



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**Facultad de Estudios Superiores Zaragoza**

**Carrera: Biología**

**Costo de inversión de una planta de tratamiento de aguas residuales utilizando un humedal artificial para su reúso productivo en el Municipio de Chalco, Estado de México.**

**PROYECTO DE TESIS**

**Alumna: Yadis Maylen Regino Peralta**

[Biol.regino@gmail.com](mailto:Biol.regino@gmail.com)

---

**M. en C. Alejandro Córdova Cárdenas**

**Director de Tesis**

**Área Socioeconómica Administrativa**

Nezahualcóyotl, Estado de México



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Contenido

<b>Costo de inversión de una planta de tratamiento de aguas residuales utilizando un humedal artificial para su reúso productivo en el Municipio de Chalco, Estado de México.</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>IMPORTANCIA DEL REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES</b> .....	5
<b>Clasificación de las aguas residuales, características y composición</b> .....	7
<b>Principales tipos de tratamiento de aguas residuales</b> .....	9
<b>SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES</b> .....	12
<b>Descripción del funcionamiento de los Humedales Artificiales</b> .....	15
<b>Tipos de Humedales Artificiales</b> .....	16
<b>NORMATIVIDAD</b> .....	18
<b>Consideraciones de construcción</b> .....	20
<b>INTRODUCCIÓN AL MODELO CANVAS. SERVICIO DE DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES</b> .....	23
<b>MATERIAL Y MÉTODO</b> .....	25
<b>Caracterización de la zona de estudio</b> .....	25
<b>Propuesta del sistema de tratamiento de las aguas residuales en el Municipio de Chalco</b> .....	30
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	31
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	44
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	46

## INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales es una cuestión prioritaria a nivel mundial, ya que es importante disponer de agua de calidad y en cantidad suficiente, lo que permitirá una mejora del ambiente, la salud y la calidad de vida de las personas, sin embargo los problemas en cuanto a esta temática avanzan día con día y a mayor velocidad. Con base en lo anterior el uso de tecnologías sostenibles es indispensable para avanzar hacia una mayor cobertura mundial, desde la captación de agua, su tratamiento y el reúso. La factibilidad de llevar a cabo el reúso del agua residual tratada depende; del costo de tratamiento requerido para alcanzar la calidad deseada, la disponibilidad del agua, los usos del agua en el sitio, de programas de inversión de infraestructura de tratamiento, de la implementación de un programa de reúso del agua residual tratada, del apoyo de las autoridades y de la aceptación de la comunidad (Escalante y Moeller, 2014).

Se presentan los humedales construidos como un ejemplo de tecnología adecuada y sostenible de tratamiento para una gran variedad de aguas residuales, incluyendo un origen urbano, agrícola o industrial, entre otros debido a su alta eficiencia de remoción de contaminantes y a su bajo costo de instalación y mantenimiento (Morató, Subirana, Carneiro y Pastor, 2012).

En el presente estudio se realizara un análisis del costo económico de la construcción de un humedal artificial en contraposición con una planta de tratamiento convencional en el Municipio de Chalco, Estado de México, con la finalidad de reusar el agua tratada por el humedal y valorar la viabilidad y

beneficios de inversión en sistemas de Humedales Construidos a la vez que se analiza y se contempla la elaboración de diseños de Humedales Artificiales como un negocio redituable en términos económicos y ambientales.

## **IMPORTANCIA DEL REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES**

La descarga de aguas residuales en cursos naturales de agua (arroyos, ríos, humedales) es una práctica antigua, surgida de la necesidad de evacuar dichas aguas fuera de los núcleos urbanos. El impacto ambiental que tales descargas causan obligó a considerar que la depuración previa era imprescindible (Fernández, Beascochea, Muñoz, Curt, 2014).

Actualmente uno de los principales retos que enfrenta México es incluir al medio ambiente como uno de los elementos de la competitividad y el desarrollo económico y social. El manejo inadecuado de los recursos hídricos ha generado problemas, como la proliferación de enfermedades por la falta de agua potable o por su contaminación, bajo este contexto se considera que el agua ha pasado de ser un factor promotor de desarrollo a ser un factor limitante (Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012, 2014). Esta problemática se refleja en el deterioro de los mantos acuíferos que ha comenzado a afectar la producción, por ejemplo, del norte de México, donde se encuentra el mayor dinamismo de la economía. El Banco Mundial sostiene que el país tiene problemas críticos asociados con el agua, que incluyen la sobreexplotación y contaminación de los acuíferos de las regiones más importantes en términos de su contribución al Producto Interno Bruto (PIB). Este es un tema preocupante debido a que el agua es un recurso primordial, cuyo problema de escases limita la actividad económica del País. Desde hace muchos años estamos ejecutando un uso no sustentable del recurso hídrico, pues la cantidad de agua que utilizamos es mayor a la capacidad de recarga de los mantos acuíferos, lo que provoca una inequidad que amenaza a las siguientes

generaciones por el probable agotamiento del recurso (Soria, Salazar y Hernández. 2006)

Ante los problemas que origina una sobreexplotación permanente, el gobierno mexicano se ha interesado en estudiar cómo los sectores demandantes podrían hacer un uso más eficiente del agua, por ejemplo, dentro del campo del tratamiento de las aguas residuales se plantean un conjunto de programas y planes de implementación, cuyo objetivo está enfocado en el agua y su uso como medio de transporte de material contaminante, su tratamiento y su reúso (Ministerio del ambiente, 2009). El utilizar el agua residual tratada en actividades en las que no se requiere una calidad de agua potable, favorecerá la conservación de las fuentes del vital líquido; por su puesto el agua residual tratada para su reúso deberá cumplir con una calidad que esté en función de la actividad en la que se pretende utilizar o de la normatividad que regula su aprovechamiento y manejo. Por lo tanto tratar el agua residual hasta lograr la calidad del agua requerida según su uso tiene un costo, el cuál debe competir con la tarifa de agua potable (Escalante y Moeller, 2014).

Debido a la insuficiente infraestructura, los altos costos, la falta de mantenimiento y de personal capacitado, sólo 36% de las aguas residuales generadas reciben tratamiento, esta situación crea la necesidad de desarrollar tecnologías para su depuración y reutilización (Romero, Colín, Sánchez y Ortiz, 2009).

## **Clasificación de las aguas residuales, características y composición**

Por definición, el agua residual es aquella que procede del empleo de un agua natural, o de la red, en un uso determinado. La eliminación de las aguas residuales se conoce por vertido. Según el Real Decreto 849/1986 celebrado en España el 11 de abril de 1986, los vertidos se distinguen en urbanos, industriales, agropecuarios y contaminación difusa. De este modo, se puede hablar de aguas residuales urbanas, industriales y agropecuarias. Las primeras se subdividen en aguas domésticas y urbanas, las segundas en aguas de refrigeración directa o indirecta, aguas de proceso: lavados, transporte, etc., y aguas de drenaje potencialmente contaminadas o limpias, y, las terceras en purines y lixiviados de estercoleros (Revista Ambientum, 2002).

Según Mendoza, Montañés y Palomares (1998) los contaminantes de las aguas se clasifican en los siguientes:

- I. “Compuestos orgánicos biodegradables: Son aquellas sustancias que se oxidan en presencia de oxígeno debido a la actividad bacteriana. Como consecuencia de ello, se produce una disminución de la concentración de oxígeno disuelto en el agua, lo cual da lugar a efectos perjudiciales sobre la vida acuática y aparición de malos olores.”
- II. “Nutrientes: Son los elementos químicos esenciales para el crecimiento de los seres vivos, y se consideran contaminantes cuando sus concentraciones son tan elevadas que permiten un crecimiento excesivo de las plantas acuáticas, principalmente las algas. Este proceso se denomina Eutrofización y se debe principalmente al aumento del fósforo.”
- III. “Patógenos: Son aquellos organismos capaces de producir enfermedades por ejemplo: virus, bacterias, protozoos y helmintos.”



- IV. “Salinidad: La cantidad de sales disueltas limita las posibles aplicaciones de un agua (contenido de cloruros superior a 500 ppm).”
- V. “Metales pesados: Al, As, Be, Bi, Cd, Zn, Co, Cu, Cr, Sn, Fe, Mn, Hg, Ni, Pb, Se, Tl, Ti por mencionar algunos que son nutrientes para muchos animales y plantas, pero a partir de determinadas concentraciones son tóxicos.”
- VI. “Compuestos orgánicos minoritarios: Se trata de compuestos que se encuentran en una concentración en una concentración muy pequeña y proceden de las industrias de plásticos, carburantes, disolventes, pinturas, plaguicidas, detergentes, aditivos alimentarios, productos farmacéuticos, etc. Normalmente estos compuestos son difícilmente biodegradables o no degradables.”
- VII. “Sustancias radiactivas: Estas sustancias están relacionadas con los residuos que se producen durante todo el ciclo de producción del uranio. Sin embargo, algunos de los elementos radiactivos encontrados en las aguas son de origen natural.”
- VIII. “Contaminación térmica: Este tipo de contaminación se debe a la utilización del agua como refrigerante en numerosos procesos industriales, de forma que gran parte del agua vuelve a su origen con algunos grados más de temperatura lo que disminuye la solubilidad del oxígeno en el agua y aumenta la velocidad de las reacciones metabólicas.”
- IX. “Sedimentos: Se trata de mezclas de barro, arena, materia orgánica y diversos minerales.”

