



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería Mecánica e Industrial

Tesina

Evaluación de un humedal artificial como
tratamiento de agua residual en un asentamiento
irregular

Que para obtener el título de
Ingeniero Industrial
presentan:

María Eugenia Haro González
Nidya Olivia Aponte Hernández

Directora: Dra. Rina Aguirre Saldivar

Ciudad Universitaria, D. F., junio de 2010.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y
la Facultad de Ingeniería
por brindarnos la oportunidad de formarnos como profesionistas.

A nuestros profesores, especialmente a los sinodales y a
la Dra. Rina Aguirre Saldivar
por el tiempo, las observaciones y los conocimientos
que compartieron con nosotras.

A nuestras madres, hermanos
y amigos *Elena, Chema, Mario, Moi, Itan, Clauka y JJ*
por brindarnos su apoyo incondicional, cariño y confianza.

Índice

	<i>pág.</i>
Índice	<i>i</i>
Índice de tablas y figuras.....	<i>ii</i>
Simbología.....	<i>iii</i>
Introducción.....	1
1 Principios de contaminación y evaluación de proyectos.....	4
1.1 Contaminación ambiental.....	4
1.2 Agua residual.....	5
1.2.1 Contaminantes.....	5
1.2.2 Parámetros de medición.....	7
1.2.3 Tratamiento.....	10
1.3 Evaluación.....	15
2 Humedales artificiales.....	17
2.1 Procesos de remoción.....	17
2.2 Clasificación.....	20
2.3 Diseño.....	22
2.4 Construcción.....	24
2.5 Operación y mantenimiento.....	24
2.6 Ventajas y desventajas.....	25
3 Caso de estudio.....	27
3.1 Resumen ejecutivo.....	27
3.2 Diagnóstico.....	28
3.2.1 Características físicas de la zona de estudio.....	29
3.2.2 Características ambientales.....	30
3.2.3 Alternativas de solución.....	32
3.3 Descripción del proyecto.....	33
3.3.1 Humedal familiar.....	33
3.3.2 Humedal regional.....	35
3.4 Evaluación.....	36
3.5 Comentarios generales.....	38
4 Conclusiones y recomendaciones.....	39
Mesografía.....	41

Índice de tablas y figuras

Tablas		<i>pág.</i>
1.1	Parámetros de contaminación en el agua residual.....	9
1.2	Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.....	10
1.3	Clasificación de los procesos de tratamiento biológico.....	11
2.1	Mecanismos de remoción de los contaminantes en los humedales.....	19
3.1	Comparativo entre sistemas de tratamiento de agua residual.....	33
3.2	Costo de la construcción de un humedal artificial familiar.....	34
3.3	Características del tule.....	36
3.4	Presupuesto del colector de Ocotla.....	36
3.5	Costo de construcción de un humedal artificial.....	37
Figuras		
1.1	Principales métodos de tratamiento de agua residual en México...	12
1.2	Proceso del tratamiento del agua residual por lagunas de facultativas.....	13
1.3	Proceso del tratamiento de agua residual por humedales artificiales.....	14
2.1	Humedal artificial de la Comunidad de Cucuchucho, Mpio. de Tzintzuntzan, Michoacán.....	18
2.2	Humedal artificial de flujo libre superficial.....	20
2.3	Esquema de un humedal artificial de flujo vertical.....	21
2.4	Esquema de un humedal artificial de flujo horizontal.....	21
3.1	Ubicación del humedal en Ocotla.....	28
3.2	Ubicación geográfica de Ocotla.....	29
3.3	Disposición final del agua residual en Ocotla.....	31
3.4	Descarga de aguas grises directamente al suelo.....	32
3.5	Terrenos disponibles para humedales artificiales a) familiar y b) regional.....	34

Simbología

B_i : Beneficio, \$

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

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

C_i : Costo, \$

CA: Coeficiente de aportación= 75%

d : profundidad del agua en el humedal, m

FNE: Flujo neto de efectivo, \$

i : Tasa de crecimiento de la población, %

I_0 : Inversión inicial, \$

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

L : Longitud del humedal, m

n : porosidad, o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal

P : Población a futuro, hab

P_2 : Población actual, hab

Q : Flujo del humedal. $m^3/día$

r : Tasa de descuento, %

t : tiempo de retención hidráulica, $días$

T : Tiempo, $años$

T_2 : Tiempo futuro, $años$

W : Ancho del humedal, m

y : Profundidad del humedal, m

Introducción

La preocupación por la contaminación del agua ha llevado al hombre a buscar nuevos métodos para su tratamiento y como resultado de esa búsqueda se han diseñado varios sistemas para disminuir la concentración de los contaminantes presentes en las aguas residuales.

Los humedales naturales son medios semiterrestres con una vegetación profusa y un alto grado de humedad; algunos ejemplos de humedales naturales son los pantanos, marismas, turberas o superficies cubiertas de agua (Ramsar, 2009). Éstos han sido utilizados durante siglos por la humanidad como receptores de aguas residuales, debido a su cercanía con ríos o cuerpos de agua. En 1953 Kathe Seidel realizó un estudio para identificar las propiedades de algunas plantas acuáticas como forma de tratamiento de aguas residuales, marcando así el inicio de los humedales artificiales (Llagas y Guadalupe, 2006). El primer sistema artificial de humedales se puso en operación en Alemania en 1974; desde entonces, estos sistemas se han utilizado en casi todo el mundo como una alternativa remoción de contaminantes del agua debido a su alta efectividad y bajo costo.

En México se habían habilitado, hasta el año 2000, 130 humedales artificiales, de los cuales la mayoría eran de flujo horizontal (HAFH) y algunos de flujo vertical (HAFV); entre todos trataban un caudal de $0.48\text{m}^3/\text{s}$ es decir, sólo un 0.61% del total agua residual en México (Miranda, 2000).

Los humedales artificiales depuran aguas domésticas, industriales y agrícolas; han sido empleados como tratamiento secundario en plantas de tratamiento y se han construido en climas tropical, subtropical, templado-subhúmedo y desértico-árido.

En nuestra Universidad se han realizado investigaciones referentes a los humedales artificiales, tal es el caso de la tesis: *Planeación, diseño y construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en lechos de carrizo, PKA* (De León, 2007), en donde se describe este proceso de tratamiento y se discute su viabilidad de aplicación en México. Sin embargo, no presenta algún caso de estudio y el análisis económico sólo compara costos de construcción y operación entre diversos países, usando el caso de Alemania como referencia.

A diferencia del estudio realizado por De León, en este trabajo se aborda la problemática de la generación de aguas residuales en un asentamiento irregular (Ocotla), donde la implantación de sistemas convencionales de tratamiento resulta poco factible, no sólo por la inversión requerida para su construcción, sino también por los gastos de operación y mantenimiento que implican. Por tal razón, se analiza para estas poblaciones, como alternativa técnica y económicamente viable, la construcción de humedales artificiales.

Es importante mencionar que los asentamientos irregulares son agrupamientos de viviendas en suelos que no han sido destinados para la urbanización, su aparición se debe generalmente al rápido crecimiento de las zonas metropolitanas y han surgido en suelo de conservación, barrancas, cañadas, lomeríos y suelo fangoso; lo que genera la pérdida de áreas agrícolas, forestales, y de recarga de acuíferos, además de significar un riesgo para la población asentada en esas áreas.

Con base en lo anterior, la Dirección General de Regularización Territorial tiene la función de normalizar la tenencia de la tierra, cuando se trata de propiedad privada o del Gobierno del Distrito Federal. Dentro de este contexto, es importante denotar que las acciones de regularización son procesos correctivos para legalizar situaciones que han sido toleradas o incluso propiciadas por el Estado.

Los *programas parciales de desarrollo urbano* son instrumentos a través de los cuales se regularizan asentamientos en suelo de conservación y tienen como objetivo, además de dar certeza jurídica, equilibrar el comportamiento urbano con las funciones ambientales del suelo de conservación, tomando en cuenta los puntos de vista social, físico y ambiental (Tlalpan, 1997). Por ello, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México se han realizado estudios ambientales con el fin de contribuir con los programas de desarrollo urbano para reducir el impacto ambiental ocasionado por los asentamientos irregulares, tal es el caso del Programa de Manejo Integral de Contaminantes (PMIC, 2002) en el cual se realizó un diagnóstico ambiental de todos los asentamientos irregulares que se encuentran en San Miguel Topilejo; otro estudio es el Programa de Reducción de Impacto Ambiental (PRIA, 2009), donde se abordó la problemática ambiental del asentamiento irregular denominado Ocotla, del cual se derivó esta tesina.

Objetivo

Evaluar la factibilidad de un humedal artificial en un asentamiento irregular, que realice el tratamiento a las aguas residuales domésticas con el fin de minimizar el impacto ambiental que dichas aguas tienen sobre el manto acuífero y fomentar su aprovechamiento.

Alcances y limitaciones

El objetivo se cumplió dentro del siguiente marco:

- Revisión de bibliografía especializada, así como varios artículos disponibles en internet.
- La información referente al asentamiento irregular fue proporcionada por la Delegación Tlalpan, el INEGI y los habitantes del asentamiento mediante 20 encuestas.
- Para el diagnóstico ambiental se realizó una visita a la zona de estudio (Ocotla), en donde se hizo un recorrido y se encuestaron a 20 personas, las preguntas que se hicieron a los pobladores ayudaron a hacer un sondeo en lo referente a la contaminación del aire, agua potable, agua residual, residuos sólidos y riesgo ambiental. Esto se hizo como parte del estudio realizado en el 2009 por alumnos de la Universidad Nacional Autónoma de México (PRIA, 2009).
- Para la evaluación económica se siguió la metodología propuesta por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público en la *Guía para elaborar y presentar los análisis costo y beneficio de proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)*.

- Los resultados se entregaron a los habitantes de la comunidad; sin embargo, la construcción del humedal artificial quedó fuera del alcance de este trabajo.

Esta tesina propone una alternativa para el tratamiento del agua residual doméstica en Ocotla a través de las ventajas que ofrecen los sistemas naturales. En el primer capítulo se mencionan los problemas de contaminación, los aspectos generales de las aguas residuales, los parámetros de medición y los tratamientos más utilizados en México; así como los criterios usados para la evaluación económica de los humedales.

En el segundo capítulo se describen las características generales de los humedales artificiales, los procesos que se llevan a cabo al conducir el agua residual a través de dichos sistemas; factores de diseño, y construcción. En el tercer capítulo se presentan las características del caso de estudio, la evaluación y discusión del proyecto. Finalmente, en el cuarto capítulo, se mencionan las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

1 Principios de contaminación y evaluación de proyectos

El acelerado proceso de urbanización del país plantea algunos de los retos más importantes para la sociedad y el gobierno. Entre ellos destacan complejos problemas ambientales como la contaminación atmosférica, la proliferación de residuos sólidos y peligrosos, la contaminación del agua, así como la invasión y el deterioro de áreas de conservación y de recarga de acuíferos; problemas que tienen importancia en las ciudades medias del país y que se incrementan en las zonas metropolitanas.

Las bases generales indispensables para comprender el contenido de esta tesina están dentro de los campos de la contaminación ambiental, la contaminación del agua y la evaluación de proyectos.

1.1 Contaminación ambiental

La contaminación se puede definir como un cambio indeseable en las características físicas, químicas o biológicas del aire, el suelo o el agua, que puede afectar de manera adversa la salud, la supervivencia o las actividades de los humanos o de otros organismos vivos (Henry y Heinke, 1999). Los contaminantes para su estudio generalmente se clasifican en:

Contaminación atmosférica. Es la presencia de impurezas en el aire que pueden provocar un perjuicio notable para la salud, la comodidad o los bienes humanos. Esta contaminación puede deberse a gases, partículas (sólidas o líquidas) e incluso a radiación (Contreras y Molero, 1998).

Residuos sólidos. Son todos los materiales sólidos desechados por los núcleos de población, por las actividades industriales y agropecuarias (Contreras y Molero, 1998).

Residuos sólidos urbanos. Son los que provienen de las actividades que se desarrollan en las casas-habitación, sitios de servicios privados y públicos, establecimientos comerciales, así como los generados en la industria, salvo los que provienen de procesos de producción que pueden tener propiedades que los hagan peligrosos (SEMARNAT, 2007).

Residuos tóxicos y peligrosos. Son residuos que presentan un determinado peligro, ya sea actual o potencial, para la salud humana o para otros organismos vivos, debido a alguno de los cuatro motivos genéricos siguientes: no degradabilidad y persistencia en el lugar de vertido, posibilidad de efectos nocivos por acumulación o de transformaciones biológicas que aumenten sus efectos perjudiciales y contenido elevado en componentes tóxicos (Contreras y Molero, 1998). De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) estos residuos son aquellos que poseen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contienen agentes infecciosos que les confieren peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que han sido contaminados cuando se transfieren a otro sitio (SEMARNAT, 2010b).

Contaminación del agua. Es la introducción directa o indirecta en los cauces o acuíferos de sustancias sólidas, líquidas, gaseosas, así como de energía calórica. Esta contaminación es causante de daños en los organismos vivos del medio acuático;

además, representa un peligro para la salud de las personas y de los animales (Contreras y Molero, 1998).

