 20 m, incorporación de agua medido compacto.	m ³	8.55	\$51.84	\$443.23
10	Relleno de excavación para estructuras con arcilla, compactada al 85% proctor con pisón.	m ³	8.64	\$231.08	\$1,996.53
11	Registro de 0.60x0.80 y 1.25 m de profundidad, medidas interiores.	Pza	2.00	\$2,113.89	\$4,227.78
12	Tubo de PVC tipo sanitario con perforaciones de 1" @15 cm, unión cementar, extremos lisos de 100 mm de diámetro.	m	3.00	\$103.73	\$311.18
13	Tubo de PVC tipo sanitario, unión cementar, extremos lisos de 100 mm de diámetro.	m	9.00	\$79.79	\$718.11
14	Tubo de PVC tipo sanitario, unión cementar, extremos lisos de 50 mm de diámetro.	m	11.00	\$37.36	\$410.96
15	Codo de PVC tipo sanitario unión cementar de 90°x100 mm de diámetro.	Pza	3.00	\$56.02	\$168.06
16	Te sencilla de PVC tipo sanitario unión cementar, de 100x100mm de diámetro.	Pza	3.00	\$83.49	\$250.47
17	Te sencilla de PVC tipo sanitario unión cementar, de 50x50mm de diámetro.	Pza	1.00	\$59.08	\$59.08
18	Impermeabilización en muros y pisos, sistema prefabricado PA-40T, SBS ALKOAT, compuesto por asfaltos destilados, modificados con elastómeros del tipo SBS con refuerzo central de poliéster no tejido de 180 gr/cm ² y acabado superior de arena silica, previa preparación de la superficie.	m ²	17.04	\$224.00	\$3,816.96
19	Cama de tezontle, incluye acarreo libre.	m ²	6.18	\$287.09	\$1,772.78
20	Piedra bola de río para decoración (bote de 0.20 m ³)	Pza	15.30	\$106.31	\$1,626.54
21	Suministro y colocación de papiro egipcio de 100 a 200 cm y de 2 a 5 varas.	Pza	30.00	\$68.86	\$2,065.80
22	Suministro y colocación de ave del paraíso envase de 0.40 x 0.40 y 1 m de altura.	Pza	10.00	\$235.07	\$2,350.70
23	Suministro y colocación de alcatraz de 30 a 50 cm con 2 a 6 hojas.	Pza	20.00	\$45.87	\$917.40
				TOTAL	\$25,987.34

Costo mano de obra	\$15, 336.26
Costo por plantas	\$5,333.90

Como se puede observar en el catálogo, el costo de la mano de obra asciende a \$15, 336.26 (casi el 60% del costo total), por lo que se sugiere que el usuario, de ser posible, realice la construcción. Por otro lado, el uso de *block* en lugar de tabique ligero (para la construcción de un humedal sobre piso terminado) disminuye la cantidad de material necesario y por tanto el costo.

Un beneficio adicional a considerar es que la Delegación cuenta con viveros y podrá donar carrizales (*Phragmites australis*), cuna de moisés (*Spathiphyllum uxpanapense*), lirios acuáticos (*Eichhornia crassipes*) y aves del paraíso (*Strelitzia reginae*), lo cual reduce en \$5,333.90 el costo total.

4.4 Análisis de resultados

De la sección anterior se desprende que los humedales poseen una gran adaptabilidad en su diseño, pudiendo variar libremente sus proporciones (siempre y cuando se respeten las dimensiones totales) para construirlos en el sitio donde más favorezcan las necesidades y gustos de sus usuarios. En este caso de estudio el principal parámetro de decisión sobre la ubicación del humedal y sobre las propuestas presentadas fue la independencia entre los hábitos e instalaciones hidráulicas de los diferentes habitantes del predio. La construcción modular del humedal permitió satisfacer las necesidades originalmente planteadas.

Lamentablemente, después de esperar más de un mes que la Delegación y la propietaria del predio coordinaran las actividades para iniciar la construcción (ver anexo A.2) no se llegó a ningún acuerdo; por lo que esta tesis terminó de escribirse y el humedal aún no existe. Sin embargo, se continuará participando en este proyecto y cuando se inicie la obra se supervisará la construcción.

Como ya se dijo antes, los humedales artificiales son sistemas muy eficientes (más del 85%) en la remoción de materia orgánica y requieren de cuidados mínimos de mantenimiento y operación; sin embargo, al estar basados en organismos vivos, deben tomarse las precauciones necesarias para que se conserven los parámetros de diseño (concentración de contaminantes, profundidad, pendiente y cantidad de agua principalmente a tratar), por lo que se deberá supervisar que los sedimentos de materia orgánica no obstruyan el flujo del agua ni se modifiquen la cantidad ni calidad del flujo a tratar.

Los humedales son sistemas fácilmente adaptables a cualquier localidad, no obstante requieren de una cantidad considerable de espacio, lo que en la actualidad es difícil de encontrar en ciudades densamente pobladas; sin embargo, una planeación temprana de las zonas urbanas prevendría dicho problema y su uso ayudaría a resolver el problema de la contaminación del agua, además de proporcionar un beneficio a la sociedad.

5. Conclusiones y recomendaciones

El agua es un insumo de gran importancia que favorece la preservación de la flora y fauna y es esencial para la vida, no solo en actividades productivas y recreativas, ya que es utilizada en actividades humanas para subsistir o producir bienes y servicios como son el consumo agrícola, el abastecimiento público, plantas termoeléctricas y actividades recreativas, sino que es un medio en el cual se producen las reacciones orgánicas, siendo también un reactivo o producto de reacción de los procesos bioquímicos; sin embargo, por la falta de infraestructura y el manejo inadecuado de los residuos que generamos, las fuentes de abastecimiento de agua han disminuido o su calidad se ha deteriorado, debido a que solo el 30% de las aguas residuales reciben un tratamiento adecuado.

