

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN UN HUMEDAL
CONSTRUIDO EN EL MUNICIPIO DE IXMIQUILPAN, ESTADO DE
HIDALGO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

PRESENTAN:

DANIEL LOVERA ALCÁNTARA
JUAN ORTIZ CANO

DIRECTOR DE TESIS: M. en C. ELISEO CANTELLANO DE ROSAS

MÉXICO D. F.

ENERO DEL 2008.



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Dedicatorias

De Daniel:

A mis padres, Olivia Patricia Alcántara Macías y Alfonso Lovera Molina, con admiración y respeto, por la herencia mas valiosa que pudiera recibir, fruto del inmenso apoyo y confianza que en mi se deposito para que los esfuerzos y sacrificios hechos no fueran en vano.

A mis hermanos, Isadora y Rodrigo; a mi tío Javier; a mis abuelitas Guadalupe y Agustina y en especial a mi sobrina Zoe, a quienes quiero mucho y que me apoyaron de una u otra manera.

A Angélica, Diana, Hanny, e Isabel, a quienes quiero con todo mi corazón, por haber compartido años maravillosos de mi vida, experiencias, consejos, sabiduría, a su apoyo incondicional, y sobre todo por confiar y creer en mi.

De Juan:

A mi esposa, hija, mama, papa y hermanos: como un testimonio de gratitud ilimitada, por que su presencia, apoyo y comprensión han sido y serán siempre el motivo más grande que me ha impulsado para lograr todas mis metas; mil gracias por su tolerancia ilimitada.

Agradecimientos

De Daniel:

A la bióloga Maricela Arteaga Mejía por sus enseñanzas, consejos, y aportaciones en el laboratorio, así como en las salidas de campo.

A nuestro director de tesis, M. en C. Eliseo Cantellano de Rosas por haber dirigido este trabajo y por su apoyo brindado.

A mi hermano Juan por su apoyo y amistad.

A todos los profesores que durante mi formación académica aportaron un granito de sabiduría.

A todos mis amigos en las diferentes etapas de mi vida que siempre estuvieron conmigo, apoyándome, motivándome para alcanzar mis metas, así como a cada una de las personas, que no están incluidas en esta lista, a las cuales quiero mucho y que directa o indirectamente tomaron parte en mi formación profesional.

De Juan:

A la maestra Marisela por su apoyo y enseñanzas, al maestro Eliseo por la sabiduría y amistad que compartió con nosotros, al maestro Carlos por su apoyo, al Subprocurador Francisco Cantón por sus consejos, a la Subprocuradora Mónica V. Alegre por su gran apoyo, a la Subdirectora Angélica por apoyo y enseñanzas, y mi hermano Daniel por su gran amistad, a todos los maestros de la carrera por todo lo que me enseñaron y a la FESZ por dejarme ser parte de sus honorables filas.

ÍNDICE

I.	Resumen.....	1
II.	Introducción.....	2
III.	Marco Teórico.....	3
III.I.	Panorama del Agua en México.....	3
III.II.	Aguas residuales, Tratamiento y Reutilización.....	7
III.III.	Humedales.....	13
III.IV.	Metales Pesados.....	18
IV.	Zona de Estudio.....	21
V.	Justificación.....	24
VI.	Hipótesis.....	24
VII.	Objetivos.....	24
VIII.	Métodos.....	24
IX.	Resultados.....	28
X.	Discusión de Resultados.....	42
XI.	Conclusiones.....	58
XII.	Recomendaciones.....	59
XIII.	Referencias.....	60

I. Resumen

Los graves problemas de escasez y contaminación del agua, aunado al costo elevado de los sistemas de tratamiento convencionales promueven el desarrollo y uso de sistemas alternativos como los humedales construidos, además de sistemas de reutilización de agua residual tratada para la producción agropecuaria. De esta manera se contribuye a la disminución de los problemas que ocasiona el vertido de aguas residuales. Los humedales eliminan diversos contaminantes y organismos patógenos. En el presente trabajo se determinó la distribución horizontal de metales pesados y la eficiencia de un humedal construido, en la calidad de agua y particularmente en metales pesados, en Julián Villagrán, Estado de Hidalgo. Se realizaron muestreos de agua durante los meses de abril, mayo, junio, agosto y octubre de 2005, así como enero y febrero de 2006. Se determinaron los metales pesados por el método espectrofotométrico de absorción atómica (cadmio, cobre, cromo, fierro, níquel, plomo y zinc) (APHA, 1992); y parámetros relacionados con la calidad del agua como Demanda Química de Oxígeno, Oxígeno Disuelto, Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica, Coliformes Totales y Coliformes Fecales, de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas NMX-AA-003-1980, NMX-AA-008-SCFI-2000, NMX-AA-012-SCFI-2001, NMX-AA-014-1980, NMX-AA-030-SCFI-2001, NMX-AA-42-1987 y NMX-AA-051-SCFI-2001. Los valores de los Metales Pesados se encuentran muy por debajo de lo que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 para uso agrícola, y en la mayoría de los casos, la calidad del agua está dentro de lo permisible por la misma norma. Los contaminantes se retienen en la parte aerobia y anaerobia del sistema, en donde interactúan con la rizosfera y entran en contacto con microorganismos y sedimentos, por lo que al pasar a los estanques piscícolas las propiedades del agua no afectan o ponen en peligro la salud humana ni la de los peces.

II. Introducción

Cualquier proceso natural o antropogénico que modifique el proceso de flujo de energía y el ciclo del agua, puede llegar a tener efectos importantes en las funciones de los ecosistemas (Ryszkowski, 2001). El movimiento del agua a través del ciclo hidrológico es el mayor de estos flujos. La cantidad de agua disponible en cada lugar depende principalmente de la precipitación y temperatura. Sin embargo, la cantidad de agua que se recibe como precipitación es variable año con año y de una región a otra del país. Los estados localizados en la zona norte ocupan cerca del 50% de la superficie del país y contribuyen con apenas poco más del 25% del agua que ingresa al país por lluvia, mientras que los estados de la zona sur, con sólo el 20.6% de la superficie nacional, reciben el 40.5% de la lluvia (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).

No sólo la escasez y la mala distribución espacial y temporal del agua imponen limitaciones a su uso, en los últimos años la contaminación se ha manifestado como otro factor restrictivo a la disponibilidad. La mayoría de los cuerpos superficiales del país reciben descargas de agua residuales sin tratamiento, ya sea de tipo doméstico, industrial, agrícola o pecuario, lo que ha ocasionado grados variables de contaminación que limitan el uso directo del agua. Los principales contaminantes presentes en el agua de los cuerpos receptores son: coliformes fecales, grasas y aceites, ortofosfatos, sólidos disueltos, detergentes y metales pesados. La contaminación que produce la industria es variada, puede producir contaminantes que tengan efectos tóxicos crónicos, aún cuando los descargue en pequeñas cantidades. Las concentraciones de cadmio, plomo, arsénico y selenio son altas en aguas provenientes de la industria metalúrgica. Los fenoles que sirven de base para fabricar medicamentos, colorantes, explosivos, herbicidas, insecticidas, detergentes, desinfectantes, y que además son auxiliares en la industria textil y del cuero, aparecen con mayor frecuencia en los monitoreos que se hacen a los ríos y lagos (Jackson *et al.*, 2001).

La contaminación difusa o no puntual, producto de los escurrimientos superficiales de las ciudades y de las áreas agrícolas, o la infiltración a los acuíferos de lixiviados de basureros o de agroquímicos agrícolas, pueden causar problemas de más difícil control que la contaminación puntual. Este es el caso de la región Valle del Mezquital que recibe el agua residual proveniente de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y es empleada en actividades productivas agropecuarias, incrementando la productividad pero generando problemas ambientales y de salud pública (Organización de Cooperación Económica y el Desarrollo, OCDE, 1998).

El establecimiento de sistemas convencionales requiere grandes inversiones que los productores y los gobiernos no pueden realizar por lo que es necesario establecer un sistema de tratamiento alternativo para las condiciones sociales y económicas de la región. Los humedales son una posible solución al problema de la contaminación de dichas aguas, es por eso que se estableció un humedal en el poblado Julián Villagrán, Municipio de Ixmiquilpan, Estado de Hidalgo. Sin embargo, se requiere evaluar las condiciones en las que funciona y particularmente determinar su eficiencia en cuanto a calidad de agua.

III. Marco Teórico

III.I. Panorama del Agua en México

Generalmente el agua se considera un recurso renovable, es decir, que puede utilizarse de manera que no afecte la disponibilidad a largo plazo del mismo recurso (Gleick, 1998). Sin embargo, varias organizaciones mundiales han señalado que la disponibilidad de agua y el acceso al agua dulce serán temas críticos a resolver durante los próximos años. Aunque el agua es muy abundante en nuestro planeta, sólo un poco más del 2.5% es dulce, y de ésta cerca de dos terceras partes no es fácilmente utilizable por encontrarse "atrapada" en glaciares y nieves perpetuas (CNA-SEMARNAT, 2005).

Los retos a enfrentar en torno a este tema tienen relación con la salud, el suministro a ciudades, la protección del ambiente, la alimentación, la industria y la energía. El principal desafío es lograr un equilibrio que permita preservar los ecosistemas acuáticos con sus valiosos servicios ambientales, a la vez que se suministra agua de buena calidad a la población. México, con una superficie de casi 2 000 000 km² y poco más de 11 000 km de litoral, presenta una gran variedad de climas y ambientes naturales, misma que afecta las distintas fases del ciclo hidrológico y establece un marcado contraste de escasez y abundancia de agua (WRI, 1999; Revenga *et al.*, 2000; PNUMA, 2004).

De acuerdo con los resultados del XII Censo General de Población y Vivienda y con base en proyecciones de la CONAPO (Consejo Nacional de la Población), hasta diciembre de 2005 México tenía una población de 103 263 388 habitantes. De esta población, el 77% habita en el medio urbano y el 23% restante se asienta en 196,350 localidades rurales, de las cuales 148 579 tienen menos de 100 habitantes. De acuerdo con los análisis de CONAPO, la tasa de crecimiento poblacional ha disminuido de 1.7% en 1995 a 1.4% en el 2000 y se estima que en el año 2030 será de sólo el 0.4% aún con esta disminución se estima que en el año 2030 México tendrá 22.7 000 000 de habitantes adicionales y que la población seguirá creciendo hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 133 000 000 en el año 2040. El crecimiento poblacional y el desarrollo económico han sido mayores en el centro, noroeste y noreste del país, precisamente en las zonas con los problemas más severos de escasez de agua, donde la disponibilidad de agua per cápita alcanza valores cercanos a los 2000 m³/año, valor considerado como peligrosamente bajo (El banco mundial y la organización de las naciones unidas consideran que una disponibilidad natural per cápita de 1000 m³/año indica una gran escasez de agua, mientras que menos de 2000 m³/año indica un nivel peligrosamente bajo en años de escasa precipitación). El sector agrícola, el cual ocupa las mayores cantidades de agua, emplea cerca del 21% de la Población Económicamente Activa (PEA) y solo genera el 2% del Producto Interno Bruto (PIB). La evolución de este sector será determinante para avanzar hacia el desarrollo sustentable en armonía con el medio ambiente y los recursos naturales (INEGI 2005).

Cuando el crecimiento urbano supera la disponibilidad del agua local o cercana se alteran los usos del agua, la empleada en riego se cambia a la industria o a las ciudades, o bien, resulta obligado importarla de otras cuencas, a distancias considerables y con altos costos económicos y a veces sociales. Esta situación impacta el proceso de desarrollo, genera conflictos y obliga a nuevas formas regionales y locales de planeación y gestión del recurso dentro del marco de desarrollo sustentable.

El agua promueve o desincentiva el crecimiento económico y el desarrollo social de una región. También afecta los patrones de vida y de cultura regionales, por lo que se le reconoce como un agente preponderante en el desarrollo de las comunidades. En este sentido, es un factor indispensable en el proceso de desarrollo regional o nacional (CNA 2005).

Regiones Hidrológicas

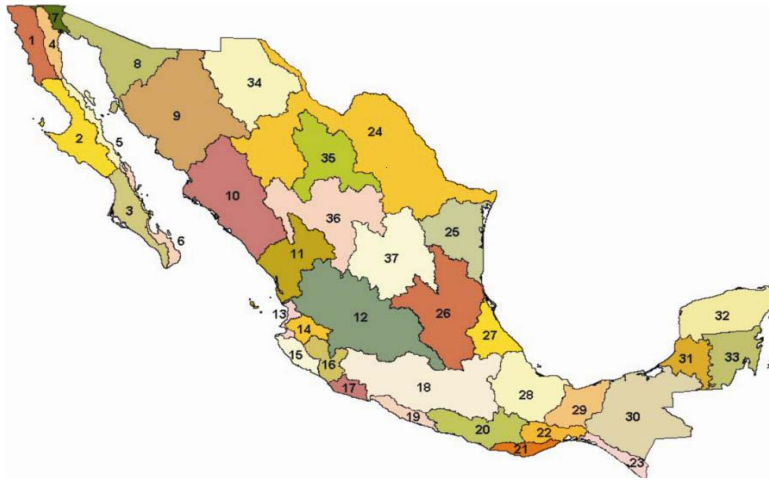


Figura 1. Las regiones hidrológicas en la república mexicana (Estadísticas del agua, CNA, 2005).

Los volúmenes de agua que escurren y se infiltran forman lo que se denomina aguas superficiales y subterráneas. Aproximadamente 412 Km³ escurren por ríos y arroyos, mientras que 50 Km³ se infiltran a los acuíferos. Lo anterior provoca insuficiencia en las aguas superficiales y subterráneas para el abastecimiento, lo que a su vez conduce a sobreexplotación de acuíferos, ocasionando salinización gradual y obligando a la transferencia entre cuencas. La contaminación, por otra parte, ha reducido el potencial de uso de varios acuíferos, ríos y cuerpos de agua. En las regiones con abundancia de agua, la actividad industrial se relaciona sobre todo con el petróleo, lo cual ha traído como consecuencia problemas críticos de contaminación. La disponibilidad de agua comúnmente se expresa en términos del volumen de líquido disponible por habitante, aunque ese volumen debería ser suficiente para satisfacer las necesidades de las actividades agropecuarias, industriales y la necesaria para el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos dulceacuícolas, y no sólo las del consumo directo por la población.

La cantidad de agua disponible varía considerablemente de un país a otro. En México se tienen registradas 37 regiones hidrológicas (fig. 1). La disponibilidad media anual de agua de cada mexicano es de 4 547 m³ y descenderá de 11 500 m³/hab en 1955 a únicamente de 3 500 m³/hab en el año 2025. El volumen de agua que se usa para el abastecimiento a los centros de población del país en el año 2004, ascendió a 9.6 Km³ y representa el 13% de las extracciones brutas de los diversos usos. Por otro lado, el incremento en la demanda de agua de las ciudades es cada vez más difícil de satisfacer y genera serios problemas de sobreexplotación. Estos se agravan en ocasiones por la ocurrencia de asentamientos diferenciales y agrietamientos del terreno, que a su vez provocan daños en la infraestructura urbana. El desarrollo a futuro de las regiones afectadas por la sobreexplotación de acuíferos es limitado y se agravará aún más de persistir la tendencia climática de los últimos años, caracterizada por condiciones extremas de sequías más severas, prolongadas y frecuentes (CNA, 2004).

Se estima que existen en el país 35 000 descargas de aguas residuales que se vierten a cuerpos receptores de propiedad nacional. La existencia de un mayor número de personas y casas, genera un volumen más alto de aguas residuales que transportan materia orgánica e inorgánica de desechos y presenta parásitos, bacterias y virus. El marco legal del sector agua en México esta regulado por la Comisión Nacional del Agua (CNA), que es una entidad desconcentrada de la SEMARNAT, es la autoridad federal responsable de administrar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, de acuerdo con las facultades que le otorga la ley de aguas nacionales, reglamentaria del artículo 27 de la constitución mexicana en el que mantiene el principio del dominio de la nación sobre las aguas, otorga seguridad jurídica a los usuarios y principia la participación particular en la administración de los recursos hídricos en el financiamiento, construcción, operación y conservación de la infraestructura hidráulica federal. El control de las descargas se realiza con la regularización mediante la expedición específica de calidad que deben reunir, descritas en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (CNA-SEMARNAT, 2005).

México tiene una precipitación promedio anual de 771 mm, la cual equivale a 1 511 km³, el 67% de la lluvia ocurre de junio a septiembre, lo que dificulta su aprovechamiento, dado su carácter torrencial en la generalidad de los casos. El 56% del territorio comprende zonas muy áridas, áridas y semiáridas que dominan el norte y áreas del centro del país. El 37% es subhúmedo y se presenta en las sierras y en las planicies costeras del pacífico, golfo de México y el noroeste de la península de Yucatán. Las zonas húmedas, con sólo el 7% del territorio, se encuentran donde se inicia el ascenso a las sierras y se deposita la humedad del golfo de México, además de una pequeña porción al extremo sur de la vertiente del pacífico. El clima y sus variaciones afectan la disponibilidad del agua e impacta también a la mayoría de las actividades humanas, como: agricultura, pesca, generación de hidroelectricidad, industria y comunicaciones. Además de la evaporación, en los suelos existe una pérdida adicional de agua por la transpiración de las plantas, resultante de sus procesos biológicos; la pérdida combinada con estos dos factores se denomina evapotranspiración. De los 1 519 km³ de agua anuales (1 519 mil millones de m³ anuales) que se reciben en el sistema hidrológico del país, se pierden por evapotranspiración 1 057 km³. El valor de este elemento del ciclo hidrológico se asocia a las posibles necesidades de riego. Las pérdidas por evapotranspiración en los cuerpos de agua, lagos y vasos de almacenamiento, tienen un efecto importante en la disponibilidad de agua. En las zonas húmedas puede ser de escasa importancia, pero en las zonas áridas estas pérdidas llegan a disminuir importantemente la capacidad de los vasos de almacenamiento y cuerpos de agua (CNA, 2005).

En México la superficie de riego ha aumentado considerablemente de forma tal que en 1926 sólo había 750 000 hectáreas, actualmente de las 6.3 000 000 de hectáreas de riego el 54% de esta superficie corresponde a 84 distritos de riego. El 46% restante a obras de pequeño riego operadas, conservadas y mantenidas por los propios productores, a las que se les denomina unidades de riego para el desarrollo rural UDERALES (Las Uderales fueron denominadas por primera vez dentro del Plan director para la modernización del distrito de riego 003 Tula, elaborado por la CNA, y hace referencia solo a la pequeña propiedad de uso agrícola, plan director del distrito de riego 003 Tula, CNA 2005).

La calidad del agua se refiere a la concentración de gases y sólidos disueltos, sólidos en suspensión, iones de hidrógeno, organismos patógenos y calor en una determinada cantidad de agua. Las sustancias químicas representan un problema para la calidad del agua dependiendo de su toxicidad intrínseca, del tiempo que persisten en el líquido sin descomponerse, de su bioacumulación, de la manera como interactúan con otros químicos, de cómo se transportan del suelo y el aire

hacia el agua y de su potencial transformación en otras formas químicas más peligrosas (Swackhamer, 2004).