El presente trabajo aborda la contaminación del agua ya que ésta es fundamental para todas las formas de vida, lo que la convierte en uno de los recursos esenciales de la naturaleza. El ciclo natural del agua tiene una gran capacidad de purificación, pero esta facilidad de regeneración y su aparente abundancia la han convertido en el vertedero habitual de nuestros residuos.

La calidad del agua de ríos, acuíferos, embalses y zonas costeras se ve afectada por las descargas de aguas residuales sin tratamiento adecuado, limita las oportunidades de su aprovechamiento y provoca la contaminación de otros recursos naturales.

1.2 Agua residual

La SEMARNAT define como agua residual al agua contaminada proveniente de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

Las fuentes principales de generación del agua residual son: origen doméstico, industrial y agrícola (Hernández, 1990), cuyas características se describen a continuación:

Origen doméstico. Contiene sustancias procedentes de casas habitación. Si la descarga es reciente, es inodora y su color es gris amarillento o blanco, sin embargo, al sufrir procesos de fermentación tiene un olor sulfhídrico y un color gris negruzco. En este tipo de descargas o vertidos se incorporan productos orgánicos, inorgánicos y microorganismos; en los productos orgánicos pueden señalarse residuos de origen vegetal, animal, deyecciones humanas y grasas y, en los inorgánicos se encuentran productos disueltos (sales) y elementos inertes como residuos de materiales, tierras, arena y papel.

Origen industrial. Proceden de las actividades industriales como residuos de materias primas, productos de transformación y acabados, así como temperatura. En estas aguas pueden aparecer productos tóxicos, iones metálicos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas y elementos radioactivos, entre otros.

Origen agrícola. Éstas concentran sustancias procedentes de las actividades agrícolas y ganaderas como pesticidas, herbicidas, residuos varios y estiércol.

La fuente principal de agua residual en el Distrito Federal es la de origen doméstico, debido a que en esta ciudad destaca el uso público de agua potable con un 97% (CONAGUA, 2008).

1.2.1 Contaminantes

Antes de mencionar los tipos y métodos de tratamiento del agua residual que se aplican en México, es importante conocer los contaminantes a tratar, ya que con base en ello se determinará el tipo de tratamiento más adecuado. Los contaminantes del agua se clasifican en físicos, químicos y biológicos.

Componentes físicos. En éstos se encuentran los sólidos (suspendidos y sedimentables), así como el olor, la temperatura, el color y la turbidez.

- **Sólidos.** El contenido total de materia sólida en el agua constituye los sólidos totales (ST) y comprenden, tanto sólidos orgánicos (trozos de vegetales y animales) como inorgánicos (basura, minerales, arenas), a éstos además se les denominan volátiles (V) y fijos (F), respectivamente. También dentro de los sólidos totales se encuentran los sólidos disueltos (SDT) y los sólidos en suspensión (SST), los primeros no se sedimentan y se presentan en estado iónico o molecular y los segundos pueden ser sedimentables (SSs) y no sedimentables (SSn), según sea su peso específico o se encuentran en estado coloidal (Hernández, 1990).
- **Olor.** Generalmente es producto de los gases que se liberan en el proceso de descomposición de la materia orgánica y se debe principalmente a la presencia de sulfuro de hidrógeno, el cual se genera al convertirse los sulfatos en sulfitos por acción de microorganismos anaerobios (son aquellos organismos que no utilizan oxígeno en su metabolismo). Es importante considerar este contaminante al momento de diseñar sistemas de tratamiento de aguas residuales debido al rechazo asociado con los *malos olores*.
- **Temperatura.** La temperatura del agua residual regularmente es más alta que la del agua potable, debido a la adición de agua caliente que proviene del uso doméstico e industrial, ésta varía de 10 a 20°C. Este es un parámetro muy importante a considerar dado que puede desencadenar la desaparición de la vida acuática, la aparición de hongos y plantas perjudiciales (Zambrano y Saltos, 2008).
- **Color.** Es un factor que permite clasificar la edad de las aguas residuales, si es reciente suele ser gris pero con la descomposición de la materia orgánica el oxígeno disuelto se reduce y el color cambia a negro.
- **Turbidez.** Se debe a la presencia de materias en suspensión, su determinación es de suma importancia porque se utiliza como medio de control.

Componentes químicos. En éstos se encuentran hidratos de carbono, grasas, aceites, agentes tensoactivos (detergentes), nutrientes como el nitrógeno, fósforo, carbono, hierro y azufre y metales pesados. La consecuencia más importante del exceso de estos componentes en el agua residual es la reducción del contenido de oxígeno disuelto ocasionando eutrofización.

- Las *grasas, aceites y agentes tensoactivos* impiden el intercambio gaseoso entre el agua y la atmósfera dificultando la transpiración de las plantas y afectando la vida acuática.
- Los *nutrientes* existen en el agua de forma natural pero su exceso provoca la proliferación de fitoplancton y el consumo del oxígeno disuelto.
- *Metales pesados.* Son elementos como el plomo, mercurio, cobalto, cadmio y cobre, comunes en las descargas de aguas residuales provenientes de las industrias; tienen una gran potencialidad tóxica en los organismos vivos e ingresan a las

cadena trófica cuando son ingeridos por los peces y plantas en los medios acuáticos.

Componentes biológicos. Entre éstos se encuentran los helmintos, algas, bacterias, virus, protozoos y hongos; se clasifican en:

- *Parásitos.* Son aquellos organismos que viven a expensas de otro ser vivo y pueden ser benignos o patógenos, éstos últimos causan enfermedades, tales como hepatitis, fiebres tíficas, cóleras, salmonelosis y disenterías, que afectan directamente al hombre. Las enfermedades se originan por las bacterias, virus y helmintos que se encuentran en el tracto gastrointestinal y son eliminados a través de la materia fecal.
- *Saprófitos.* Son plantas y microorganismos que se alimentan de materia orgánica en descomposición y facilitan o aceleran la descomposición natural de los sólidos orgánicos.

Para medir los contaminantes descritos anteriormente, existen parámetros que indican su concentración; a continuación se mencionan.

1.2.2 Parámetros de medición

Los parámetros que se utilizan para medir la calidad del agua son los sólidos, la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno, el oxígeno disuelto, el nitrógeno, el fósforo, los cloruros, el pH, las grasas y aceites y los microorganismos indicadores, los cuales se describen brevemente a continuación (Hernández, 1990).

Sólidos. Son materiales que varían desde hilachas hasta coloides. Para evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento se debe considerar la medida del tamaño de las partículas que componen los sólidos suspendidos totales (SST).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Es la cantidad de oxígeno disuelto que se consume durante la oxidación de la materia orgánica presente en el agua en un tiempo dado. Con ella se indica el oxígeno necesario para alimentar a los microorganismos y a las reacciones químicas. Para realizar la medición de la DBO son necesarias las siguientes condiciones de ensayo: 20°C, presión atmosférica, oscuridad y muestra diluida con agua pura en condiciones aerobias y, para el control de los procesos de tratamiento se suele medir a los cinco días (DBO₅).

Demanda Química de Oxígeno (DQO). Es la cantidad de oxígeno disuelto consumido por el agua residual durante la oxidación provocada por un agente químico fuertemente oxidante (Hernández *et al* 1995).

Oxígeno disuelto (OD). Es la cantidad de oxígeno presente en el agua, puede ser incrementado por la captación de más oxígeno de la atmósfera, la acción fotosintética (principalmente de algas verdes), el descenso de temperatura y la dilución. Por otra parte, la cantidad de oxígeno puede disminuir por la respiración de microorganismos, algas y organismos macroscópicos, así como la elevación de la temperatura y reacciones químicas.

Nitrógeno total Kjeldahl (NTK). Es la cantidad total de nitrógeno en el agua, indica su capacidad de ser nitrificado a nitritos y nitratos, o en su caso, desnitrificado a nitrógeno gaseoso.

Fósforo total. Es la especificación de todas las formas presentes de fósforo (orgánicas e inorgánicas disueltas y particuladas) bajo la estructura de ion ortofosfato.

Cloruros. Son compuestos que llevan un átomo de cloro en estado de oxidación, son solubles en agua y se encuentran disociados en aniones de cloruro con sus correspondientes cationes cargados positivamente (como el sodio). El análisis de la concentración de cloruros en el agua residual se basa en una valoración con nitrato de plata utilizando como indicador cromato de potasio. Es importante destacar que si el agua tratada aún contiene altas concentraciones de cloruro y se utiliza para el riego en campos agrícolas, afecta la calidad del suelo.

Potencial de Hidrógeno (pH). Es una medida de la acidez o alcalinidad que describe la actividad de los iones en una solución acuosa; de acuerdo con esta medida las sustancias se clasifican en ácidas, básicas o neutras utilizando una escala del 0 al 14. Para el tratamiento de agua que se realiza por medio de microorganismos (tratamiento biológico) el pH debe estar en un rango de 6 a 9, fuera de éste la mayoría de los microorganismos resultan dañados o inactivos, por esta razón antes de proceder con un tratamiento biológico se requiere de un análisis del agua para determinar si existe la necesidad de estabilizar el pH a través de métodos químicos.

Grasas y aceites. Son los compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal y de hidrocarburos del petróleo que se determinan utilizando hexano como disolvente.

Microorganismos indicadores. Son aquellos que tienen un comportamiento similar al de los patógenos pero que se identifican con mayor facilidad. Una vez que se ha evidenciado la presencia de grupos indicadores, se puede inferir que los patógenos se encuentran presentes en la misma concentración y que su comportamiento frente a diferentes factores es similar (Campos, 2010). Enseguida se listan algunos indicadores para bacterias, virus y huevos de helminto:

- *Coliformes fecales y Escherichia Coli.* Son bacterias que están presentes en grandes cantidades en el tracto gastrointestinal, tanto del hombre como de los animales.
- *Colifagos.* Son virus que utilizan bacterias como la *Escherichia Coli* como hospedadores.
- *Ascaris lumbricoides.* Son organismos esencialmente acuáticos (aunque proliferan también en ambientes terrestres) que parasitan el tubo digestivo.

Una vez que se han descrito los parámetros de medición, es pertinente correlacionarlos con los niveles de contaminación del agua residual, la cual se puede clasificar en fuerte, media y ligera (ver tabla 1.1).

Parámetro	Contaminación fuerte	Contaminación media	Contaminación ligera
Sólidos totales	1000	500	200
Volátiles	700	350	120
Fijos	300	150	80
Sólidos en suspensión	500	300	100
Volátiles	400	250	70
Fijos	100	50	30
Sólidos sedimentables	250	180	40
Volátiles	100	72	16
Fijos	150	108	24
Sólidos disueltos	500	200	100
Volátiles	300	100	50
Fijos	200	100	50
DBO ₅ a 20°C	300	200	100
DQO	800	450	160
Oxígeno disuelto	0	0.10	0.2
Nitrógeno total	86	50	25
Orgánico (N)	35	20	10
Amoníaco libre N-NH ₄	50	30	15
Nitritos N-NO ₂	0.10	0.05	0.00
Nitratos N-NO ₃	0.40	0.20	0.10
Fósforo total (P)	17	7	2
Cloruros	175	100	15
pH	6.9	6.9	6.9
Grasas	40	20	0

Valores en mg/l con excepción del pH

Fuente: Hernández et al, 1995.

Tabla 1.1 Parámetros de contaminación en el agua residual

Es importante mencionar que la SEMARNAT, a través del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, cuyo objetivo es proponer, diseñar y aprobar la normatividad, ha expedido normas oficiales mexicanas concernientes a las descargas de aguas residuales y a las aguas tratadas que se reusen en servicios al público.

Una de estas normas es la NOM-001-SEMARNAT-1996 que indica los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, en lo que concierne a esta tesina únicamente es de interés el indicador de grasas y aceites en descargas al suelo con un promedio mensual de 15.

Así mismo, para este trabajo es importante mencionar la NOM-003-SEMARNAT-1996 que señala cuáles son los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilicen en servicios al público (*ver tabla 1.2*).

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

Fuente: SEMARNAT, 2010

Tabla 1.2 Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público

1.2.3 Tratamiento

Existen diferentes tipos de tratamiento de aguas residuales, los cuales han demostrado su eficiencia para la remoción de los contaminantes presentes en dichas aguas; éstos son tratamiento primario, secundario y terciario, a continuación se describe cada uno de ellos (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Tratamiento primario. Se lleva a cabo por medio de operaciones físicas (desbaste por rejillas, tamices y filtración mecánica o sedimentación) para retirar grasas, aceites, hidrocarburos y elementos flotantes; y también por operaciones químicas como la absorción para eliminar micro contaminantes, fenoles y color, entre otros.

Tratamiento secundario. Se realiza a través de procesos biológicos, los cuales tienen el objetivo de estabilizar la materia orgánica, así como coagular y remover los nutrientes y los sólidos coloidales que no se sedimentan.

Tratamiento terciario. Se efectúa por medio de procesos físico-químicos como la precipitación, la filtración y/o la cloración, los cuales reducen los niveles de nutrientes inorgánicos del efluente final, especialmente fosfatos y nitratos; además inhiben el desarrollo microbiano.

Es importante destacar que los tratamientos antes descritos son secuenciales, es decir, se aplican en el orden correspondiente; sin embargo, en la mayoría de los casos no se utiliza el terciario, debido a su elevado costo, por lo que el tratamiento secundario de aguas residuales (procesos biológicos) toma gran importancia.