Así mismo, el aumento poblacional en el D.F. de casi el doble por cada 10 años (cuatro millones de habitantes en 1960, cerca de ocho millones en 1970 y casi 20 millones para el año 2000) nos enfrenta a la necesidad de construir, como mínimo, 5 millones de viviendas para cubrir las necesidades de estas personas además de los rezagos de vivienda acumulados. Dicha situación, aunada a la falta de planeación, afecta el desarrollo general de los asentamientos propiciando la creación de asentamientos irregulares, los cuales generan una mayor contaminación en el medio, dado que no cuentan con los servicios urbanos básicos; para lo cual los usuarios realizan autoconstrucción y cooperación comunitaria.

De acuerdo al análisis realizado en este trabajo, una solución al tratamiento de las aguas residuales en asentamiento irregulares; es la utilización de humedales artificiales. Por las ventajas que tienen comparadas con otros procesos:

- pues no requieren equipos mecánicos
- instalaciones altamente capacitadas,
- es una tecnología fácilmente adaptable
- y no generan un impacto visual al ser construidos.

La mayor desventaja que se tiene con el humedal es que no se puede estandarizar de acuerdo al número de habitantes, ya que depende del influente, carga orgánica, temperatura, variedad de plantas de la localidad, adaptabilidad y el sustrato; por otro lado, al carecer de bombas se requiere aprovechar de las pendientes naturales, lo que dificulta su adaptabilidad, ya que, al no ser planeado desde el inicio de la construcción de la vivienda, la descarga de aguas residuales y el espacio disponible para la construcción del humedal podría no encontrarse en la mejor localización.

En contraparte, el método más utilizado en el tratamiento de aguas residuales es el conocido como lagunas de estabilización, el cual requiere de un área aproximada de 4 m²/hab, el costo inicial depende del costo del terreno ya que requiere grandes extensiones de terreno para funcionar adecuadamente. Así mismo, los costos de extracción de lodos es alto por lo que es más fácil abrir nuevas lagunas de tratamiento y abandonar las originalmente construidas hasta que estas estén secas en su totalidad y el lodo acumulado pueda ser removido. Esto sin mencionar que generan un gran impacto visual al ser un foco

de infección pues se encuentran al aire libre y permiten la proliferación de moscas y mosquitos y de ser un suelo arenoso se corre el riesgo de haber infiltraciones a los mantos acuíferos subterráneos.

Otro de los métodos más utilizados en México son las plantas de tipo “lodos activados”, mismas que requieren un área aproximada de 2.25 m²/hab y tiene un costo inicial muy alto; siendo de más de 100 mil pesos la de 500 galones (1.89 m³) por día, que es la de menor tamaño. Esto no incluye el costo de mantenimiento y operación, quien de acuerdo al fabricante es de \$3.00 por m³ de agua tratada.

En el país existen 677 lagunas de estabilización, 454 de lodos activados y 134 humedales artificiales por lo que es difícil que se conviertan en la principal tecnología empleada para el tratamiento de aguas residuales. Porque al no ser difundidas y apoyadas este tipo de tecnologías por parte de las dependencias gubernamentales, se quedan en el diseño; por lo que, como ingenieros debemos promover cualquier tecnología y más aún si ésta representa un gran beneficio ambiental y económico.

Cabe mencionar que para determinar las características de diseño y construcción del humedal fue necesaria la interacción tesista-propietaria y tesista-dependencia ya que para determinar las características del humedal era indispensable conocer las costumbres en relación a la utilización y reutilización del agua y al gusto particular de la propietaria para la elección de las plantas; así como la elección de los materiales por parte de la dependencia pues estos serían donados y deberían estar disponibles en sus almacenes.

Con base en lo aprendido en la literatura especializada y a los conocimientos empíricos durante la elaboración de esta tesis, las recomendaciones básicas para el diseño y construcción serían:

Durante el proceso de diseño:

- Elegir el humedal de tipo subsuperficial ya que estos son más eficientes debido a la barrera física que implica el sustrato y requieren de menor área que los de flujo superficial.
- De ser posible, conocer los hábitos en relación al consumo de agua para poder determinar la cantidad de agua a tratar así como de cuestionar sobre los planes a futuro del lugar para contemplar el redimensionamiento del humedal en caso de requerirse.
- Conocer las expectativas del propietario en relación a la ubicación del humedal artificial.

Durante el proceso de construcción:

- Aprovechar las pendientes naturales de la mejor manera para eliminar costos innecesarios de relleno o excavación pues es necesaria una pendiente a lo largo del humedal.

- Impermeabilizar la base y los muros del humedal para evitar infiltraciones.
- Reutilizar materiales para el sustrato y utilizar plantas localizadas cerca del sitio, ya que se disminuiría el costo de inversión así como el riesgo de sequía por ambientes extremos.

Durante el proceso de operación:

- Vigilar el humedal los primeros meses para determinar qué tipo de plantas son las más resistentes o si es necesaria alguna replantación.
- Realizar una limpieza y retirar los elementos contaminantes de las rejillas que actúan como barrera física en caso de notar una disminución del caudal de salida.
- Inspeccionar el estado de las paredes del humedal cada 6 meses para notar cualquier fuga o agrietamiento y arreglarlo en caso de ser necesario.
- Cortar las plantas con periodicidad de acuerdo al crecimiento observado para conservar una altura determinada y que las raíces no afecten la base del humedal.

Con esta tesis pude conocer la problemática sobre la falta de infraestructura necesaria para dar tratamiento al agua residual de toda la población; así como para ofrecer los servicios básicos. También valorar, que no existen programas a mediano o largo plazo para solventar dichos problemas puesto que se consideran como afectaciones para zonas en particular; ignorando que, todos estaremos involucrados en un futuro no muy lejano, debido a la magnitud de los posibles impactos en el entorno. Por lo que, como ingenieros, debemos evaluar las distintas problemáticas que más afectan a la población y establecer un plan a futuro que nos permita ser una pieza clave en la búsqueda de las soluciones.