La calidad del agua residual está dada por su caracterización con base en sus parámetros físicos, químicos y biológicos, así como su flujo. Las principales características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales y las principales fuentes de contaminantes según Ramos, Sepúlveda y Villalobos (2003) son:

- i. “Propiedades Físicas: Color, Olor, Conductividad, Temperatura, sólidos, turbidez, Materia Flotante, Densidad y Aspecto. La mayoría de estas características físicas son de origen

doméstico, agua residual industrial, descomposición de residuos industriales, degradación natural de materia orgánica, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas.”

- ii. “Constituyentes químicos orgánicos: Carbohidratos, Tensoactivos, Fenoles, Proteínas, Compuestos orgánicos volátiles, Plaguicidas, Grasas animales, aceites y grasas. Estos constituyentes químicos tienen su origen en descargas domésticas, comerciales, vertidos industriales, residuos agrícolas y degradación natural de materia orgánica.”
- iii. “Inorgánicos: Alcalinidad, Cloruros, Metales pesados, Nitrógeno, pH, Fósforo y Azufre. La actividad generadora de este tipo de contaminantes suele ser por causa de residuos domésticos, industriales, algunas infiltraciones de agua subterránea, vertidos industriales y residuos agrícolas.”
- iv. “Gases: Sulfuro de Hidrógeno, Metano, Amoniaco que son principalmente producto de la descomposición de residuos domésticos y/o industriales.”
- v. “Constituyentes biológicos: Animales, Plantas, Protistas, Virus. Producot de Efluentes de plantas de tratamiento, residuos domésticos, cursos de agua abiertos.”

### **Principales tipos de tratamiento de aguas residuales**

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales son un conjunto integrado de operaciones y procesos físicos, químicos y biológicos, que se utilizan con la finalidad de depurar las aguas residuales hasta un nivel tal que permita alcanzar la calidad requerida para su disposición final, o su aprovechamiento mediante su reúso. Las aguas residuales producidas en el ámbito municipal requieren el tratamiento apropiado, previo a su reutilización o disposición final, esto para proteger el ambiente y la salud de la población mediante la mejor combinación de opciones tecnológicas, que permitan el tratamiento de las aguas contaminadas, minimizando el uso de recursos disponibles, con el mayor beneficio ambiental y al menor costo económico (Ministerio del ambiente, 2009).

La selección de los procesos de tratamiento de aguas residuales o la serie de procesos de tratamiento de un cierto número de factores, Ramalho (1996) incluye los siguientes:

- Características del agua residual: DBO, materia en suspensión, pH, productos tóxicos.
- Calidad del efluente de salida requerido.
- Coste y disponibilidad de terrenos.
- Consideración de futuras ampliaciones o la previsión de límites de calidad de vertido más estricto, que necesite el diseño de tratamientos más sofisticado en el futuro.
- Coste local del agua; p. ej. ciertos tratamientos sofisticados podrían justificarse en regiones en que el coste de agua es elevado, y estaría fuera de lugar en regiones de bajo coste de agua.

Todo tratamiento de agua residuo requiere de una etapa de pretratamiento que implica la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga bien en los receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una neutralización u homogeneización (Remalho, 1996). Entre los procesos que se encuentran en un pretratamiento se sitúan el desbaste (rejas y tamices, desarenado, desaceitado y desengrase entre algunos otros (Mendoza et al., 1998).

Los Tratamiento primarios o Deposición primaria tienen el objetivo de separar por medios físicos de los sólidos en suspensión no retirados en los pretratamiento (Mendoza et al, 1998). Entre los principales tratamiento primarios se encuentran el cribado o desbrozo, la sedimentación, la flotación y la neutralización y homogeneización, la decantación, coagulación-floculación y fangos activados (Remalho, 1996).

Remalho (1996) hace mención de la aireación prolongada (proceso de oxidación total), tratamiento de contacto-estabilización, lagunas aireadas, bolsas de estabilización de aguas residuales, filtros percoladores, biodiscos (RCB) y tratamiento anaerobio de las aguas residuales, como parte de los tratamientos secundarios los cuales como menciona Reynolds (2001), consisten en la digestión biológica que fomentan el crecimiento de microorganismos.

Finalmente el agua residual pasa por un tratamiento terciario que consiste en un tratamiento químico (por ejemplo, precipitación, desinfección). También pueden utilizarse para realzar los pasos del tratamiento primario (Reynolds, 2001). Las alternativas para las operaciones de tratamiento de aguas residuales hechas por el hombre involucran cierto número de tratamientos naturales. Los sistemas de desecho en sitio (tanques sépticos o pozos negros) ofrecen una opción viable para deshacerse de los residuos, al ser debidamente manejados. Además, el uso de lagunas de estabilización, sistemas de tratamiento de terrenos y sistemas acuáticos para el desecho de residuos son adecuados, nuevamente, al ser manejados de forma correcta. Las lagunas de estabilización son una alternativa de

bajo costo para el tratamiento de corrientes de residuos, pero requieren vastas extensiones de terreno. Las aguas de alcantarillado también pueden ser aplicadas al terreno y utilizadas como una fuente de agua para los cultivos agrícolas. Los sistemas de tratamiento acuático incluyen estanques o humedales con plantas que tienen la capacidad de tomar los contaminantes dañinos que se encuentran en las aguas negras. Estos sistemas pueden ser humedales naturales o hechos por el hombre (humedales construidos) (Reynolds, 2001). Para la depuración de aguas residuales, generalmente se consideran humedales aquellos sistemas que usan macrófitos (plantas que se ven a simple vista), en contraposición a los micrófitos (generalmente microalgas), y por lo tanto no suelen ser considerados como humedales (Cano, 2003).

### **SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES**

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales y se presentan como una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable ya que requiere poca especialización del personal para su manejo (López, Alioto, Schefer, Belleggia, Siniscalchi y Parodi, 2006). El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible la serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente (Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010).

Los estudios sobre humedales construidos para tratamiento de aguas residuales se iniciaron en la década del cincuenta en el Instituto Max Planck en Alemania- USA, fueron desarrollados en los años setenta y ochenta (Llagas y Gómez, 2006). A principios de los años ochenta la autoridad del valle de Tennessee inició un programa de investigación y asistencia técnica sobre humedales construidos para el tratamiento de una gran variedad de desechos. Actualmente existen humedales en Alemania, Austria, Suiza y Dinamarca; sin embargo esta tecnología se ha ido construyendo y evaluando en otros países como Francia, Polonia, España, Estonia, Hungría, Inglaterra, Checoslovaquia, Canadá, Egipto, China, Nicaragua, México, etc. (Reyes, Sáenz, Martínez y González, 2014). En los años noventa se vio un mayor incremento en el número de esos sistemas, como la aplicación se expandía no solo para tratamiento de agua residual municipal, sino también para agua de tormenta, industrial y residuos agrícolas (Llagas y Gómez, 2006).

Estos sistemas de tratamiento de aguas residuales consisten en una porción de terreno que se inunda a una frecuencia y duración tales que se mantiene saturado permitiendo el crecimiento de vegetación acuática (Polprasert, 1996). Por lo tanto un humedal artificial es un sistema de tratamiento de agua residual (estanque o cauce) poco profundo, construido por el hombre, en el que se han sembrado plantas acuáticas, y contado con los procesos naturales para tratar el agua residual (Llagas y Gómez, 2006). Fenoglio (2010) menciona que este tipo de sistemas se utilizan para aguas residuales de tipo doméstico, aunque también han funcionado para aguas de origen industrial.

Además de la depuración de aguas residuales, los humedales artificiales ofrecen beneficios ambientales agregados como son: mejora de la calidad ambiental, crean y restauran nichos ecológicos, generan mejoramiento paisajísticos, contribuyen en la generación de zonas de amortiguamiento de crecidas de ríos y avenidas, son fuente de agua en procesos de reutilización de aguas residuales para riego y aportan ventajas en otras actividades de carácter lúdico y económico (Arias y Brix, 2011). Así mismo crean nuevos hábitats para la vida silvestre y protege de manera indirecta la salud e intereses de la población (Rivas, Pozo, Mantilla, López, Brena, Sánchez, Sotelo y Muñoz, 2005).