La valoración del agua como de buena o mala calidad no es absoluta, depende del uso que se le de o el destino que tenga, por ello, la calidad del agua puede también ser definida simplemente como la aptitud del líquido para sostener varios usos o procesos. Todas las actividades humanas que dependen del agua, tanto consuntivas (agropecuarias, domésticas e industriales) como no consuntivas (recreación, pesca, generación de energía eléctrica, transporte acuático), requieren que la concentración de algunos de los constituyentes que determinan su calidad se encuentren dentro de ciertos límites. Cuando alguno de estos sobrepasa el límite, se afecta su aptitud para determinado uso y se considera un contaminante. A mayores volúmenes extraídos para satisfacer las necesidades de los consumidores, se incrementan también los volúmenes de aguas residuales que vulneran y degradan la calidad de las mismas fuentes de abastecimiento, ya que la mayor parte de los usos afecta la calidad del agua (Jackson, 2001).

Las aguas de desecho domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias en general no reciben tratamiento y se vierten crudas directamente en los cuerpos de agua superficiales, además, funcionan como sumideros para otras fuentes de contaminación, puntuales o difusas. Las fuentes puntuales son aquellas que abarcan poca superficie, como son los desagües industriales, municipales o de granjas, los tiraderos de desechos, las fosas sépticas, los tanques de almacenamiento con fugas, los pozos, ductos petroleros con derrames y las chimeneas. Las fuentes difusas abarcan grandes superficies, como los terrenos agrícolas y pecuarios, las minas a cielo abierto, las superficies urbanas y la precipitación de contaminantes atmosféricos (CNA, 2004).

Las sustancias volátiles que son arrastradas por el aire en forma de partículas, constituyen un componente importante de la contaminación de los cuerpos de agua. Los compuestos orgánicos persistentes, como son el mercurio y los plaguicidas, así como los nutrientes inorgánicos: el fósforo y el nitrógeno por ejemplo, destacan entre los contaminantes atmosféricos que afectan la calidad del agua por su impacto en los ecosistemas acuáticos y la salud de todo tipo de organismos, desde las algas e invertebrados hasta el ser humano. La disminución de la calidad del agua es un problema que se suma al de la creciente escasez por sobreexplotación y a la elevación de los costos para el abastecimiento, dada la necesidad de tratarla antes de que se pueda usar. En los últimos años se han implementando muchas medidas para reducir la contaminación del agua (Swackhamer, 2004).

La calidad del agua varía continuamente en el tiempo a causa de factores naturales, como los cambios estacionales en la frecuencia e intensidad de las lluvias, así como por la variación temporal en las actividades socioeconómicas que influyen sobre ella. Esto es particularmente cierto en los cuerpos acuáticos en los que hay un aporte de agua, corrientes y recambios continuos. Algunos de los indicadores se presentan en términos de promedios anuales y nacionales o regionales, que pueden diferir significativamente de los valores locales en un momento determinado. Para conocer el comportamiento de la calidad del agua en los cuerpos superficiales, en las zonas costeras y en acuíferos, se llevan a cabo mediciones a través de la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua (RNMCA) (CNA, 2005).

La distribución de la calidad de agua, refleja que más del 60% de los acuíferos contienen agua de buena calidad natural, con concentraciones menores o iguales a $1,000 \text{ mg L}^{-1}$ de sólidos totales disueltos. En general, la salinidad del agua subterránea es mayor en las zonas áridas, debido a que la precipitación pluvial es

escasa y la evaporación potencial es muy alta, lo que propicia la concentración de sales. Por el contrario, en las zonas tropicales y de mayor precipitación, la salinidad natural del agua es menor. A nivel nacional existen alrededor de 40 acuíferos que presentan cierta degradación de la calidad del agua subterránea por actividades antropogénicas o causas de origen natural (Revenga *et al.*, 2000; WRI, 2000).

III.II. Aguas Residuales, Tratamiento y Reutilización

El agua residual se puede definir, considerando las fuentes de su generación, como la combinación de los desperdicios líquidos y los desperdicios acarreados por el agua que se remueven de residencias, instituciones y establecimientos comerciales e industriales junto con agua superficial, subterránea o de tormenta que pueda estar presente (Metcalf y Eddy, 1991).

La Norma NMX-AA-003-1980 define el agua residual como "las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas". Los contaminantes en el agua residual son generalmente una complicada mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos. Se puede clasificar de acuerdo a sus componentes físicos, químicos y biológicos. Por ejemplo, el agua puede ser caracterizada por sus propiedades físicas como el color, olor, temperatura y cantidad de sólidos. A la vez, los componentes biológicos como animales, plantas y químicos, ya sean orgánicos como carbohidratos y pesticidas o inorgánicos como Ph, nitrógeno y metales pesados, dan características especiales al agua. Entre 1995 y 2003, la generación de aguas residuales de los centros urbanos se ha incrementado de 231 a 255 m³/s (fig. 2). Este crecimiento es equivalente a un 10%, pero según el comportamiento de los últimos cuatro años parece estar frenándose (CNA, 2004).

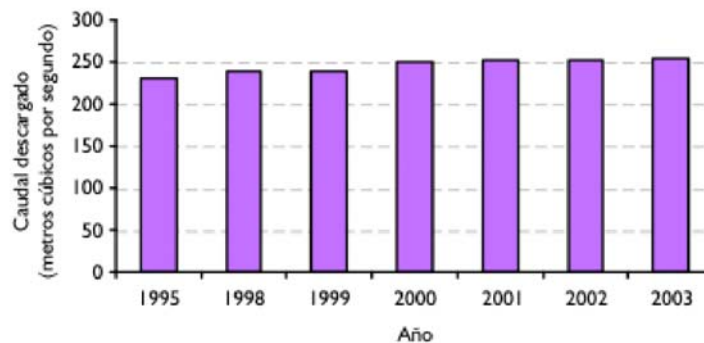


Figura 2. Crecimiento de caudales de descarga (CNA, 2004).

Los sólidos suspendidos, son aquellas partículas visibles entre la superficie y el fondo, pueden ser removidos por medios físicos o mecánicos a través de procesos de filtración o sedimentación. Los sólidos suspendidos totales (residuo del agua residual evaporada y secada a temperatura específica entre 103 y 105 °C.) son la porción de los sólidos totales retenidos en un filtro con tamaño de poro específico. Se incluyen en esta clasificación las grandes partículas que flotan, tales como las arcillas, sólidos fecales, restos de papel, madera en descomposición, partículas de comida y basura. Los sólidos suspendidos se dividen a su vez en dos grupos: sedimentables y coloidales. La parte de sólidos en suspensión que por tamaño y peso pueden sedimentar al lapso de una hora en cono Imhoff, se denominan

sedimentables. A la diferencia entre sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales se le denomina coloidales.

Su acumulación permite que los depósitos de lodos crezcan, favoreciendo las condiciones anaerobias con las descargas de aguas residuales dentro de los ambientes acuáticos. La materia orgánica biodegradable se compone principalmente de proteínas, carbohidratos y grasas. La cantidad de oxígeno necesaria para la descomposición biológica aeróbica de material nutriente es el factor clave para expresar su fuerza contaminante. Estos compuestos pueden medirse en función a la DBO₅ y la DQO. Para evaluar la contaminación del agua por materia orgánica se emplea una prueba de laboratorio la DBO₅, que refleja la cantidad de este gas que se requiere para la descomposición de los desechos. El indicador demanda bioquímica de oxígeno en aguas superficiales denota el estado de la calidad del agua. La DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto en las aguas naturales como en las aguas residuales. Si este material es descargado a las aguas sin previo tratamiento, la estabilización biológica agotará las fuentes naturales de oxígeno y se fomentarán condiciones sépticas (Metcalf *et al.* 1991).

Los organismos patógenos que se encuentran en las aguas residuales, transmiten muchas de las enfermedades infecciosas se clasifican entre las categorías de bacterias, protozoarios, helmintos y virus. Los más importantes son las bacterias: *Escherichia coli*, *Legionella pneumophila*, *Salmonella sp*; protozoarios como: *Cryptosporidium parvu* (OMS, 2004). Dentro de los nutrimentos, el nitrógeno, fósforo y carbono, son esenciales para el desarrollo de las especies vegetales y animales. Cuando son descargados en ambientes acuáticos pueden proliferar organismos no deseados. Por otro lado, cuando la concentración de estos nutrimentos es elevada y se descargan en suelos, se podrán ver afectados los mantos acuíferos (Phillips, 2004).

Entre 1998 y 2002, el caudal de descarga de aguas residuales no municipales ha crecido poco más de 11 m³/s, incremento equivalente a un 7% (fig. 3). La mayor parte de este crecimiento se dio entre 1998 y 1999, pues en los últimos años el valor de la descarga se ha mantenido casi sin cambios (CNA, 2004).

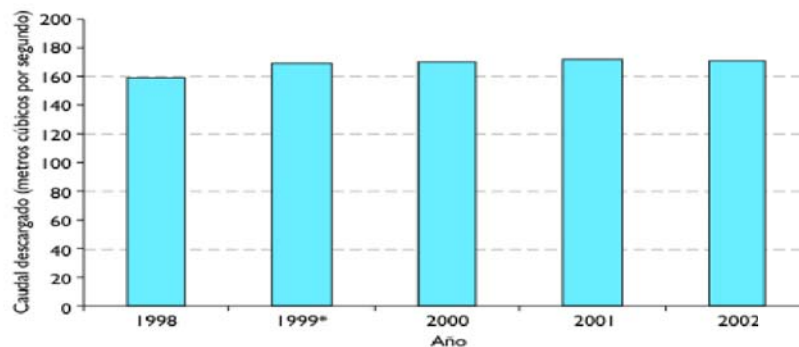


Figura 3. Crecimiento del caudal de descargas de aguas residuales CNA, 2004.

Los indicadores más utilizados para evaluar la contaminación fecal de los cuerpos de agua son la *Escherichia coli* y el grupo de las bacterias coliformes. En México se ha adoptado el de las coliformes, microorganismos que provienen principalmente de los tractos digestivos de animales de sangre caliente, por lo que su presencia está relacionada con descargas muy recientes de aguas residuales no tratadas, de tipo doméstico y pecuario (CNA, 2004).

Las bacterias coliformes fecales no suelen causar enfermedades en cantidades mínimas, sin embargo, se emplean como indicador de la calidad del agua porque su presencia se relaciona con la de varios patógenos, más difíciles de detectar, como son *Salmonella*, *Shigella* y *Vibrio*, causantes de gastroenteritis, disentería, tifoidea y cólera, así como de virus, excretados por los portadores de la enfermedad (CNA, 2004). No obstante, la afirma que *Escherichia coli* es el indicador más adecuado para contaminación fecal, dado que las otras coliformes pueden tener un origen no fecal y existir en aguas naturales no contaminadas. La ONU considera este indicador entre sus Indicadores de Desarrollo Sustentable (OMS, 2004).

El oxígeno disuelto es uno de los constituyentes que determinan la calidad de los cuerpos de agua. La presencia de este gas en cantidad suficiente es indispensable para la existencia de la vida acuática y la calidad estética de los ríos, lagos y lagunas. La ausencia de oxígeno en el agua crea condiciones sépticas y de mal sabor y olor propias de la putrefacción, que impiden prácticamente cualquier uso de este recurso. Las descargas de materia orgánica en los cuerpos de agua afectan la concentración de este constituyente, ya que los microorganismos que descomponen estos desechos consumen el oxígeno disponible (Ahmad, 2002).

La contaminación del agua por fósforo tiene como fuente principal el uso de fertilizantes agrícolas, aunque proviene también de la erosión del suelo y la materia orgánica en descomposición que descargan industrias, urbes y granjas de animales domésticos. El fósforo tiene la capacidad de fijarse fuertemente al suelo, lo que paradójicamente ha provocado que se aplique en exceso sobre los cultivos, ya que implica pocas pérdidas desde el punto de vista agrícola. No obstante, las pequeñas cantidades de este nutriente que se transportan con la erosión hídrica y eólica del suelo puede tener severos impactos en la calidad de las fuentes de agua superficiales. (Swackhamer, 2004).

Diversas investigaciones han demostrado que el fósforo suele jugar un papel más importante en la eutrofización de los ecosistemas dulceacuícolas que el nitrógeno, mientras que en los ecosistemas costeros este último resulta más crítico. El indicador fósforo total en aguas superficiales describe el estado de los cuerpos de agua superficiales del país con respecto a este elemento. Otras formas de medición del fósforo en aguas superficiales son empleadas por organizaciones como la OCDE en su core set de indicadores ambientales, la agencia ambiental europea en sus indicadores de estado y la EPA (Agencia de Protección Ambiental) en su iniciativa de indicadores ambientales (EPA, 2004).

El nitrato es un componente importante de los fertilizantes y puede originarse también de la oxidación del amonio (NH_4^+) y de otras fuentes presentes en los restos orgánicos. Su presencia en los cuerpos de agua superficiales se asocia tanto con fuentes no puntuales de contaminación (e.g., los campos de cultivo) como con fuentes puntuales (e.g., la descarga directa de aguas residuales municipales, industriales en los afluentes o los tiraderos de basura). Los compuestos que le dan origen pueden llegar a los cuerpos de agua por escurrimiento superficial o también depositarse por vía atmosférica en una cantidad significativa. Se cuenta con evidencias sólidas del efecto adverso en la salud humana del agua con elevadas concentraciones de nitrato, particularmente en los infantes menores de 3 meses. Los iones nitrato son reducidos a iones nitrito (NO_2^-) en el tracto digestivo, los cuales oxidan la hemoglobina a metahemoglobina, incapaz de transportar oxígeno al cuerpo, causando cianosis y hasta asfixia (Swackhamer, 2004).

El indicador nitrato en aguas superficiales describe el estado de contaminación de los cuerpos de agua superficiales con respecto a este compuesto. La EPA (2004), la OCDE y la Agencia Ambiental Europea cuantifican el nitrógeno en aguas

superficiales para sus indicadores ambientales. Las prácticas agropecuarias intensivas, que implican el uso excesivo de fertilizantes y plaguicidas, y la acumulación de desechos animales, municipales e industriales orgánicos en el suelo son fuentes potenciales de contaminación de los acuíferos. La presencia de ciertas sustancias en las aguas subterráneas se asocia con la infiltración de lixiviados derivados de estas fuentes. La concentración de nitrato en aguas subterráneas es un buen indicador de la presencia de otros contaminantes, dada la elevada movilidad y estabilidad de estos iones en los acuíferos (EPA, 2004).

En México se tienen reportadas 13 regiones hidrológicas administrativas, en las cuales se mencionan el tipo de tratamiento que se le dan a las aguas residuales industriales (fig. 4) (CNA, 2004). Se requieren sistemas de tratamiento de aguas residuales eficientes y que no impliquen un gran capital en infraestructura y recursos humanos, en la actualidad encontramos algunos tipos de tratamiento cuyo uso depende fundamentalmente de los límites de vertido para el afluente, tales como:

Tratamiento primario: Cribado o desbrozo, sedimentación, flotación, separación de aceites, homogeneización y neutralización.

Tratamiento secundario: Lodos activados, aireación prolongada, estabilización por contacto, laguna con aireación, laguna de estabilización, filtros biológicos y tratamientos anaerobios.

Tratamiento terciario avanzado: Microtamizado, filtración, precipitación y coagulación, adsorción, intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis, cloración y procesos de reducción de nutrimentos (Moshiri, 2000).

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES POR REGIÓN HIDROLÓGICA ADMINISTRATIVA, 2002 (agua residual generada y tratada en litros por segundo y caudal tratado en porcentaje)			
REGIÓN HIDROLÓGICA ADMINISTRATIVA	AGUA RESIDUAL GENERADA	AGUA RESIDUAL TRATADA	CAUDAL TRATADO/ GENERADO
I Península de Baja California	1 900	1 100	57.9
II Noroeste	22 300	80	0.4
III Pacífico Norte	42 690	440	1.0
IV Balsas	14 800	2 060	13.9
V Pacífico Sur	4 400	200	4.5
VI Río Bravo	4 200	3 300	78.6
VII Cuencas Centrales del Norte	2 800	820	29.3
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	11 100	2 730	24.6
IX Golfo Norte	14 290	1 400	9.8
X Golfo Centro	36 700	11 700	31.9
XI Frontera Sur	7 400	1 070	14.5
XII Península de Yucatán	2 400	100	4.2
XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala	6 300	1 170	18.6
TOTAL	171 280	26 170	15.3

Figura 4. Tratamiento de aguas residuales industriales por región hidrológica administrativa (Estadísticas del Agua en México, CNA, 2004).

En el Estado de Hidalgo se encuentran 40 plantas de tratamiento de agua residual, las cuales están divididas en tratamientos primario, secundario y terciario (fig. 5). Los tratamientos primarios se emplean para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por los límites tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario.

ESTADO	PRIMARIO		SECUNDARIO		TERCIARIO		CAUDAL TRATADO TOTAL
	PLANTAS	CAUDAL	PLANTAS	CAUDAL	PLANTAS	CAUDAL	
Hidalgo	9	9	27	926	4	14	949

Figura 5. Tratamientos llevados a cabo en el estado de Hidalgo (Estadísticas del Agua en México, CNA, 2004).

El tratamiento secundario comprende los tratamientos biológicos convencionales, y para el caso del tratamiento terciario su objetivo fundamental es la eliminación de contaminantes que no se retiraron con el tratamiento anterior (Ramalho, 1996).

La reutilización del agua se constituye como una alternativa de gran relevancia en los estados áridos y semiáridos del país, donde unos de los principales problemas es la escasez del recurso (fig. 6) (CNA, 2005).

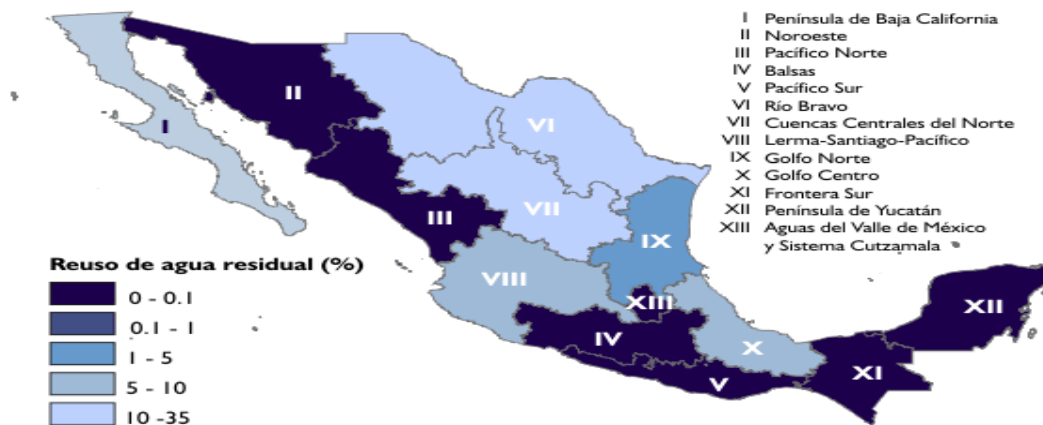


Figura 6. Regiones hidrológicas con reuso de agua residual (CNA, 2005).

Desde hace más de 100 años, la reutilización del agua residual sin tratar en riego agrícola ha sido una práctica común, uno de los distritos de riego pioneros en esta práctica es el 003 Tula en el estado de Hidalgo, donde se utiliza en el riego agrícola, el agua residual generada en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). El reuso de agua residual en la región asciende a un volumen anual de 1 933 hm³ (61.3 m³/s), el mayor del país. El 90% se emplea para el riego del Valle de Tula, un 7% se utiliza para el riego de jardines y lavado de autos principalmente en el Valle de México y el 3% restante en las industrias asentadas en ambas subregiones (fig. 7) (CNA, 2004).



Fuente: Gerencia Técnica.