Es importante recalcar el valor de los conocimientos y de la preparación, puesto que al conocer las distintas metodologías y tecnologías involucradas en cualquier proceso podremos elegir la más adecuada acorde a los diferentes criterios de diseño elegidos, ya sea: costo inicial, de operación o de mantenimiento, espacio disponible, adaptabilidad e inclusive gusto personal.

Una de las mayores complicaciones al realizar esta tesis fue el considerar el gusto personal de la propietaria del lugar y al mismo tiempo el de la dependencia, ya que al tener distintas perspectivas del proyecto fue difícil llegar a un acuerdo puesto que cada uno quería tener la razón; sin embargo al final se pudo conciliar un diseño y arreglo que beneficiara a las dos partes.

Para finalizar, en el ámbito social es necesario conservar, fomentar y ampliar nuestras relaciones personales puesto que eso ayudará en nuestro trabajo puesto que muchas veces nos tocará ser parte de un equipo multidisciplinario o tendremos que interactuar con el usuario final o el cliente y será indispensable el poder desenvolvernos fácilmente para poder interpretar su necesidad. Esto sin dejar de mencionar que muchos trámites se agilizan al tener los contactos adecuados.

Así mismo, la importancia de conocer e implementar toda clase de tecnologías limpias en las escuelas, podría generar un temprano interés en los alumnos, lo que ayudaría a que dichas alternativas fueran promovidas y estudiadas para que pudiera existir literatura más especializada y así ser fácilmente adaptable a cualquier zona del país.

A.1 Anexo fotográfico

Todas las fotos corresponden a la situación en la que se encuentran los lotes ubicados dentro de la 1a sección de manzana 36 en el pueblo de San Miguel Ajusco en la actualidad.

Figura A1.1 Lote baldío con espacio disponible



Figura A1.2 Casa deshabitada con espacio disponible



Figura A1.3 Lote utilizado como jardín para fiestas con espacio disponible



Figura A1.4 Fosa séptica comunitaria deshabilitada



Figura A1.5 Fachada del lote que no cuenta con espacio disponible



Figura A1.6 Fachada principal del lote elegido, propiedad de la Sra. Martínez



Figura A1.7 Planta baja de la casa habitación “A” (propiedad de la Sra. Martínez)



Figura A1.8 Planta alta de la casa habitación “A”



Figura A1.9 Casa habitación “B” (en construcción)



Figura A1.10 Fosa séptica de la casa habitación “A”



Figura A1.11 Tinaco deshabilitado que podrá aprovecharse para el agua tratada



Figura A1.12 Riego del jardín con aguas grises



Figura A1.13 Vista de la ubicación del humedal (fondo del pasillo)



Figura A1.14 Ubicación de la posible construcción del humedal



A.2 Bitácora

Los trabajos descritos se realizaron del 16 de mayo al 16 de noviembre del año 2011. Los participantes en este proyecto son:

- Geógrafo Víctor Hugo Serrano de la Dirección de Ordenamiento Territorial de la Delegación Tlalpan (en lo sucesivo "el geógrafo").
- Señora *Cristina Martínez Lovera, propietaria del lote elegido* (en lo sucesivo "la propietaria").
- M.I. Alejandra Medina Arévalo, profesora de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería en la División de Ingeniería Mecánica e Industrial (en lo sucesivo "la tutora de tesis").
- Licenciada Beatriz, secretaria del Geógrafo Víctor Hugo (en lo sucesivo "la secretaria").
- Jonathan López Salazar, alumno tesista de la Facultad de Ingeniería, autor de esta bitácora.

Sólo se asientan las reuniones y trabajos de campo realizados fuera de la Facultad de Ingeniería de la UNAM:

Lunes 16 de mayo

Se realizó una cita con el geógrafo para celebrarse el día jueves 19 de mayo del 2011 para exponerle el proyecto y saber si podría contarse con el apoyo de la delegación Tlalpan para la construcción de un humedal artificial en algún asentamiento irregular.

Jueves 19 de mayo

Se establecieron los alcances, las limitaciones y el apoyo que espera recibirse por parte de la delegación para el desarrollo del proyecto. Los resultados fueron:

- El humedal artificial debe satisfacer la demanda de 5 personas adultas.
- Se deberá hacer una visita a los asentamientos para exponer a los habitantes un panorama del proyecto y conocer su opinión.
- Se deberá realizar un análisis de costos, así como de beneficios sociales y ambientales sobre la construcción de dicho humedal con la finalidad de ser presentado al director general de la delegación Tlalpan para que éste apruebe el presupuesto.
- La construcción del humedal artificial será en un plazo menor a dos meses para recopilar información a la brevedad posible en esta planta piloto.
- En el caso de obtener resultados favorables, la delegación planteará un proyecto para 130 asentamientos irregulares para el año 2012.

Jueves 26 de mayo

Se llamó al geógrafo para determinar la fecha en la cual se conocería a la persona interesada en construir el humedal, sin embargo al no estar en su oficina se le dejó recado con su secretaria.

Viernes 27 de mayo

Se visitó al geógrafo sin tener una cita previa y se platicó sobre la junta que se planeaba realizar con el director de la delegación y se estableció que en un periodo no mayor a 8 días esta junta se llevaría a cabo. También pidió el catálogo de obra para determinar el costo de la construcción del humedal y que el día sábado 4 de junio la delegación nos llevaría a conocer el lote y a la propietaria interesada en el proyecto.

Lunes 30 de mayo

Se le presentó una propuesta al geógrafo sobre el catalogo, el cual considera la mano de obra para la construcción y el costo era cercano a los \$25, 000 por lo que se pidió realizar un nuevo catálogo de obra que incluyera solamente el material para la construcción.

Sábado 4 de junio

No se realizó la visita al terreno por la falta de un vehículo; sin embargo, se comprometieron a que el sábado 11 de junio ya no habría ningún problema para conocer a la persona interesada.

Miércoles 8 de junio

Se envió al geógrafo el catálogo de obra corregido para su revisión e indicación de cualquier posible cambio.