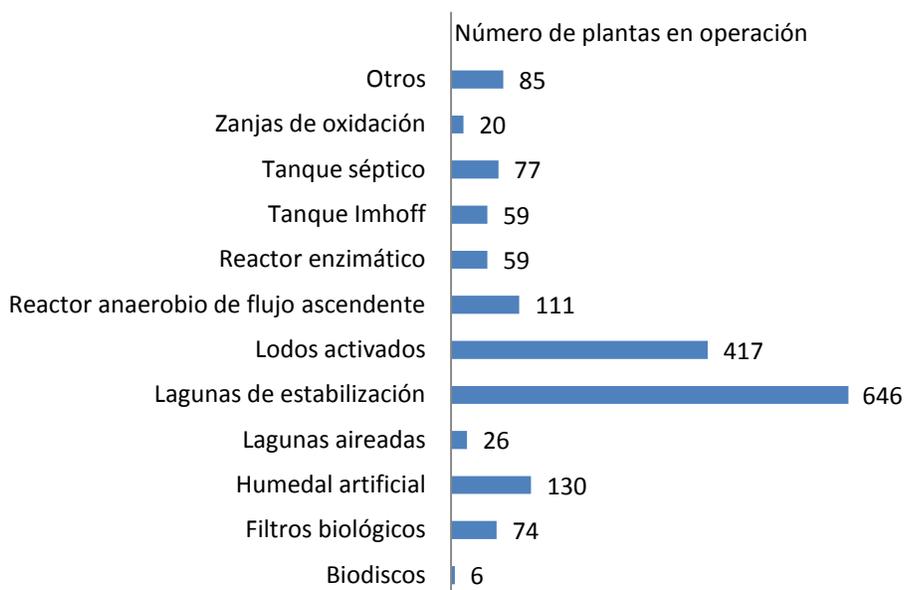
En la siguiente tabla (*ver tabla 1.3*) se mencionan algunos de los procesos biológicos y su clasificación, los métodos para llevarlos a cabo y sus usos.

Proceso	Método	Uso
<i>Procesos aerobios</i>		
Crecimiento en suspensión	Lodos activados	Remoción de la DBO, nitrificación
	Lagunas aireadas	
	Digestión aerobia	Estabilización, remoción de la DBO
Película bacteriana adherida	Filtros percoladores	Remoción de la DBO, nitrificación
	Sistemas biológicos de contacto rotatorios	
	Reactor de lecho empacado	
Híbrido (combinación)	Filtros percoladores/ lodo activado	
	Humedales artificiales	
<i>Procesos anóxicos</i>		
Crecimiento en suspensión	Denitrificación por crecimiento en suspensión	Denitrificación
Película bacteriana adherida	Denitrificación por película fija	
<i>Procesos anaerobios</i>		
Crecimiento en suspensión	Procesos de contacto anaerobio	Remoción de la DBO, nitrificación
	Digestión anaerobia	Estabilización, remoción de la DBO
Película bacteriana adherida	Lecho anaerobio fijo	Remoción de la DBO, estabilización, denitrificación
Híbrido	Proceso anaerobio de manto de flujo ascendente	Remoción de la DBO (desechos muy concentrados)
	Reactor de manto de lodos/reactor de lecho fijo	Remoción de la DBO
<i>Procesos aerobios, anóxicos y anaerobios combinados</i>		
Crecimiento en suspensión	Procesos simples o de múltiples etapas, diferentes procesos propios	Remoción de la DBO, nitrificación, denitrificación y remoción de fósforo
Crecimiento en suspensión y en película bacteriana adherida		
<i>Procesos en lagunas</i>		
Lagunas facultativas	Lagunas facultativas	Remoción de la DBO
Lagunas anaerobias	Lagunas anaerobias	Remoción de la DBO, estabilización

Fuente: Crites y Tchobanoglous, 2000.

Tabla 1.3 Clasificación de los procesos de tratamiento biológico

Respecto a los métodos para el tratamiento de las aguas residuales, en la tabla 1.3 se pueden visualizar diversos tipos; sin embargo, para el presente estudio sólo se contemplan los más utilizados en México (ver figura 1.1).



Fuente: Elaboración propia con datos de la CONAGUA, 2008.

Figura 1.1 Principales métodos de tratamiento de agua residual en México

En nuestro país, en el año 2007 estaban en operación 1710 plantas de tratamiento de aguas residuales, mismas que trataron $79.3m^3/s$, lo que corresponde al 38.3% de los $207 m^3/s$ del agua recolectada en los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2008). Con ello se observa que gran parte del agua residual no recibe tratamiento alguno, por lo que es necesario incrementar el porcentaje de agua tratada; ya que el cuidado de los acuíferos y de las cuencas hidrológicas es fundamental para asegurar la permanencia de los sistemas que hacen posible el abasto para cubrir las necesidades básicas de la población.

A continuación se describen, a grandes rasgos, los tres principales métodos de tratamiento utilizados en nuestro país.

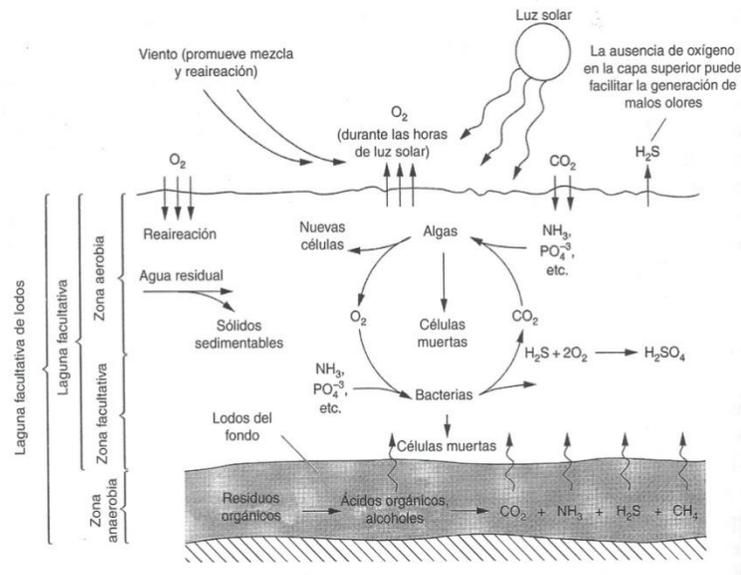
Lagunas de estabilización. Son grandes depósitos impermeables cuya profundidad oscila entre 1.5 y 2.5m (Crites y Tchobanoglous, 2000), en ellos se retienen los efluentes durante varios días, en los cuales los microorganismos transforman la materia orgánica en sales minerales y CO_2 , y son utilizados posteriormente por las algas que producen el oxígeno consumido por las bacterias. El tratamiento se desarrolla por acción de bacterias aerobias en la capa superior y de bacterias anaerobias y/o anóxicas en la capa inferior, dependiendo de la mezcla que se introduce por acción del viento.

Cuando el terreno es barato e impermeable, y no se requiere bombear el agua residual a grandes distancias o elevaciones, las lagunas de estabilización suponen costos de inversión bajos o moderados, con valores en México en torno a los 7 000- 8 000 USD/(L/s) para un caudal elevado (900 L/s). En plantas menores el costo aumenta, en torno a los 13 000 USD/(L/s), para un caudal de 100 L/s. Cuando el terreno es caro, poco apto para la excavación, o permeable, los costos aumentan

considerablemente. Los costos de operación de las lagunas de estabilización son en México bajos o muy bajos (en torno a los \$0,03-0,05 USD/m³), a no ser que se requiera bombear el agua residual desde una cierta distancia o desnivel (Escalas, 2006).

Este tratamiento se ha aplicado ampliamente en México por ser un proceso económico y de operación sencilla, que resiste bien las oscilaciones de carga y caudal.

Las lagunas son adecuadas para cumplir con la mayor parte de los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (riego agrícola directo, y descarga a cuerpos de agua destinados al riego agrícola).



Fuente: Crites y Tchobanoglous, 2000

Figura 1.2 Proceso del tratamiento de agua residual por el método de lagunas facultativas.

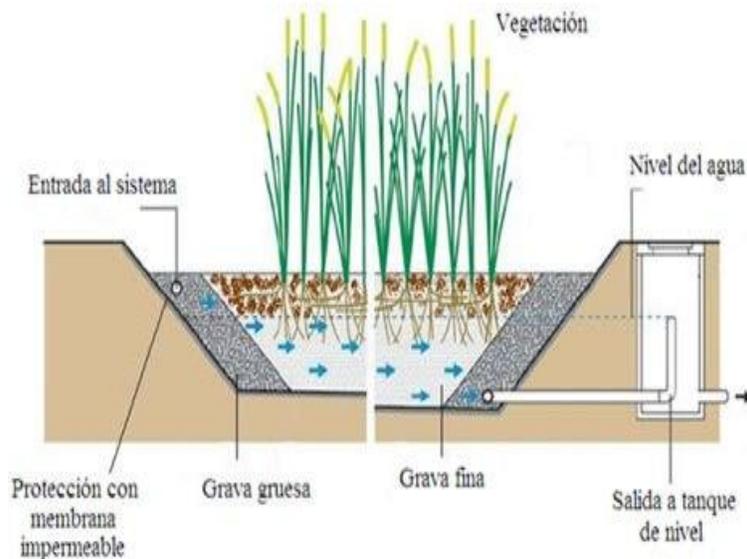
Lodos activados. Son plantas de tratamiento cuyo proceso consiste en que las aguas residuales entren en contacto con una población microbiana mixta (en forma de suspensión floculenta) en un sistema aireado y agitado. La materia en suspensión y la coloidal se eliminan por la adsorción en los flóculos microbianos; esta materia y los nutrientes disueltos se descomponen lentamente por la acción del metabolismo microbiano, etapa que se le denomina estabilización. En este proceso una parte de la materia orgánica se oxida a sustancias simples como CO₂, a lo que se le denomina mineralización, la otra parte se convierte en materia celular nueva, etapa llamada asimilación. Una vez que se alcanza el grado de tratamiento deseado la masa microbiana floculenta conocida como lodo se separa del agua por asentamiento, esta parte del proceso se conoce como clarificación o sedimentación. El sobrenadante es el agua tratada (López, 2000).

Para el proceso de lodos activados, los costos de inversión en México, estimados por el autor a partir de plantas reales, son de 18 000-36 000 USD/(L/s), en función del gasto de diseño de la planta, mientras los costos de operación son de 0,07-0,22 USD/m³ (Escalas, 2006).

El proceso de lodos activados se ha empleado frecuentemente en México para el tratamiento de medianos y grandes caudales en zonas urbanas o periurbanas con terreno escaso y/o caro, especialmente en aplicaciones de reutilización del agua en uso público urbano, ya que proporciona una calidad adecuada.

El proceso de lodos activados, se perfila entonces como un proceso apto en México para cumplir con los límites más estrictos de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997, pero con considerables o elevados costos de inversión y operación.

Humedales artificiales. Son sistemas de tratamiento de agua residual que actúan como filtros biológicos, consisten en un estanque o cauce poco profundo en el que se siembran plantas acuáticas que retienen sedimentos, nutrientes y contaminantes, además eliminan organismos patógenos (Llagas y Guadalupe, 2006).



Fuente: Llagas y Guadalupe, 2006

Figura 1.3 Proceso del tratamiento de agua residual por humedales artificiales

En el siguiente capítulo se profundizará en la descripción y funcionamiento de este método de tratamiento.

Con la finalidad de minimizar la degradación del ambiente y proteger la salud de la población, es importante impulsar el desarrollo de procesos de tratamiento del agua residual que transformen las características iniciales de la misma y de esta manera prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, por esta razón, en este trabajo se evalúa la posibilidad de construir un humedal artificial en un asentamiento irregular; para ello es necesario conocer aspectos generales de la evaluación.

1.3 Evaluación

Un proyecto es una serie de planteamientos encaminados a la producción de un bien o la prestación de un servicio, con el fin de obtener un determinado resultado, desarrollo económico o beneficio social (Hernández *et al*, 1998).

La evaluación de proyectos es una herramienta que compara los costos con los beneficios para determinar si es conveniente o no realizar un proyecto. Para la identificación de los costos y beneficios del proyecto, es necesario comparar la situación con proyecto contra lo que hubiera sucedido sin él. Esta comparación se realiza a través de indicadores que expresan cuantitativamente los recursos utilizados por unidad de producto.

Criterios de evaluación

Los criterios utilizados en la evaluación de un proyecto, están en función de diversos objetivos y de la forma de medir, considerar y especificar los recursos requeridos y los beneficios por obtener, en cada caso particular (Weitzenfeld, 1996).