Figura. 7. Grafica de reuso de agua. (Gerencia técnica, CNA, 2004).

La reutilización del agua residual (depurada) se basa, esencialmente, en aprovecharla como agua de riego y/o como agua de recarga con objeto de incrementar los recursos hídricos de un sistema acuífero. Esta reutilización puede evitar muchos de los problemas que ocasiona el vertido de estas aguas en cauces superficiales o en el mar, como son riesgos sanitarios, cambios en las características organolépticas, eutrofización, etc. Esta reutilización representa una forma de conseguir que los recursos hídricos convencionales se dediquen a cubrir aquellas demandas que exigen una calidad más elevada del agua (Bavor and Mitchell, 1994).

En la mayoría de estudios realizados sobre reutilización del agua residual se presta mayor atención a su uso como agua de riego, ya que, en comparación con otros tipos de aplicaciones, requiere en muchos casos un nivel de calidad menos estricto lo cual implica, a su vez, que el nivel de depuración que se debe alcanzar durante el tratamiento no sea tan elevado. La reutilización de aguas residuales en México es una práctica bastante extendida pero, pocas veces a sido planificada por lo que se a generado toda una problemática en relación con los efectos negativos que produce el uso de estas aguas en ríos, acuíferos, suelos, cultivos y hombre. Estos efectos negativos se han podido constatar en el Valle de León y en el Valle del Mezquital donde la reutilización de aguas residuales sin ningún tratamiento a dado lugar a la contaminación de los suelos, de las aguas subterráneas y a la aparición de enfermedades entre la población como: gastrointestinales, respiratorias y cutáneas (CNA, 2004).

Ante esta problemática, es necesario plantearse estrategias de control que permita minimizar los aspectos negativos del uso de aguas residuales para riego. Cuatro grupos humanos están expuestos a enfermedades transmisibles originadas por los sistemas de reutilización del agua con fines agrícolas: los consumidores, los trabajadores agrícolas y sus familias, los manipuladores de alimentos y los residentes en zonas vecinas. A todos ellos hay que protegerlos mediante cuatro medidas integradas:

- ❖ Tratamiento de las aguas residuales para evitar que las utilizadas en el riego contengan microorganismos patógenos, metales pesados, grandes cantidades de nutrimentos como el fósforo y el nitrógeno.
- ❖ Técnicas de aplicación de aguas residuales, para evitar en lo posible que entren en contacto con las partes comestibles de los vegetales cultivados como lo son los tubérculos.

- ❖ Selección de los cultivos, a fin de limitar el empleo de aguas residuales a las plantas que no se consumen directamente o que crecen muy por encima del terreno (tomates) o que no se comen crudas (zanahoria).
- ❖ Control de la exposición humana, aconsejando debidamente a los trabajadores agrícolas y a sus familias, los manipuladores de alimentos y los consumidores mediante programas de educación sanitaria.

III.III. Humedales

Los humedales construidos o naturales son zonas en las que el agua es el principal factor que controla el medio y la vida vegetal y animal relacionado con él. Se dan en los lugares donde la capa de agua se haya en o cerca de la superficie de la tierra o donde la tierra está cubierta de agua poco profunda. Sin embargo, recientemente se han desarrollado métodos alternativos que representan una oportunidad por sus ventajas económicas y ecológicas (Phillips, 2002).

Ofrecen una alternativa más barata y económica que otras tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. Un sistema de humedales construidos es específicamente diseñado para la mejora de la calidad de agua, en algunas partes del mundo estos sistemas fueron construidos para tratar los volúmenes bajos de aguas residuales cargadas ligeramente de materia orgánica en las poblaciones aisladas de las áreas urbanas (fig. 8) (Armstrong *et al.*, 1990).

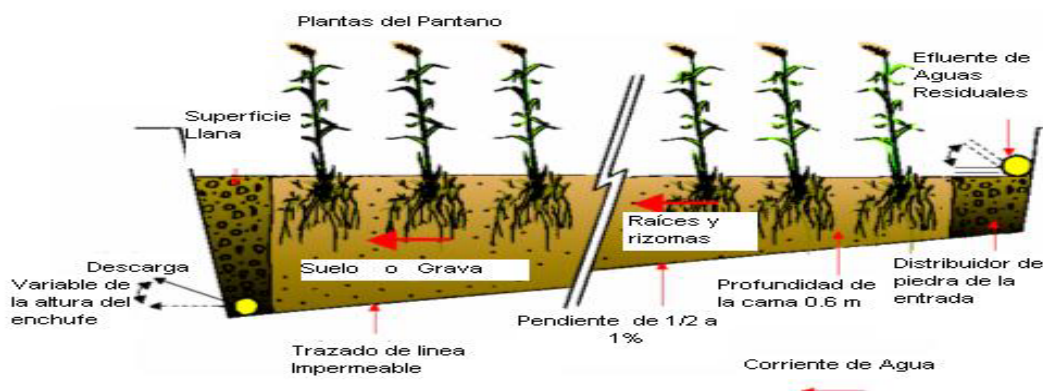


Figura 8. Típica configuración de un humedal construido (Armstrong, 1990).

Sin embargo la demanda extendida de tener una mejor calidad de agua, el reciclaje y el reuso de la misma, es actualmente lo que provoca la tendencia a utilizar este tipo de sistema de humedales construidos. La reciente preocupación por la pérdida de los humedales naturales, ha generado una necesidad por la creación de humedales construidos con el fin de emular las funciones y valores de los humedales naturales que se han destruido (Ahmad *et al.*, 2002).

Se aplican en la medida de lo posible, las condiciones o características naturales a los humedales construidos con las plantas que reproducen las condiciones físicas, químicas y biológicas del sistema de los humedales naturales. La mayoría de estos sistemas proporcionan el tratamiento terciario de las aguas residuales de algunas poblaciones de Estados Unidos y Nueva Zelanda, quitando considerablemente la concentración de nutrientes como el N y el P, además de sólidos suspendidos, sin embargo, en los países europeos este sistema normalmente se utiliza para mantener un tratamiento secundario del alcantarillado doméstico. Estos humedales construidos se han visto como una manera atractiva económicamente para

proporcionar normas altas de tratamiento de aguas residuales (Hamer, 2000). Un ejemplo es el ubicado en el poblado de Julián Villagrán, Municipio de Ixmiquilpan, Estado de Hidalgo (figs. 9, 10 y 13).



Figura 9. Alcatraces del humedal construido en Julián Villagrán, Hidalgo (2005).

Los humedales fueron construidos para uno o más de cuatro propósitos primarios:

- ❖ La creación del hábitat para compensar los humedales naturales.
- ❖ La mejora de la calidad del agua.
- ❖ Producción de comida por medio de la acuicultura.
- ❖ Abastecimiento de agua de mejor calidad para la comunidad urbana y la agricultura.

El sistema de tratamiento por medio de humedales construidos es una tecnología nueva para muchos países como México, es una alternativa mas barata para el tratamiento de aguas residuales, estéticamente es mas parecido a un jardín que una planta de tratamiento convencional, por lo que favorece al paisaje urbano. Este sistema promueve el uso sustentable de recursos locales que son un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales que resulta más amistoso con el ambiente. Pueden crearse los humedales construidos a costos más bajos que otras opciones de tratamiento, con métodos de baja tecnología, donde ninguna nueva o compleja herramienta tecnológica se necesita (Mejía-Saénz *et al.*, 2002).



Figura 10. Estanques piscícolas del humedal construido en Julián Villagrán, Hidalgo (2005).

El sistema se basa en fuentes de energía renovables como la energía solar y cinética, de las plantas del humedal y de microorganismos que son los elementos activos de los procesos de tratamiento. Puede tolerar grandes y pequeños volúmenes de agua y variado nivel de contaminación, esto incluye aguas residuales

municipales o domésticas, aguas pluviales, de escurrimiento, aguas residuales agrícolas, efluentes industriales. También puede servir como un santuario de fauna y para mantener un buen paisaje urbano, como centro de educación ambiental (Brix and Scherup, 1990).

Aun cuando los humedales fueron contruidos para emular los naturales, su función principal es la de remover contaminantes del agua residual. Un humedal natural es un sistema de pantano de agua dulce poco profundas dominadas por vegetación de tipo herbácea emergente como juncos y cañas (Mitsch and Gosselink, 1993).

Los sistemas de humedales contruidos son clasificados en general como:

- ❖ Sistema de flujo horizontal
- ❖ Sistema de flujo vertical
 - De flujo de superficie
 - De Flujo de la superficie subalterno

Se denomina sistema de flujo horizontal porque el agua residual es alimentada por una entrada con un sistema de flujos horizontales a través de la cama o a la toma de corriente. Los sistemas de flujo vertical son alimentados intermitentemente y agota verticalmente a través de una red de cañería del desagüe. Los humedales contruidos utilizan aguas del efluente que fluyen por una cubeta o cauce que apoya una variedad de vegetación, y el agua es visiblemente a poca profundidad, sobre la superficie de los materiales del substrato, que generalmente son tierras nativas y arcillas, y materiales que previenen la filtración. Se instalan los dispositivos de la entrada para aumentar el máximo el flujo del agua residual a través del humedal hacia el cauce de la salida, típicamente la profundidad de la cama es de aproximadamente 0.4 m (Koottatep *et al.*, 2002).

El papel que juegan las plantas en el humedal es primordial en el tratamiento de aguas residuales, estas proporcionan que en un área grande de su superficie se establezcan microorganismos, los componentes de las plantas estabilizan la superficie de la cama, el flujo lento hacia abajo ayuda en si al sedimento establecido y entrampado en el proceso y finalmente en la transparencia del agua, además tienen un papel vital en el levantamiento y retención de nutrimentos y previenen la eutrofización del humedal (Tanner, 2001).

La elección de las plantas se basa principalmente en función de su rápido y constante crecimiento, y de esta manera ayudar a la capacidad de absorción de contaminantes, deben tolerar condiciones anóxicas y de anegación, condiciones hipertróficas, las especies deben ser de preferencia especies locales, el uso de plantas exóticas en los sistemas del humedal contruido debe evitarse y ser mas bien una planta perenne con un ciclo de vida que tenga una o dos estaciones de crecimiento al año para asegurar el mantenimiento del sistema. Las plantas crecen de restos de hojas y tallos que caen al substrato y crean capas múltiples de componentes orgánicos, esta acumulación de las partículas es ideal para la captación de nutrimentos e iones. Los vasos en los tejidos de la planta que están libres, habilitan el oxígeno para ser transportado de las hojas a la zona de la raíz y a la tierra circundante. Esto habilita el proceso microbiano aeróbico de descomposición y la captación de contaminantes del agua (Armstrong *et al*, 1990; Brix y Schierup, 1990).

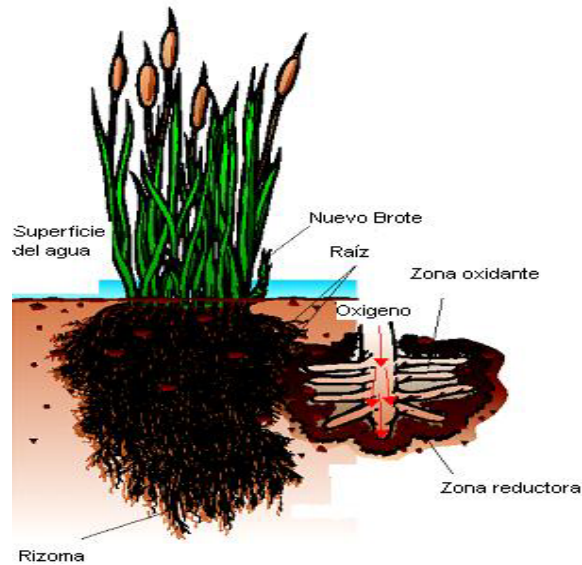


Figura 11. El sistema de raíces extensivas de plantas de pantano (Leslie *et al.*, 1999).

Phragmites spp. y *Typha Angustifolia* son ejemplos de especies que pueden captar eficazmente los nutrientes (fig. 11). Estas plantas tienen una biomasa grande sobre las hojas y debajo con los tallos subterráneos y las raíces, estas últimas propicia que se tengan macroporos que permite que el agua se filtre de mejor manera, de este modo aumenta la interacción del efluente con la planta, absorben a través de su sistema de raíz un 25% del total de compuestos orgánicos, además de la descomposición de la biomasa de la planta, proporciona una durable fuente de carbono que está disponible para las poblaciones microbianas. Esta comunidad microbiana propicia la degradación del Nitrógeno (Brix, 1990).

Especies como *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua o lirio acuático), y algunas especies de *Typha* y *Phragmites* han sido empleadas para tratar efluentes de zonas mineras que contienen elevadas concentraciones de metales pesados como cadmio, zinc, mercurio, níquel, cobre y vanadio. *Eichhornia crassipes*, autóctona de Sudamérica, es un "Jekyll y Hyde" del mundo de los humedales, pues elimina eficazmente materiales tóxicos de algunos humedales y constituye un costoso adversario en otros debido a su fenomenal índice de crecimiento. Estas plantas llevan a cabo procesos muy importantes como la nitrificación y desnitrificación por la volatilización del amoníaco (NH_3), en la interface de la raíz y el sedimento, el oxígeno atmosférico se difunde en la rizosfera a través de las hojas, tallos, rizomas y raíces de la planta del humedal, que crean una capa aeróbica (fig. 12) (Moshiri, 2000).

Muchas plantas de humedales son capaces de eliminar sustancias tóxicas procedentes de plaguicidas, descargas industriales y actividades mineras. Se ha comprobado que algunas plantas de humedales acumulan metales pesados en sus tejidos en concentraciones 100.000 veces superiores a la del agua que las rodea y son capaces de destoxificar ciertas clases de efluentes.

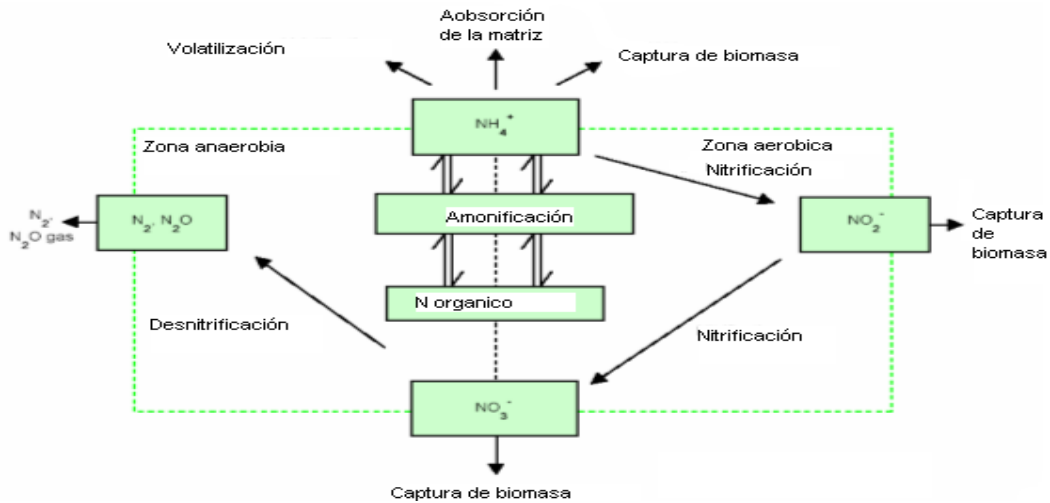


Figura 12. Transformación del nitrógeno en un humedal construido (Moshiri, 2000).

La opción del sustrato es determinada por su permeabilidad hidráulica y su capacidad de absorber nutrientes y contaminantes. Los sustratos deben proporcionar un medio conveniente para el crecimiento exitoso de la planta y debe permitir la infiltración y movimiento del agua residual. La composición química del sustrato también afectará la eficiencia del sistema. Las tierras con volumen de nutrientes bajo promoverán la captación directa de nutrientes del agua residual por las plantas (Wetzel, 2000).

En Queensland Australia se llevó a cabo un experimento con un humedal construido en donde se reporta una retención del 70% de Materia Orgánica y de organismos patógenos esto debido a la eficiencia del sistema, además de que los humedales que son construidos en climas subtropicales en las regiones costeras y en los climas áridos tienen una buena retención de nutrientes, en particular el nitrógeno (Greenway, 2005).

En Texcoco México, hay un humedal experimental en donde se reporta la retención del 80% de sólidos disueltos totales (TSS) y de nitratos de las aguas residuales domesticas, el retiro de amonio es de 50% aproximadamente y se demostró la eficiencia de la *Typha angustifolia* al quitar TSS y el nitrógeno (Belmont *et al.*, 2004).



Figura 13. Humedal construido en Julián Villagrán, Hidalgo (2005).

III.IV. Metales Pesados

Los metales pesados son aquellos elementos químicos del grupo de los metales, con densidad superior a 5 g/cm³ y masa atómica alta, como cadmio, cobre, cromo, mercurio, plomo, etc. Como contaminantes, son un grupo de sustancias que presentan toxicidad para los seres vivos, incluido el hombre. La toxicidad de los metales pesados, principalmente está dada por la contaminación de los mantos freáticos mediante la lixiviación de las emisiones al medio ambiente por parte de empresas generadoras de este tipo de residuos, esta contaminación se podría ver reflejada en daños a la salud de los humanos así como a la fauna y flora natural, en el caso de la afectación a los seres humanos, ésta se ve reflejada con la adquisición de enfermedades, principalmente cáncer y daño al sistema nervioso (fig. 14). En el caso del daño al medio ambiente, la lixiviación y la contaminación de aguas superficiales, trae consigo la bioacumulación del contaminante en especies acuáticas y terrestres y la muerte en otras, así como el daño en el suelo a los microorganismos nativos, afectando así todo el ecosistema (Hernández-Muñoz, 1992).

CONTAMINANTE	TIPO DE INDUSTRIA
Cadmio	Lodos de baterías
Cobre	Arena de fundición
Cromo	Plantas eléctricas
Fierro	Metalúrgica
Níquel	Lodos de acabados metálicos
Plomo	Lodos de baterías
Zinc	Lodos de baterías

Figura 14. Tipos de industria que contribuyen con la contaminación de metales pesados.

Los compuestos de plomo son tóxicos y es posible que exista envenenamiento tanto por exposición prolongada como por el uso inadecuado del material. En cuestión de envenenamiento el polvo y el vapor son los vectores principales aunque también el envenenamiento puede llevarse a cabo mediante la absorción a través de la piel en el caso de compuestos organoplúmbicos (Means, 2000).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el plomo es uno de los cuatro metales con mayor efecto dañino sobre la salud humana. Es posible que ingrese al cuerpo humano por comida en un 65% de las veces, mediante fruta, vegetales, carnes, granos, mariscos, refrescos y vino; por agua y aire. También el humo de cigarro puede contener plomo en cantidades pequeñas (CNA, 2005).

El plomo no otorga ningún beneficio esencial en el cuerpo humano, por el contrario, causa daños como: perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia, incremento en la presión sanguínea, daño a los riñones, abortos, perturbación del sistema nervioso, daño al cerebro, daño a la fertilidad del hombre actuando a nivel espermático, disminución de habilidades de aprendizaje en el niño y alteración en el comportamiento de los niños (OMS, 2004).