Jueves 9 de junio

Se confirmó la cita con la secretaria para que no existiera inconveniente alguno sobre la visita al posible lugar de construcción del humedal.

Sábado 11 de junio

Conocí a la propietaria del lote interesada en el proyecto en compañía de 3 miembros de la delegación y de la tutora de tesis. Se le mostraron imágenes y una presentación para que comprendiera mejor lo que se pretendía con este trabajo y se notó muy interesada. Se determinó que el sábado 18 de junio se realizaría el levantamiento del lugar.

Sábado 18 de junio

Se realizó un primer levantamiento al lote elegido y se observaron los desniveles con la ayuda de un nivel con manguera. También se hablaron de posibles ubicaciones para la construcción del humedal y se aclararon algunas dudas a la propietaria sobre el proyecto.

Sábado 25 de junio

Se realizó un recorrido a pie y se tomaron fotografías para conocer la situación del asentamiento y determinar la cantidad de lotes con espacio disponible para la construcción de un humedal.

Se tomaron nuevamente varias medidas al lote elegido para verificarlas.

Sábado 2 de julio

Se le mostraron 3 propuestas a la propietaria para la construcción del humedal y se le realizaron cambios como son la ubicación del control de salida y la longitud del humedal, ya que la señora deseaba que el humedal cubriera toda una zona sin utilizar para que fuera más estético.

Con la ayuda de la propietaria se conoció el número de habitantes por lote para establecer un promedio.

Lunes 4 de julio

Se solicitó una cita con el geógrafo para mostrarle los planos de construcción de las propuestas expuestas a la propietaria.

Jueves 7 de julio

En la cita con el geógrafo, se estableció que la delegación solo sería capaz de proporcionar el material para la construcción, así que se pidió dicha lista de material para poder surtirla.

Sábado 16 de julio

Se le comentó a la propietaria lo platicado con el geógrafo; se le mostraron las nuevas correcciones y se le cuestionó sobre si podría solventar el gasto de la construcción y de la fecha probable de construcción.

Jueves 28 de julio

Se platicó con el geógrafo la fecha que la propietaria propuso y se le dio razón de lo acontecido en las últimas semanas, quedó de llamar a la propietaria para establecer la fecha de construcción.

Sábado 30 de julio

Se llamó a la propietaria para conocer lo sucedido y mencionó que no se habían puesto en contacto con ella y que el geógrafo no atendía sus llamadas.

Lunes 3 de agosto

Se le llamó al geógrafo y se le dejó recado a la secretaria pues el geógrafo se encontraba en un recorrido.

Miércoles 3 de agosto

Se visitó al geógrafo y se le mencionó que no pudimos comunicarnos con él días anteriores. Comentó que aún no había una empresa que donara el material y que en 2 semanas nos daría la fecha de construcción.

Sábado 20 de agosto

Se visitó a la propietaria, quien después de revisar las correcciones a los planos aceptó su ubicación y tamaño, sin embargo se platicó sobre un cambio a la propuesta. Este cambio sugiere la reutilización del agua tratada para abastecer los sanitarios y regar el jardín.

Domingo 28 de agosto

Se le envió a la señora una lista con fotos de las plantas que podrían plantarse dentro del humedal; sin embargo, al no elegir unas en particular se dejará la decisión final al geógrafo, ya que la delegación cuenta con viveros y no se sabía de qué plantas dispondrían. También se anexaron los planos finales para su revisión.

Miércoles 7 de septiembre

Se le enviaron al geógrafo los planos finales del humedal, la lista del material necesario para la construcción y la lista de plantas. También se le recordó llamarle a la propietaria para que se pusiera de acuerdo sobre la fecha de inicio de construcción.

GLOSARIO

A

- Absorción** Proceso de penetración activa o pasiva de una sustancia externa al interior de un organismo.
- Adsorción** Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material.
- Afluente** Incorporación de caudal aportado por uno más cauces hacia otro de mayor envergadura.
- Agua residual, servida, fecal o cloacal** Agua contaminada con desechos orgánicos humanos o animales u otras sustancias que ingresan a ella después de su aprovechamiento. También se les llama aguas servidas, fecales o cloacales debido a que contienen materia fecal y por la forma en la que son transportadas (del latín cloaca, alcantarilla) respectivamente.
- Aireación prolongada o de oxidación total** Es un sistema de tratamiento secundario de tipo biológico-aerobio de estabilización aerobia, mediante el cual se emplea una aireación prolongada llamada oxidación total.

B

- Bacterias aerobias** Tipo de organismo que necesita de un ambiente que contenga oxígeno diatómico (un gas compuesto por dos átomos de oxígeno) para poder existir y desarrollarse adecuadamente, es decir, que necesitan oxígeno para la respiración celular.
- Biomagnificación** Se refiere al proceso mediante el cual ciertas sustancias como pesticidas o metales pesados se mueven hacia arriba en la cadena alimenticia, se abren camino en los ríos o lagos, y sirven de alimento a los organismos acuáticos como los peces, lo que a su vez son comidos por aves de gran tamaño, los animales o seres humanos. Las sustancias se concentran en los tejidos o los órganos internos a medida que avanzan en la cadena.

C

- Carcinógeno** Cualquier sustancia o agente capaz de desencadenar un cáncer en las células sanas; no necesariamente tiene que ser un agente que provoque mutación en el material genético de las células.
- Clorofluorocarbonos (CFC)** Son una familia de hidrocarburos en los cuales los átomos de hidrógeno han sido sustituidos total o parcialmente por átomos de Cloro y de Flúor; se emplean en gran cantidad en la industria de la refrigeración y de propelentes de aerosoles. Los CFC poseen una capacidad de supervivencia en la atmósfera de 50 a 100 años y al alcanzar la estratosfera son disociados por la radiación ultravioleta, liberando el cloro de su composición y dando comienzo al proceso de destrucción del ozono.
- Coagulante** Los coagulantes son agentes que ayudan a la precipitación ya que permiten incrementar la tendencia de las partículas de agregarse unas a otras para formar partículas de mayor tamaño y así precipitar más rápidamente.