Los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales:

- Aguas domésticas
- Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y mataderos entre otros.
- Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.
- Tratamiento de fangos de depuradoras convencionales, mediante deposición superficial en humedales de flujo subsuperficial donde se deshidratan y mineralizan (Delgadillo et al., 2010).

Los sistemas de humedales se describen típicamente por la posición de la superficie del agua y/o el tipo de vegetación presente. La mayoría de los humedales naturales son sistemas de flujo libre superficial en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera; estos incluyen a los fangales (principalmente con

vegetación de musgos), las zonas pantanosas (principalmente de vegetación arbórea), y las praderas inundadas (principalmente con vegetación herbácea y plantas macrófitas emergentes) (EPA, 2000).

### **Descripción del funcionamiento de los Humedales Artificiales**

Los humedales artificiales son áreas que se encuentran llenas de agua con plantas emergentes como espadañas, carrizos, juncos y enneas, que aprovechan las interacciones con los microorganismos y la atmósfera para remover la materia orgánica. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas y permite la transferencia de oxígeno. Existen dos tipos de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento del agua residual, el humedal de Flujo Superficial y los humedales de Flujo Subsuperficial (Silva, Zamora, y Darío, 2005). Los humedales construidos, generalmente se clasifican dentro del grupo de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales acuáticos. La depuración del agua ocurre por la interacción entre elementos componentes del humedal y de los fenómenos físicos, químicos y biológicos dentro del humedal, con la intervención del sol como fuente principal de energía (Arias y Brix, 2011).

Los contaminantes del agua se clasifican en tres categorías: químicos, físicos y biológicos. Los contaminantes químicos comprenden tanto productos químicos orgánicos como inorgánicos. En la tabla núm. 1 se enlistan los procesos mediante los cuales son removidos los contaminantes anteriormente citados.



Tabla núm. 1.-Principales procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen la depuración de aguas residuales en humedales (Cano, 2003).

Contaminantes	Procesos de Eliminación
Materia Orgánica	Sedimentación, Asimilación y Mineralización
Sólidos en suspensión	Floculación, Sedimentación, Filtración y Degradación
Nitrógeno	Amonificación, Volatilización de amonio, Nitrificación y Desnitrificación
Fósforo	Adsorción, Sedimentación, Precipitación química y Asimilación Vegetal
Patógenos	Sedimentación y muerte gradual, Radiación UV, Antibióticos naturales y Predación
Compuestos inorgánicos	Asimilación e Inmovilización
Metales pesados	Fijación al sedimento y Adsorción por las plantas

### Tipos de Humedales Artificiales

Son muy diversas las clasificaciones que existen en la identificación de los humedales artificiales. Arias y Brix (2011) mencionan que Vymazal (1988), sugiere una clasificación de acuerdo con las características del material vegetal predominante en los lechos así:

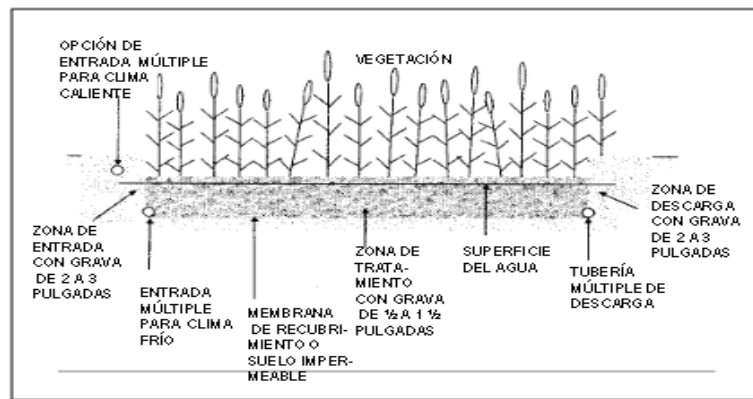
- a) Humedales construidos, basados en macrófitas flotantes. Ej.: *Eichhornia crassipes*, *lemna minor*.
- b) Humedales construidos, basados en macrófitas de hojas flotantes. Ej.: *Nymphaea alba*, *Potamogeton gramineus*.
- c) Humedales construidos, con macrófitas sumergidas. Ej.: *Littorella uniflora*, *Potamogeton crispus*.
- d) Humedales construidos, con macrófitas emergentes, Ej.: *Thypha latifolia*, *Phragmites australis*.

En la Fig. 1 se sintetiza la clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas (Delgadillo et al., 2010).



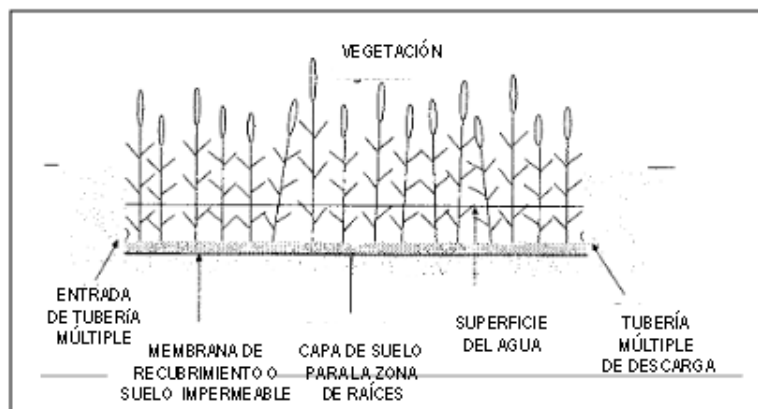
Fig. 1.- Clasificación de los sistemas de depuración de aguas residuales a base de Humedales Construidos con Macrófitas (Delgado et. al., 2010).

Existen dos tipos de humedales, los de flujo superficial y subsuperficial. Los humedales de flujo subsuperficial (HFS) se diseñan y construyen para que el agua fluya a través de la zona radicular de la vegetación y por lo tanto no presentan una superficie libre de flujo. Este sistema consiste en una excavación que contiene un lecho de material filtrante que generalmente es grava, el cual soporta el crecimiento de la vegetación emergente, está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. Un ejemplo de un humedal FS se muestra en la Figura 2 y la Figura núm. 3 muestra la imagen de un Humedal de flujo libre superficial (Varón, Ginneken y Madera, 2006) y (EPA, 2000).



Fuente: adaptado de un dibujo de S.C. Reed, 2000.

Fig. 2.- Humedal de Flujo Subsuperficial (FS).  
Fuente: EPA (2000) EPA-832-F-00-023



Fuente: Adaptado de un dibujo de S.C. Reed, 2000

Fig. 3.- Humedal de Flujo Libre Superficial (FLS) Fuente:  
EPA (2000) EPA-832-F-00F24

## NORMATIVIDAD

La calidad del agua residual tratada saliendo de un tratamiento debe cumplir estrictamente con las siguientes Normas Oficiales Mexicanas (AquaTec México, 2014):

*NOM-001-SEMARNAT-1996*, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

*NOM-002-SEMARNAT-1996*, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas.

*NOM-003-SEMARNAT-1997*, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

La tabla núm. 2, muestra el comparativo del rendimiento de un Humedal de flujo superficial y uno de flujo subsuperficial (Aquaberri, 2014).

Tabla núm. 2.- Relación de rendimiento de dos sistemas de Humedales Construidos (Aquaberri, 2014).

	Vertical	Vertical	Horizontal	Horizontal
Parámetro	Reducción (%)	Efluente (mg/l)	Reducción (%)	Efluente (mg/l)
Sólidos en Suspensión	90-95	13-25	90-95	13-25
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	90-95	15-25	85-90	15-30
DQO (mg/l)	80-90	60-120	80-90	60-120
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	60-70	9-12	20-25	22-24
N total	60-70	15-20	20-30	35-40
P total	20-30	7-8	20-30	7-8
Coliformes Fecales (UFC/100ml)	1-2 unidades log	10e5-10e6	1-2 unidades log	10e5-10e6

## **Consideraciones de construcción**

El dimensionamiento y las características físicas del humedal construido dependen, entre otros factores, de la localización de la planta, de las características del sitio, de las características de calidad del agua afluente, de la calidad del agua efluente deseada, y de las restricciones de calidad de vertido de aguas tratadas, exigida por las autoridades locales (Arias y Brix, 2011).

Los aspectos más importantes a tener en cuenta para la construcción de humedales son básicamente, la impermeabilización de la capa superficial del terreno, la selección y colocación del medio granular para el caso de los sistemas de Flujo Superficial (SFS), el establecimiento de la vegetación, y por último las estructuras de entrada y Salida (Silva, Zamora, y Darío, 2005).