Los criterios de evaluación de proyectos más utilizados son los siguientes:

Valor Actual Neto (VAN). Es la diferencia entre los ingresos y egresos actualizados al periodo actual. Según este criterio el proyecto debe aceptarse si su valor actual neto es positivo. Se calcula con la ecuación 1.1.

$$VAN = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \quad (\text{ec 1.1})$$

Tasa Interna de Retorno (TIR). Es la tasa que iguala la suma del valor actual o presente de los gastos con la suma del valor actual o presente de los ingresos previstos. Además, es un indicador de la rentabilidad de un proyecto; a mayor TIR, mayor rentabilidad. Se utiliza para decidir sobre la aceptación o rechazo de un proyecto de inversión. Para ello, la TIR se compara con una tasa mínima; si la tasa de rendimiento del proyecto expresada por la TIR supera la tasa de descuento, se acepta la inversión; en caso contrario, se rechaza. Se calcula con la siguiente ecuación.

$$-I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FNE_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (\text{ec 1.2})$$

Para la evaluación de este trabajo se toman en cuenta las recomendaciones presentadas por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público en la *Guía para elaborar y presentar los análisis costo y beneficio de proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)* (SHCP, 2009). Los pasos para hacer dicha evaluación son los siguientes:

- *Resumen ejecutivo*. Se presenta el origen y la visión global del proyecto, describiendo brevemente sus aspectos más relevantes.
- *Situación actual y posibles soluciones*. En esta sección se indica con detalle el diagnóstico de la situación actual (localización geográfica del área de influencia, aspectos sociodemográficos, condiciones climatológicas e hidrológicas, análisis de la oferta actual de agua potable y su distribución, y generación de aguas

residuales); la problemática que se pretende resolver; el análisis de la oferta y la demanda derivado del proyecto y las alternativas de solución.

- *Descripción del proyecto.* Aquí se señalan las características más importantes del proyecto, incluyendo el objetivo y propósito del mismo.
- *Evaluación.* Se identifican, cuantifican y valoran los beneficios y costos sociales del proyecto en términos monetarios a lo largo del horizonte de evaluación.
- *Análisis costo y beneficio.* Se valoran criterios de evaluación como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN) y con base en sus resultados se determina la viabilidad del proyecto.
- *Conclusiones.* Se exponen los argumentos por los cuales el proyecto debe realizarse, los principales beneficios y costos y las conclusiones de su análisis.

Recapitulando, en este tema se estudió la contaminación ambiental, el agua residual, sus componentes, los parámetros que se utilizan para medir dichos componentes, los tipos y métodos de tratamiento, así como la *Guía para elaborar y presentar los análisis costo y beneficio de proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)*; como ya se mencionó, dentro de los métodos de tratamiento más utilizados en México están los humedales artificiales los cuales se tratarán en el siguiente capítulo.

2 Humedales artificiales

En el pasado, la acción de los procesos naturales de autodepuración era suficiente para controlar el efecto de los contaminantes vertidos en los cuerpos de agua; sin embargo, debido al creciente uso del agua en los diversos sectores (domésticos, comerciales, de servicios, industriales, agrícolas y pecuarios) la capacidad natural de dichos cuerpos ha sido superada causando la degradación del ambiente. Lo anterior, ha provocado la necesidad de investigar, analizar y proponer soluciones que reduzcan esta problemática.

Los humedales naturales son medios semiterrestres con una vegetación profusa y un alto grado de humedad; pueden tener aguas permanentes o temporales, aguas estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina, cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros; algunos ejemplos de humedales naturales son los pantanos, marismas, turberas o superficies cubiertas de agua (Ramsar, 2009).

Al observar las capacidades de remoción de contaminantes en los humedales naturales se diseñaron sistemas artificiales que funcionaran como filtros biológicos para retener los sedimentos, nutrientes y otros contaminantes además de eliminar organismos patógenos y fijar minerales como el fósforo (P) y el nitrógeno (N). Entre sus funciones se pueden mencionar el almacenamiento y la purificación del agua así como la conservación de acuíferos.

2.1 Procesos de remoción

Los humedales artificiales son estanques o cauces poco profundos donde se controla la cantidad de agua a tratar, así como la poda, extracción y disposición de la vegetación (ya que al morir, ésta libera contaminantes en su proceso de descomposición). Estos sistemas presentan un funcionamiento similar al de un humedal natural, sólo que éstos son manipulados y controlados de tal manera que su eficiencia es más alta, además su costo es bajo comparado con otros sistemas de tratamiento (*ver tabla 3.1*).

Un humedal se puede construir en cualquier sitio, generalmente funciona por gravedad en un sistema tipo cascada pasando el agua residual por diferentes etapas de tratamiento hasta lograr su depuración (Urquiza *et al*, 2006). Cabe señalar que en los humedales artificiales se logran remociones superiores al 80% (Zambrano y Saltos, 2008), además de proporcionar beneficios intangibles ya que mejoran la estética del lugar en donde se encuentran, como se puede apreciar en la *figura 2.1*.



Fuente: Urquiza *et al*, 2006.

Figura 2.1 Humedal artificial de la Comunidad de Cucuchucho, Mpio. de Tzintzuntzan, Michoacán

En los humedales artificiales se presentan tres tipos de procesos de remoción: físicos, biológicos y químicos, los cuales generalmente ocurren simultáneamente.

Procesos físicos. Se refieren a la sedimentación de sólidos debida a la baja velocidad del agua y a la resistencia proporcionada por las plantas flotantes y sus raíces. La sedimentación reduce la cantidad de sólidos que entran en la fase de filtración y es considerada generalmente como un proceso irreversible; sin embargo, la resuspensión de sedimentos puede ocurrir cuando la velocidad de flujo aumenta por la turbulencia generada por el viento, la perturbación de animales y humanos, o el desprendimiento de gases (por fotosíntesis o respiración de microorganismos durante la descomposición de materia orgánica). En la sedimentación también se elimina una porción significativa de nutrientes y organismos patógenos.

Procesos biológicos. Se basan principalmente en la presencia de vegetación (de distinta naturaleza) capaz de captar y acumular diversos contaminantes, por ejemplo: materia orgánica, nutrientes y metales pesados como plomo (Pb) y cadmio (Cd). La velocidad de remoción depende del crecimiento de las plantas y de la concentración de contaminantes que tengan en su tejido (las plantas herbáceas y algas almacenan nutrientes durante un periodo de tiempo menor que las plantas leñosas, debido a su corto ciclo de vida).

Un aspecto muy importante de este proceso es la muerte de las plantas, ya que al descomponerse (detritus) liberan nutrientes y metales que habían captado.

Por otra parte, las bacterias que se encuentran en el humedal utilizan el carbono (C) de la materia orgánica como fuente de energía, convirtiéndolo en bióxido de carbono (CO₂) o metano (CH₄). Así mismo, el metabolismo microbiano remueve nitrato y amonio (nitrógeno inorgánico) y algunas bacterias transforman el nitrato en gas nitrógeno (N₂), el cual se libera a la atmósfera (Llagas y Guadalupe, 2006).

Procesos químicos. Dentro de los procesos químicos de remoción de contaminantes el más importante es la absorción, el cual retiene los contaminantes y posteriormente los inmoviliza. La absorción se define como la transferencia de iones de la fase de solución (agua) a la fase

sólida (suelo). Dentro de estos procesos también se consideran reacciones de adsorción, precipitación y volatilización (Llagas y Guadalupe, 2006).

A su vez, la adsorción se refiere a la unión de iones a partículas del suelo, por absorción o intercambio catiónico. Es la unión física de los cationes (como el amonio (NH_4^+) y la mayoría de las trazas de metales) a la superficie de las partículas de arcilla y materia orgánica del suelo; es decir, es la formación de una película líquida o gaseosa sobre la superficie de un cuerpo sólido. La capacidad de los suelos para retener cationes aumenta, generalmente, con el contenido de arcilla y materia orgánica, además se expresa como capacidad de intercambio catiónico (CEC).

Algunos metales, el fosfato y compuestos orgánicos se pueden inmovilizar en el suelo por medio de la absorción química de las arcillas, los óxidos de hierro (Fe), el aluminio (Al) y la materia orgánica. Los fosfatos también pueden precipitarse con los óxidos de hierro y aluminio para formar un nuevo mineral compuesto que provoca el almacenamiento de fósforo en el suelo a largo plazo.

La precipitación es la separación de sustancias por asentamiento gravitacional, mediante el agregado de reactivos químicos que alteran su estado físico o su solubilidad. Una forma de precipitación que ocurre en el suelo de los humedales es la formación de sulfuros de metales, éstos inmovilizan los metales tóxicos y son insolubles.

Finalmente, la volatilización es un mecanismo mediante el cual un compuesto disuelto en el agua se transfiere a la atmósfera, por ejemplo: la remoción de nitrógeno como amoníaco, NH_3 (Llagas y Guadalupe, 2006).

Como ya se mencionó, los procesos descritos se llevan a cabo simultáneamente, razón por la cual se obtienen eficiencias de entre un 85 y 90% de remoción de contaminantes, logrando así una depuración casi completa y la posibilidad de reutilizar el agua para la misma u otras actividades como el riego agrícola, de áreas verdes o la infiltración a mantos acuíferos. En la siguiente tabla (2.1) se resumen los principales mecanismos de remoción y los contaminantes removidos.

Contaminante	Mecanismos de remoción
Sólidos suspendidos	Sedimentación / filtración
Materia orgánica biodegradable	Degradación microbiana (aerobia, anaerobia y facultativa)
Nitrógeno	Amonificación seguida por la nitrificación-denitrificación bacteriana; volatilización del amonio y rizofiltración.
Fósforo	reacciones de adsorción, precipitación con el aluminio, hierro y calcio y minerales de la arcilla en el suelo.
Metales pesados	Sedimentación. Adsorción sobre la superficie de la planta y los detritus.
Patógenos	Sedimentación/filtración. Radiaciones ultravioleta. Excreción de antibióticos por las raíces de las plantas.

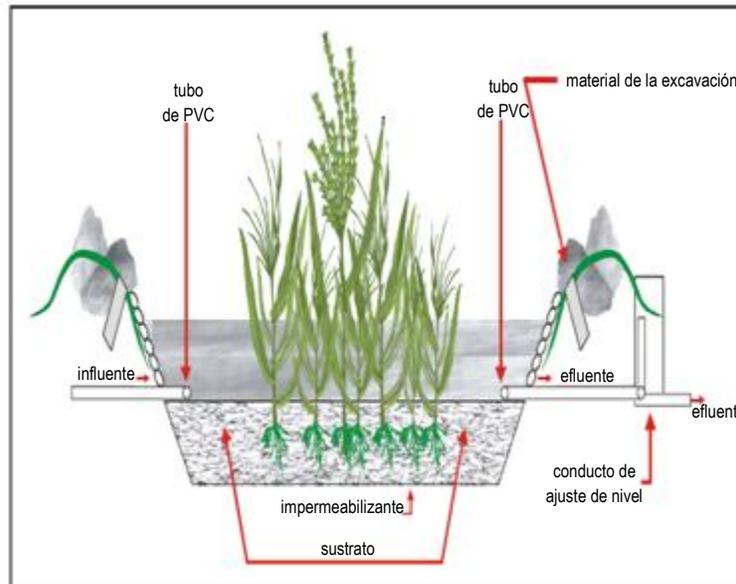
Fuente: Silva, 2009

Tabla 2.1 Mecanismos de remoción de los contaminantes en los humedales

2.2 Clasificación

Los humedales artificiales se clasifican en dos tipos, según el flujo del agua que presenten: libre superficial o subterráneo.

Flujo libre superficial (FLS). Estos sistemas consisten en una o más cuencas o canales de poca profundidad con un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación hacia el agua freática. Estos humedales soportan poca carga orgánica por lo que generalmente son utilizados para aguas residuales que han tenido un tratamiento previo: rejillas, desarenador, trampas de grasas (ver figura 2.2).



Fuente: Llagas y Guadalupe, 2006

Figura 2.2 Humedal artificial de flujo libre superficial

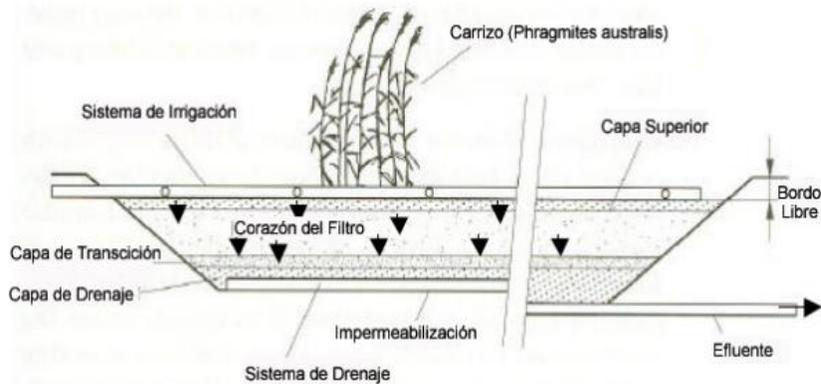
En los sistemas de FLS el agua residual se alimenta de forma continua a baja velocidad. El tratamiento se lleva a cabo mediante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente, donde se depositan los sólidos suspendidos y los sedimentos, mientras las bacterias degradan la materia orgánica (Tesillos y Ubaldo, 2007). La vegetación que se utiliza en los sistemas FLS son espadañas, ancas, juncos y carrizos (USEPA, 2000a).

Flujo subterráneo (FS). Son canales excavados rellenos de material granular (cuya profundidad aproximada es de 60cm), generalmente grava, aunque también se puede utilizar roca triturada, arena u otro tipo de material, donde el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie de la superficie libre. Las principales ventajas de mantener ese nivel son la prevención de mosquitos, malos olores y la eliminación del riesgo de contacto del hombre con el agua residual (USEPA, 2000b). El tratamiento se lleva a cabo al fluir el agua a través de la grava y las raíces (Tesillos y Ubaldo, 2007).