Compuestos orgánicos volátiles (COV)	Son sustancias químicas que contienen carbono y se encuentran en todos los elementos vivos. Son liberados por la quema de combustibles, como gasolina, madera, carbón o gas natural.
Contaminación	La presencia en el ambiente de toda materia o energía, en cualquiera de sus estados físicos y formas que, al incorporarse en el medio, altera o modifica su composición o condición natural, causando un desequilibrio ecológico.
Contaminante biológico	Son aquellos microorganismos contenidos en la materia orgánica, responsables de la transmisión de enfermedades, que se vehiculizan a través de las aguas de abastecimiento y pueden penetrar en el organismo produciendo daños a la salud.
Contaminante físico	Son aquellos que alteran el color, olor, temperatura, sabor y demás características físicas del agua. El elemento agresor es la energía en sus diversas manifestaciones.
Contaminante inorgánico	Son de origen mineral y de naturaleza variada (sales, óxidos, ácidos y bases inorgánicas, metales, etc.) aparecen en cualquier tipo de agua residual, aunque son más abundantes en los generados por la industria.
Contaminante orgánico	Son compuestos cuya estructura química está compuesta fundamentalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Son los contaminantes mayoritarios en vertidos urbanos y vertidos generados en la industria agroalimentaria.
Contaminante primario	Residuos producidos por fenómenos naturales y por actividad humana.
Contaminante químico	Son aquellos contaminantes que se combinan con el agua y cambian su composición química original. El elemento agresor, es la materia en sus diferentes estados y sus muy variadas composiciones químicas.
Contaminante secundario	Son las reacciones producidas por la mezcla de los contaminantes primarios.
Cribado o desbrozo	Proceso físico o mecánico que separa los materiales de acuerdo a su tamaño de partícula individual; consiste en filtrar el afluente en cámaras de rejillas para eliminar todos los objetos grandes que son depositados en el sistema de alcantarillado (trapos, barras, latas, frutas, papel higiénico, etc.)

D

Demanda bioquímica de oxígeno, DBO	Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Se utiliza para medir el grado de contaminación; normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO5) y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO ₂ /l). El método de ensayo se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos. La curva de consumo de oxígeno suele ser al principio débil y después se eleva rápidamente hasta un máximo sostenido, bajo la
---	---

acción de la fase logarítmica de crecimiento de los microorganismos.

Dióxido de azufre (SO₂) Gas producido por la presencia de azufre en los combustibles, la fabricación de ácido dodecibencensulfónico, la vulcanización y la fundición de metales.

Dióxido de carbono (CO₂) Gas originado a partir de la respiración y la combustión completa del carbón. Es el principal gas causante del efecto invernadero.

Discos biológicos o biodiscos El sistema consiste en un cilindro de plástico de gran tamaño y superficie, que gira alrededor de un eje horizontal y está sumergido parcialmente en el agua residual a tratar. Sobre su superficie se desarrollan colonias de bacterias y otros microorganismos, formando una zooglea similar a la que recubre las superficies de relleno de los filtros biológicos. Al girar, parte del cilindro se expone al aire para recibir el aporte necesario de oxígeno, que se puede forzar o no con aire a presión.

E

Efluente La salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua, a un tanque de oxidación, a un tanque para un proceso de depuración biológica del agua. Es el agua producto dada por el sistema

Electrodialisis Es un método de eliminación de nutrientes inorgánicos (fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales y se efectúa en celdas de electrodialisis. Los componentes básicos de la celda son una serie de membranas hechas de resina de intercambio iónico. Estas membranas son permeables solo a las especies iónicas y son relativamente selectivas de un tipo específico de iones.

Endógena Se refiere a algo que se origina o nace en el interior o que se origina en virtud de causas internas.

Estabilización por contacto Este proceso es una modificación del proceso de lodos activados. El agua residual afluyente se mezcla con lodo estabilizado y esta mezcla se somete a aireación en el tanque de contacto inicial, para el cual, el tiempo de retención es solamente de 20 a 40 min. Durante el contacto inicial se separa una fracción apreciable de demanda biológica de oxígeno, en suspensión y disuelta, mediante bio-absorción después de estar en contacto con el lodo activo suficientemente aireado. El efluente mezcla procedente del tanque de contacto inicial fluye al clarificador. Se separa el efluente clarificado y la descarga del clarificador se lleva a un tanque de estabilización en donde es aireada durante un periodo de 1.5 a 5h. Durante este periodo de estabilización los productos orgánicos adsorbidos se rompen mediante generación aerobia. El lodo estabilizado que abandona el tanque de estabilización lo hace en condiciones de inanición y, por lo tanto, dispuesto a adsorber residuos orgánicos.

Estabilización por lagunaje o balsas de estabilización En este proceso no se utilizan equipos de aireación; el oxígeno necesario se obtiene de la superficie natural de aireación y de las algas que producen oxígeno por fotosíntesis. El oxígeno liberado por las algas por la fotosíntesis se utiliza por las bacterias para la degradación aerobia de la materia orgánica. Los productos de esta degradación (CO₂, amoníaco, fosfatos) son utilizados de nuevo por las algas.

Eutrofización

Proceso que consiste en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno.

F

Fenol

El fenol es una sustancia tanto manufacturada como natural. El fenol puro es un sólido incoloro a blanco. El producto comercial es un líquido. Se usa principalmente en la producción de resinas fenólicas y en la manufactura de nylon y otras fibras sintéticas; como desinfectante y antiséptico y en preparaciones tales como enjuagadientes y pastillas para el dolor de garganta.

Fertilizantes nitrogenados fosfatados potásicos (NPK)

Benefician los suelos agrícolas, aumentan su fertilidad, pero en cuerpos de agua propician la eutrofización y en capas subterráneas del suelo y mantos acuíferos pueden ocasionar la acumulación de materia orgánica.

Floculación

Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.