El diseño de un humedal artificial debe permitir que todos los procesos implicados en la depuración y el logro del rendimiento esperado, ocurran de forma adecuada en toda la masa de agua, esto es, que el escurrimiento de ésta sea lo más uniforme posible, durante el tiempo necesario y que el tiempo de recorrido de las partículas sea similar para todas ellas (Chiva, 2004)

La forma del humedal artificial debe favorecer el escurrimiento a flujo pistón, por lo que la relación largo/ancho debe encontrarse entre 5/1 y 3/1 (Polprasert, 1996). Asimismo, la distribución del agua en la entrada del sistema debe ser lo más uniforme posible (Bécares, 2004).

El escurrimiento del agua en el humedal debe ser capaz de desarrollarse por gravedad, aprovechando el potencial de energía natural o gradiente hidráulico disponible entre la entrada y la salida del sistema (Dupoldt, Garber, Lapp, Murphy, Sayers, Takita y Webster, 2000). Polprasert (1996) recomienda una pendiente longitudinal de entre 0,5 y 1 %. Para evitar la proliferación de mosquitos en épocas cálidas y el congelamiento del agua en épocas frías, resulta más conveniente adoptar una pendiente del 1 %, que es límite superior recomendado en la bibliografía específica.

Las plantas juegan un papel fundamental en estos sistemas siendo sus principales funciones: Airear el sistema radicular y facilitar oxígeno a los microorganismos que viven en la rizosfera, absorción de nutrientes (nitrógeno y fósforo), eliminación de contaminantes asimilándolos directamente en sus tejidos, filtración de los sólidos a través del entramado que forma su sistema radicular. La selección de las especies vegetales se debe realizar de acuerdo a la adaptabilidad de las mismas al clima local, su capacidad de transportar oxígeno desde las hojas hasta la raíz, su tolerancia a concentraciones elevadas de contaminantes, su capacidad asimiladora de los mismos, su tolerancia a condiciones climáticas diversas, su resistencia a insectos y enfermedades y su facilidad de manejo (Fernández, et al., 2014).

Llagas y Gómez (2006) mencionan que las funciones de las plantas en sistemas de tratamiento acuático son las siguientes:

Raíces y/o tallos en la columna de agua: Superficie sobre la cual la bacteria crece y medio de filtración y adsorción de sólidos.

Tallos y/o hojas sobre la superficie del agua: Atenúan la luz del sol y así previenen el crecimiento de las algas. Reducen los efectos del viento en el agua, es decir; transferencia de gases entre la atmosfera y el agua. Importantes en la transferencia de gases para y desde las partes sumergidas de la planta.

Para el diseño de humedales se deben considerar los siguientes criterios (Delgadillo et al., 2010):

- 1.- Se consideran reactores biológicos.
- 2.- Se considera que el flujo a través del medio poroso es flujo pistón y en forma uniforme.
- 3.- La Ley de Darcy describe el flujo a través del medio poroso.

Para el diseño los pasos a seguirse son:

- Calculo del área necesaria.
- Profundidad del humedal.
- Pendiente.
- Sustrato.
- Relación largo-ancho

## INTRODUCCIÓN AL MODELO CANVAS. SERVICIO DE DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El modelo Canvas tiene su origen en la tesis doctoral que realiza Osterwalder (2004), y constituye un nuevo modelo de análisis de estrategia para definir modelos de negocio (Banchieri, Blasco, & Campa-Planas, 2013).

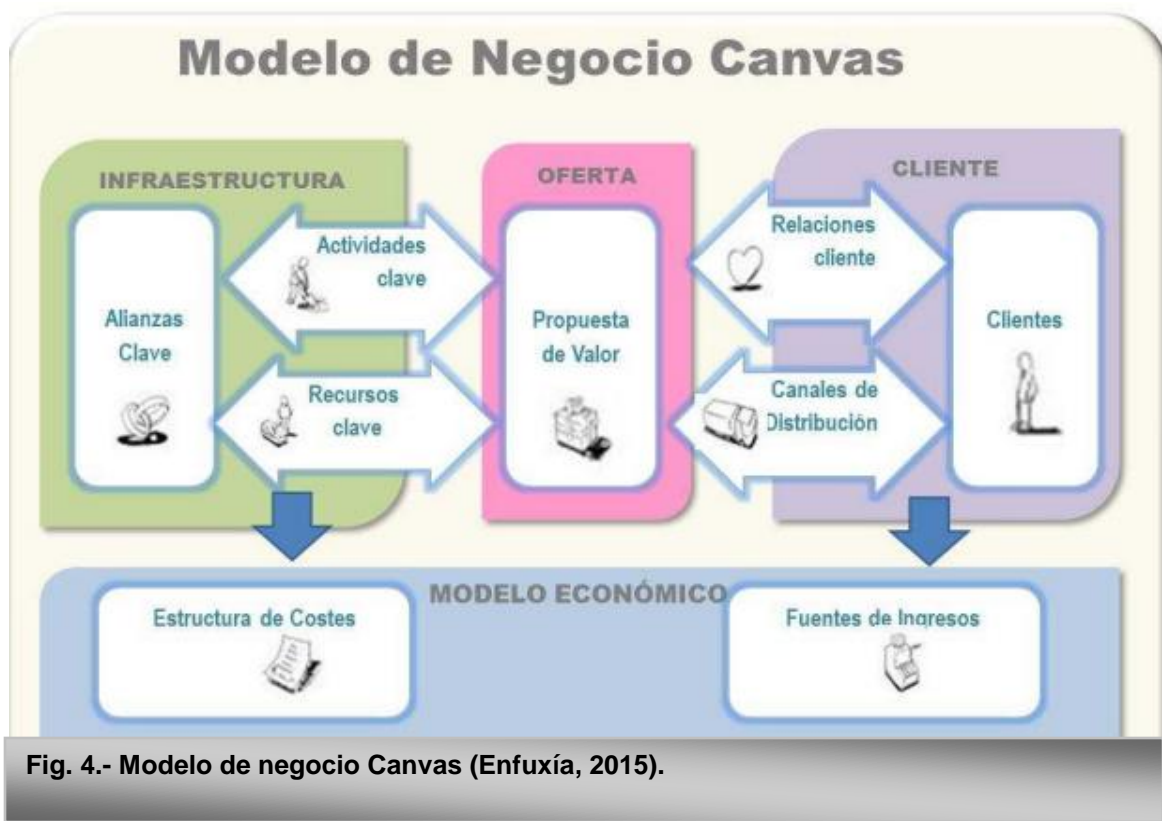


Fig. 4.- Modelo de negocio Canvas (Enfuxía, 2015).

Este modelo describe como una organización crea, distribuye y añade valor a la vez que se visualizan los aspectos claves de la empresa en nueve bloques (Enfuxía, 2015). Este modelo (Fig. 4) sostiene que tener una propuesta de valor es lo que hace especial a una empresa en el mercado. La propuesta de valor se tiene que llevar a una serie de clientes (que es lo que está ubicado a la derecha),



con los que se debe establecer una serie de relaciones. Y para llevar esa propuesta de valor a los clientes, se tiene que hacer a través de unos canales (comerciales, Internet, tiendas offline, etc.). Eso sería de puertas hacia fuera. De puertas hacia dentro (a la izquierda de la Fig. 4), se contmplan las actividades y los recursos clave, es decir, lo que obligatoriamente se tiene que hacer y lo que es crítico dentro de un modelo de negocio, y los socios clave con los que se va a trabajar. Finalmente se considera la estructura de costes y las líneas de ingresos del negocio (Escudero, 2011).

## **MATERIAL Y MÉTODO**

En el presente trabajo se utilizó el método deductivo con el objeto de partir de aspectos generales relacionados la temática de la investigación sobre los costos de inversión en los Humedales Construidos para el tratamiento de aguas residuales, para llegar a la situación específica actual del Municipio de Chalco, Estado de México.

Se realizó un estudio exploratorio para la visualización de la Construcción de Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales como un posible modelo de negocios de acuerdo con el modelo CANVAS.

La técnica de investigación fue exclusivamente de revisión sistemática e incluyó las siguientes etapas:

Recopilación y revisión de literatura relacionada con los diseños para establecer un humedal artificial, el reúso de aguas tratadas, la normatividad vigente, costos y beneficios de los sistemas de tratamiento de agua a base de humedales.

Elaboración de informe final y correcciones pertinentes en el escrito.

### **Caracterización de la zona de estudio**

A continuación se realiza una breve caracterización del Municipio de Chalco según el Plan Municipal de Desarrollo (2013-2015) y el Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2014)

El Municipio de Chalco tiene una extensión de 229.64 Km<sup>2</sup>, se localiza en la parte oriente del Estado de México, a 102 Km de la capital Toluca y a 35 Km del Distrito Federal; su cabecera municipal se denomina Chalco de Díaz Covarrubias y forma parte de la zona metropolitana del Valle de México. Los límites del Municipio son: al Norte colinda con el Municipio de Ixtapaluca; al Sur con los Municipios de Juchitepec, Temamatla, Cocotitlán y Tlalmanalco; al Este colinda con Ixtapaluca y al Oeste con el Distrito Federal y con el Municipio de Valle de Chalco (Plan de Desarrollo Municipal, 2013)

Chalco se integra por una cabecera municipal, 4 barrios, 17 colonias, 13 pueblos, 10 conjuntos urbanos, 1 zona industrial, Granjas Chalco, Bosques de Chalco I y II y Santa Cruz.