Los niveles de plomo en la sangre oscilan entre los 15 y 40 µg/dl de sangre. La OMS considera como límite aceptable 40, inaceptable de 41 a 60, y peligroso cuando rebasan los 60 µg/dl de sangre. El promedio aceptable es de 20 µg/dl de sangre. Análisis químicos han revelado que entre los adultos, alrededor del 95% del plomo en el cuerpo se almacena en los huesos; este porcentaje es de aproximadamente 70% en los niños. También es encontrado en el ambiente regularmente como resultado de las actividades humanas, tal como la gasolina que genera después de su combustión la aparición de cloruros, bromuros u óxidos de plomo. Estas sales, si son grandes, se precipitan en el suelo o la superficie de las

aguas y si son chicas, viajarán a través del aire y permanecerán en la atmósfera y cierta cantidad caerá con la lluvia. Por todas estas características la EPA limita el plomo en aire en 1.5 microgramos por metro cúbico y en agua 15 microgramos por litro, en cuanto a la legislación mexicana, en base a la NOM-001-SEMARNAT-1996, el límite máximo permisible en aguas residuales es de 0.5 mgL^{-1} (OMS, 2004).

Las rocas y el suelo tienen cadmio en pequeñas cantidades. Este metal es extraído de la producción de otros metales como el zinc, el plomo y el cobre. El reciclado también es una fuente importante de producción, se obtiene por método hidrometalúrgico a partir de polvos arrastrados por los gases de tostación de los sulfuros de los elementos mencionados, se concentra de un 7 a un 10% de cadmio y se lixivian en un medio sulfúrico, la adición de polvo de cinc provoca la precipitación del cadmio metálico que se separa del resto por evaporación o destilación a unos $400 \text{ }^\circ\text{C}$. No se oxida fácilmente y tiene muchas aplicaciones como baterías, pigmentos, capas metálicas y plásticos.

Después de que el cadmio es usado entra en el ambiente principalmente por el suelo ya que es encontrado en estiércoles y pesticidas. El humano lo adquiere principalmente a través de los alimentos, aunque cuando la gente fuma se expone a niveles altos, ya que este humo transporta el cadmio a los pulmones y después a la sangre que se encargara de distribuirlo a todo el cuerpo; primero lo lleva al hígado, donde se forman complejos que son transportados a los riñones donde daña el mecanismo de filtración por lo que lleva mucho tiempo antes de que el cadmio acumulado en los riñones sea excretado y otros efectos en la salud provocados por su presencia pueden ser: diarreas, dolor de estómago y vómitos severos, fracturas de huesos, fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad, daño al sistema nervioso central, daño del sistema inmune, desordenes psicológicos, posibles daños al ADN y desarrollo de cáncer (OMS, 2004).

Aproximadamente se liberan al ambiente de forma natural 25,000 toneladas al año en todo el mundo. La mitad de este cadmio se liberado en los ríos a través de la descomposición de rocas, así como fuegos forestales y volcanes. El resto es liberado por actividades humanas. Las aguas residuales con cadmio terminan en los suelos, esta agua proviene de la producción de zinc, minerales de fosfato y bioindustrias del estiércol (SEMARNAT, 2005).

El cadmio de las corrientes residuales puede también ingresar en el aire a través de la quema de residuos urbanos y de la quema de combustibles fósiles. La respiración de altos niveles de cadmio daña seriamente los pulmones y puede causar la muerte. Debido a las regulaciones sólo una pequeña cantidad de cadmio entra en el agua a través del vertido de aguas residuales de casas o industrias, otra fuente importante de emisión de cadmio es la producción de fertilizantes fosfatados artificiales. Parte del cadmio terminará en el suelo después de que el fertilizante es aplicado en las granjas y el resto del cadmio terminará en las aguas superficiales cuando los residuos del fertilizante son vertidos por las compañías productoras. En ecosistemas acuáticos el cadmio puede bioacumularse en mejillones, ostras, langostas y peces. La susceptibilidad al cadmio puede variar ampliamente entre organismos acuáticos, por lo que los organismos de agua salada son más resistentes al envenenamiento por este elemento que los organismos de agua dulce (Means and Hinche, 2000). La EPA ha fijado un límite de porciones de cadmio por mil millones de porciones de agua potable (5 ppm). La EPA no permite cadmio en los pesticidas. La industria textil limita la cantidad de cadmio en colorantes a 15 porciones por millón (15 ppm) (EPA, 2004).

El níquel está presente en la naturaleza en niveles pequeños, se utiliza en muchos productos metálicos como la joyería. En los alimentos se encuentra en pequeñas cantidades, también se encuentra en detergentes. Los fumadores tienen un alto

grado de exposición a este metal. En pequeñas cantidades es esencial pero cuando las concentraciones son muy altas se tienen consecuencias como posibilidades de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata, enfermedades y mareos después de la exposición al gas de níquel, embolia de pulmón, fallos respiratorios, defectos genéticos, asma y bronquitis crónica, desordenes del corazón (Hernández-Muñoz, 1992).

El níquel se deposita en el suelo o cae después de reaccionar con las gotas de lluvia, para ser eliminado por el aire es necesario un periodo de tiempo muy largo. Puede terminar también en la superficie del agua cuando es parte de las aguas residuales. La mayor parte de todos los compuestos del níquel que son liberados al ambiente se absorberán por los sedimentos o partículas del suelo y llegarán a inmovilizarse. Las altas concentraciones en suelos arenosos provocan daño en las plantas y en aguas superficiales puede ocasionar la disminución del rango de crecimiento de las algas, los microorganismos pueden sufrir también una disminución del crecimiento debido a la presencia de níquel, aunque también pueden desarrollar resistencia (Means and Hinche, 2000).

La gente puede estar expuesta al cromo al respirarlo, comerlo o beberlo y a través del contacto con la piel con cromo o con compuestos del mismo. En el agua y aire el nivel de cromo es bajo. En agua para beber el nivel de cromo es usualmente bajo como en el agua de pozo, pero el agua de pozo contaminada puede contener cromo hexavalente, el cual representa un grave peligro. El cromo III es un elemento esencial para organismos que puede interferir en el metabolismo del azúcar y causar problemas de corazón cuando la dosis es muy baja puede causar trastornos metabólicos, condiciones del corazón y diabetes. Es mayormente tóxico para los organismos ya que puede alterar el material genético. La mayor parte del cromo es ingerido por comida que contiene cromo III como vegetales, frutas, carnes, levaduras y granos, en exceso puede causar erupciones cutáneas.

El cromo VI es un peligro mayormente para las personas que trabajan en la industria del acero y textil. La gente que fuma tabaco también puede tener un alto grado de exposición al cromo. Es conocido porque causa varios efectos sobre la salud. Si es un compuesto en los productos de la piel puede ocasionar reacciones alérgicas como erupciones cutáneas. Cuando el cromo VI se respira puede irritar la nariz y causar sangrado. Aunque puede causar otros problemas: malestar estomacal y úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño a los riñones e hígado, alteración del material genético, cáncer de pulmón y muerte (OMS, 2004).

Cuando la cantidad de cromo en el suelo aumenta, la concentración en los cultivos también aumenta. La acidificación del suelo puede también influir en la captación de cromo por cultivos. Las plantas usualmente absorben el elemento en ciertos niveles ya que si exceden pueden ocurrir efectos negativos. En los animales el cromo puede causar problemas respiratorios, puede contraer enfermedades (Means and Hinche, 2000).

La remoción de metales pesados divalentes en humedales construidos son reportados en un intervalos de 50 a 95 %. Los resultados preliminares en humedales construidos indican que los metales pesados están dentro del intervalo de hasta 95 %, determinado por Copper (Mays y Edwards, 2001; Mitsch y Gosselink, 1993).

IV. Zona de Estudio

El agua residual, una vez que sale de la cuenca, se vierte en el río Tula (en el estado de Hidalgo), de ahí pasa al río Moctezuma (en San Luis Potosí), después al río Pánuco (en Tamaulipas) y finalmente desemboca al Golfo de México. De manera intermedia pasa a través de un sistema de canales de los cuales son irrigadas las zonas de cultivo en el estado de Hidalgo (Gobierno del Estado de Hidalgo, 1987).



Figura 15. Mapa de ubicación del humedal  (Hidalgo, 2000).

En dirección al oeste, se encuentra el Valle del Mezquital, donde se localizan las grandes extensiones de Actopan, Ixmiquilpan y Tasquillo (fig. 15). El Valle del Mezquital es una región caracterizada por su aridez pese a contar, en sus partes planas, con grandes superficies de riego que aprovechan las aguas del río Tula y que posibilitan una abundante producción de alfalfa y hortalizas. El humedal se encuentra ubicado en la región del Valle del Mezquital al centro-suroeste del estado de Hidalgo, en el poblado de Julián Villagrán, pertenece al municipio de Ixmiquilpan, en donde tiene las siguientes coordenadas geográficas, 20° 29' latitud norte, 99° 13' latitud oeste y se encuentra ubicado a 1,700 msnm (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2000).

El estado de Hidalgo es irrigado por dos distritos de riego el 003 y el 100, que son los que abastecen de agua residual a los municipios y que es utilizada para el riego. El distrito de riego 003 Tula, se creó por decreto presidencial de fecha 15 de diciembre de 1954, el cual fue publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el día 20 de enero de 1955.

La superficie beneficiada con el riego se distribuye en 17 municipios que son: Actopan, el Arenal, Ixmiquilpan, San Salvador, Francisco I. Madero, Santiago de Anaya, Mixquiahuala, Progreso, Chilcuautila, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tepetitlán, Tetepango, Tezontepec, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Tula de Allende; con una superficie de riego de 50 131 hectáreas. El municipio de Ixmiquilpan colinda al norte con los municipios de Zimapán, Nicolás Flores y Cardonal; al este con Cardonal y Santiago de Anaya; al sur con Santiago de Anaya, San Salvador, Chilcuautila y Alfajayucan y al oeste con Alfajayucan, Tasquillo y Zimapán. Las principales localidades con las que cuenta son: Panales, el Tephé, Maguey Blanco,

Orizabita, el Alberto, Dios Padre, Julián Villagrán y Tatzadhó (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2000).

El municipio de Ixmiquilpan cuenta con una superficie de 565.3 km², lo cual representa el 2.7% de la superficie del estado. Se encuentra localizado en el eje Neovolcánico en un 70%, formado por llanuras y en menor proporción por lomeríos, el otro 30% se localiza en la Sierra Madre Oriental. En lo que respecta a la hidrología del municipio, Ixmiquilpan se encuentra posicionado en la región del Pánuco, en la cuenca del río Moctezuma, de la cual se derivan las subcuencas; del río Tula, río Actopan y el río Amajac. Presenta clima semiseco templado en la mayor parte de la superficie municipal, que representa 51.22%, además existe clima seco semicálido en un 23.67% y templado subhúmedo con lluvias en verano de 21.58%, el restante tiene un clima semiseco y semicálido. La temperatura promedio para los meses de diciembre y enero que son los más fríos del año oscila entre los 14.5°C y durante los meses de mayo y junio que son las temperaturas más altas registra un promedio de 21.4°C la estación meteorológica de la ciudad de Ixmiquilpan tras 53 años de observación a estimado que la temperatura anual promedio en el municipio es de aproximadamente 18.5°C.

Con respecto a la precipitación anual en el municipio, el nivel promedio observado es de alrededor de lo 363.8 mm. Según datos observados desde hace más de 50 años, siendo los meses de junio y septiembre los de mayor precipitación y los de febrero y diciembre los de menor. Este municipio dentro de sus recursos naturales tiene pino, encino, sabino, pirul, mezquite, jacaranda y oyamel, así como árboles exóticos aguacate, durazno, granada e higo, en su zona de bosque existe encino prieto, encino manzanilla y como matorral el garambullo, palma y nopal (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2000). La fauna perteneciente a éste municipio está compuesta de tejón, ardilla, tlacuache, onza, conejo, zorro, zorrillo, liebres, ratón de campo, serpientes y una gran variedad de insectos y reptiles. De acuerdo a la superficie que se utiliza para cada actividad su orden es el siguiente: pecuario 40%, agrícola 30% en donde cultiva maíz, frijol, alfalfa, diversas hortalizas y tomate rojo o jitomate entre otros; seguido por otros usos y finalmente el forestal.

Al año 2000 de acuerdo al XII Censo General de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI, 2005), el porcentaje de población de 5 años y más que habla lengua indígena es del 44.6 %, con respecto a la población total, las lenguas que más se practican son: otomí, náhuatl y mixteco. La población del municipio de Ixmiquilpan según los datos del censo del 2000 registra 75 833 habitantes, siendo 35 499 hombres y 40 334 mujeres; teniendo un índice de masculinidad de 87 55 varones por cada 100 mujeres. La mayoría de su población se encuentra concentrada en la cabecera municipal y en sus principales localidades como panales, el tephé, maguey blanco, orizabita entre otros; la población oscila desde recién nacidos, jóvenes y adolescentes (fig. 16) (INEGI, 2005).

NOMBRE DE LA LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL	POBLACIÓN TOTAL MASCULINA	POBLACIÓN TOTAL FEMENINA
IXMIQUILPAN	30 831	14 163	16 668
EL TEPHE	2 172	1 058	1 114
DIOS PADRE	1 540	721	819
JULIAN VILLAGRAN	1 198	552	646
LA LOMA JULIÁN VILLAGRÁN	746	371	375

Figura 16. Porcentaje de población de las localidades próximas a la zona de estudio (INEGI, 2005).

La agricultura en este municipio es en su mayoría de riego en ellos se cosechó en el ciclo 1998-99, la siguiente producción: maíz, con 4 063 has cosechadas, 3 387 de riego y 676 de temporal, siniestrándose en total 1 204 has, frijol con 878 has cosechadas, 186 de riego y 692 de temporal, con 398 has siniestradas, avena forraje 189 cosechadas, 153 fueron de riego y 77 has fueron siniestradas, jitomate con 112 has cosechadas de riego y 25 has siniestradas; así como el cempazúchitl con 1 ha cosechada y de riego (CNA, 2004).

En el municipio se cría ganado bovino con 18 002 cabezas, ganado porcino con 9 500 cabezas, 41 900 cabezas de ganado ovino, 25 734 cabezas de ganado caprino, 158 100 aves, 1 160 guajolotes y 98 colmenas. Con respecto a la pesca en Ixmiquilpan el volumen que se puede capturar se obtiene de presas, bordos y abrevaderos y es utilizada únicamente para autoconsumo (INEGI, 2005). Dentro de sus unidades de comercio registra siete tiendas LICONSA, una cámara u organismo, un tianguis, un mercado público, un rastro, y establecimientos de alimentos y bebidas. De acuerdo con cifras al año 2000 presentadas por el INEGI, la población económicamente activa de 12 años y más del municipio asciende a 23 599 de las cuales 210 se encuentran desocupadas y 23 389 ocupadas (fig. 17). Se ha detectado que existen problemas de niveles freáticos elevados y salinidad en áreas de las comunidades de: San Salvador, Tlaxcoapan, Tlahuelilpan, San José Bojay, Presas, Ulapa, el Quematha, el Pacheco, Yolotepec, el Dextho y Julián Villagrán, entre otros. La superficie afectada es de 551 hectáreas (INEGI, 2005).

SECTOR	PEA OCUPADA	%
TOTAL MUNICIPAL	23 389	
PRIMARIO	7 464	31.9
SECUNDARIO	4 368	18.7
TERCIARIO	11 557	49.4

Figura 17. Población económicamente activa (INEGI, 2005).

V. Justificación

Debido al impacto ecológico provocado en el Valle del Mezquital por la introducción de aguas residuales, es necesario proponer alternativas de tratamiento que sean económicas y socialmente viables. Los humedales construidos son una alternativa demostrada para otros países y regiones de México (Belmont *et al*, 2004). En el poblado de Julián Villagrán se ha establecido un humedal pero es necesario determinar su eficiencia para evaluar su aplicación en otros lugares de la región.

VI. Hipótesis

Se ha reportado que los humedales construidos retienen metales pesados de 50% a 95%; entonces en el humedal de Julián Villagrán se puede establecer una menor eficiencia debido a que los flujos son muy altos, dadas las condiciones del lugar, y tomando en cuenta que el humedal construido fue ampliado.

VII. Objetivos

General

Determinar la eficiencia del humedal construido en el poblado Julián Villagrán, Municipio de Ixmiquilpan, Estado de Hidalgo.

Particulares

- ❖ Determinar la calidad de agua en el sistema
- ❖ Determinar la eficiencia de remoción de metales pesados (cadmio, cobre, cromo, hierro, níquel, plomo y zinc)
- ❖ Comparar la distribución de contaminantes en las diferentes etapas del tratamiento
- ❖ Proponer alternativas para el mejoramiento del humedal

VIII. Métodos

Para este estudio, en el humedal construido se tomaron nueve puntos de muestreo durante los primeros meses de trabajo (abril a octubre de 2005) ya que a partir del mes de enero de 2006 el humedal fue modificado (figs. 18-19) y por lo tanto se incrementaron los puntos de muestreo, quedando su nomenclatura de la siguiente manera: 1. entrada de agua, 2. sedimentador, 3. sedimentador uno, 4. sedimentador dos, 5. distribuidor uno, 6. distribuidor dos, 7. distribuidor tres, 8. anaerobio, 9. aerobio, 10. estanque IV, 11. estanque V, 12. estanque VI, 13. estanque VII, 14. estanque VIII (figs. 20-31).

- Las muestras fueron tomadas durante siete salidas de campo distribuidas en un año de trabajo de campo (2005-2006).
- El muestreo se realizó de acuerdo con la NMX-AA-003-1980 (Aguas residuales), y la NMX-AA-014-1980 (cuerpos receptores); según el caso.

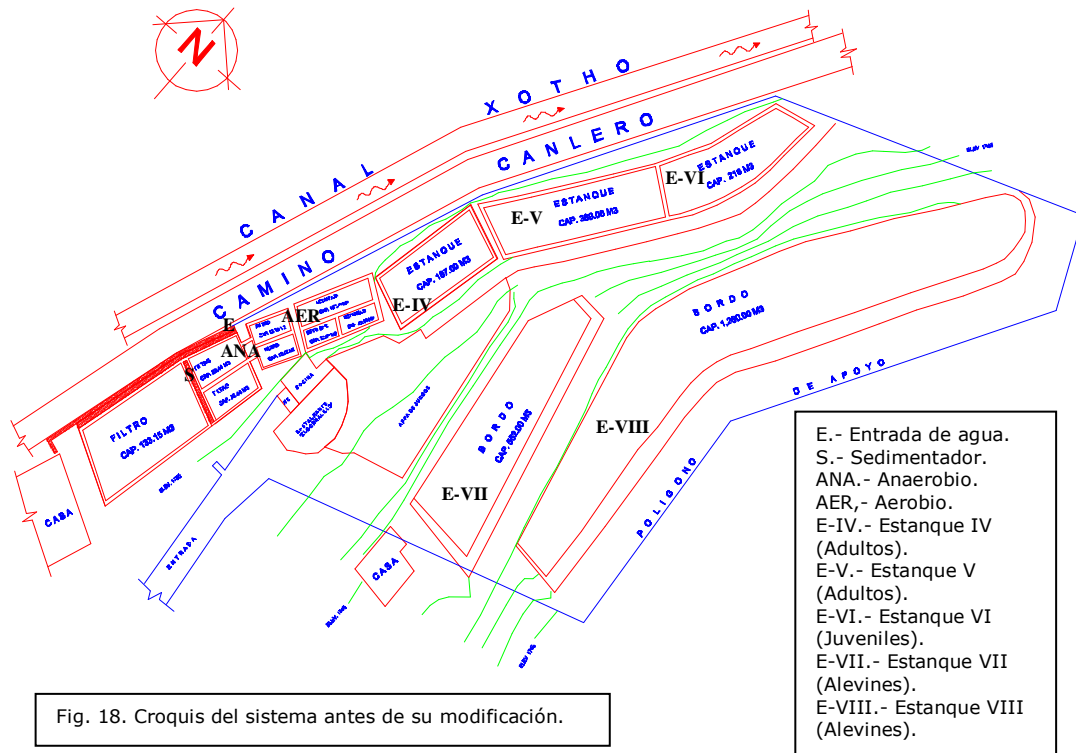


Fig. 18. Croquis del sistema antes de su modificación.