Flotación

La flotación se usa para separar partículas líquidas (grasas, aceites, etc.), fibras y otros sólidos de baja densidad, así como para espesar los lodos procedentes de los procesos de lodos activados. La separación se lleva a cabo introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas. La fase líquida se presuriza en presencia del suficiente aire para conseguir la saturación en aire del agua. Luego, este líquido saturado de aire se lleva hasta la presión atmosférica pasándolo a través de una válvula reductora de presión, lo que provoca la formación de pequeñas burbujas de aire que se desprenden de la solución. Los sólidos en suspensión o las partículas líquidas flotan, debido a que estas pequeñas burbujas, asociándose a los mismos, les obligan a elevarse a la superficie. Los sólidos en suspensión concentrados pueden separarse de la superficie por medio de sistemas mecánicos y el líquido clarificado puede separarse cerca del fondo o parte de él reciclarse.

H

Humedal artificial

Son cuerpos de agua de baja profundidad que retienen temporalmente el agua con la finalidad de promover la degradación con ayuda de bacterias aerobias y anaerobias, oxigenar el sistema, y remover la mayor parte de los patógenos. Pueden ser construidos de tal forma que el agua se ve en la superficie (superficiales) o bien, cuya superficie de agua se encuentre por debajo de un lecho de piedras, en donde el agua no se ve (subsuperficiales). Son sistemas muy sencillos de construir puesto que no requiere elementos complejos de diseño ni componentes especiales; así mismo requiere de un mínimo de energía ya que se usa sólo para el bombeo del agua para riego.

L

Lagunas aireadas

Son balsas con profundidades de 1 a 4 m en las que la oxigenación de las aguas residuales se realiza mediante unidades de aireación bien sean superficiales, turbinas o difusores.

Lixiviado

Son aguas residuales formadas por la descomposición de los desechos residuos y otros factores como la precipitación pluvial, este líquido contiene materiales contaminantes como plomo, aluminio y arsénico, afectando el medio ambiente y los recursos hídricos.

Lodos activados

Tratamiento biológico más habitual en el tratamiento de aguas residuales. Consta de un reactor donde se mantiene en suspensión un cultivo microbiano capaz de asimilar la materia orgánica presente en el agua residual a depurar. El proceso requiere un sistema de aireación y de agitación, que suministre el oxígeno requerido por las bacterias encargadas de la depuración, evite la sedimentación de los flóculos en el reactor y permita la homogeneización de los lodos activados. Al cabo de un periodo de tiempo determinado (y una vez que la materia orgánica ha sido suficientemente oxidada) el líquido de mezcla se envía a un tanque de sedimentación (decantador secundario) donde se separa el lodo biológico del agua. Una parte de la biomasa decantada se recircula al reactor para mantener una concentración de microorganismos adecuada, mientras que el resto del lodo se extrae del sistema para evitar una acumulación excesiva de biomasa y controlar el tiempo medio de estancia celular.

Lodos residuales

Son residuos semisólidos que se producen, decantan o sedimentan durante el tratamiento de aguas residuales. Son generados en las fosas sépticas de viviendas, centros comerciales, oficinas o industrias, o producidos en las plantas de tratamiento de agua comunal, industrial y comercial, así como en las unidades de control de emanaciones atmosféricas. También se les llama fangos.

Luz ultravioleta

La radiación UV se utiliza para dañar la estructura genética de las bacterias, virus, y otros patógenos, haciéndolos incapaces de la reproducción. Se está convirtiendo en el medio más común de la desinfección debido a las preocupaciones por los impactos de la clorina en el tratamiento de aguas residuales, ya que es tóxica para especies acuáticas y, por tanto, el efluente tratado debe ser químicamente desclorinado (agregando complejidad y costo al tratamiento).

M

Materia orgánica biodegradable

Son residuos que se pueden descomponer por la acción de bacterias aerobias.

Metales pesados

Son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua y cuya concentración en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas. Algunos metales son indispensables en bajas concentraciones, ya que forman parte de sistemas enzimáticos, como el cobalto, zinc, molibdeno o como el hierro. Su ausencia causa enfermedades, su exceso intoxicaciones. Los más importantes son: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Zinc (Zn).

Monóxido de carbono (CO)

Gas inodoro e incoloro, producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles.

Mutágeno

Es un agente físico, químico o biológico que altera o cambia la información genética de un organismo y ello incrementa la frecuencia de mutaciones por encima del nivel natural.

O

Organismo indicador

Se refiere a especies seleccionadas por su sensibilidad o tolerancia (normalmente es la sensibilidad) a varios parámetros. Usualmente los biólogos emplean bioindicadores de contaminación debido a su especificidad y fácil monitoreo.

Ósmosis inversa

En el tratamiento de las aguas residuales este proceso se lleva a cabo mediante una configuración tubular. El agua residual fluye bajo presión elevada (por encima de la presión osmótica) a través de un tubo interior formado por material semipermeable y proyectado para soportar presiones elevadas. El agua purificada se separa en el tubo exterior, que se encuentra a presión atmosférica y está fabricado de material ordinario.

Óxidos de nitrógeno (NOx)

Término genérico que hace referencia a un grupo de gases muy reactivos como el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). Los óxidos de nitrógeno se forman cuando se quema combustible. En la atmósfera, los NOx pueden contribuir a la formación de ozono fotoquímico (smog o niebla contaminante), contribuye al calentamiento global y produce la llamada lluvia ácida.

Ozono (O₃)

Es un contaminante secundario que se forma en la tropósfera por la acción de la luz solar sobre el dióxido de nitrógeno y la presencia de COV.

P

Patógeno

Son bacterias, virus, protozoos y helmintos (gusanos) presentes en las aguas residuales municipales o introducidos al permitir el contacto del agua con materia fecal. Son causantes de enfermedades gastrointestinales, infecciones en la piel e inclusive la muerte.

Q

Quelante

Es una sustancia que forma complejos con iones de metales pesados. A estos complejos se los conoce como quelatos, palabra que proviene de la palabra griega chele que significa "garra". Una de las aplicaciones de los quelantes es evitar la toxicidad de los metales pesados para los seres vivos.