### **Orografía**

El municipio de Chalco tiene una orografía con tres características de relieve y son: la zona accidentada 33% del territorio, la cual se localiza al sur del municipio, así como los cerros de Tlapipi, el Papayo, el Pedregal de Teja, Coletto e Ixtlaltetlac. La zona semiplana que representa el 20% de la superficie ubicándose al oeste de San Martín Cuauhtlalpan y Santa María Huexoculco, dando origen a la formación de pequeños valles intermontañosos, y la zona plana que se encuentra al oeste del municipio.

## **Hidrografía**

La hidrografía del municipio se compone de dos ríos: al norte de la entidad el río de la Compañía, y al sur el río Asunción o Ameca, cabe señalar que ambas corrientes pluviales tienen un alto grado de contaminación ya que sirven como drenaje para el desalojo de desperdicios sólidos y líquidos, de basura doméstica, provocando un deterioro ambiental.

Existe el recurso hidráulico en otro aspecto, pues se cuenta con pozos profundos y corrientes de agua como las siguientes: "El Cedral", "Cajones", "El Potrero", "Telolo", "Palo Hueco" y "Santo Domingo".

## **Clima**

El clima del municipio de acuerdo a la clasificación de Köppen es Cwbg, templado subhúmedo con verano largo, lluvia invernal inferior al 95%, isotermal, y la temperatura más alta se manifiesta antes del solsticio de verano. En la región elevada hacia el este, el clima es C(E)wg, semifrío-subhúmedo, con precipitación invernal menor al 5%, el verano es largo, es isotermal y la temperatura más elevada se registra antes del solsticio de verano.

La temperatura media anual es de 15.6°C, en el verano la temperatura promedio máxima alcanza los 31°C y la mínima promedio es de 8.2°C en invierno. La temperatura mensual más elevada es en abril, mayo, junio, julio y agosto, las medias mínimas son en diciembre, enero y febrero que determinan la existencia de algunas heladas. Algunas bajas temperaturas se han registrado en el verano en algunos días de julio o agosto por la disminución de la humedad del aire,

siendo así que en el día encontramos temperaturas altas y por la noche se presentan vientos fríos. Los meses secos son: enero, febrero y marzo aunque se registran algunas lluvias extemporáneas, en mayo, junio, agosto y septiembre las cuales son abundantes.

### **Principales Ecosistemas**

En cuanto a la vegetación, en la parte plana del municipio es escasa aunque en las orillas de las carreteras de Cuautla y Mixquic existen árboles, y en los pueblos existe poca vegetación en la parte alta de follaje abierto; pinos, ciprés, ocote, cedro, encinos, sauce, jacaranda, alcanfor, trueno y colorín y en las partes medias y bajas se encuentran las especies de *pinus*: *Moctezuma*, *Rudis* y *Teocote*.

La fauna existente en el municipio es de conejos de monte, ardillas, comadreja, zorrillos, lagartijas, culebras, víboras de cascabel, ratones y ratas de campo, liebres, coyotes, algunos depredadores como la aguililla, gavilanes y zopilotes.

### **Características y uso de suelo**

La región pertenece al período mioceno-plioceno, último de la era terciaria que dio origen a la formación de la sierra volcánica teniendo como resultado que el municipio tenga rocas ígneas; también se han formado rocas sedimentarias las cuales están formadas por los arrastres del agua y el viento, con lo cual podemos decir que el suelo de Chalco está compuesto en un 70% de rocas que cubren su superficie.

El suelo del municipio presenta diferentes tipos que están determinados por el clima o las rocas y son los siguientes: andosol, cambisol, fluvisol, gleysol, solonchak y vertisol, el suelo es diverso y productivo, siendo muy fértil aunque presentan problemas para su manejo debido a su dureza.

### Mapa del sitio



La comunidad de San Lucas Amalinalco del Municipio de Chalco contempla una población de aproximadamente 319 habitantes (Inegi, 2014). La

Fig. 5 muestra el sitio disponible para la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales, el perímetro está señalado de color rojo. Dicho punto se encuentra al lado del Rio “La Compañía” que es el cauce donde se descarga el agua residual proveniente de la población de “San Lucas Amalinalco”. Así mismo se señala de color blanco el Cárcamo “San Lucas” que se encuentra al lado del perímetro destinado para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales, que se pretende será un Humedal Construido.

En la Fig. 6 se hace un acercamiento del sitio donde se puede visualizar que los terrenos aledaños al punto de estudio son terrenos que se aprovechan

para la siembra de hortalizas utilizadas para consumo humano. Esta situación es alarmante debido a que los productos cosechados son destinados para el consumo humano y son irrigados con aguas negras crudas que los mismos pobladores desvían del canal o del cárcamo aledaños.



### **Propuesta del sistema de tratamiento de las aguas residuales en el Municipio de Chalco**

El sitio que se contempla para la construcción del humedal es un predio de aproximadamente dos hectáreas que está situado cerca del Río La Compañía y se ubica al lado del cárcamo San Lucas.

La comunidad de San Lucas comprende una población de 3190 habitantes por lo que de acuerdo con los cálculos tomando en cuenta datos de con la CONAGUA (2015), se contempla un flujo promedio a producirse de 4.4 l/s, que aumenta en temporada de lluvias y disminuye en temporada de estiaje.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Modelo de negocio**

Se contempla la posibilidad de creación de una empresa dedicada al diseño, mantenimiento y construcción de Humedales Artificiales adaptados a las necesidades particulares de cada sitio de trabajo; pues un buen diseño garantiza la obtención de una buena calidad de agua tratada.

### **Análisis exploratorio. Perfilación del negocio utilizando el modelo Canvas.**

**Propuesta de valor:** El diseño de un Humedal Artificial garantizando su buen funcionamiento y alto rendimiento para el tratamiento de aguas residuales, ésta propuesta tiene beneficios de salud para la población, económicos y ecológicos ya que la inversión de construcción, operación y mantenimiento es considerablemente bajo en comparación con los costos que implican las plantas de tratamiento de aguas convencionales. No se genera un impacto visual pues puede integrarse al paisaje sin problema alguno ya que no genera malos olores. El producto obtenido es un agua residual tratada de buena calidad que cumple con las normas mexicanas que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes presentes en el agua utilizada para riego; esto según la literatura citada en el presente estudio.

En el caso particular del Municipio de Chalco, la implementación de un sistema de Humedal Artificial para el tratamiento del agua, implica un alto ahorro



económico, lo que solucionaría el problema de multas al Organismo Descentralizado de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (ODAPAS CHALCO), por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) al mismo tiempo se disminuyen los pagos por derechos de descarga en los bienes nacionales (ríos). Posteriormente el Municipio podría solicitar el apoyo que brinda la CONAGUA a los Municipios que tratan sus aguas residuales, por ejemplo, apoyos económicos para el mantenimiento de las plantas de tratamiento o para la construcción de otro sistema.

**Cliente:** Se contemplan como clientes, en primera instancia, a los Municipios del Estado de México, pues el proyecto puede ser adaptado para cada uno según sean sus características.

Aunque se pueden realizar trabajos para pequeñas y medianas empresas del sector privado que deseen tratar sus aguas residuales, en este caso los clientes principales son las pequeñas comunidades de los Municipios del Estado de México.

**Relación con el cliente:** Se puede establecer una relación frecuente con los clientes, ya que se contempla que la empresa brinde servicio de mantenimiento para los Humedales.

**Canales:** Ayudar al cliente a que tome conciencia sobre la propuesta de valor, facilitar el acceso al servicio y conservar la comunicación posterior a la realización del servicio con el cliente ayudará a la empresa, pues un cliente satisfecho es sinónimo de recomendación.

**Ingresos:** Se contempla los pagos recurrentes para que la adquisición del servicio sea más cómoda para el cliente.

Un Municipio puede solicitar apoyo a la CONAGUA cuando cuenta con el indicador de tratamiento de aguas residuales, por lo que se puede decir que el costo de inversión en la construcción de un humedal disminuye un poco más.

**Actividades Clave:** Producir una buena calidad de agua tratada, atender al cliente y solucionar sus problemas son las actividades clave que se van a realizar, posteriormente después de la construcción del humedal se contempla contos con las siguientes actividades de mantenimiento:

1.-La malla en la entrada y la salida debe ser limpiada para prevenir la obstrucción por sólidos suspendidos y grava.