Existen dos tipos de humedales de FS, los artificiales de flujo vertical (HAFV) y los de flujo horizontal (HAFH):

Humedal artificial de flujo vertical (HAFV). Se caracterizan por disponer de un sistema intermitente de alimentación por encima de la superficie distribuido a lo largo y ancho del lecho, el agua se infiltra por gravedad a través del medio de soporte (grava, arena)

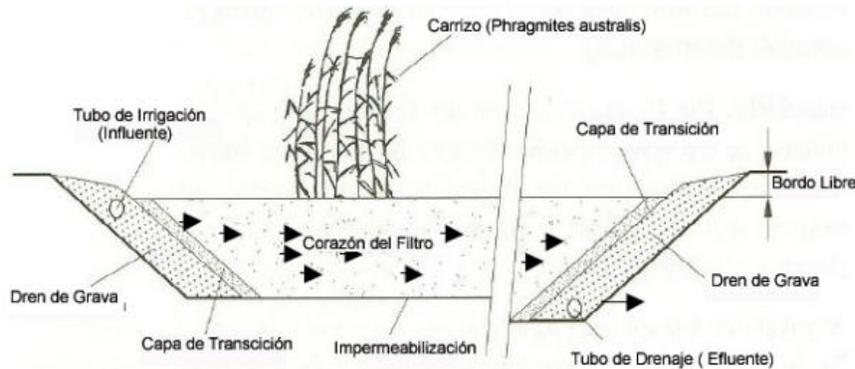
permitiendo que el influente alimentado tenga una mayor dilución de oxígeno atmosférico y así se cuente con condiciones aerobias de degradación para que el nitrógeno amoniacal se convierta en nitratos (*ver figura 2.3*). Los HAFV tienen un alta eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos; sin embargo, es menor en la transformación de compuestos de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) y aún menor el tratamiento de metales pesados (Jiménez, 1999).



Fuente: De León, 2007

Figura 2.3: Esquema de un humedal artificial de flujo vertical

Humedal artificial de flujo horizontal (HAFH). El influente se alimenta horizontalmente a través de todo lo ancho del humedal y fluye por gravedad (debido a la inclinación de la base) entrando en contacto con el medio de soporte, rizomas y microorganismos (*ver figura 2.4*).



Fuente: De León, 2007

Figura 2.4: Esquema de un humedal artificial de flujo horizontal

La intermitencia y la inundabilidad permanente confieren propiedades diferentes a los sistemas verticales y horizontales respectivamente; en particular afecta la transferencia de oxígeno. Los sistemas con flujo horizontal se han diseñado generalmente con profundidades de 0.6m, producen efluentes con ausencia de oxígeno, y presentan la posibilidad de malos olores; los sistemas con flujo vertical operan con cargas superiores que los horizontales, producen efluentes más oxigenados y libres de malos olores (Morató *et al*, 2006).

2.3 Diseño

Antes de iniciar la construcción de un humedal es fundamental tomar en cuenta los siguientes factores de diseño:

- *Caudal de entrada.* Es el volumen de agua que pasa por una determinada sección transversal en una unidad de tiempo.
- *Características del líquido.* Se refiere a los contaminantes (físicos, químicos y biológicos) que se encuentran en el agua residual, por ejemplo: color, temperatura, sólidos en suspensión, sólidos disueltos, bacterias, protozoos, virus, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y metales pesados.
- *Selección de la vegetación.* Primeramente se deben considerar las condiciones ambientales, el tipo de vegetación que existe en la zona, los objetivos del tratamiento y la calidad, inicial y final, de dichas aguas.
- *Dimensión del humedal.* Depende del flujo a tratar y las características que debe cumplir el efluente. La superficie necesaria se puede expresar en $l/día \cdot m^2$.
- *Características del suelo.* El tipo de suelo que deberá tener un humedal depende del tipo de flujo. Si es de flujo libre se deposita tierra y si es de flujo subterráneo se debe buscar que la permeabilidad del suelo sea baja y no haya percolación. En todos los casos la compactación de arcilla suele ser suficiente para preparar los canales.
- *Energía.* Este factor es determinante ya que la energía luminosa que reciben los vegetales es fundamental para su crecimiento y ciclo biogeoquímico; es importante tomar en cuenta la latitud del lugar, dado que el sol es la fuente de energía empleada.
- *Evapotranspiración.* Se refiere a la pérdida de humedad por evaporación directa y por la transpiración de la vegetación.

Las variables de diseño del humedal son: el área, la relación largo-ancho, la profundidad y el gasto promedio; las cuales se calculan a partir de las siguientes relaciones:

- *Área.* Los humedales artificiales son reactores biológicos cuyo rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo pistón (ec. 2.1), a partir de la cual se calcula el área del humedal (Zambrano y Saltos, 2008):

Ecuación básica de los reactores de flujo pistón:

$$\frac{c_e}{c_0} = e^{-k_r t} \quad (\text{ec. 2.1})$$

Para resolver la ecuación 2.1 primero se debe obtener el tiempo de retención hidráulica (t), el cual es el tiempo aproximado en el que el agua residual estará en el humedal desde su entrada hasta su salida y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{(L)(W)(d)(n)}{Q} \quad (\text{ec. 2.2})$$

Finalmente, para obtener el área del humedal se deberán combinar las ecuaciones 2.1 y 2.2:

$$A = LW = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{C_0}{C_e}\right)}{k_T \cdot n} \quad (\text{ec. 2.3})$$

- Tiempo de retención hidráulica. Es el tiempo en el que el agua residual pasa a través del sistema. Para el diseño de humedales se ha encontrado que 5 días es el tiempo que garantiza la remoción de contaminantes en un 80% (Llagas y Guadalupe, 2006).
- *Relación largo-ancho.* La relación largo-ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. Las relaciones largo-ancho de 10:1 o mayores asegurarían un flujo a pistón, pero tienen el inconveniente de que el agua se desborde en la parte alta debido al incremento en la resistencia del flujo, esto causado por la acumulación de residuos de vegetación. Por lo tanto, relaciones de 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables (Zambrano y Saltos, 2008).
- *Profundidad.* Para este parámetro se recomiendan profundidades de 0.30 a 0.60m para sistemas de flujo libre superficial, teniendo en cuenta que si hay una pendiente en la zona más profunda debe haber 0.60m y en la menos profunda 0.30m. En ciertos casos, sobre todo en humedales pequeños, estas dimensiones pueden reducirse a 0.50m e incluso a 0.20m. Para sistemas de flujo subterráneo se recomiendan profundidades de 0.1 a 0.45m.
- *Gasto [Q].* Es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de una población en un día de consumo promedio (CEA, 2009).

El gasto se determina aplicando la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\text{Dotación} \left[\frac{l}{\text{hab} \cdot \text{día}} \right] \text{Población} [\text{hab}] CA}{86400 \left[\frac{s}{\text{día}} \right]} \quad (\text{ec. 2.4})$$

Así mismo para la ecuación mencionada anteriormente es necesario estimar la población futura; existen métodos que se aplican comúnmente en los proyectos de infraestructura, uno de ellos es el método geométrico, el cual supone que el crecimiento poblacional es directamente proporcional a la población inicial. Se calcula de la siguiente forma (César, 2007):

$$P = P_2 (1 + i)^{t-t_2} \quad (\text{ec. 2.5})$$

A pesar que en el asentamiento se ha pedido crecimiento cero, para el diseño del humedal se debe considerar el crecimiento de la población.

Con base en los factores descritos se puede señalar que en el diseño del humedal primeramente se deberá considerar el flujo, el cual debe superar la resistencia por fricción mismo sistema; esta resistencia es impuesta por la vegetación y la capa de sedimentos en los humedales de flujo libre y en los de flujo subterráneo por las raíces de las plantas y los sólidos acumulados en los humedales. La energía necesaria para superar esta resistencia se da por la

pérdida de carga (pérdida de energía dinámica del fluido debida a la fricción de las partículas entre sí y contra las paredes de la tubería o canal que las contiene) entre la entrada y salida del flujo en el sistema.

2.4 Construcción

Existen varios aspectos de importancia que deben considerarse al momento de construir un humedal, éstos son la excavación, la nivelación, la impermeabilización de la capa subterránea del terreno, la selección y colocación del material granular, la vegetación y las estructuras de entrada y salida (Zambrano y Saltos, 2008), mismos que consisten en:

Excavación. Excavar a la profundidad que corresponde (0.40-0.60m) la cubierta vegetal, cuyo material puede ser reservado y reutilizado posteriormente como medio de soporte o para otras actividades en la obra.

Nivelación. Establecer un fondo con una ligera pendiente (1%) para asegurar el drenaje y una salida de altura variable con el nivel del agua (Zambrano y Saltos, 2008). Lo anterior, con la finalidad de que existan las condiciones hidráulicas adecuadas para el flujo del sistema.

Impermeabilización. Contar con una barrera impermeable para evitar la contaminación del subsuelo, algunas veces esta barrera se presenta de forma natural por una capa de arcilla o por el material del sitio, mismos que si se compactan llegan a un estado cercano al impermeable. Otras alternativas pueden ser el uso de asfalto o de geomembranas.

Sustrato. Colocar grava, arcilla, tezontle o material de la excavación sobre el suelo impermeabilizado hasta una altura de 0.20m, de tal forma que sirva como base para las raíces de la vegetación.

Vegetación. Trasplantar rizomas al lecho previamente preparado, ya que el sembrado de semillas es un método que requiere mucho tiempo y control estricto del agua. Las plantas que se utilizan normalmente miden de 0.20 a 0.40m de alto, mismas que se plantan uniformemente por todo el humedal a una distancia aproximada de 0.60m entre cada una; se espera que después de algún tiempo (6 meses a un año) existan plantas en todo el humedal sin que queden espacios libres entre ellas.

2.5 Operación y mantenimiento

El mantenimiento de los humedales artificiales no requiere de actividades complejas ya que como se mencionó, su funcionamiento es similar al de uno natural; sin embargo, es importante y necesario conocer las principales acciones para su manipulación, control y rendimiento (Zambrano y Saltos, 2008), por ello a continuación se listan y describen:

Asegurar que el flujo alcance todas las partes del humedal. Se refiere a verificar que el agua cubra la superficie del humedal para que los residuos no bloqueen los caminos del flujo y no se desarrollen áreas de estancamiento. Si esto llegara a pasar se tiene que limpiar la zona bloqueada para que el agua siga su camino.

Mantener un crecimiento vigoroso de la vegetación. Es necesario inspeccionar la vegetación de manera regular, así como retirar las especies invasoras y evitar el uso de herbicidas. Además, se debe controlar el nivel del agua.

Control de la fauna nociva. Crear las condiciones adecuadas en el humedal que eviten el desarrollo de larvas, ya que los mosquitos son comunes en los humedales naturales y pueden presentarse en los artificiales. Es importante mencionar que cuando el agua está en movimiento se minimiza el riesgo de aparición de mosquitos.

Control del humedal. Mantener observaciones periódicas en el humedal para identificar a tiempo posibles cambios (corrosión, obstrucción, erosión y crecimiento de vegetación indeseable) que puedan ser desfavorables o bien incrementar la generación de gastos.

2.6 Ventajas y desventajas

Como en todos los sistemas que se diseñan y desarrollan, existen ventajas y desventajas que no pueden dejarse pasar por desapercibidas, es decir, se deben conocer y evaluar cada una de ellas. Lo anterior, con el propósito de que con la implementación de dichos sistemas siempre se obtenga el mayor beneficio y rendimiento.

En particular, se puede decir que los humedales artificiales brindan una diversidad de ventajas y beneficios, de entre los cuales se mencionan los siguientes:

- Garantizan una eficiencia del 85 al 90%.
- Los costos de operación y mantenimiento son bajos comparándolos con otros sistemas de tratamiento, ya que no requieren de infraestructura costosa ni de personal especializado.
- No generan un costo en el consumo de energía, dado que la única energía que requieren es la solar, para que los procesos de remoción cumplan con su ciclo.
- Son sistemas de uso múltiple debido a que tienen la capacidad de tratar aguas residuales provenientes de descargas domésticas, industriales y agrícolas.
- Todos los procesos de remoción de contaminantes son naturales.
- Normalmente se pueden construir en cualquier sitio.
- Benefician al ambiente y son estéticos.
- No se presentan malos olores.
- Minimizan focos de infección.
- Incrementan y favorecen la reutilización del agua tratada.

Los humedales artificiales no son capaces de resolver todo, por lo que la implementación de estos sistemas también puede presentar algunas desventajas, tales como:

- Requieren grandes extensiones de terreno, aproximadamente de 2.5 a 9m² por habitante.
- Baja eficiencia durante el invierno, cabe señalar que esto sólo sucede en lugares donde se registran temperaturas menores a 0°C.
- Es posible la acumulación de sedimentos en el lecho si no son operados correctamente.

En este capítulo se describieron los humedales artificiales, su clasificación, así como sus características factores y parámetros de diseño, todo esto con el fin de determinar la posibilidad de emplear un humedal artificial en un asentamiento irregular; en el capítulo siguiente se describen las características de la zona de estudio, así como la evaluación social del proyecto.