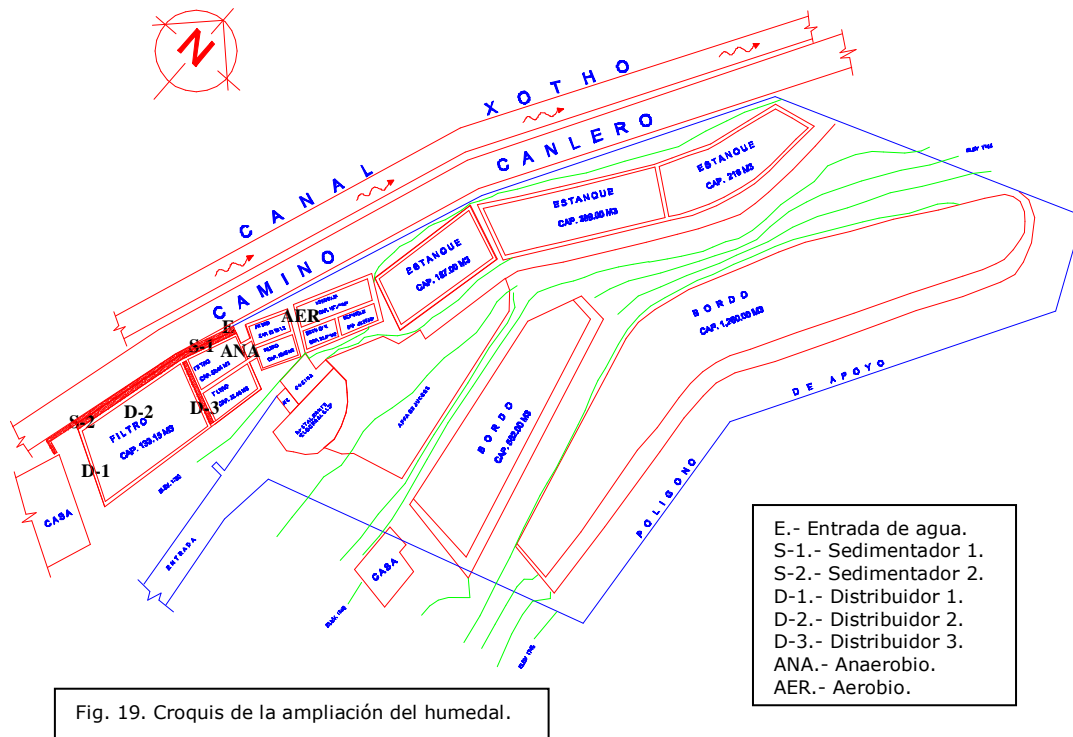


Fig. 19. Croquis de la ampliación del humedal.



Figura 20. Punto de muestreo 1 (entrada de agua) y 3 (sedimentador uno).



Figura 21. Punto de muestreo 2 (sedimentador).



Figura 22. Punto de muestreo 4 (sedimentador dos).



Figura 23. Punto de muestreo 5 (distribuidor uno).



Figura 24. Punto de muestreo 6 (distribuidor dos).



Figura 25. Punto de muestreo 7 (distribuidor tres).



Figura 26. Punto de muestreo 8 (anaerobio).



Figura 27. Punto de muestreo 9 (aerobio).



Figura 28. Punto de muestreo 10 (estanque IV).



Figura 29. Punto de muestreo 11 (estanque V).



Figura 30. Punto de muestreo 12 (estanque VI).



Figura 31. Punto de muestreo 13 (estanque VII) y 14 (estanque VIII).

Trabajo de campo

Se efectuó la determinación de pH, conductividad eléctrica y temperatura directamente en el punto de muestreo sin extraer muestra, sumergiendo los electrodos en el cuerpo de agua, utilizando un potenciómetro marca Conductronic modelo PC 18, calibrándolo antes de cada medición, tal como lo determina la NMX-AA-008-SCFI-2000. Con respecto al parámetro de oxígeno disuelto, se utilizó un oxímetro marca Ysi modelo 52 sumergiendo el electrodo directamente en el cuerpo de agua, basándonos en la técnica reportada en la NMX-AA-012-SCFI-2001.

Trabajo de laboratorio

En el laboratorio se hicieron las determinaciones de coliformes totales y fecales, demanda química de oxígeno y metales pesados (cadmio, cobre, cromo, fierro, níquel, plomo y zinc). La determinación y cuantificación de los metales pesados se llevó a cabo con un espectrofotómetro de absorción atómica marca Varian modelo 1448, en base a lo establecido en la NMX-AA-051-SCFI-2001, en la cual se determinan los metales pesados por el método espectrofotométrico de absorción atómica (APHA, 1992). La demanda química de oxígeno fue determinada como lo establece la NMX-AA-030-SCFI-2001. Para los coliformes totales y fecales, se utilizó la técnica del número más probable (NMP 100 mL^{-1}) tal como lo establece la NMX-AA-42-1987.

IX. Resultados

A continuación se presentan los resultados para los parámetros químicos (Tablas 1-14), físicos (Tablas 15-24) y biológicos (Tablas 25-28).

Tabla 1. Pb (mg L⁻¹) en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		0.02	0.04	0.03	0.04	0.03
2 Sedimentador		ND	0.03	0.03	0.04	0.03
Anaerobio 8		ND	0.03	0.02	0.04	0.02
Aerobio 9		ND	0.01	0.02	0.01	0.02
E-IV 10		0.03	0.05	0.03	0.02	0.02
E-V 11		ND	ND	0.01	0.01	0.01
E-VI 12		ND	0.02	0.05	0.01	0.01
E-VII 13		0.01	0.02	0.02	0.03	0.01
E-VIII 14		0.01	0.03	0.04	0.03	0.02

ND.- No detectado.

Tabla 2. Pb (mg L⁻¹) en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		0.043	0.03
3 Sedimentador 1		0.041	0.03
4 Sedimentador 2		0.03	0.03
5 Distribuidor 1		0.03	0.02
6 Distribuidor 2		0.03	0.01
7 Distribuidor 3		0.02	0.02
8 Anaerobio		0.04	0.011
9 Aerobio		0.03	0.022

Tabla 3. Zn (mg L⁻¹) en el sistema antes de su modificación.

SITIO DE MUESTREO	2005				
	Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua	ND	ND	ND	0.03	0.02
2 Sedimentador	ND	ND	ND	0.02	0.01
Anaerobio 8	ND	ND	ND	0.01	0.01
Aerobio 9	ND	ND	ND	0.01	0.01
E-IV 10	ND	0.003	ND	ND	0.01
E-V 11	ND	0.001	ND	ND	0.01
E-VI 12	ND	0.002	ND	ND	0.01
E-VII 13	ND	0.001	0.02	ND	ND
E-VIII 14	ND	0.002	0.01	ND	ND

ND.- No detectado.

Tabla 4. Zn (mg L⁻¹) en la ampliación del humedal.

SITIO DE MUESTREO	2006	
	Enero	Febrero
1 Entrada de agua	0.02	0.03
3 Sedimentador 1	0.02	0.03
4 Sedimentador 2	0.01	0.02
5 Distribuidor 1	ND	0.02
6 Distribuidor 2	ND	0.01
7 Distribuidor 3	ND	ND
8 Anaerobio	ND	ND
9 Aerobio	ND	ND

ND.- No detectado.

Tabla 5. Cu (mg L⁻¹) en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		0.056	ND	ND	0.01	ND
2 Sedimentador		ND	ND	ND	0.01	ND
Anaerobio 8		ND	ND	ND	ND	ND
Aerobio 9		ND	ND	ND	ND	ND
E-IV 10		ND	ND	ND	ND	ND
E-V 11		0.0086	ND	ND	ND	ND
E-VI 12		0.052	ND	ND	ND	ND
E-VII 13		0.078	ND	ND	ND	ND
E-VIII 14		ND	ND	ND	ND	ND

ND.- No detectado.

Tabla 6. Cu (mg L⁻¹) en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		ND	ND
3 Sedimentador 1		ND	ND
4 Sedimentador 2		ND	ND
5 Distribuidor 1		ND	ND
6 Distribuidor 2		ND	ND
7 Distribuidor 3		ND	ND
8 Anaerobio		ND	ND
9 Aerobio		ND	ND

ND.- No detectado.

Tabla 7. Fe (mg L⁻¹) en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		0.097	0.065	0.054	0.048	0.034
2 Sedimentador		ND	0.065	0.058	0.045	0.032
Anaerobio 8		ND	0.05	0.054	0.04	0.032
Aerobio 9		ND	0.032	0.042	0.052	0.03
E-IV 10		0.043	0.054	0.04	0.034	0.02
E-V 11		0.043	0.054	0.038	0.036	0.02
E-VI 12		0.065	0.076	0.068	0.022	0.02
E-VII 13		0.041	0.163	0.056	0.013	0.04
E-VIII 14		0.086	0.119	0.045	0.034	0.042

ND.- No detectado.

Tabla 8. Fe (mg L⁻¹) en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		0.03	0.03
3 Sedimentador 1		0.032	0.02
4 Sedimentador 2		0.02	0.02
5 Distribuidor 1		0.023	0.02
6 Distribuidor 2		0.03	0.01
7 Distribuidor 3		0.03	0.03
8 Anaerobio		0.03	0.03
9 Aerobio		0.01	0.012

Tabla 9. Cd (mg L⁻¹) en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		ND	ND	ND	ND	ND
2 Sedimentador		ND	ND	ND	ND	ND
Anaerobio 8		ND	ND	ND	ND	ND
Aerobio 9		ND	ND	ND	ND	ND
E-IV 10		ND	ND	ND	ND	ND
E-V 11		ND	ND	ND	ND	ND
E-VI 12		ND	ND	ND	ND	ND
E-VII 13		ND	ND	ND	ND	ND
E-VIII 14		0.0014	ND	ND	ND	ND

ND.- No detectado.

Tabla 10. Cd (mg L⁻¹) en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		ND	ND
3 Sedimentador 1		ND	ND
4 Sedimentador 2		ND	ND
5 Distribuidor 1		ND	ND
6 Distribuidor 2		ND	ND
7 Distribuidor 3		ND	ND
8 Anaerobio		ND	ND
9 Aerobio		ND	ND

ND.- No detectado.

Tabla 11. Ni (mg L⁻¹) en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		ND	0.025	0.019	0.01	0.02
2 Sedimentador		ND	ND	0.016	0.01	0.02
Anaerobio 8		ND	ND	0.011	0.01	0.012
Aerobio 9		ND	0.025	0.014	0.025	0.021
E-IV 10		ND	0.025	0.014	0.024	0.014
E-V 11		0.025	0.025	0.014	0.025	0.015
E-VI 12		ND	0.025	ND	0.014	0.015
E-VII 13		0.025	0.025	ND	0.016	0.015
E-VIII 14		ND	0.05	ND	0.014	0.02

ND.- No detectado.

Tabla 12. Ni (mg L⁻¹) en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		0.03	0.025
3 Sedimentador 1		0.02	0.025
4 Sedimentador 2		0.012	0.025
5 Distribuidor 1		0.01	0.02
6 Distribuidor 2		0.01	0.03
7 Distribuidor 3		0.012	0.03
8 Anaerobio		0.031	0.02
9 Aerobio		0.01	0.01

Tabla 13. Cr (mg L⁻¹) en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		ND	0.066	ND	0.045	0.036
2 Sedimentador		ND	0.06	ND	0.045	0.036
Anaerobio 8		ND	0.066	ND	0.042	0.025
Aerobio 9		ND	0.066	ND	0.036	0.03
E-IV 10		ND	0.033	0.059	0.034	0.04
E-V 11		ND	0.033	0.051	0.041	0.04
E-VI 12		ND	ND	0.044	0.04	0.025
E-VII 13		0.033	ND	0.04	0.038	0.07
E-VIII 14		0.033	ND	0.021	ND	0.01

ND.- No detectado.

Tabla 14. Cr (mg L⁻¹) en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		0.04	0.043
3 Sedimentador 1		0.041	0.041
4 Sedimentador 2		0.04	0.033
5 Distribuidor 1		0.03	0.02
6 Distribuidor 2		0.03	0.02
7 Distribuidor 3		0.03	0.02
8 Anaerobio		0.02	0.01
9 Aerobio		0.02	0.019

Tabla 15. DQO (mg L⁻¹) en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		183.33	218.61	951.38*	378.32*	291.04*
2 Sedimentador		127.37	195.48	813.88*	296.78*	392.50*
Anaerobio 8		42.02	110.34	163.17	124.02	648.38*
Aerobio 9		69.44	90.76	132.79	421.61*	270.22*
E-IV 10		74.65	43.40	169.16	362.13*	439.87*
E-V 11		169.44	72.91	237.5	361.21*	264.60*
E-VI 12		69.44	41.18	384.72*	607.01*	592.45*
E-VII 13		65.97	246.52	268.75*	642.52*	513.08*
E-VIII 14		171.18	156.25	188.88	288.04*	614.90*

*Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 16. DQO (mg L⁻¹) en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		70.33	65.64
3 Sedimentador 1		39.12	43.5
4 Sedimentador 2		19.35	27.41
5 Distribuidor 1		21.17	66.1
6 Distribuidor 2		20.69	22.32
7 Distribuidor 3		19.56	63.55
8 Anaerobio		15.31	99.56
9 Aerobio		20.54	25.45

Tabla 17. O₂ (mg L⁻¹) disuelto en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		6.8	9.5	5.6	3.5	6
2 Sedimentador		5.6	13.2	6.6	4	5.8
Anaerobio 8		3.3	2.1	3.4	0.5	2.5
Aerobio 9		6.9	3.1	7.6	5.4	4.3
E-IV 10		8.5	> 20	8.5	7.7	7
E-V 11		8.5	> 20	8.7	8.5	7.5
E-VI 12		8.5	> 20	8.5	7.8	7
E-VII 13		8.3	> 20	7.2	6.2	5.8
E-VIII 14		7.8	> 20	7.9	16.1	8.5

Tabla 18. O₂ (mg L⁻¹) disuelto en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		4.5	7.93
3 Sedimentador 1		5	8
4 Sedimentador 2		2.2	4.7
5 Distribuidor 1		4.5	8.3
6 Distribuidor 2		4.6	5
7 Distribuidor 3		3.5	4.5
8 Anaerobio		3.8	2.1
9 Aerobio		3.4	5.1

Tabla 19. T (°C) en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		19.7	19.3	19.9	22.6	20.5
2 Sedimentador		19.4	19.5	19.9	22.4	21.3
Anaerobio 8		19.5	19	19.1	22.5	20.9
Aerobio 9		20.1	19.2	19.6	22.9	21.0
E-IV 10		20.8	20.9	21.0	24.2	21.8
E-V 11		21.3	21.1	20.8	23.9	22
E-VI 12		21.5	21.4	21.1	23.8	22.2
E-VII 13		19.9	20.8	20.4	23.8	21.8
E-VIII 14		21.9	21.3	21.1	24.4	24.1

Tabla 20. T (°C) en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		21.5	19.7
3 Sedimentador 1		20.2	21.5
4 Sedimentador 2		19.9	19.4
5 Distribuidor 1		20.2	19.1
6 Distribuidor 2		20.7	20.4
7 Distribuidor 3		20.5	17.8
8 Anaerobio		19.9	17.3
9 Aerobio		19.7	16.6

Tabla 21. pH en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		6.53	8.06	8.24	7.23	7.58
2 Sedimentador		6.67	8.05	8.38	7.36	7.67
Anaerobio	8	6.90	7.93	8.25	7.26	7.62
Aerobio	9	6.96	7.20	8.70	7.38	7.62
E-IV	10	6.29	7.55	8.76	8.02	8.03
E-V	11	7.49	7.03	8.66	7.91	7.48
E-VI	12	6.39	6.91	8.76	8.04	7.55
E-VII	13	7.63	7.93	8.77	7.84	7.4
E-VIII	14	7.93	7.04	8.87	9.01	7.82

Tabla 22. pH en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		7.56	9.74
3 Sedimentador 1		7.75	10.27
4 Sedimentador 2		7.42	10.25
5 Distribuidor 1		6.71	10.66
6 Distribuidor 2		6.25	8.23
7 Distribuidor 3		6.58	8.15
8 Anaerobio		7.42	8.06
9 Aerobio		7.3	8.11

Tabla 23. Conductividad eléctrica (mScm⁻¹) en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		1900	1000	2030	1950	2040
2 Sedimentador		1980	1000	2030	1700	2020
Anaerobio 8		1980	1000	2030	1910	2020
Aerobio 9		2000	1000	1990	1920	2010
E-IV 10		1950	1960	1950	1860	2000
E-V 11		1930	1980	1970	1880	1900
E-VI 12		1920	1990	1950	1880	1900
E-VII 13		1880	1920	2010	1890	2030
E-VIII 14		1740	1820	1890	1780	1900

Tabla 24. Conductividad eléctrica (mScm⁻¹) en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		1980	1880
3 Sedimentador 1		1950	1400
4 Sedimentador 2		1940	1960
5 Distribuidor 1		2000	1950
6 Distribuidor 2		1990	1780
7 Distribuidor 3		1960	1940
8 Anaerobio		1960	1940
9 Aerobio		1880	1970

Tabla 25. Coliformes totales (NMP 100 mL⁻¹) en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO DE	2005				
	Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua	ND	2400*	2400*	460*	75
2 Sedimentador	ND	2400*	2400*	192	120
Anaerobio 8	ND	2400*	1386*	198	240
Aerobio 9	ND	2400*	126	312	46
E-IV 10	240	120	1386*	112	240
E-V 11	1100*	2400*	11	457*	383
E-VI 12	9	43	157	206	259
E-VII 13	64	2400*	380	14	151
E-VIII 14	23	240	3837*	198	28

ND.- No detectado.

* Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 26. Coliformes totales (NMP 100 mL⁻¹) en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO DE	2006	
	Enero	Febrero
1 Entrada de agua	1100*	1100*
3 Sedimentador 1	953*	312
4 Sedimentador 2	1218*	312
5 Distribuidor 1	199	210
6 Distribuidor 2	4402*	210
7 Distribuidor 3	1386*	150
8 Anaerobio	4402*	312
9 Aerobio	1100*	259

*Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 27. Coliformes fecales (NMP 100 mL⁻¹) en el sistema antes de su modificación.

SITIO MUESTREO	DE	2005				
		Abril	Mayo	Junio	Agosto	Octubre
1 Entrada de agua		ND	2400*	2400*	150	75
2 Sedimentador		ND	2400*	2400*	193	120
Anaerobio 8		ND	1400	312	11	120
Aerobio 9		ND	1400	111	232	240
E-IV 10		23	120	1156*	113	21
E-V 11		4	2400*	44	458	113
E-VI 12		9	43	157	207	199
E-VII 13		20	2400*	312	14	151
E-VIII 14		< 3	240	584	11	28

ND.- No detectado.

*Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 28. Coliformes fecales (NMP 100 mL⁻¹) en la ampliación del humedal.