2.-Monitoreo de la calidad del agua: es recomendado que se monitoree periódicamente los niveles de nutrientes y BOD para estimar la reducción e identificar los problemas potenciales.

3.-Plantas muy marchitas aún con agua suficiente, pueden sufrir de una sobrecarga de contaminantes y deben ser reemplazadas.

Ajuste de la profundidad de agua para alentar el crecimiento de raíz de planta.

**Recursos clave:** Contar con perfiles profesionales y con el conocimiento necesario para garantizar un diseño de humedales de alto rendimiento.

Utilizar material de buena calidad.

**Socios clave:** Se contempla establecer alianzas estratégicas con casas de material hidráulico y empresas relacionadas con el material necesario para la construcción de humedales.

**Estructura de costos de Construcción:** Los costos variarán dependiendo en el sitio y el tipo de materiales utilizadas. En los EEUU, el costo total de este tipo de humedales estuvieron en el promedio \$601.716 por hectárea (1998 dólares de EEUU) (Crites et al. 2006). Los artículos mayores incluidos en costos iniciales para humedales construidos son listados en la tabla núm. 3.

**Tabla núm. 3.- Artículos incluidos en los costos iniciales para humedales artificiales (Setty,**

Costos de la tierra	Investigación del sitio
Vaciado y excavación del sitio	Recubrimiento
Grava	Plantas
Estructuras de la entrada y salida	Tuberías y bombas
Barda perimetral	Costo de ingeniería
Costo de asesoría jurídica	Sueldos

A continuación se enlistan (Tabla núm. 4) los costos de y de operación y mantenimiento (O/M) para un humedal de Flujo Libre Superficial y de uno de Flujo Subsuperficial con una capacidad de 100,000 galones por día (EPA, 2000):

<b>Tabla núm. 4.- Costos de operación y mantenimiento de un humedal de flujo superficial y un humedal de flujo subsuperficial (EPA, 2000).</b>				
	<b>HUMEDAL DE FLUJO LIBRE SUPERFICIAL</b>		<b>HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL</b>	
	<b>COSTO, \$*</b>		<b>COSTO, \$*</b>	
<b>ELEMENTO</b>	<b>RECUBRIMIENTO DE SUELO NATURAL</b>	<b>RECUBRIMIENTO DE MEMBRANA PLÁSTICA</b>	<b>RECUBRIMIENTO DE SUELO NATURAL</b>	<b>RECUBRIMIENTO DE MEMBRANA PLÁSTICA</b>
Costo del terreno	\$16,000	\$16,000	\$16,000	\$16,000
Evaluación del sitio	3,600	3,600	3,600	3,600
Limpieza del sitio	6,600	6,600	6,600	6,600
Movimiento de la tierra	33,000	33,000	33,000	33,000
Recubrimiento	0	66,000	0	66,000
Suelo para siembra	10,600	10,600	142,100	142,100
Plantas	5,000	5,000	5,000	5,000
Sembrado	6,600	6,600	6,600	6,600
Estructuras de entrada y descarga	16,600	16,600	16,600	16,600
Subtotal	\$98,000	\$164,000	\$229,500	\$295,500
Costos de ingeniería, legales, etc.	\$53,800	\$95,100	\$133,000	\$171,200
Costo total de inversión	\$154,800	\$259,100	\$362,500	\$466,700
Costos de O/M	\$6,000	\$6,000	\$6,000/año	\$6,000/año

La comparación de costos de un Humedal FSL y de Flujo Subsuperficial con un Sistema Convencional de Tratamiento de Agua Residual se muestra en la Tabla núm. 5, EPA (2000).

<b>Tabla núm. 5.- Comparación de costos (EPA, 2000)</b>			
<b>ELEMENTO COSTO</b>	<b>HUMEDAL FSL</b>	<b>PROCESO</b>	
		<b>HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL</b>	<b>SBR (REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL)</b>
Costo de inversión (\$)	259,000	466,700	1,104,500
Costo O/M (\$)	6,000/año	6,000/año	106,600/año
Costo total a valor presente (El factor de valor presente es de 10.594 con base en un periodo de 20 años y 7% de interés.)	322,700	530,300	2,233,400
Costo por 100 galones de agua tratada (\$) (El caudal diario para 365 días por año por 20 años, dividido por 1000 galones)	0.44	0.73	3.06

### **Ventajas y Desventajas de un Humedal de Flujo superficial Libre y un Humedal de Flujo Subsuperficial**

Para tener conocimiento sobre las debilidades y fortalezas de la formación de una empresa dedicada al diseño de Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales, es básico contemplar las ventajas y desventajas de cada tipo de humedal que se describen en las tablas núm. 6 y núm. 7 respectivamente.

**Tabla núm. 6.- Ventajas de un humedal de flujo superficial y de un humedal de flujo subsuperficial (EPA, 2000)**

Humedal de Flujo Libre Superficial	Humedal de Flujo Subsuperficial
<b>Ventajas</b>	
Los humedales FLS proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores adiestrados.	Los humedales FS proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados.
Los humedales FLS pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento.	Los humedales FS pueden ser menos costosos de construir, y usualmente también son menos costosos para operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento diseñados para un nivel equivalente de calidad de efluente.
La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos. La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semi-cálidos.	La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos.
Los sistemas de humedales proporcionan una adición valiosa al "espacio verde" de la comunidad, e incluye la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para recreación pública.	La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semi-cálidos. La configuración de los humedales FS proporciona una mayor protección térmica que los humedales FLS.
Los sistemas de humedales FLS no producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.	Los sistemas de humedales FS no producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.
La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles puede ser también efectiva con un tiempo de retención significativamente mayor.	Los FS son muy efectivos en la remoción de la DBO, la DQO, los SST, los metales y algunos compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles es también posible pero se requiere un tiempo de retención mucho mayor.
	Los mosquitos y otros insectos vectores similares no son un problema con los humedales FS mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial de flujo se mantenga. También se elimina el riesgo de que niños y mascotas estén expuestos al agua residual parcialmente tratada.

**Tabla núm. 7.- Desventajas de un humedal de flujo superficial y de un humedal de flujo subsuperficial (EPA, 2000)**

Humedal de Flujo Libre Superficial	Humedal de Flujo Subsuperficial
<b>Desventajas</b>	
Las necesidades de terreno de los humedales FLS pueden ser grandes, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno o fósforo.	Un humedal FS requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
La remoción de DBO, DQO y nitrógeno en los humedales son procesos biológicos y son esencialmente continuos y renovables. El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.	La remoción de DBO, DQO y nitrógeno en los humedales FS es un proceso continuo renovable. El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo
En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación. Un aumento en el tiempo de retención puede compensar por la reducción en esas tasas pero el incremento en el tamaño de los humedales en climas extremadamente fríos puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico.	En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, NH <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub> . Un aumento en el tiempo de retención puede compensar por la disminución de las tasas pero el incremento en el tamaño de los humedales en climas extremadamente fríos puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico.
La mayoría del agua contenida en los humedales artificiales FLS es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco. El aumento del tamaño del humedal y, consecuentemente, el tiempo de retención puede hacerse en forma compensatoria, pero puede no ser eficiente en términos económicos. Métodos alternos de nitrificación en combinación con los humedales FLS han sido utilizados con éxito.	La mayoría del agua contenida en los humedales FS es anóxica, limitando el potencial de nitrificación del amoníaco del agua residual. El aumento del tamaño del humedal y el tiempo de retención puede hacerse como compensación, pero puede no ser eficiente en términos económicos. Métodos alternos de nitrificación en combinación con los humedales FS han sido utilizados con éxito. Los humedales FS no pueden ser diseñados para lograr una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias coliformes. Los ciclos ecológicos en estos humedales producen concentraciones naturales de esos compuestos en el efluente.
Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema.	Los sistemas de humedales FS típicamente reducen al menos un orden de magnitud el contenido de coliformes fecales. Esto no es siempre suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección subsiguiente. La desinfección con luz ultravioleta ha sido utilizada con éxito en varias aplicaciones.