3 Caso de estudio

El crecimiento poblacional en los últimos años rebasó las zonas de desarrollo urbano dentro de los planes delegacionales, dando como resultado el surgimiento de numerosos asentamientos irregulares, en su gran mayoría ubicados sobre suelos de conservación ecológica, amenazando con ello la sustentabilidad de la Ciudad de México.

En este capítulo se propone el uso de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en el asentamiento irregular de Ocotla, a partir de la *Guía para elaborar y presentar los análisis costo y beneficio de proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales* discutida en el capítulo inicial (*ver apartado 1.3*) (SHCP, 2009).

3.1 Resumen ejecutivo

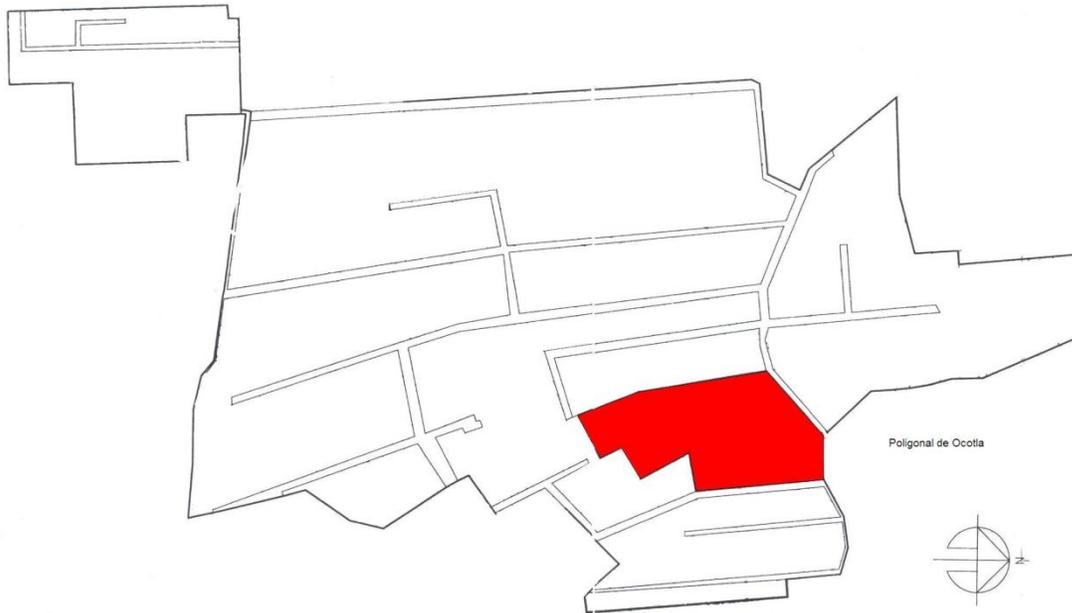
Este caso estudia la factibilidad técnica y económica de construir un humedal artificial como alternativa para el tratamiento de aguas residuales en Ocotla. Dicha alternativa es económica en el consumo de energía, fácil de mantener y operar y garantiza la remoción de contaminantes evitando así la degradación del manto acuífero y beneficiando a la población en general.

Origen del proyecto. Ocotla, ubicado en el Pueblo de San Miguel Topilejo dentro de la delegación Tlalpan del Distrito Federal; tuvo su origen con la lotificación de terrenos ejidales, cuenta con aproximadamente 450 habitantes (PRIA, 2009) y carece de redes de agua potable, drenaje y alcantarillado.

Al no existir una red de drenaje y alcantarillado, la mayoría de los habitantes utilizan fosas sépticas para descargar el agua residual.

Por lo anterior, para reducir el deterioro ambiental provocado por las descargas de agua residual se propone la construcción de un humedal artificial para depurar el agua. El sustrato del humedal alberga una gran cantidad y diversidad de microorganismos que se desarrollan sobre las raíces de las plantas provocando la degradación de la materia orgánica, y de esta manera es posible que se cumplan con las normas mexicanas de descarga y reutilización del agua residual.

Descripción del proyecto. Consiste en un humedal artificial con un área de $1649.65m^2$, una profundidad de $0.40m$ y un gasto de 0.42 litros por segundo; construido en el predio con menor altitud dentro del asentamiento (*ver figura 3.1*).



Fuente: PRIA, 2009

Figura: 3.1 Ubicación del humedal en Ocotla

La propuesta se evaluó a partir de los beneficios ambientales y el ahorro de agua para las familias del lugar. Se consideraron como criterios de evaluación el Valor Actual Neto (VAN) incorporando los beneficios y costos de inversión, operación y mantenimiento en un horizonte de evaluación de diez años, que corresponde al promedio de vida útil de los componentes del sistema, y la Tasa Interna de Retorno (TIR) que considera como ingresos los ahorros generados por el uso de agua tratada.

El resultado del VAN es de \$2,062,133.68y la TIR es del 62%, por lo tanto es recomendable aceptar el proyecto.

3.2 Diagnóstico

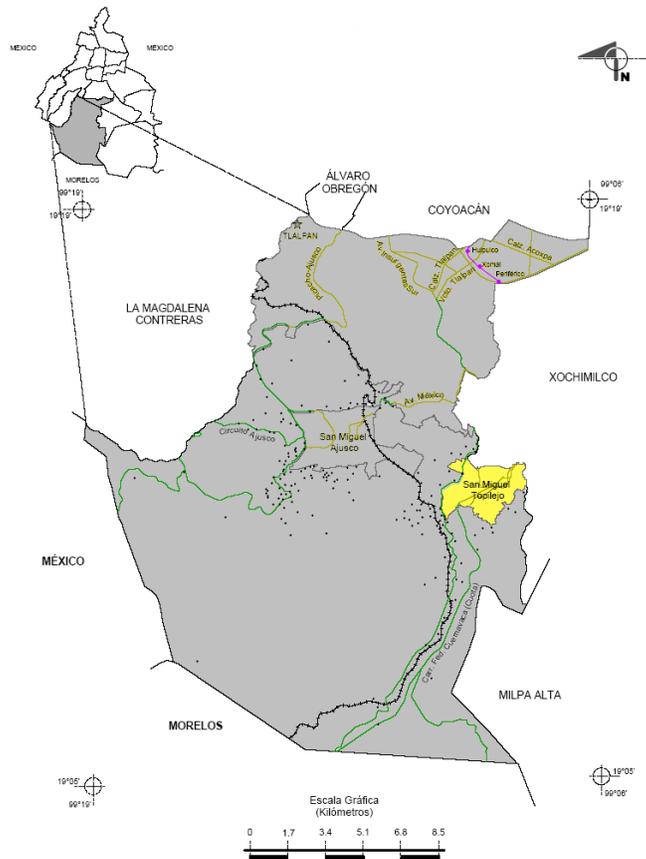
El diagnóstico se realizó como parte del *Programa de reducción de impacto ambiental*, (PRIA) estudio realizado por los alumnos de la materia de Proyecto de ingeniería de nuestra Facultad, durante el semestre 2010-1; dicho programa tuvo por objeto proponer las estrategias necesarias en materia de agua potable, agua residual, contaminación atmosférica, manejo de residuos sólidos y peligrosos así como riesgo ambiental, para minimizar los impactos ambientales y contribuir con la regularización del asentamiento, ya que se encuentra en zona de conservación ecológica..

Las principales fuentes de información para la elaboración de este diagnóstico son: la proporcionada por las autoridades delegacionales y la recabada en el asentamiento, por medio de observación directa y 20 encuestas aplicadas a la población que se hicieron como parte del PRIA; sin embargo, se estima que para una distribución normal con un intervalo de confianza del 95% se debieron hacer 174 encuestas. Es importante señalar que se realizó dicho número de encuestas debido a la poca participación ante la invitación que se les hizo a los habitantes; pero se cuenta con un estudio previo *Programa de manejo integral de contaminantes* realizado en el 2002 que complementa la información.

3.2.1 Características físicas de la zona de estudio

A continuación se describen las características físicas de la zona de estudio con información obtenida del *Prontuario de información geográfica delegacional de Tlalpan* (INEGI, 2005).

Ubicación geográfica. Ocotla pertenece al pueblo de San Miguel Topilejo y se encuentra dentro de la delegación Tlalpan entre los paralelos $19^{\circ} 09' 57''$ de latitud norte y $99^{\circ} 09' 57''$ de longitud oeste con una altitud de 2,890 msnm (ver figura 3.1); el territorio de la región tiene un relieve montañoso y de origen volcánico, es una zona boscosa generadora de oxígeno y de recarga acuífera.



Fuente: INEGI, 2005

Figura 3.2 Ubicación geográfica de Ocotla.

Aspectos demográficos. Tlalpan presenta la tasa de crecimiento más elevada (0.9%) (SDE, 2005) del Distrito Federal debido al dinamismo de su mercado inmobiliario, además de la constante expansión de los asentamientos irregulares. Respecto al número de predios y habitantes del asentamiento, es importante mencionar que durante el estudio realizado en el año 2002 (PMIC, 2002), se reportó la existencia de 240 predios, 122 familias y 450 habitantes; el levantamiento de campo realizado por la delegación el 17 de mayo de 2007 indica que existen 285 predios en Ocotla y 37 lotes más en la ampliación autorizada (322 en total); sin embargo, en los datos proporcionados por los habitantes para la realización de este estudio (recibidos directamente de la delegación, dentro del

Convenio de crecimiento cero), se refleja que existen: 317 lotes, 122 familias y 450 habitantes (PRIA, 2009).

De los 317 lotes existentes, 165 están habitados, 88 deshabitados y 64 son baldíos. En general, el asentamiento tiene características urbanas, pero aún existen algunos terrenos de cultivo y espacios ocupados como granjas de traspatio.

Población. La población de este asentamiento es heterogénea, tanto económica como social y educativamente. Las viviendas varían en su consolidación y materiales de construcción y en las condiciones generales de mantenimiento (PRIA, 2009).

Clima y características hidrológicas. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 12 y 14°C. Los meses de temperatura más elevada son abril y mayo. La precipitación promedio anual es de 1000 milímetros, los meses de mayor precipitación son de julio a septiembre.

3.2.2 Características ambientales

En términos generales en Ocotla se detectaron problemas de contaminación que generan insalubridad, fauna nociva y afectan a la atmósfera, suelos y acuíferos; a continuación se mencionan aquellos que fueron identificados durante la visita realizada al asentamiento. Cabe mencionar que para este caso de estudio sólo se profundizará en el tema del agua.

Contaminación atmosférica. Las principales fuentes de contaminación atmosférica en Ocotla son la defecación de los animales al aire libre, la erosión, quema de basura y de llantas.

Manejo de residuos. Ocotla cuenta con un servicio de recolección de parada fija dos veces por semana; no se observó ningún tipo de contenedor en la vía pública, pero sí muchas calles y terrenos baldíos con basura de diferentes tipos, por otro lado se identificaron residuos peligrosos como pilas, anticongelante, pinturas y aerosoles..

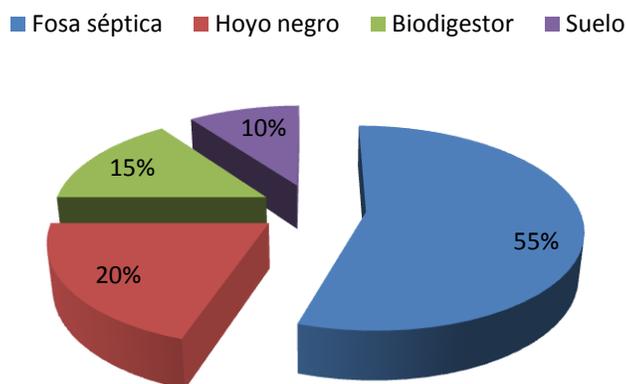
Agua potable. El abastecimiento de agua potable en el asentamiento representa un problema debido a la falta de una red de distribución. Es importante señalar que en este asentamiento el agua potable es subsidiada por la delegación y se suministra a través de carros tanque, además se identifican otras fuentes de abastecimiento como la captación de agua de lluvia y la compra de garrafones de agua para beber.

Los resultados de la encuesta indican que el consumo de agua en Ocotla es de 58.4 litros/hab·día, sin embargo, en esta cifra no se ve reflejada la recolección de agua de lluvia que realiza el 80% de los habitantes. Por ello, para establecer el consumo anual de agua en la zona de estudio se considera la recomendación de la Organización Mundial de la Salud, la cual indica que la cantidad mínima aceptable para satisfacer las necesidades de consumo e higiene básica debe ser de 100 litros de agua al día por persona (Howard y Bartam, 2003) teniendo en cuenta que la población en Ocotla es de 450 habitantes, se calcula el consumo anual de agua:

$$100 \frac{[l]}{[día][habitante]} * 365 \frac{[días]}{[año]} * 450 [habitantes] = 16,425,000 \frac{[l]}{[año]}$$

Agua residual. En Ocotla tampoco existe red de drenaje ni alcantarillado; las formas de disposición final del agua residual son fosa séptica, hoyo negro, biodigestor y descarga directa al suelo (*ver figura 3.2*). La mayoría de la población dijo tener fosas sépticas; sin embargo, reportaron que nunca han sido vaciadas, es importante mencionar que se estima que un tiempo de llenado promedio de una fosa es de seis meses, por lo tanto, es posible que dichas fosas tengan infiltraciones y estén contaminando los mantos acuíferos.