SITIO MUESTREO	DE	2006	
		Enero	Febrero
1 Entrada de agua		312	460
3 Sedimentador 1		953	312
4 Sedimentador 2		720	312
5 Distribuidor 1		199	150
6 Distribuidor 2		326	210
7 Distribuidor 3		386	150
8 Anaerobio		402	312
9 Aerobio		301	259

X. Discusión de Resultados

Metales pesados

El principal proceso de remoción de metales pesados en la naturaleza es la adsorción, seguida por la volatilización y la bioacumulación. La adsorción se presenta cuando el metal se encuentra en forma soluble y ocurre debido a las diferentes cargas eléctricas entre el metal y la materia orgánica, o bien, cuando el metal se encuentra en forma insoluble y se precipita. Los metales pesados en su mayoría son importantes constituyentes de muchas aguas, algunos de estos metales pesados son necesarios para el desarrollo de la vida y su ausencia en cantidades suficientes podría limitar el crecimiento de los organismos. No obstante, el exceso de estos metales provocaría problemas por su toxicidad (Metcalf y Eddy, 1991).

Plomo (mg L^{-1})

La tendencia de este elemento dentro del sistema es decreciente, aunque en algunos casos se incrementa notablemente debido posiblemente a que existe una alimentación directa del canal a los estanques de actividad piscícola. Al entrar el efluente al sistema se presentan valores de medios a altos y cuando pasa por el sedimentador y el filtro disminuye, posiblemente por la precipitación de este elemento. Walker y Hurl (2002) destacan que el principal mecanismo de remoción de metales pesados es la sedimentación y de manera particular señalan la retención de hasta el 71% de plomo. Por otro, Cheng *et al.* (2002) reportan que la principal retención se da en las raíces laterales de *Cyperus alternifolus*. Por tal motivo, es necesario realizar un estudio más detallado en esta parte de sistema.

Cuando llega a los estanques de producción piscícola el valor aumenta en varios casos, lo que podría atribuirse a una mayor presencia de materia orgánica, sin embargo los valores de DQO no son altos, por lo que se puede presentar una posible acumulación debido a la influencia directa de una toma de agua residual directa del canal (sobre todo en los cuatro últimos estanques). Los valores mas bajos se registraron en el mes de abril y en dos casos (mayo y junio) en donde se elevó casi al máximo permitido por la normatividad aplicable (5 mg L^{-1}). El comportamiento mas variado fue en los tres primeros meses ya que en agosto y octubre se presentó una clara disminución del contaminante a los largo del sistema (con excepción de los dos últimos estanques).

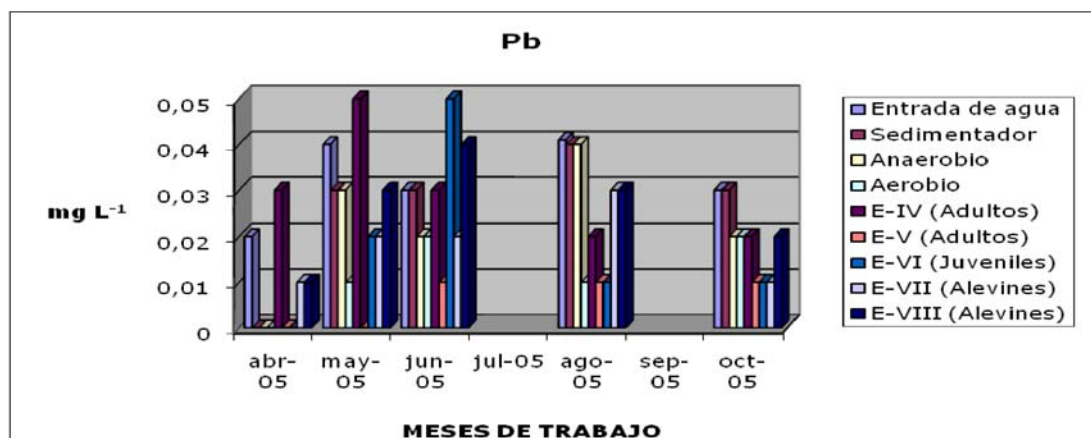


Figura 32. Valores obtenidos de Pb en el sistema antes de su modificación.

Con la ampliación del humedal los valores obtenidos fueron mas estables con una remoción de este elemento del 50% considerando la cantidad que entra con la cantidad que sale destinada al riego agrícola. Según lo que establece la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, con límite máximo permitido de 0.5 mg L⁻¹ para aguas residuales y comparando los valores obtenidos en los diferentes puntos de muestreo, se observa que ninguno sobrepasa dicho valor. Aun cuando las cantidades registradas en los diferentes muestreos a través de los meses de trabajo, son muy variables con respecto a lo establecido por la norma oficial mexicana ya mencionada, estas fracciones no deberían de existir para los fines que se tiene destinada esta agua ya que el plomo es un elemento no esencial.

En el filtro anaerobio del sistema de Villagrán el nivel promedio de oxígeno es de 2.36 mg L⁻¹ lo que permite suponer que dicho mecanismo de remoción podría estarse presentando en el sistema. Sin embargo, en general los niveles de Pb son bajos comparados con estudios similares como el caso de Cheng *et al.* 2002, en donde reportan 0.302 mg L⁻¹, es decir 10 veces más que lo registrado en este trabajo y en donde, después de 5 meses se obtuvo el 100% de remoción. De manera similar, Walker y Hurl (2002) señalan el 71% de retención en sedimentos.

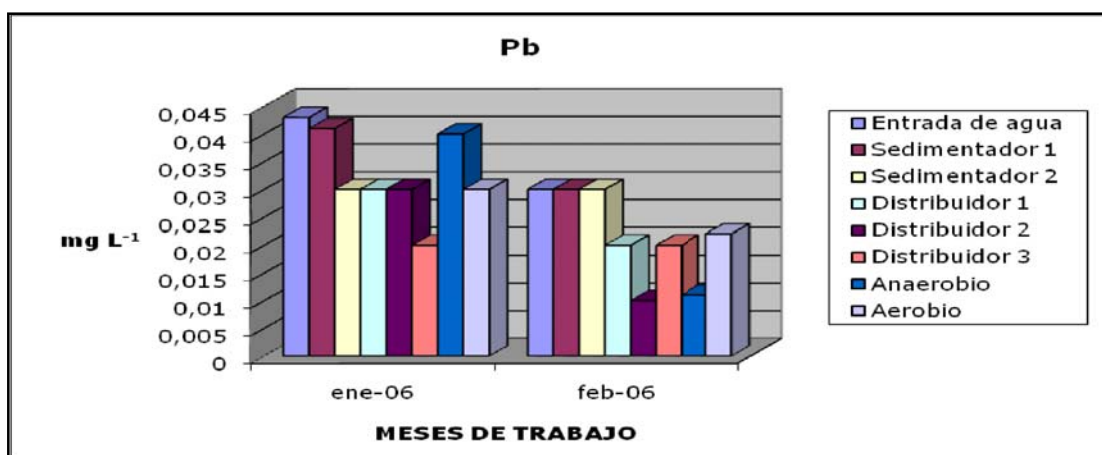


Figura 33. Valores obtenidos de Pb en la ampliación del humedal.

Zinc (mg L⁻¹)

Este metal puede encontrarse en aguas residuales en contenidos que sobrepasan 5 mg L⁻¹, que proviene generalmente de las tuberías de latón y hierro galvanizado, atacadas por aguas agresivas o ricas en cloruros y sulfatos. Para cantidades relativamente pequeñas (2 mg L⁻¹), el zinc puede dar al agua una opalescencia variable con la dureza (Rodier, 1991).

Este elemento no se detectó durante el primer mes de trabajo en ninguna etapa del sistema, pero en mayo y junio tampoco se presentó en los estanques de los peces, interpretando una posible acumulación de este metal en los estanques debido a la alimentación directa de agua del canal hacia estos estanques. Considerando el valor máximo permitido por la norma aplicable (10 mg L⁻¹) se considera que se presenta únicamente como trazas, y de acuerdo con los valores obtenidos en agosto y octubre, hubo una remoción de este parámetro del 80% al final del proceso.

Cabe mencionar que en general son muy bajos los niveles encontrados ya que por ejemplo Cheng *et al.* 2002 reporta concentraciones de 4.25 mg L^{-1} .

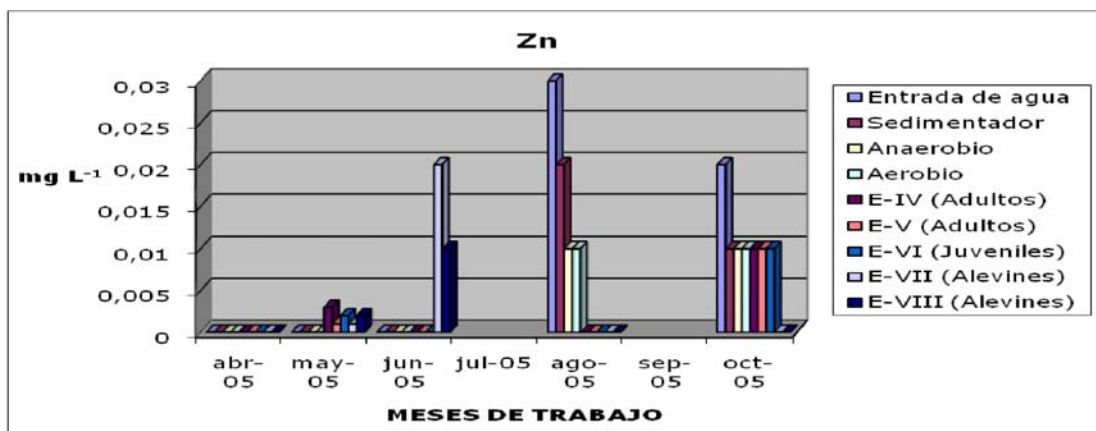


Figura 34. Valores obtenidos de Zn en el sistema antes de su modificación.

En la ampliación del humedal los valores obtenidos oscilaron entre 0.03 y 0.01 mg L^{-1} , observando una remoción del 80% de este metal y considerándolo como trazas o insignificantes ya que la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, establece como limite máximo permitido 10 mg L^{-1} . Para la vida acuática presenta una cierta toxicidad, en función de la mineralización del agua y de la especie considerada. La toxicidad para los peces se ejerce a partir de algunos miligramos por litro. Para el uso agrícola, el marchitamiento de las plantas puede ocurrir a partir de 5 mg L^{-1} .

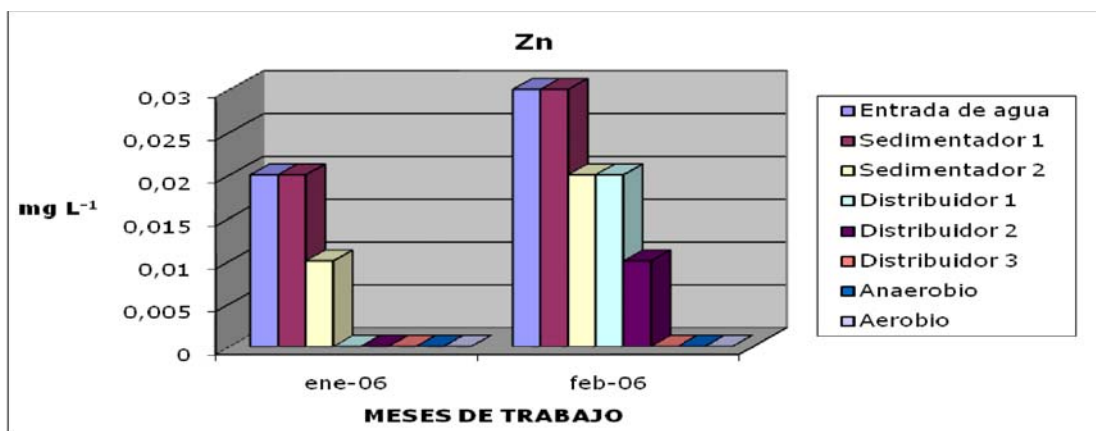


Figura 35. Valores obtenidos de Zn en la ampliación del humedal.

Cobre (mg L^{-1})

Con excepción de algunas especies, no parece que los contenidos inferiores a 1 mg L^{-1} sea tóxico para los peces. La vida acuática puede perturbarse con dosis superiores, pero las condiciones de toxicidad varían según las especies y la composición del agua (oxígeno disuelto, temperatura, calcio, magnesio, etc.).

Los niveles obtenidos de este elemento antes de la modificación del sistema fueron muy bajos, siendo el mes de abril en el que se detectaron el mayor número muestras con un comportamiento muy variado y aun así removiendo el 95% de

este metal, no detectándose en los meses de enero y febrero, una posible explicación, es que este metal se va a los sedimentos.

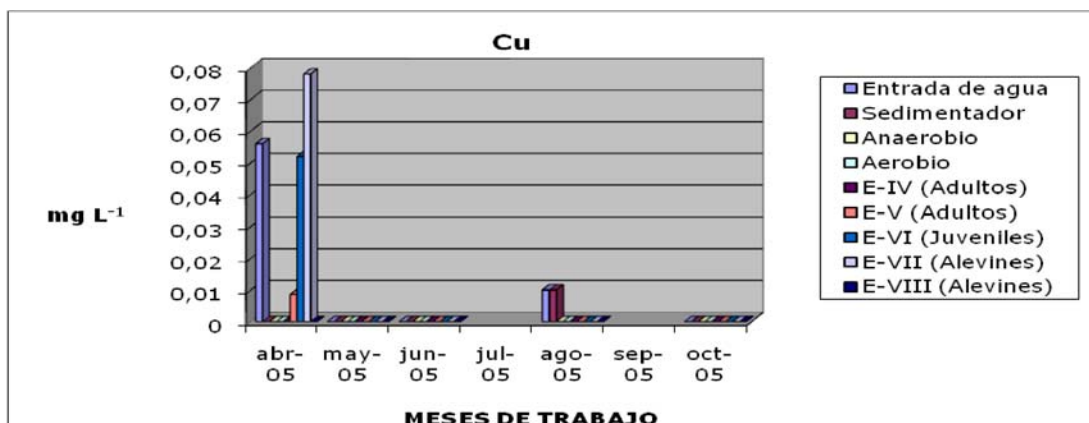


Figura 36. Valores obtenidos de Cu en el sistema antes de su modificación.

Hierro (mg L^{-1})

Este metal en estado ferroso es bastante soluble en el agua; y puede precipitar debido al desprendimiento del anhídrido carbónico y por oxidación en el aire. Según los casos, podría existir en estado coloidal y en forma de complejos orgánicos o minerales. La toxicidad para la vida acuática es difícil de precisar, pues esta en función del estado químico del metal (ferroso o férrico) y de la presencia del precipitado de hidróxido de hierro, que tiende a depositarse en las branquias de los peces (Rodier, 1991).

Los niveles de este elemento tienden a ser muy variables ya que los valores obtenidos van disminuyendo a medida de que pasa por el humedal y cuando pasa por los estanques incrementa su valor, lo que indica una posible acumulación en los estanques, siendo el más alto de $0,163 \text{ mg L}^{-1}$ y el más bajo de $0,02 \text{ mg L}^{-1}$, lo que corresponde a una remoción del 30% en el humedal.

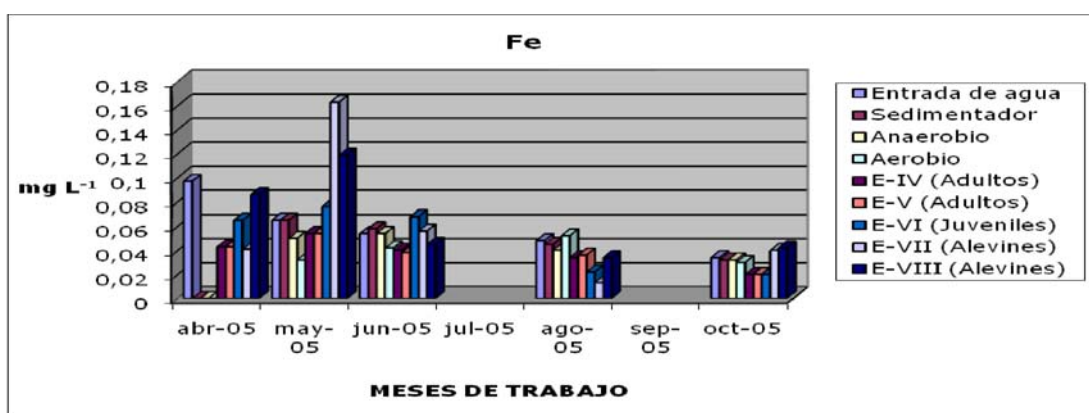


Figura 37. Valores obtenidos de Fe en el sistema antes de su modificación.

En el nuevo sistema, los registros indican una remoción del 70%, lo que indica que el humedal funciona de manera adecuada al retener la mayor cantidad del elemento, reduciendo las lecturas en el estanque de algas. La norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, establece como limite máximo permitido 1.0 mg L⁻¹ de este metal pesado en aguas residuales, lo que indica que ningún valor se encuentra sobre este limite.

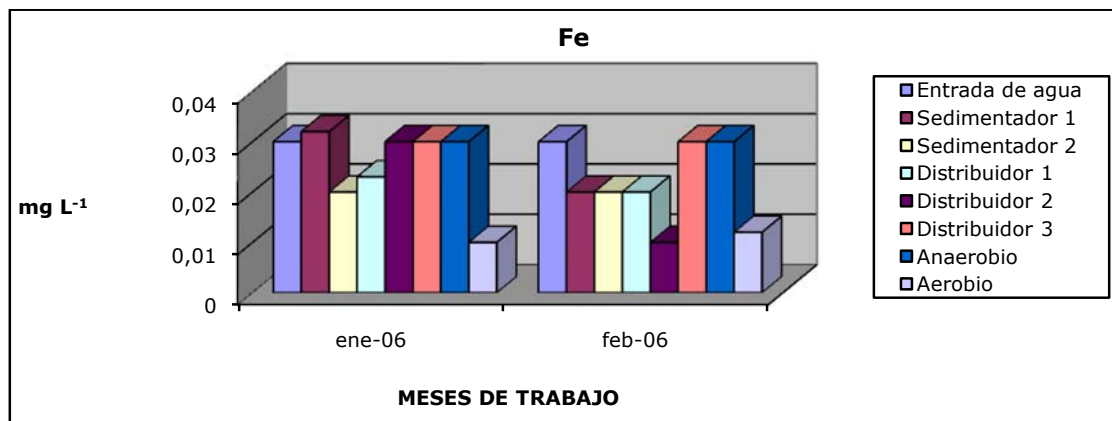


Figura 38. Valores obtenidos de Fe en la ampliación del humedal.

Cadmio (mg L⁻¹)

La fuente principal del cadmio en el organismo es de origen alimentario que puede provenir de vasijas barnizadas, así como de utensilios de cocina galvanizados (Rodier, 1991). Este metal pesado sólo fue detectado en un punto de muestreo en el primer mes de trabajo y fue de 0.0014 mg L⁻¹. La norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, tiene establecido el limite máximo permitido de 0.2 mg L⁻¹ en aguas de tipo residual, lo que indica que el único valor esta muy por debajo de dicho limite.

Níquel (mg L⁻¹)

Los valores que se obtuvieron en el sistema antes de su modificación fueron, en su mayoría muy similares, con la excepción de un valor que se dispara considerablemente de 0.05 mg L⁻¹, la mayoría de estos valores se encuentran alrededor de los 0.020 mg L⁻¹, valores que evidentemente están muy por debajo de lo permitido por la norma aplicable.