<p>La población de aves en un humedal FLS puede tener efectos adversos si un aeropuerto se encuentra localizado en la vecindad.</p>	<p>Si bien los humedales FS pueden ser de menor superficie que los humedales FLS para la remoción de la mayoría de los constituyentes del agua residual, el costo mayor del medio de grava en los humedales FS puede dar como resultado costos de construcción más altos para sistemas con una capacidad mayor a 227,000 litros por día (60,000 galones por día).</p>
<p>Los humedales artificiales FLS pueden remover coliformes fecales del agua residual municipal, al menos en un orden de magnitud. Esto no siempre es suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección subsiguiente. La situación puede complicarse aun más debido a que las aves y otras especies de vida silvestre producen coliformes fecales.</p>	

### **Situación actual del Municipio de Chalco**

El Municipio de Chalco cuenta con tres plantas de tratamiento de aguas residuales (tabla núm. 8) que no se encuentran en funcionamiento debido a la falta de recurso económico para su mantenimiento y operación. Se sabe que una planta de tratamiento de aguas residuales convencional demanda un elevado costo energético y consecuentemente un alto costo económico, esto aunado a la necesidad de contar con el personal capacitado para su operación. Sin embargo es necesario implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales para cumplir con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 y en la Ley del agua para el Estado de México y los Municipio, a la vez que se contribuya a la protección del medio ambiente.



Las características de las plantas de tratamiento de aguas residuales en Chalco es la siguiente:

**Tabla núm. 8.- Caracterización de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) existentes en el Municipio de Chalco, Estado de México.**

NOMBRE DE LA PLANTA	UBICACIÓN	APORTACIÓN	TIPO DE TRATAMIENTO	CAPACIDAD INSTALADA (LPS)	PRODUCCIÓN ANUAL (M3)	COSTO OPERACIÓN MENSUAL	COSTO DE AGUA TRATADA (M3)
PORTAL VILLAS DE CHALCO	CARRETERA CHALCO-MIXQUIC S/N RANCHO VILDE	RESIDUAL DOMÉSTICA	LODOS ACTIVADOS-AEROBIA (SBR)	40	1,261,440.0	\$ 82,753.48	\$ 2.15
PASEOS DE CHALCO	C. PROLONGACIÓN SAN ISIDRO RIO AMECA	RESIDUAL DOMÉSTICA	ANAEROBIA-AEROBIA	26	788,400.0	\$ 52,853.35	\$ 2.15
VOLCANES DE CHALCO	CARRETERA CHALCO MIXQUIC S/N, RANCHO VILDE	RESIDUAL DOMÉSTICA	LODOS ACTIVADOS-ANAEROBIA	40	735,840.0	\$ 22,973.22	\$ 2.18

El nombre del cuerpo receptor de descarga es el Río Amecameca.

En la tabla núm. 9, se enlistan las actividades necesarias para la rehabilitación y mantenimiento de cada una de las tres plantas de tratamiento:

**Tabla núm. 9.- Servicios necesarios para la rehabilitación y mantenimiento de las PTAR convencionales existentes en el Municipio de Chalco, Estado de México.**

PLANTA PORTAL CHALCO	PLANTA PASEOS DE CHALCO	PLANTA VOLCANES DE CHALCO
<p><b>SISTEMA ELECTRICO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisión de cableado eléctrico.</li> <li>• Suministro de contactores</li> <li>• Revisión de tableros de control</li> <li>• Programación de arrancadores termo magnéticos</li> <li>• Reparación de luminarias</li> </ul>	<p><b>SISTEMA ELECTRICO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisión de cableado eléctrico.</li> <li>• Suministro de autotransformador</li> <li>• Revisión de tableros de control</li> <li>• Programación de arrancadores termo magnéticos</li> <li>• Reparación de luminarias</li> </ul>	<p><b>SISTEMA ELECTRICO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisión de cableado eléctrico.</li> <li>• Revisión de tableros de control.</li> <li>• Reparación de electroneveles.</li> </ul>
<p><b>EQUIPOS ELECTROMECHANICOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantenimiento de bombas sumergibles de 7.5HP.</li> <li>• Mantenimiento de sopladores de 100HP y 50HP.</li> <li>• Mantenimiento de bombas sumergibles de reactor biológico.</li> <li>• Mantenimiento de bombas horizontales con motor de 20HP.</li> <li>• Mantenimiento de difusores de membrana.</li> </ul>	<p><b>EQUIPOS ELECTROMECHANICOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantenimiento de bombas sumergibles de 15HP.</li> <li>• Mantenimiento de sopladores</li> <li>• Mantenimiento de bombas sumergibles de reactor biológico.</li> <li>• Mantenimiento de bombas sumergibles de sedimentador secundario</li> </ul>	<p><b>EQUIPOS ELECTROMECHANICOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantenimiento de bombas verticales.</li> <li>• Mantenimiento de motores</li> <li>• Mantenimiento de bombas sumergibles.</li> <li>• Mantenimiento de bombas sumergibles de sedimentador secundario</li> </ul>
<p><b>OBRA CIVIL</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reparación de rejillas.</li> <li>• Sustitución de escalera marina</li> <li>• Instalación de polipasto en sistema de rejillas.</li> </ul>	<p><b>OBRA CIVIL</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reparación de muros</li> <li>• Sustitución de escalera marina</li> <li>• Cambio de rejillas de desarenador</li> <li>• Sustitución de tapas</li> <li>• Reparación de escaleras del cárcamo de agua tratada.</li> </ul>	<p><b>OBRA CIVIL</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Suministro e instalación de canaletas</li> <li>• Cambio de rejillas.</li> <li>• Reparación de criba mecánica.</li> <li>• Reparación de escaleras del cárcamo de agua tratada.</li> </ul>
<p><b>GENERAL</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisión de difusores de membrana en el reactores aerobios.</li> <li>• Reparación de malla ciclónica.</li> <li>• Reparación de la compuerta del pozo de visita</li> <li>• Suministro de equipo de cloración.</li> </ul>	<p><b>GENERAL</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisión de difusores de membrana en el reactor aerobio.</li> <li>• Reparación de malla ciclónica.</li> <li>• Reparación de la compuerta del pozo de visita .</li> </ul>	<p><b>GENERAL</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reparación de malla ciclónica.</li> <li>• Pintura en general en tuberías de agua</li> <li>• Mantenimiento a equipo de cloración.</li> </ul>

De acuerdo con los datos anteriores, se deduce que la construcción de un Humedal Artificial para el Municipio de Chalco, es un proyecto novedoso y atractivo desde el punto de vista económico y ambiental, ya es un sistema que no implica altos costos de operación y mantenimiento y que genera bastos beneficios ecológicos que realzarían la visualización del Municipio ante algunos otros existentes en el Estado de México.

Para la ejecución del proyecto, se considera que el terreno es buscado por la Dirección de Desarrollo Urbano del Municipio. De acuerdo con los datos anteriores y considerando las ventajas de cada sistema de Humedales Construidos y tomando en cuenta las características del terreno, se sugiere que en la zona señalada se construya un Humedal de Flujo Libre Subsuperficial donde El agua a tratar atraviesa el sustrato verticalmente. La alimentación del dispositivo debe ser intermitente para que se produzcan periodos temporales de inundación que favorezcan el predominio de condiciones aerobias para lo que se puede utilizar el cárcamo San Lucas que se encuentra dentro del Terreno considerado; ya que se cuentan con las condiciones topográficamente necesarias se puede utilizar un sistema de sifón autodescargante, para evitar consumos energéticos y el empleo de equipos electromecánicos.

Gracias a la rápida infiltración del agua en el sustrato no existen largos periodos de encharcamiento, lo que reduce la probabilidad de problemas en cuanto a la proliferación de mosquitos al mismo tiempo que se posibilita el empleo

de una mayor variedad de especies vegetales confiriendo al dispositivo una mayor integración paisajística y valor estético.

De acuerdo con lo anterior y contemplando la tasa de inflación anual a partir de los datos de costos de los años anteriores ya citados en este escrito, se estiman los siguientes costos operacionales (Tabla núm. 10), donde se compara la propuesta del Humedal con una planta de tratamiento convencional existente en el Municipio:

<b>Tabla núm. 10.- Comparación de costos estimados operacionales.</b>						
PLANTA	APORTACIÓN	TIPO DE TRATAMIENTO	CAPACIDAD INSTALADA (LPS)	PRODUCCIÓN ANUAL (M3)	COSTO OPERACIÓN MENSUAL	COSTO DE AGUA TRATADA (M3)
SAN LUCAS AMALINALCO	RESIDUAL DOMÉSTICA	HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL EN CHALCO	4.4 LPS (promedio)	138,758.4	\$5,266	\$1.33
VOLCANES DE CHALCO	RESIDUAL DOMÉSTICA	LODOS ACTIVADOS-ANAEROBIA	40	735,840.0	\$ 22,973.22	\$ 2.18

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es vital incluir la cultura del ahorro del agua potable para reducir la cantidad de aguas residuales que se generan en las ciudades y por ende reducir el tamaño y complejidad de las instalaciones necesarias para su tratamiento. Cuando no se cuenta con el terreno suficiente, la opción más viable son las plantas de



**Fig. 7.- Integración paisajística de un Humedal Artificial a espacios de estancia (Aquatec, 2014)**

tratamiento convencional; sin embargo, los Humedales Construidos se pueden aprovechar en casi cualquier lugar e incluso en zonas donde aun no hay red eléctrica, no generan lodos y las especies vegetales pueden aprovecharse como materia prima (manufactura de artesanías). Aquatec México propone la introducción de Humedales Artificiales adecuándolos a lugares de reposo o jardines, ya que pueden ser utilizados en lugares como escuelas, espacios disponibles en instalaciones de empresas, asilos (Fig. 7), etc.