S

Sedimentación

Tratamiento primario que se utiliza para separar sólidos en suspensión, basándose en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran.

En algunos casos, la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua residual. Este proceso puede producirse en varios puntos del tratamiento o en varias etapas.

Sólidos en suspensión

Son los principales contaminantes del agua y son aquellas partículas de suelo provenientes de la erosión y de otros sólidos que quedan suspendidos en el agua.

Sustitución isomórfica

Sustitución de un ion por otro de tamaño similar pero de carga diferente.

T

Tamizado

Método físico para separar mezclas en el cual se separan dos sólidos formados por partículas de diferente tamaño.

Tecnologías extensivas

Es aquella donde no se hace uso de recursos tecnológicos avanzados sino que se desarrolla de manera empírica empleando los recursos con los que se cuenta.

Tecnologías intensivas

Se caracterizan por el uso de técnicas y equipos sofisticados para sacar el máximo provecho a los recursos del medio y obtener una mejor producción.

Tensioactivo

Son sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases, por ejemplo: dos líquidos insolubles uno en otro. Entre los tensioactivos se encuentran las sustancias sintéticas que se utilizan regularmente en el lavado como detergentes, productos para eliminar el polvo de superficies y champús.

Teratogénico

Todo factor ambiental que puede provocar una alteración morfológica o funcional.

Tratamiento primario

Es un tratamiento físico que se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por los límites tanto de descarga al medio receptor, como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario.

Tratamiento secundario

Es un tratamiento que comprende los procesos biológicos convencionales como son la digestión bacteriana aerobia y anaerobia.

Tratamiento terciario

Es un tratamiento llamado también avanzado que emplea tecnología especializada, rayos U.V. por ejemplo, para la eliminación de contaminantes particulares que no se eliminan con los tratamientos secundarios como son las bacterias, virus y parásitos.

MESOGRAFÍA

- Acosta, Raquel Susana. 2008.** *Saneamiento ambiental e higiene de los alimentos*. Córdoba : Brujas, 2008.
- Aguas e ingeniería. 2010.** *Tratamiento de Aguas Residuales*.
http://aguaseingenieria.com/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=16&Itemid=30, s.l. : 2010.
- Aguilar, Luis. 2007.** Contaminación del aire. *Blogspot.com*. [En línea] 2007. <http://aire-contaminacion.blogspot.com/>.
- Apoyofq. 2011.** Bacteria. *Apoyo contra la fibrosis quística*. [En línea] 2011. <http://apoyofq.tripod.com/cuerpo/bacteria.htm>.
- Barceló, Damià y al. 2008.** *Aguas continentales. Gestion de recursos hídricos, tratamientos y calidad del agua*. España : Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2008.
- Bautista Zúñiga, Francisco. 1999.** *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. Yucatán, México : Universidad Autónoma de Yucatán, 1999.
- Botanical-online. 2011.** La fotosíntesis. *Botanical-online S L*. [En línea] 2011. <http://www.botanical-online.com/fotosintesis.htm>.
- Calvo, Dr. Mariano Seoáñez. 2002.** *Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimentarias*. Madrid : Grupo Mund-Prensa, 2002.
- Calvo, Mariano Seoáñez. 2000.** *Tratado de gestión del medio ambiente urbano*. s.l. : Mundi-Prensa, 2000.
- CONAGUA. (Junio de 2008).** *Programa nacional hídrico 2007-2012*. Recuperado el marzo de 2011, de Comisión Nacional del Agua, México: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PNH_05-08.pdf
- Delegación Tlalpan. 2010.** Secretaría del Medio Ambiente. [En línea] mayo de 2010.
http://www.sma.df.gob.mx/dgpcp/pdf/mapa_firm_Tlalpan.pdf.
- Fetter, C.W. 2000.** *Applied Hydrogeology*. Wisconsin : Prentice-Hall, 2000.
- GDF. 2011.** Gobierno del Distrito Federal. *Catalogo de Precios Unitarios*. [En línea] Junio de 2011.
- GODF. 2008.** Limite de colonias Tlalpan. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. [En línea] abril de 2008.
<http://www.seduvi.df.gob.mx/seduvi/cartografia/limitesdecolonias/Tlalpan.pdf>.
- IPN. (junio de 2009).** *Dirección de bibliotecas, repositorio digital*. Recuperado el septiembre de 2011, de <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/4099/1/ASENTAMIENTOSIRREG.pdf>
- IUPA. 2007.** Hidrogeoquímica: Lección 19. Otras reacciones químicas. *Grupo de Investigación de Recursos Hídricos. Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas*. [En línea] 2007. <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ19.pdf>.
- Lahora, Agustín. 2005.** *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales*. Almería : GALASA, 2005.
- Lara Borrero, Jaime Andrés. 1999.** *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales [título de maestría]*. Barcelona : Universidad Politécnica de Cataluña, mayo de 1999.
- Lenntech. 2011.** Water Treatment Solutions. *Lenntech, Holding B V*. [En línea] 2011. <http://www.lenntech.es/adsorcion.htm>.
- LGEEPA. 2011.** Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. *Camara de Diputados*. [En línea] 28 de enero de 2011.
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>.
- Paniagua García, Martín Enrique. 2009.** *Tratamiento de aguas residuales*. San Carlos de Guatemala : Facultad de Arquitectura, 2009.
- R. O. Carpena, M. Pilar Bernal.** Revista ecosistemas. [En línea] <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=490>.
- Ramalho, Rubens Sette. 1996.** *Tratamiento de aguas residuales*. España : Reverté S.A., 1996.
- Reed, Sherwood C., Middlebrooks, E. Joe, Crites, Ronald W. 1998.** *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. Estados Unidos de America : Mc Graw-Hill, 1998.
- Rocha Vargas, Rafael. 2007.** ECambiental s.c. *Educación y capacitación ambiental*. [En línea] marzo de 2007.
http://ss1.webkreator.com.mx/4_2/000/000/00b/586/Tratamiento%20de%20aguas%20grises.pdf
- SALLAVOR. 2011.** Bioconstrucción y ecología solidaria. [En línea] abril de 2011.
<http://sallavor.org/resources/depuraci%C3%B3n+biol%C3%B3gica.pdf>.
- Saravia Asencios, Carmen Illanith. 2009.** *Beneficio de las lagunas de oxidación para el mejoramiento de la calidad agronómica del suelo*.
<http://bioxiabono.blogspot.com/2009/10/anexos.html>, s.l. : 2009.
- SEDUVI. 2010.** Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación Tlalpan del Distrito Federal . *Gaceta Oficial de la Federación, Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda*. [En línea] agosto de 2010.
http://www.seduvi.df.gob.mx/portal/files/articulo%2014/fraccion%20I/DECRETOS/PDDU_TLALPAN.pdf.
- SEMARNAT. 2009.** Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. [En línea] Diario oficial de la federación, 14 de enero de 2009.
<http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/normas/Pages/normasoficialesmexicanasvigentes.aspx>.