Según la Comisión Nacional del Agua, del total del consumo de agua potable el 75% se convierte en agua residual; por lo que se estima que el agua residual que se genera en Ocotla al año es de 13,140,000 litros.



Fuente: Elaboración propia con datos de la encuesta

Figura 3.3: Disposición final del agua residual en Ocotla

Es importante mencionar que en el 2008, la Delegación puso en marcha un programa de protección de los mantos acuíferos (El Financiero, 2008) durante el cual se distribuyeron biodigestores a los habitantes de Ocotla, sin embargo, se pudo observar que son pocas las personas que lo utilizan, además durante la encuesta se percibió desconocimiento y hasta rechazo hacia este sistema.

En la visita se observó que en varios de los predios se realiza descarga de aguas grises directamente al suelo y a la vía pública (*ver figura 3.3*), lo que podría provocar la contaminación del acuífero.



Fuente: PRIA, 2009

Figura 3.4 Descarga de aguas grises directamente al suelo

3.2.3 Alternativas de solución

Debido a la problemática anteriormente descrita, es necesario analizar alternativas de solución para el tratamiento de aguas residuales que sean factibles tanto técnica como económicamente y que garanticen la remoción de contaminantes beneficiando a la población en general.

En la siguiente tabla (*ver tabla 3.1*) se presentan tres alternativas analizadas para seleccionar aquella que efectúe la remoción de contaminantes requerida, permita cumplir con la normatividad ambiental correspondiente; y sea económicamente viable. La tabla se construyó de acuerdo con las características de los métodos de tratamiento descritos en el capítulo 1 de esta tesina.

Características		Lodos activados	Lagunas facultativas	Humedal
Superficie (m ² /hab)		4 a 7	12 a 14	2.5 a 9
Costo de equipos		M	MP	MP
Salario del personal		M	P	P
Costo de construcción		M	P	MP
Costo de mantenimiento		M	P	P
Remoción (%)	DQO	50 – 85	50 – 85	55 – 80
	DBO	60 – 96	60 – 96	60 – 98
	SST	50 – 90	50 – 90	60 – 98
	N total	60 – 70	60 – 70	30 – 70
	P total	10 – 40	10 – 40	20 – 60
	Coliformes fecales	99 - 99.9	99 - 99.9	99 - 99.9

M=mucho, P=poco, MP= muy poco

Fuente: Elaboración propia con información de Seoanez (1999b)

Tabla 3.1. Comparativo entre sistemas de tratamiento de agua residual

De acuerdo con el análisis comparativo que se muestra en la *tabla 3.1*, la eficiencia en la remoción de contaminantes es similar para los tres tratamientos; sin embargo, la mejor alternativa es el humedal, debido a que requiere de una menor superficie y los costos generales de equipo, construcción, operación y mantenimiento son menores, por lo que se cumple con las necesidades del proyecto.

3.3 Descripción del proyecto

La alternativa seleccionada es el humedal artificial. Para el caso de Ocotla se analizan dos soluciones, el familiar y el regional, a continuación se describe cada uno de ellos:

3.3.1 Humedal familiar

El humedal familiar tiene una capacidad para dar tratamiento al agua residual generada por seis personas (PMIC, 2002).

Para el diseño del humedal se toman en cuenta los factores descritos en el capítulo anterior; lo primero es determinar las dimensiones del humedal considerando una profundidad de 0.40m y una relación largo-ancho de 3:1.

Se calcula el gasto mediante la ecuación 2.4:

$$Q = \frac{(100) \left[\frac{l}{hab \cdot dia} \right] (6) [hab]^{(0.75)}}{86400 [s/dia]} = 0.0052 \frac{l}{s}$$

A partir del gasto obtenido se determina el área (ecuación 2.3):

$$A = \frac{0.0052 \ln \left(\frac{300}{20} \right)}{(0.38)(0.40)(0.40)} = 20.12m^2$$

De lo anterior:

$$w = \sqrt{\frac{20.12}{3}} = 2.58m; l = (3)(2.58) = 7.76m$$

Por lo tanto las dimensiones del humedal familiar son:

- Largo = 7.75m
- Ancho = 2.50m
- Profundidad = 0.40m

Se considera que un humedal familiar estaría conformado por un canal 7.76m de largo 2.58m de ancho y 0.40m de profundidad, con una pendiente del 1%. El sustrato tendrá un grosor de 0.20m, su volumen será de 4m³.

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
Excavación con máquina para zanjas	m ³	8	12.768	102.25
Plantilla apisonada con pisón de mano	m ³	1	256.35	256.35
Suministro y colocación de arena	m ³	4	127.25	509.52
Cisterna (5,000l)	pza.	1	18,100	18,100.00
Acarreo kilómetros subsecuentes	m ³ /km	8	5.943	47.54
			IVA	3,042.50
			Total	22,058.16

Fuente: Elaboración propia con datos de DGICGAEM, 2008.

Tabla 3.2 Costo de la construcción de un humedal artificial familiar

En la *figura 3.3* se indican los predios en los cuales podría ser instalado el humedal familiar. Se señalaron los terrenos habitados y en construcción que tienen el área necesaria para la construcción del humedal y que se encuentran dentro de la poligonal de Ocotla, éstos representan el 6.3% del total de los lotes (no se consideran los terrenos comunales, los no habitados y los baldíos).



Fuente: Elaboración propia con mapa obtenido del PRIA, 2009.

Figura 3.5 Terrenos disponibles para humedales artificiales a) familiar y b) regional

El humedal familiar no es viable como solución para Ocotla debido a que el 93.7% de los predios carecen del área suficiente para su construcción.

3.3.2 Humedal regional

El humedal artificial que se propone dará tratamiento al agua residual generada por los habitantes de Ocotla y se calcula para una vida útil de diez años, por lo anterior, se estima el crecimiento de la población en este periodo de tiempo, se considera una tasa de crecimiento media anual del 0.9% (SDE, 2005) y la población actual de 450 habitantes. Cabe señalar que en la delegación Tlalpan se tiene el acuerdo de crecimiento cero, con el fin de que no se extienda el área de los asentamientos irregulares y de esta manera lograr que no aumente el número de habitantes, sin embargo, se ha detectado que los lotes se subdividen incrementando la población; es por esta razón que se hace la siguiente consideración (ec. 2.5):

$$P = 450 (1 + 0.009)^{10} = 492 \text{ habitantes}$$

Para continuar con el diseño del humedal se calcula el gasto mediante la ecuación 2.4:

$$Q = \frac{(100) \left[\frac{l}{\text{hab.día}} \right] (492) [\text{hab}]^{(0.75)}}{86400 [\text{s/día}]} = 0.42708 \frac{l}{s}$$

A partir de este gasto se determina el área (ecuación 2.3):

$$A = \frac{0.42708 \ln \left(\frac{300}{20} \right)}{(0.38)(0.40)(0.40)} = 1649.65 m^2$$

Y, por la razón de aspecto de 3:1

$$w = \sqrt{\frac{1649.65}{3}} = 23.45 m ; l = (3)(23.45) = 70.34 m$$

Por lo tanto, las dimensiones del humedal regional son:

- Largo = 70.30m
- Ancho = 23.40m
- Profundidad = 0.40m

Cabe mencionar que con respecto a la vegetación se sugiere utilizar tule, *Typha latifolia*, ya que al tratarse de una especie de pasto, es fácil de podar, se puede arrancar del lecho del humedal, no tiene raíces voluminosas, su control reproductivo es sencillo y se puede conseguir en Xochimilco; sus características se describen en la *tabla 3.3*.

Descripción	Pertenece a la familia de la <i>Typhaceas</i> , crece en medios acuáticos, lagunas, pantanos y esteros.
Origen	Hemisferio norte, se encuentra en México en grandes extensiones.
Floración	Durante el verano emerge entre las hojas una especie de tallo sobre el que se agrupan las flores en espiga cilíndrica compacta de color castaño.
Propiedades	Es muy rico en proteínas, grasas, azúcares, fibras y sobre todo sales minerales, calcio y hierro. Durante el invierno los rizomas gruesos están llenos de almidón y la base se puede cocinar como las papas o hacer harina.
Otros usos	Sus hojas son utilizadas en la fabricación artesanal de sillas, sillones y canastos.
Riego	Vive con las raíces sumergidas y resiste periodos muy breves fuera del agua.
Luz y exposición	Crece a pleno sol, aunque acepta sombra parcial.
Temperatura	Soporta un amplio rango de temperaturas. Es una de las plantas acuáticas más resistentes y menos exigentes.
Profundidad	Aproximadamente 0.40m
Sustrato	No necesita un suelo especialmente rico. El agua debe mantenerse bien aireada.
Multiplicación	Por división de los rizomas a finales de verano, es una planta de crecimiento rápido.

Fuente: CAEM, 2008

Tabla 3.3 Características del tule

3.4 Evaluación

Para realizar la evaluación es necesario calcular el costo del humedal artificial y para ello se debe tomar en cuenta el costo de la instalación de un sistema colector de aguas residuales, que incluye la excavación con máquina en donde se afloja y extrae el material, posteriormente se coloca una plantilla apisonada a mano y compactada con agua, siguiendo con la instalación de la tubería de polietileno alta densidad corrugado exterior, liso interior de 300mm de diámetro, se hacen los pozos de visita y se considera también el acarreo del material sobrante (DGICGAEM, 2008).

Conceptos	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Excavación con máquina para zanjas	m ³	720	12.768	9,192.96
Plantilla apisonada con pisón de mano	m ³	81	256.35	20,760.705
Relleno de zanjas con materiales producto de la excavación	m ³	590.4	61.971	36,587.67
Instalación de tubería de polietileno alta densidad	ml	720	40.4985	29,158.92
Pozos de visita	pozo	8	6,458.55	51,668.4
Suministro e instalación de brocales y tapas para pozos de visita	pza.	8	854.07	6,832.56
Acarreo kilómetros subsecuentes	m ³ /km	720	5.943	4,278.96
Suministro de tubería de polietileno alta densidad	ml	720	218.2005	157,104.36
			Suma	315,584.53
			IVA	50,943.50
			Total	366,078.05

Fuente: Elaboración propia con datos de DGICGAEM, 2008

Tabla 3.4 Presupuesto del colector de Ocotla

Se procede a calcular los costos de construcción del humedal, para ello se describe brevemente el proceso: se excavan con máquina las dimensiones requeridas, se hace una plantilla apisonada a mano y se compacta con agua; siguiendo con la colocación de arena gruesa con tamaño máximo de grano de 2mm, porosidad de 0.40 y conductividad hidráulica de 480 m³/m², se instala una cisterna y finalmente se acarrea el material sobrante (DGICGAEM, 2008).

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Total	
Excavación con máquina para zanjas	m ³	659.86	12.768	8,425.09	
Plantilla apisonada con pisón de mano	m ³	82.48	256.35	21,144.38	
Suministro y colocación de arena	m ³	329.93	127.25	41,984.28	
Cisterna (20,000l)	pza.	1.00	50,000	50,000.00	
Acarreo kilómetros subsecuentes	m ³ /km	659.86	5.943	3,921.54	
Red de drenaje local	pza.	1	315,584.53	315,584.53	
Terreno	m ²	1500	420	630,000.00	
Fuente: Elaboración propia con datos de DGICGAEM, 2008				Suma	1,071,059.82
				IVA	171,369.57
				Total	1,242,429.39

Tabla 3.5 Costo de construcción de un humedal artificial

Así mismo, se deben considerar los costos de mantenimiento; para este estudio se propone que una persona se haga cargo del humedal trabajando 6 días a la semana con un salario de \$300.00, es decir, un costo anual de mantenimiento de \$93,600.00. Es importante mencionar que esto representa una fuente de empleo para algún miembro de la comunidad, ya que como se mencionó anteriormente no es necesario personal especializado para dicha actividad. Cabe señalar que este costo puede ser cubierto por los habitantes del asentamiento, a través de una cuota mensual de \$23 por lote.

Por otro lado se pueden generar beneficios económicos que originen ahorros y/o ingresos; enseguida se analiza la posibilidad de reutilizar el agua para algunas actividades como evacuación sanitaria, riego, lavado de pisos y autos, las cuales representan el 47% del consumo de agua en el Distrito Federal (INEGI, 2005) y de esta manera disminuir la cantidad de agua potable suministrada.

El costo real de un carro tanque con capacidad de 8000 litros de agua potable es de 900 pesos, es decir, 0.1125 pesos por litro. A continuación se obtiene el costo del consumo anual de agua potable en Ocotla:

$$16,425,000 \frac{[l]}{[año]} \times 0.1125 \frac{[pesos]}{[l]} = 1,847,812.50 \frac{[pesos]}{[año]}$$

Si el 47% del agua se utiliza en las actividades mencionadas anteriormente, se tendría un ahorro en el suministro de agua potable de:

$$1,847,812.5 \frac{[pesos]}{[año]} \times 0.47 = 868,471.874 \frac{[pesos]}{[año]}$$

El uso específico que se le dé a esta agua dependerá de la instalación de la infraestructura necesaria, la cual tendría un costo aproximado de \$366,078.05. Sin embargo, los habitantes pueden disponer del agua tratada en las instalaciones del humedal sin necesidad de la red de redistribución.