Entre algunos otros beneficios de los Humedales Construidos destacan los siguientes:



- Genera beneficios ambientales económicos y sociales.
- El agua tratada se puede reutilizar para riego de cultivos y/o áreas verdes.
- La tecnología de los Humedales Construidos funciona bien cuando se realiza un buen diseño y se efectúa una operación eficiente del sistema (Fig. 8). (Se obtiene una calidad de agua que cumple con la normatividad)
- Disminuyen el deterioro ecológico de la zona e incluso se puede elevar la calidad de vida de los habitantes de la comunidad que los poseen.
- Recuperan en buena medida los valores estético y ambiental tomando de la naturaleza un método que ella misma proporciona, con el que es posible preservar y mejorar la calidad del agua.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Aquaberri S. L. (2014). *Tecnologías naturales de depuración y tratamiento de aguas*. Recuperado de <http://www.aquaberri.com/>
2. AquaTec México (2014). *Reuso Aguas Residuales Tratadas*. Recuperado de <http://www.aquatecmexico.com/page13.html>
3. Arias, C. A., & Brix, H. (2011). *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. *Ciencias e Ingeniería Neogranadina*, (13), 17-24.
4. Banchieri, L. C., Blasco, M. J., & Campa-Planas, F. (2013). *Auto evaluación de la gestión parte de pequeñas empresas y microempresas: Estudio exploratorio*. Omnia Science
5. BÉCARES, E. (2004). *Función de la vegetación y procesos de diseño de humedales contruidos de flujo subsuperficial horizontal y flujo superficial*. *En: Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales contruidos*. Eds. García, J., Morató, J. y Bayona, J. pp 50 a 62.
6. Cano, A. L. (2003). *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería)*. *In Ecología, manejo y conservación de los humedales* (pp. 99- 112). Instituto de Estudios Almerienses.
7. CHIVA, J. (2004). *Hidráulica y fenómenos de transporte en humedales contruidos*. *En: Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales contruidos*. Eds. García, J, Morató, J. y Bayona, J. pp. 63 a 69.

8. Comisión Nacional del Agua (2015). *Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/>*
9. Crites, RW et al. (2006) *Natural Wastewater Treatment Systems*. Taylor & FrancisGroup.
10. Delgadillo Oscar, Camacho Alan, Pérez Luis F., Andrade Mauricio (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua.
11. Dupoldt, C., Edwards, R., Garber, L., Isaacs, B., Lapp, J., Murphy, T., Rider, G., Sayers, M., Takita, C. Y Webster, H. (2000). *A handbook of constructed wetlands*. USDA-Natural Resources Conservation Service y US Environmental Protection Agency- Region III, USA. Vol. 1. 46 pp.
12. Entuxía Consultoría de Creación de Empresas (2015). *Modelo de Negocio Canva*. Recuperado de <http://www.entuxia.com/financiacion/wp-content/uploads/MODELO-DE-NEGOCIO-CANVAS-EJEMPLO.pdf>
13. EPA (2014). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial, Septiembre de 2000*. EPA 832-F-00-024. Recuperado de [http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2003\\_07\\_10\\_mtb\\_cs\\_00\\_023.pdf](http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2003_07_10_mtb_cs_00_023.pdf)



14. EPA (2014). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de Flujo Libre Superficial. Septiembre de 2000.* EPA 832-F-00-024. Recuperado de [http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2003\\_07\\_10\\_mtb\\_cs\\_00\\_023.pdf](http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2003_07_10_mtb_cs_00_023.pdf)
15. Escalante E. Violeta e. & Moeller Chávez Gabriela E. (2014). *Panorama del reúso de agua residual tratada en México.* Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/documentosdigitales/bvsde/texcom/cd051488/escalapa.Pdf>
16. Escudero, J. (2011). Define bien tu modelo de negocio. *Emprendedores: las claves de la economía y el éxito profesional*, (171), 85-98.
17. Fenoglio L. (2000). *Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales de flujo vertical. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química.* Universidad Nacional Autónoma de México, México.
18. Fernández González Jesús, Beascochea Eduardo de Miguel, Muñoz José de Miguel & Curt Fernández de la Mora Ma. Dolores (2014). *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas.* Recuperado de [http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia\\_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%201%20a%202.pdf](http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%201%20a%202.pdf)

19. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015). *Sistema Estatal y Municipal de base de datos*. Recuperado de <http://sc.inegi.org.mx/cobdem/>
20. Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2014). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. Recuperado de <http://e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM15mexico/index.html>
21. Llagas Chafloque, W. A., & Gómez Guadalupe, E. (2006). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. *Rev. Inst. investig. Fac. minas metalcienc. geogr*, 9(17), 85-96.
22. López, N. C., Alioto, R., Schefer, J. C., Belleggia, F., Siniscalchi, A., & Parodi, E. R. (2006). *Diseño de un humedal artificial para remoción de nutrientes de un afluente del embalse paso de las piedras (Argentina)*. In *Rescatando antiguos principios para los nuevos desafíos del milenio* (pp. 1-7). AIDIS.
23. Mendoza Roca José Antonio, Montañés Sanjuan María Teresa & Palomares Gimeno Antonio Eduardo. (1998). *Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
24. Metcalf & Eddy, INC. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. Tercera edición. Volumen 2. México.
25. Ministerio del Ambiente, (2009). *Manual para Municipios Ecoeficientes*. Lima, Perú: Enotria S. A.

26. Morató, J., Subirana, A., Gris, A., Carneiro, A., & Pastor, R. (2012). *Tecnologías sustentables para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales.*
27. POLPRASERT, C. (1996). *Organic waste recycling. Technology and management.* Ed. Wiley & Sons, Inglaterra. 412 pp.
28. Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012, (2014). *Sustentabilidad Ambiental.* Recuperado de [http://www.cenidet.edu.mx/docs/pnd\\_2007\\_2012.pdf](http://www.cenidet.edu.mx/docs/pnd_2007_2012.pdf)
29. Plan de Desarrollo Municipal (2013-2015). *Diagnostico del Municipio.*
30. Ramalho R. S., (1996) *Tratamiento de Aguas Residuales.* España: Editorial Reverté.
31. Ramos Olmos Raudel, Sepúlveda Marqués Rubén & Villalobos Moreto Francisco. (2003). *El agua en el medio ambiente Muestreo y análisis.* Mexicali, Baja California: Plaza Y Valdés Editores.
32. Reyes, G. P., Sáenz, S. E., Martínez, M. C. D. P., & González, J. H. C. *Diseño Hidraulico de un Humedal Artificial a Nivel Laboratorio.*
33. Reynolds, K. A. (2001). *Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. Latinoamérica, 48-49.*
34. Revista Ambientum, (2012). *Clasificación de aguas residuales industriales.* Edición Junio, p. 1. Recuperado de [http://www.ambientum.com/revista/2002\\_22/CLSFCCNG1.asp](http://www.ambientum.com/revista/2002_22/CLSFCCNG1.asp)
35. Rivas Hernandez, A, Pozo,R.F.; Mantilla Morales,G., López Ramírez,E., Brena Zepeda, J.E, Sanchez Castañeda, L.F., Sotelo Romero, N.D Y Muñoz Peñaloza, K. (2005). *Uso de humedales, alternativa*

*ecológica y sustentable para la recuperación del lago de Pátzcuaro, México.* CONAGUA. Resúmenes p. 134.

36. Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., & Ortiz-Hernández, M. A. (2009). *Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica.* *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 157-167.
37. Setty Karen (2015). *Manual de Construcción: Humedales Construidos para el tratamiento de Aguas negras.* Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara. Recuperado de [http://www2.bren.ucsb.edu/~keller/courses/GP\\_reports/Diseno\\_Humedal\\_AguasNegras.pdf](http://www2.bren.ucsb.edu/~keller/courses/GP_reports/Diseno_Humedal_AguasNegras.pdf)
38. Silva, R., Sofía, Á., Zamora, Z., & Darío, H. (2005). *Humedales artificiales* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales).
39. Soria, E. G., Salazar, J. A. G., & Hernández, M. F. (2006). *Demanda y distribución del agua en la Comarca Lagunera, México.* *Agrociencia*, 40(2), 269-276.
40. Varón, M. P., Van Ginneken, M., & Madera, C. A. (2006). *Humedales de Flujo Subsuperficial.* *Revista Electrónica de Ingeniería en Producción Acuicola*, 2(2).