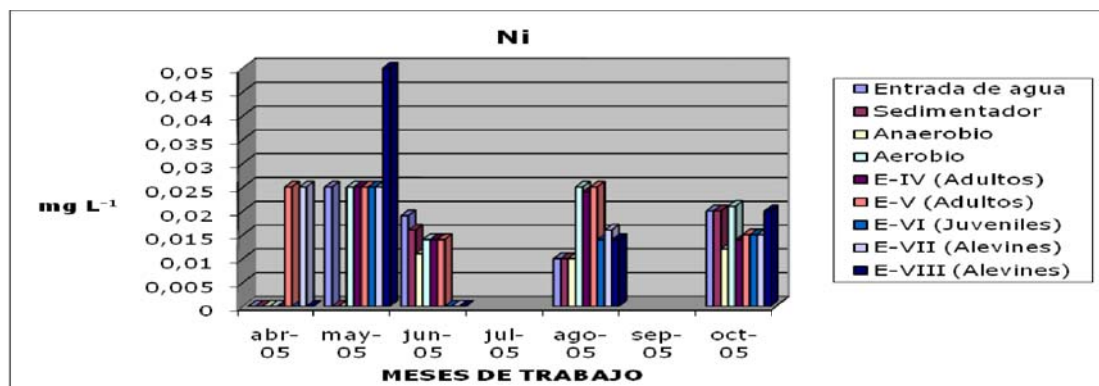


Figura 39. Valores obtenidos de Ni en el sistema antes de su modificación.

Para la ampliación del humedal los valores oscilaron entre 0.01 mg L^{-1} y 0.031 mg L^{-1} . En la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, se establece como limite máximo permitido para este metal pesado la cantidad de 2.0 mg L^{-1} , lo que arroja como resultado que en ningún valor antes mencionado sobre pasa este limite.

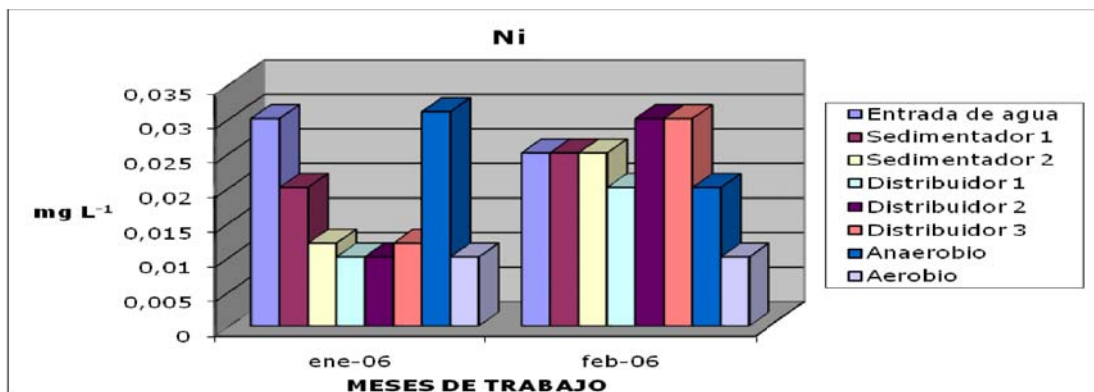


Figura 40. Valores obtenidos de Ni en la ampliación del humedal.

Cromo (mg L^{-1})

Desde el punto de vista acuático, los organismos inferiores (limite: 0.05 mg L^{-1} de cromo total) son más sensibles que los peces (limite: 1 mg L^{-1} de cromo total) (Rodier, 1991). En el sistema antes de su modificación se obtuvieron valores muy variados, en la parte del humedal los valores fueron en orden decreciente y las variaciones se detectaron en la parte de los estanques de actividad piscícolas, lo que indica una fuerte influencia de la toma de agua directamente del efluente.

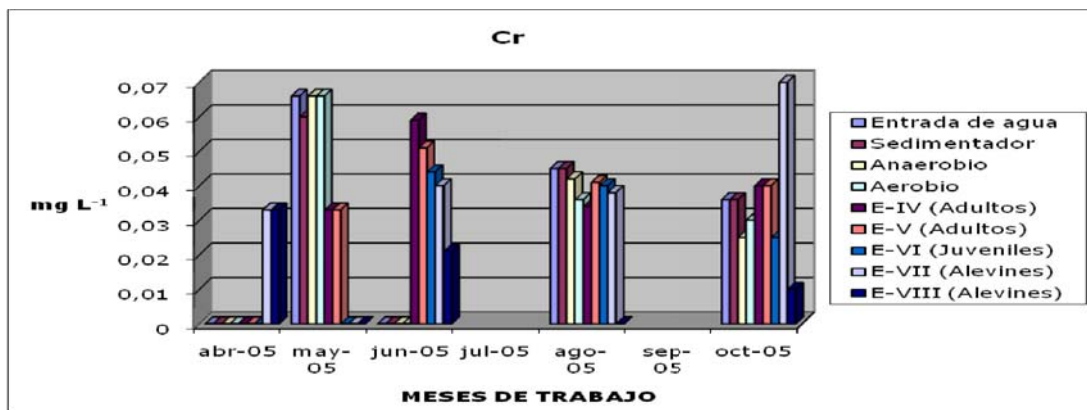


Figura 41. Valores obtenidos de Cr en el sistema antes de su modificación.

Para la ampliación del humedal, los resultados obtenidos fueron de 0.02 mg L^{-1} a 0.041 mg L^{-1} , para este caso nuevamente se ve el comportamiento normal de retención ya que estos valores se abaten en un 60% aproximadamente. Lo que nos indica la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, es un limite máximo permitido de 1.0 mg L^{-1} de este metal pesado, y dados los valores obtenidos en este trabajo ninguno sobrepasa este limite.

Por lo cual los valores solo en el mes de mayo sobrepasan el límite de 0.05 mg L^{-1} que establece para los organismos inferiores como peligroso según Metcalf y Eddy (1991); dos en el mes de junio ligeramente arriba de 0.05 mg L^{-1} y uno en el mes de octubre que fue de 0.07 mg L^{-1} .

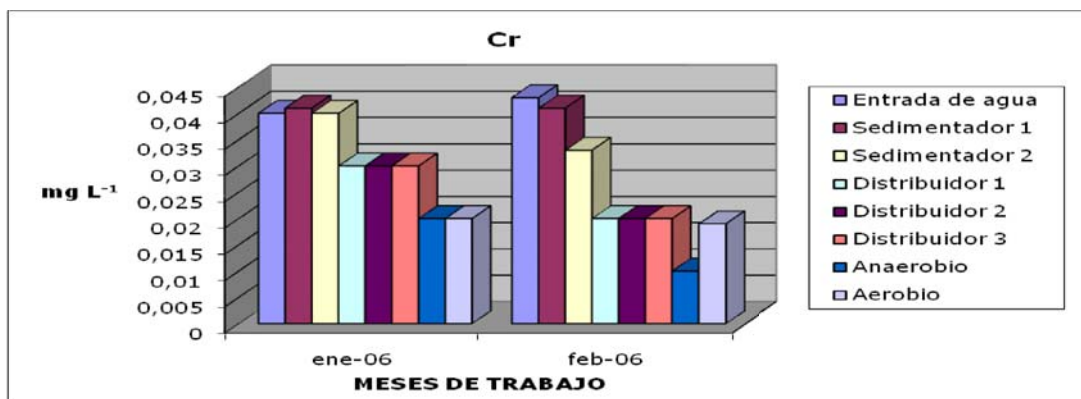


Figura 42. Valores obtenidos de Cr en la ampliación del humedal.

En general se ha reportado que los humedales retienen metales pesados (Cheng *et al.* 2002; Walker y Hurl, 2002, Liu *et al.* 2007), sin embargo todavía no están completamente elucidados los mecanismos de remoción para grupos de metales. Destaca el trabajo de Liu *et al.* (2007) que evaluó a 19 especies vegetales con Cd, Pb y Zn. A partir de este trabajo se puede plantear que para el caso del plomo y zinc en donde se obtuvo una remoción de 50% y 80% respectivamente y tomando como punto de partida las especies *Alternanthera philoxeroides*, *Zizania latifolia*, *Echinochloa crus-galli* y *Polygonum hydropiper* que demostraron eficiencias de remoción del 90% podrían ser utilizadas para mejorar la remoción de dichos metales.

Demanda Química de Oxígeno (mg L^{-1})

Los resultados obtenidos para la DQO constituyen un indicador de la materia contaminante poco biodegradable (Lim, 2001). Si bien en el sistema, previo a su modificación, se obtuvieron valores promedio de entre 200 y 400 mg L^{-1} , sus valores individuales fueron muy variables (con la mayor desviación estándar en el influente, 314.68), desde menores a 100 mg L^{-1} y hasta mayores de 500 mg L^{-1} . Los mayores valores de materia orgánica fueron hacia los meses de agosto a octubre.

En general, puede plantearse que después del sedimentador y al pasar por el filtro anaerobio disminuye la concentración, en donde se abate considerablemente este contenido debido a la rizosfera del humedal y mayor superficie de contacto.

Posteriormente, comienza a aumentar su valor después de que pasa por el proceso aerobio (Algas) y aumenta por la presencia de peces en donde se adiciona alimento y (en este lapso de tiempo) se encuentra una toma directa de agua residual, que no pasa por el humedal, lo que aumenta el valor de la DQO hasta valores de 200 – 600 mg L^{-1} . Destaca que en el mes de junio se tiene el valor más alto en el afluente (951.38 mg L^{-1}).

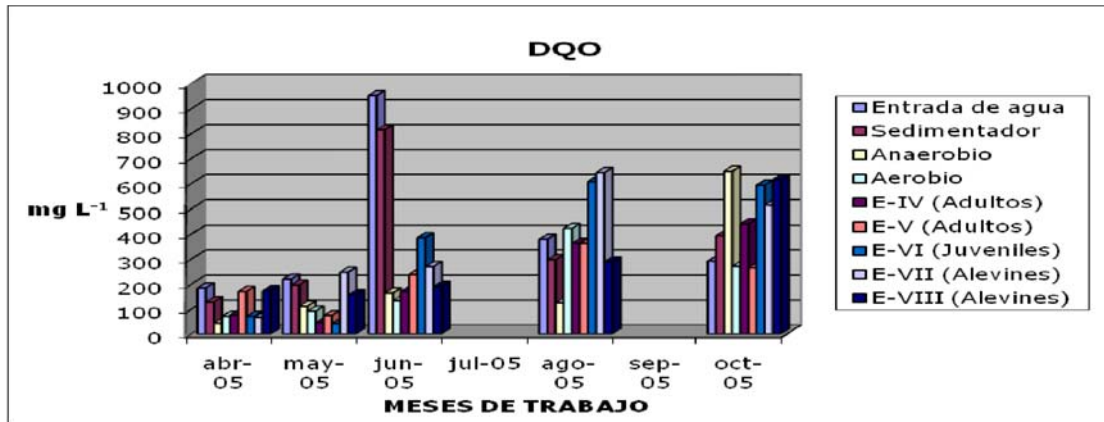


Figura 43. Valores obtenidos de DQO en el sistema antes de su modificación.

Para el caso de la ampliación del sistema, en enero de 2006 los valores son notablemente más pequeños (de 15.21 mg L⁻¹ a 99.56 mg L⁻¹). De acuerdo a Metcalf y Eddy (1991), consideran que 250 mg L⁻¹ es una concentración débil; de 500 mg L⁻¹ es una concentración media y de 1000 mg L⁻¹ es una concentración fuerte, por lo que se puede plantear que el sistema en general recibe agua con concentración de débil a media y sólo en casos excepcionales es fuerte (junio en el influente y agosto-octubre en los estanques piscícolas).

En general puede plantearse que la remoción de materia orgánica es de entre 25 – 50%, lo cual contrasta con otros experimentos como el realizado en el estado de Ohio donde las plantas acuáticas retuvieron la DQO en un 65 a 80%, mientras que en el proyecto de Texcoco se reportan valores de 1887+/- 167, teniendo una reducción de 84.9% +/-1.3% (Belmont *et al.*, 2004).

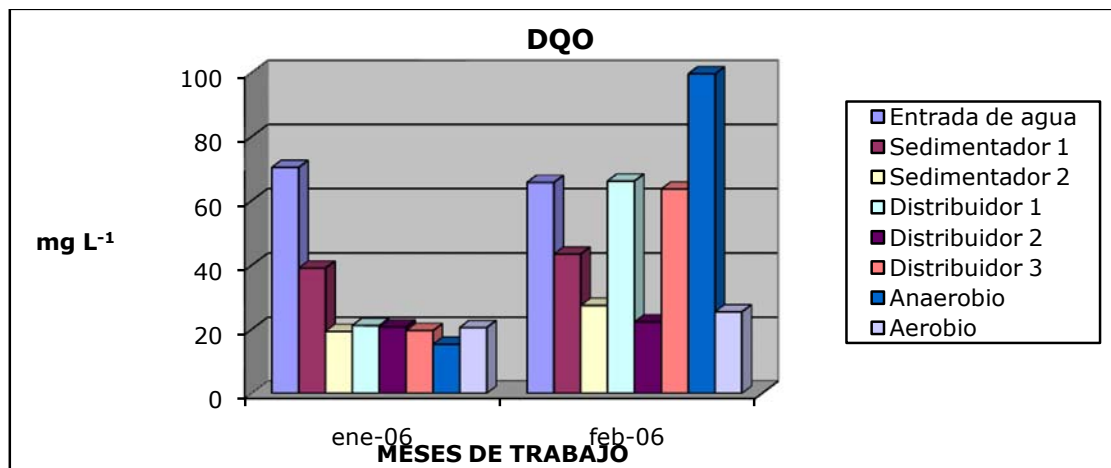


Figura 44. Valores obtenidos de DQO en la ampliación del humedal.

Cabe mencionar que la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 indica un límite máximo permisible de materia orgánica en aguas residuales de 250 mg L⁻¹, por lo que en 19 valores obtenidos se sobrepasan los límites permitidos, que como ya se mencionó corresponde a los meses de junio a octubre de 2005. Destaca que con la adición progresiva de DQO se estaba saturando el sistema durante el final del 2005.

Oxígeno Disuelto (mg L^{-1})

El oxígeno disuelto es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios así como para otras formas de vida, no obstante, el oxígeno es sólo ligeramente soluble en el agua. La cantidad real de oxígeno que pueda estar presente en el sistema viene regida por: 1) la solubilidad del gas; 2) la presión parcial del gas en la atmósfera; 3) la temperatura, y 4) la pureza del agua (Metcalf y Eddy 1991). Además, está en función del origen del agua, las aguas superficiales pueden contener cantidades próximas a la saturación.

En el sistema, previo a su modificación, se presenta cierta uniformidad sobre valores de 6 a 8 mg L^{-1} . Dicha variación se puede atribuir a que en el mes de mayo se registraron valores extremadamente altos (mayores de 20), una posible explicación puede deberse a la desconfiguración del instrumento utilizado para medir este parámetro. Los valores del influente y del sedimentador son muy similares (6-7 mg L^{-1}) y disminuye considerablemente en la salida del filtro anaerobio (promedio de 2.36 e incluso de hasta 0.5 mg L^{-1}), mientras que en general son más altos en los estanques.

El abatimiento de oxígeno se debe al consumo por las raíces de las plantas, la escasa difusión de aire, los organismos y la acumulación de materia orgánica. Luego en el parte en donde están las algas, su productividad provoca el incremento de O_2 , una vez realizada la oxigenación, ingresa al resto de los estanques (Rodier, 1990). Además la temperatura presente en el sistema acelera la velocidad de las reacciones bioquímicas que utilizan el oxígeno contribuyendo a mejorar los procesos de autodepuración (Metcalf y Eddy, 1991).

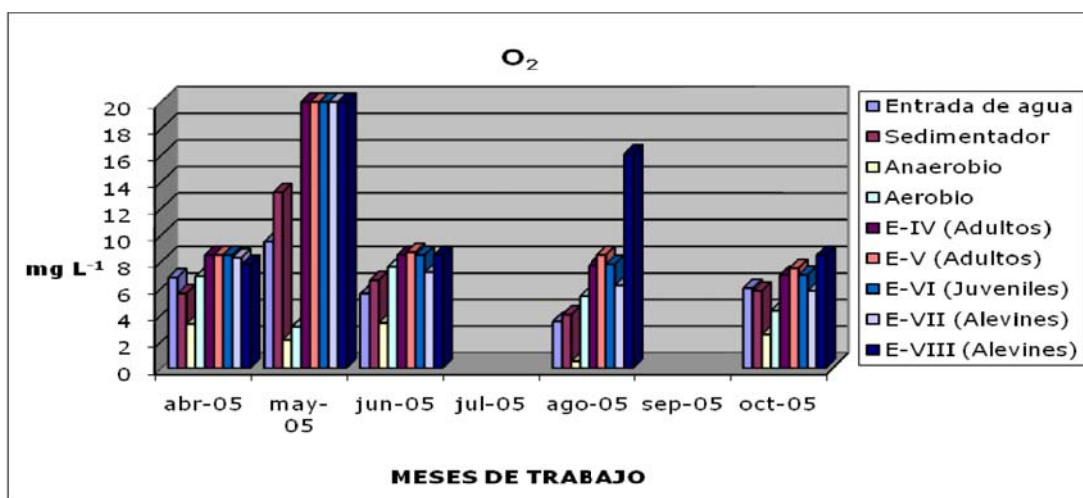


Figura 45. Valores obtenidos de O_2 en el sistema antes de su modificación.

Para el caso del sistema del humedal modificado, los valores son uniformes con una ligera tendencia hacia la disminución de oxígeno, probablemente por que no se ha establecido una comunidad de fitoplancton que contribuya al aumento en la producción de oxígeno. Según lo establecido por la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, establece un límite máximo permitido para las aguas residuales de 50 mg L^{-1} de oxígeno disuelto, no encontrando un valor que exceda este límite permitido, siendo el más elevado el de 20 mg L^{-1} detectado en el mes de mayo en los estanques donde se encuentran los peces, debido a la desconfiguración del instrumento utilizado para medir este parámetro.

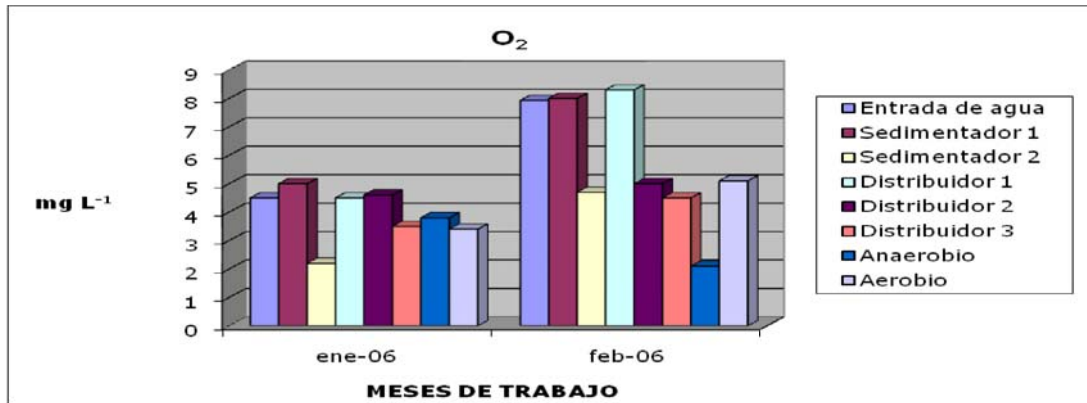


Figura 46. Valores obtenidos de O₂ en la ampliación del humedal.