- Setty, Karen. 2011.** Manual de construcción: humedales construidos para el tratamiento de aguas negras. [En línea] 2011. http://www2.bren.ucsb.edu/~keller/courses/GP_reports/Diseno_Humedal_AguasNegras.pdf.
- SIEGE. 2007.**, Sistema de Información Económica, Geográfica y Estadística. [En línea] julio de 2007. <http://www.siege.df.gob.mx/estadistico/pdf/monografias/tlp.pdf>.
- SMA. 2010.** Secretaría del Medio Ambiente. [En línea] mayo de 2010. http://www.sma.df.gob.mx/dgpcp/pdf/mapa_firm_Tlalpan.pdf.
- Solís Segura, Luz María y López Arriaga, Jerónimo Amado. 2003.** *Principios básicos de contaminación ambiental*. Toluca, México : Emahaia S.A. de C.V., 2003.
- UPC. 2011.** Universidad Politécnica de Cataluña. [En línea] abril de 2011. http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6263/4/03_Memoria.pdf.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1988.** *Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*. Cincinnati : U.S. Environmental Protection Agency, 1988.
- USEPA. 1993.** *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: A Technology assessment*. Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency, 1993.
- UTN-FRBB. 2007.** TRATAMIENTO DE EFLUENTES- CARACTERIZACION. *Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina*. [En línea] 2007. http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/efluentes/tema_9.pdf.
- Yactayo, Víctor Maldonado. 2005.** Filtración, Organización panamericana de la salud. *Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental*. [En línea] enero de 2005. <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual1/tomoll/nueve.pdf>.

IMÁGENES

- Aguamarket. 2011.** *Filtro de carbon activo*. <http://www.aguamarket.com/sql/productos/productos.asp?producto=4319&nombreactivo=Filtro+carbon+activado+con+portafiltro>, s.l. : 2011.
- Akvopedia. 2011.** Humedal Artificial de Flujo Vertical. *Akvo.org, Netherlands*. [En línea] 2011. http://www.akvo.org/wiki/index.php/Humedal_Artificial_de_Flujo_Vertical.
- Ambientalista. 2011.** Directorio de Delegaciones en el Df. *AMBIENTALista.com*. [En línea] 30 de julio de 2011. <http://www.ambientalista.com/?p=908>.
- BUPOLSA. 2011.** *Filtro biológico horizontal*. <http://www.bupolsa.com/depu/filtro.html>, Madrid, España : 2011.
- Campos, Beto. 2010.** *Biodigestor*. http://eq-cinco.blogspot.com/2009_11_01_archive.html, s.l. : 2010.
- Criotec. 2011.** *Intercambio iónico*. <http://www.criotec-coolers.com/osmosis-inversa-purificadora.htm>, México : 2011.
- Díaz Delgado, Carlos, y otros. 2001.** *Agua potable para comunidades rurales, reuso, y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas*. México : Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, 2001.
- DRACE. 2011.** *Microfiltración en lecho de arena en doble etapa*. http://www.dracemedioambiente.com/procesos_microfilt.html, Madrid, España : 2011.
- Hidrocomponentes. 2011.** *Lodos activos*. <http://www.hidrocomponentes.com/LODOSACTIVADOS.jpg>, Buenos Aires, Argentina : 2011.
- Hidrored. 2010.** *Proceso de cloración*. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/contenido/capitulo04.html>, España : 2010.
- Hispagua. 2011.** *Electrodíalisis*. <http://hispagua.cedex.es/documentacion/especiales/desalacion.php?localizacion=Desalaci%F3n>, España : 2011.
- Huber. 2011.** *Maquina de microtamizado*. <http://www.huber.es/es/productos/microtamizado-filtracion.html>, España : 2011.
- Inquinat. 2011.** *Intercambio iónico*. <http://www.inquinat.com.ar/ing-ionico.htm>, Argentina : 2011.
- laptuk. 2011.** *Esquema de una cámara de flotación*. http://www.adosgroup.cz/files/prez/text_es/laptuk.htm, s.l. : 2011.
- Recova. 2011.** *Esterilizador por rayos UV*. http://www.larecovadelsur.com.ar/esterilizador_por_rayos_uv.htm, Argentina : 2011.
- Rei, Panta. 2011.** *Cribado*. <http://www.pantarewater.com/default.asp?content=3,186,184,0,0,Cribado,00.html>, s.l. : 2011.
- Tecnofiber. 2011.** *Depuradora de oxidación total vivienda unifamiliar*. http://www.tecnofibersl.com/depuradora_oxidacion_total.html, Valencia : 2011.
- Tagua. 2011.** *Biodiscos*. <http://www.depuradoras.eu/depuradoras-urbanas-biodiscos.html>, España : 2011.
- Unitek. 2011.** *Equipo generador de ozono*. <http://webs.satlink.com/usuarios/u/unitek/ozono.htm>, Argentina : 2011.