Es necesario evaluar el sistema de tratamiento seleccionado con el fin de determinar si existen beneficios económicos y ambientales.

Para determinar la viabilidad del proyecto, se deben tomar en cuenta los siguientes criterios de evaluación:

Valor Actual Neto (VAN). Es la diferencia entre el valor actual de los flujos netos de efectivo y la inversión inicial. La tasa libre de riesgo es del 19.5% (BANXICO, 2010 (ver ecuación 1.1)).

$$VAN = -1,242,429.39 + \sum_{t=1}^{10} \frac{868,471.87 - 93,600}{(1 + 0.195)^t} = \$2,062,133.68$$

Este valor es positivo por lo que se recomienda la aceptación del proyecto.

Tasa Interna de Retorno (TIR). Se calcula de la siguiente forma (ecuación 1.2):

$$-1,242,429.39 + \sum_{t=1}^{10} \frac{868,471.87 - 93,600}{(1 + \%TIR)^t} = 0 ; \%TIR = 62$$

El resultado de la TIR es mayor que la tasa de descuento propuesta, lo que asegura la rentabilidad del proyecto. Cabe mencionar que aun contando el costo de la red de redistribución del agua tratada el proyecto seguiría siendo rentable. La inversión se recupera en un año cuatro meses.

3.5 Comentarios generales

Para la descarga de agua residual en Ocotla se compararon los métodos de tratamiento de lodos activados, lagunas facultativas y humedales artificiales como alternativas de solución; se seleccionó el humedal artificial debido a que remueve materia orgánica y la mayoría de los contaminantes presentes en las aguas, tiene un alta eficiencia con la cual se obtienen valores de contaminantes por debajo de los límites de las normas de descarga, además los costos de construcción, operación y mantenimiento son menores.

El resultado de la evaluación arrojó una reducción en los costos de suministro de agua potable si se utiliza el agua tratada, además existen beneficios ambientales como la conservación del manto acuífero.

De acuerdo con los datos obtenidos, el VAN es mayor que cero (\$2,062,133.68) y la TIR del 62%, por lo que se sugiere la instalación y puesta en marcha del humedal.

4 Conclusiones y recomendaciones

Ante el impacto ambiental provocado por las descargas de aguas residuales, se impone la necesidad de emplear sistemas alternos para el tratamiento y disposición final de las mismas. En este trabajo se aborda esta problemática, sugiriendo como solución la instalación de un humedal artificial que remueve materia orgánica y otros contaminantes presentes en las aguas, por debajo de los límites establecidos en las normas de descarga.

Al realizar este estudio se llegó a las siguientes conclusiones:

- Es necesario estudiar las características específicas de cada sitio para definir los criterios específicos de diseño.
- Para la instalación de humedales artificiales se requieren terrenos con las dimensiones suficientes y una leve pendiente con el fin de no requerir sistemas de bombeo.
- El sistema de tratamiento a través de humedales artificiales puede ser aplicado en asentamientos rurales, semiurbanos y urbanos donde sea necesario remover materia orgánica, nitrógeno y fósforo.
- La utilización de humedales artificiales genera beneficios ambientales ya que disminuye la contaminación ocasionada por el vertido de las aguas residuales directamente al suelo.
- En nuestro país, a través de sistemas como los humedales artificiales, se puede incentivar la reutilización del agua en diferentes actividades a un costo menor que el de otros métodos de tratamiento.
- El humedal familiar es una alternativa económica y eficiente para el tratamiento del agua residual; sin embargo, en este caso en particular se sugiere el humedal regional debido a que sólo el 6.3% de los lotes tiene el área necesaria para su construcción.
- Las dimensiones del humedal para Ocotla deben ser de largo $70.34m$, de ancho $23.45m$ y de profundidad $0.40m$.
- La ubicación propuesta del humedal es en el predio con menor altitud dentro del asentamiento.
- El valor actual neto, VAN, para el proyecto de humedales en el asentamiento de Ocotla es de \$2,062,133.68 considerando una tasa de descuento del 19.5%.
- La tasa interna de retorno resultó del 62%, por lo tanto se puede concluir que el proyecto es rentable y se sugiere su instalación.
- Aun considerando la red de distribución y el bombeo del agua tratada, el proyecto seguiría siendo rentable porque se tiene un amplio margen entre la TIR y la tasa de descuento utilizada.

A partir del análisis de las diferentes opciones existentes para el tratamiento de aguas residuales domésticas y los cálculos realizados para el sistema de humedales artificiales es posible recomendar:

- Tratar de reducir el número de asentamientos irregulares aplicando la normatividad correspondiente y cuando sea necesario regularizarlos hacer estudios ambientales muy estrictos.
- Fomentar los estudios ambientales y hacer públicos los resultados de modo que sirvan como elementos de apoyo en proyectos futuros.
- Promover la reutilización del agua para reducir el consumo de agua potable y, de esta manera, contribuir con la preservación del ambiente.
- La Universidad debe continuar realizando este tipo de estudios y proponer alternativas ambientales con el fin de beneficiar sociedad.
- La participación de ingenieros industriales en estudios ambientales es de gran utilidad, establecen relaciones costo-beneficio, con lo cual ayudan a la toma de decisiones además realizan importantes contribuciones gracias a su capacidad para analizar sistemas.

Mesografía

Baca Urbina Gabriel, *Evaluación de proyectos*, 5ª edición, México, McGraw Hill, 2001.

BANXICO, Tasas de interés representativas, México, Banco de México, enero de 2010, en línea: <http://www.banxico.org.mx/politica-monetaria-e-inflacion/estadisticas/otros-indicadores/tasas-interes-precios.html>

CAEM, *Diseño, construcción y puesta en marcha de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales para la comunidad de Santa Ana Zicatecoyan*, México, Comisión de Agua del Estado de México, 2008.

Campos Pinilla Claudia, *Indicadores de contaminación fecal en aguas*, México, abril de 2010, en línea: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/index.html#>

Chavarría Hernández Juan Carlos, *Humedales artificiales de flujo vertical: estado del arte y propuestas experimentales para la obtención de parámetros de diseño*, México, Tesis de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, 2001.

César Valdés, Enrique, *Apuntes de tratamiento de aguas residuales*, México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.

CONAGUA, *Estadísticas del Agua en México 2008, formato digital* 1ª edición, México, Comisión Nacional del Agua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Hidráulicos, 2008.

Contreras López Alfonso y Molero Meneses Mariano, *Introducción al estudio de la contaminación y su control*, 1ª edición, 2ª reimpresión, Madrid, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 1998.

Crites, Ron y Tchobanoglous, George, *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*, 1ª edición, Colombia, McGraw Hill, 2000.

De León Ibarra, Juan Francisco, *Planeación, diseño y construcciones de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en lechos de carrizo (PKA)*, México, Tesis de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.

DGIGCAEM, *Tabulador 2008*, Dirección General de Inversión y Gestión de la Comisión del Agua del Estado de México, octubre de 2009, en línea, <http://sistemas.edomex.gob.mx/srvc/srvc?forma=tram&idClave=2890>

El Financiero, *Lanza Tlalpan un programa de protección a mantos acuíferos*, México, noviembre de 2008, en línea: <http://www.elfinanciero.com.mx/ElFinanciero/Portal/cfpages/contentmgr.cfm?docId=155577&docTipo=1&orderby=docid&sortby=ASC>

Escalas Cañellas Antoni, *Tecnologías y usos de las aguas residuales en México*, Chile, Universidad de Concepción, 2006.

Hammer, Donald A., *Constructed wetlands for wastewater treatment, municipal, industrial and agricultural*, 5ª edición, Michigan, Lewis publishers, 1989.

Henry J. Glynn, Heinke Gary W., *Ingeniería ambiental*, 2ª edición, México, Prentice Hall, 1999.

Hernández Hernández Abraham, Hernández Villalobos Abraham, Hernández Suárez Alejandro, *Formulación y evaluación de proyectos de inversión*, 5ª edición, México, Thompson, 1998.

Hernández Muñoz, Aurelio, *Saneamiento y alcantarillado*, 2ª edición, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1990.

Hernández Muñoz Aurelio, *Depuración de aguas residuales*, 3ª edición, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1994.

Hernández Muñoz Aurelio, Hernández Lehmann Aurelio y Galán Martínez Pedro, *Manual de depuración Uralita*, Madrid, Editorial Paraninfo, 1995.

Howard, Guy, y Bartam, Jamie, *Domestic water quantity, service level and health*, Suiza, World Health Organization, 2003, en línea: http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/WSH03.02.pdf

INEGI, *Prontuario de información geográfica delegacional de Tlalpan*, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2005.

Jiménez B., *Construcción y arranque de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo humedal artificial de flujo horizontal*, México, Tesis de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, 1999.

Llagas Chafloque, Wilmer Alberto y Guadalupe Gómez, Enrique, *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, Perú, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Revista del Instituto de Investigaciones, 2006.

López Márquez, Luis Rafael, *Lodos residuales: estudio comparativo de dos métodos para la desinfección de lodos residuales provenientes de una planta de tratamiento de agua residual*, México, Tesis de licenciatura en Químico Farmacobiología, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.

Miranda Ríos Mónica, *Desarrollo situación actual y aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal en México*, México, Tesis de licenciatura en Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.

Morató Jordi, Subirana Anna, Gris Anna, Carneiro Alex y Pastor Rosario, *Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales*, Revista Lasallista de Investigación, enero-junio, año/vol, 3 número 001, Antioquía, Colombia, Corporación Universitaria Lasallista, 2006.

PAOT, *Asentamientos irregulares en el suelo de conservación del Distrito Federal*, México Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial, 2003, en línea: <http://www.paot.org.mx/centro/temas/suelo/docpaot/asentamientos.pdf>

PMIC, *Programa de Manejo Integral de Contaminantes, San Miguel Topilejo, Informe final*, México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2002.

PRIA, *Programa de reducción de impacto ambiental, Ocotla, Informe final*, México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.

Ramsar, *Convención sobre los humedales*, Suiza, Ramsar, octubre de 2009, en línea: http://www.ramsar.org/cda/ramsar/display/main/main.jsp?zn=ramsar&cp=1_4000_2

Sapag Chain, Nassir y Sapag Chain, Reinaldo, *Preparación y evaluación de proyectos*, 2ª edición, México, McGraw Hill, 1989.

SDE, *Tlalpan*, México, Secretaría de Desarrollo Económico, 2005, en línea: <http://www.siege.df.gob.mx/estadistico/pdf/monografias/tlp.pdf>

Seoanez Calvo, Mariano, *Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales*, 1ª edición, Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 1999a.

Seoanez Calvo, Mariano, *Aguas residuales urbanas: tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento*, 1ª edición, Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 1999b.

SEMARNAT, *Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, Diario Oficial de la Federación*, México, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, julio de 2007, en línea: [http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/PR/Leyes/28011988\(1\).pdf](http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/PR/Leyes/28011988(1).pdf)

SEMARNAT, *página de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales*, México, enero de 2010a, en línea: <http://www.semarnat.gob.mx/Pages/inicio.aspx>

SEMARNAT, *Residuos peligrosos*, México, junio de 2010b, en línea: <http://www.semarnat.gob.mx/gestionambiental/materialesyactividadesriesgosas/Pages/residuos peligrosos.aspx>

SHCP, *Guía para elaborar y presentar los análisis costo y beneficio de proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR*, México, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, noviembre de 2009, en línea: www.shcp.gob.mx/EGRESOS/ppi/proyectos.../guia_acb_ptar.pdf

Silva, Juan Pablo, *Humedales construidos*, Colombia, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, noviembre de 2009, en línea: www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/humedales.pdf

Tesillos Martínez, Carmela y Ubaldo Alvide, Ricardo Emmanuel, *Programa preliminar de diseño de humedales artificiales de flujo horizontal, para emplearse como sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas* México, Tesis de licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.

Tlalpan, *Programa delegacional de Desarrollo Urbano*, México, Tlalpan, 1997, en línea: [http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/tlalpan\[1\].pdf](http://www.sideso.df.gob.mx/documentos/progdelegacionales/tlalpan[1].pdf)

Urquiza Marín, R., Guzmán Rodríguez, S.T., Sánchez Quispe, C. Domínguez Sánchez, A. Rivas H., *Los humedales artificiales; una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales de Michoacán*, México, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2006.

USEPA, *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales humedales de flujo libre superficial*, United States Environmental Protection Agency, 2000a.

USEPA, *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales humedales de flujo subsuperficial*, United States Environmental Protection Agency, 2000b.

Weitzenfeld, Henyk, *Manual básico sobre evaluación del impacto en el ambiente y la salud de acciones proyectadas*, 2ª edición, México, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, Programa de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud, 1996.

Zambrano Pérez, Colombo Xavier y Saltos Arteaga, Xavier Enrique, *Diseño del sistema de tratamiento para la depuración de las aguas residuales domésticas de la población San Eloy en la provincia de Manabí por medio de un sistema de tratamiento natural compuesto por un humedal artificial de flujo libre*, Ecuador Tesis de Ingeniería Civil, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2008.