Temperatura (°C)

La temperatura es importante en la solubilidad de sales y gases, en la determinación del pH y de la conductividad eléctrica, el conocimiento del origen del agua y de eventuales mezclas, etc. La temperatura de aguas superficiales está influenciada por la temperatura del aire. Una temperatura menor a 10°C modera las reacciones químicas en los diferentes tratamientos de las aguas. Las variaciones bruscas son ocasionadas por la mezcla de aguas de otro origen (Metcalf y Eddy, 1991).

La elevación de la temperatura genera una modificación en la densidad (disminuye cuando aumenta la temperatura), reducción de la viscosidad, aumento de la tensión de vapor saturante de la superficie y una disminución de la solubilidad de los gases. Así también, puede tener acciones benéficas, favorece la autodepuración y aumenta la velocidad de la sedimentación, acelera las reacciones químicas y bioquímicas, las cuales tienen un consumo de oxígeno, lo cual hace que disminuya el oxígeno disuelto y contrariamente aparezca ácido sulfhídrico, metano y cadenas parcialmente oxidadas, produciendo olores y sabores desagradables (Rodier, 1990).

En el sistema antes de su modificación, las lecturas de la temperatura presentaron en general un incremento al pasar a los estanques de producción piscícola, influyendo en este parámetro la hora a la que se tomaron las lecturas y la temporada del año.

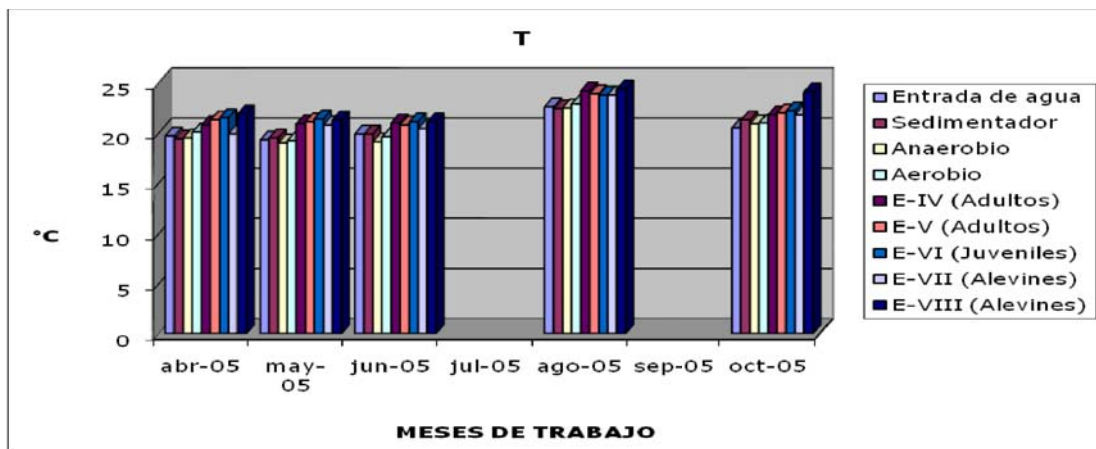


Figura 47. Valores obtenidos de T °C en el sistema antes de su modificación.

Para la ampliación del humedal se obtuvieron lecturas de este parámetro que no tuvieron mucha variación, es decir, un comportamiento muy estable. Según lo que establece la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, el límite máximo permitido para las aguas residuales es de 40 °C por lo que ninguna de los valores obtenidos en campo superan este límite antes mencionado. Las variaciones bruscas en la temperatura tienen influencia directa en los seres vivos, especialmente en las especies piscícolas, el oxígeno es menos soluble en aguas con temperaturas elevadas, provoca un crecimiento de plantas acuáticas y de hongos, (Metcalf y Eddy, 1991). Esto contrasta con otro tipo de humedales como el realizado en Texcoco donde se reportan temperaturas de 18.2 °C (Belmont *et al.*, 2004).

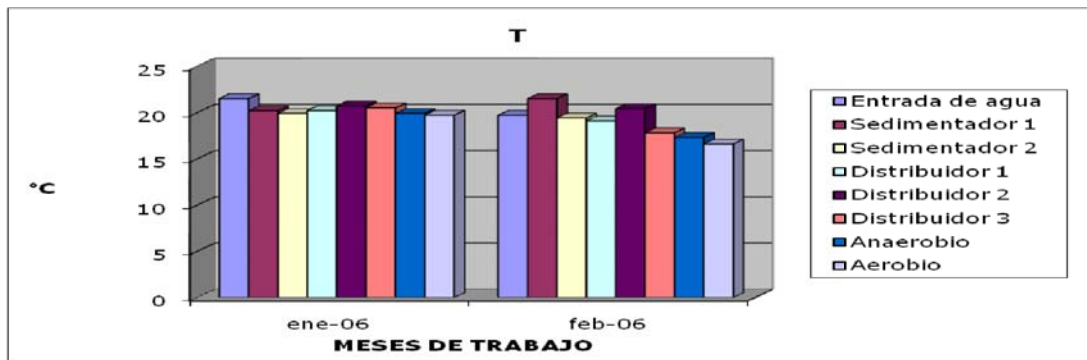


Figura 48. Valores obtenidos de T °C en la ampliación del humedal.

pH

El intervalo de concentración idóneo para la existencia de la mayoría de la vida biológica es muy estrecho y crítico; el agua residual con una concentración adversa de ion hidrógeno, es decir, que se encuentren valores muy bajos o muy altos de este parámetro; es difícil de tratar por medios biológicos y si la concentración no se altera antes de la descarga de esta al medio, el efluente puede alterar la concentración de las aguas naturales (Metcalf y Eddy, 1991). El pH controla diferentes reacciones químicas, la actividad biológica normalmente se restringe a una escala bastante estrecha de pH, entre 6.0 y 8.0 (Leslie, 1999).

El pH de los cuerpos de agua y el agua residual doméstica, en general, es ligeramente básico por la presencia de bicarbonatos, carbonatos y metales alcalinos. En las descargas industriales es posible encontrar pH ácido o básico, debido al uso de reactivos químicos.

En el sistema antes de su modificación los valores obtenidos fueron variados, en los meses de abril a agosto de 2005 tienden a incrementar de forma mínima a medida que pasan por el sistema de estanques, sobresaliendo el mes de junio en donde se obtuvieron las lecturas más elevadas oscilando alrededor de 8.70, considerándolo como un valor alcalino.

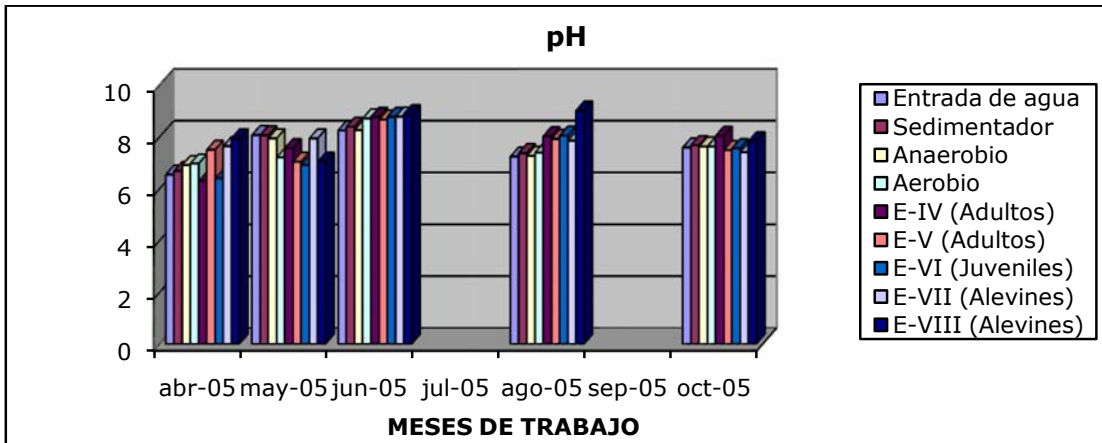


Figura 49. Valores obtenidos de pH en el sistema antes de su modificación.

Para el caso de la ampliación del humedal los valores obtenidos en el mes de enero fueron muy similares a los anteriores, para el mes de febrero las lecturas se dispararon de manera considerable teniendo registros hasta de 10.66 que fue el más elevado de todas las lecturas tomadas en el proyecto. La norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT1996, nos indica un valor de 10 unidades de pH como limite máximo permitido para las aguas residuales, encontrando que solo tres valores captados en el mes de Febrero sobre pasan por décimas este valor.

Los valores obtenidos se considerados como ligeramente alcalinos en su mayoría, cuatro valores presentan un intervalo alcalino bien definido y cuatro valores con tendencia hacia ligeramente ácido, todo esto en función de las temperaturas y el tipo de sustrato en la zona que es piedra caliza.

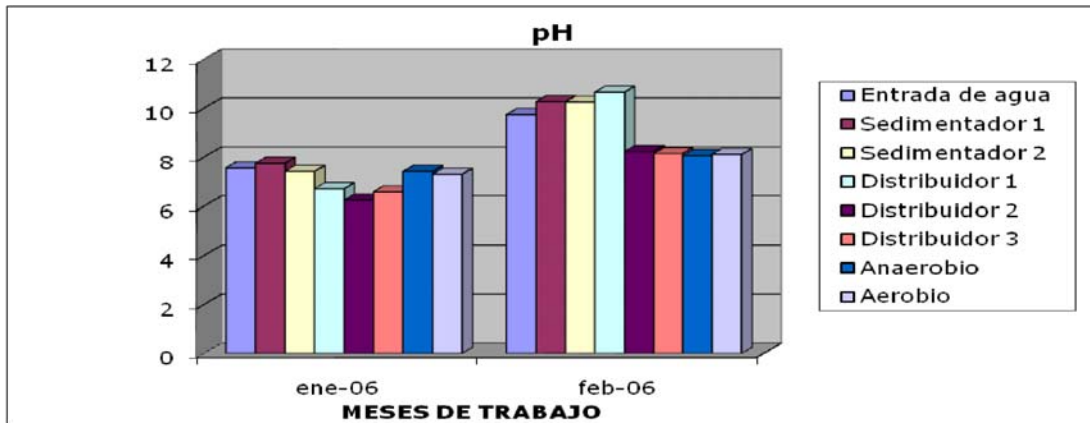


Figura 50. Valores obtenidos de pH en la ampliación del humedal.

Conductividad Eléctrica (mScm⁻¹)

La conductividad está relacionada con la concentración de sustancias disueltas y con su naturaleza, además de variar en función de la temperatura (la conductividad aumenta 1.9 μS por 100°C aproximadamente) y permite evaluar de forma rápida la mineralización global del agua. Las sales son buenas conductoras y se debe considerar que la materia orgánica y coloidal tiene poca conductividad. Al medir la conductividad en aguas residuales que puedan ser vertidas en cuerpos de agua dan una idea sobre la composición y contaminación de ésta (Rodier, 1990).

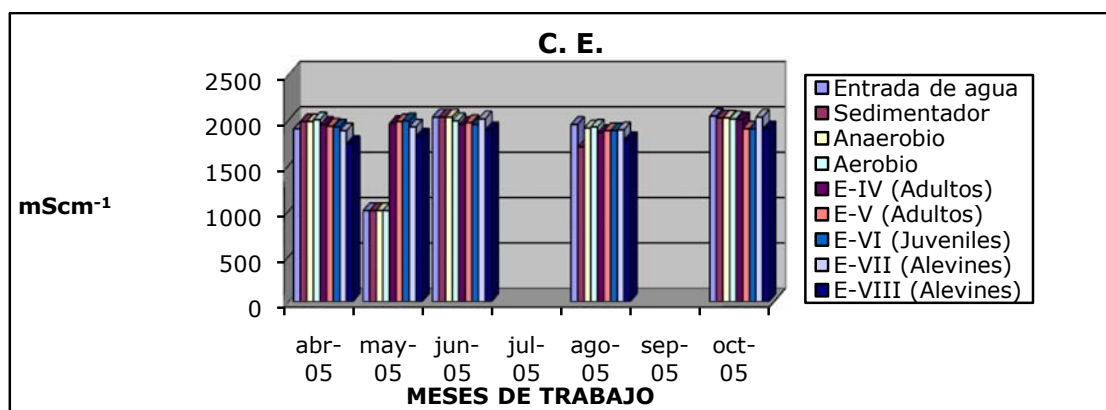


Figura 51. Valores obtenidos de C. E. en el sistema antes de su modificación.

Según lo establecido por la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, existe un límite máximo permitido que es de 10 000 mScm⁻¹ para aguas residuales, lo que nos permite inferir que los resultados obtenidos en campo son adecuados. De acuerdo a Rodier (1990) cuando una conductividad es < 100 mScm⁻¹, la mineralización en el agua es muy débil, por lo que las aguas de los humedales se consideran con un estado de mineralización débil.

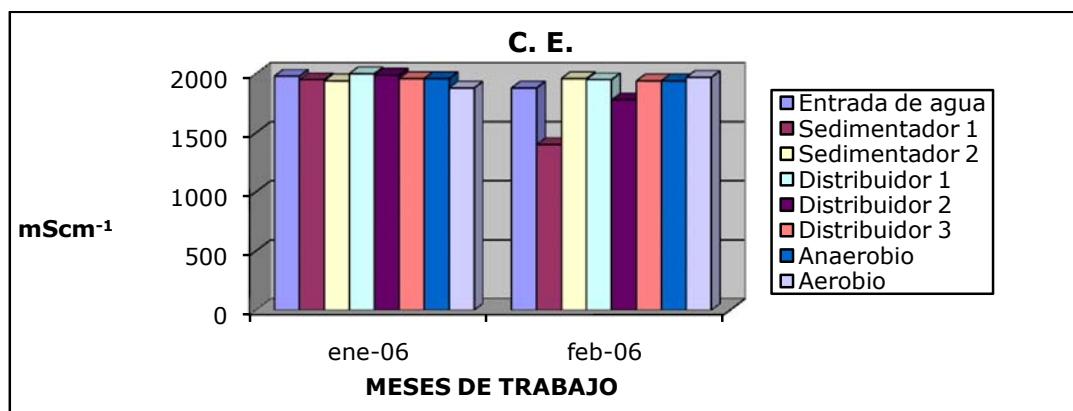


Figura 52. Valores obtenidos de la C. E. en la ampliación del humedal.

Coliformes Totales (NMP 100mL⁻¹)

Cada persona evacua de 100 000 a 400 000 millones de organismos coliformes por día, estos organismos, son útiles para destruir la materia orgánica en los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales (Metcalf y Eddy, 1991).

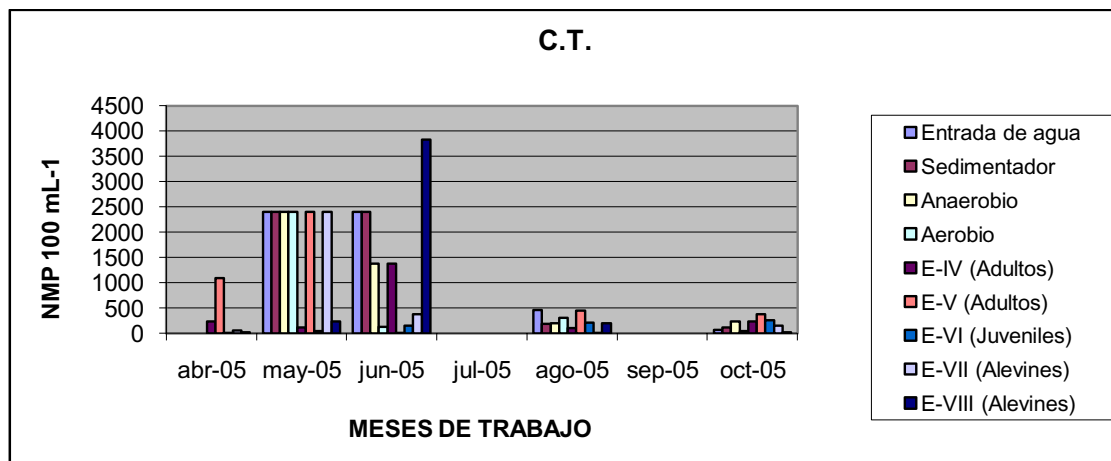


Figura 53. Valores obtenidos de C. T. en el sistema antes de su modificación.

La norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 reporta como límite máximo permitido en aguas residuales de 400 NMP 100 mL⁻¹. La presencia de organismos coliformes se interpreta como una indicación de que los organismos patógenos también pueden estar presentes y su ausencia indica que el agua se halla exenta de organismos productores de enfermedades (Metcalf y Eddy, 1991).

Se reportaron valores que rebasan los límites máximos permitidos, y que representan en la mayoría de los casos el error, al tomar agua directamente del canal para abastecer los estanques en donde están los peces, ya que en la mayoría de los otros valores se refleja el buen funcionamiento del sistema al eliminar estos organismos cuando pasan por cada uno de los puntos de muestreo al estar interactuando con los diferentes procesos del humedal construido, lo que nos indica un sistema maduro que es capaz de retener contaminantes orgánicos como los coliformes.

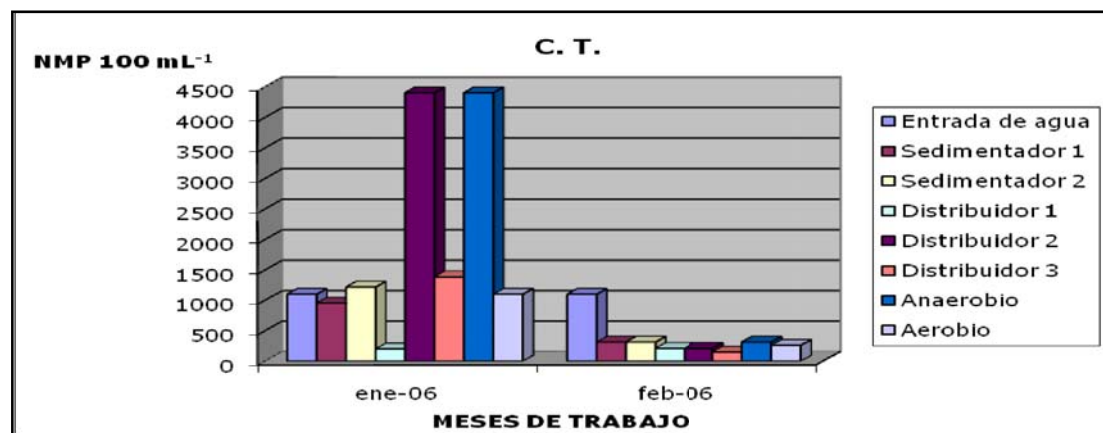


Figura 54. Valores obtenidos de C. T. en la ampliación del humedal.

Coliformes Fecales (NMP 100 mL⁻¹)

La presencia de coliformes no siempre significa contaminación con residuos humanos, ya que algunos de estos organismos pueden crecer en el suelo, por lo que la *Escherichia coli* (*E. Coli*), se utiliza como indicador de contaminación fecal (Metcalf y Eddy, 1991). En el sistema antes de su modificación donde se tiene la producción piscícola se obtuvieron los siguientes valores, en abril de 3 a 23 NMP 100 mL⁻¹, en mayo de 43 a 2400 NMP 100 mL⁻¹, en junio de 44 a 2400 NMP 100 mL⁻¹, en agosto de 11 a 458 NMP 100 mL⁻¹ y en octubre de 21 a 240 NMP 100 mL⁻¹ de coliformes fecales.

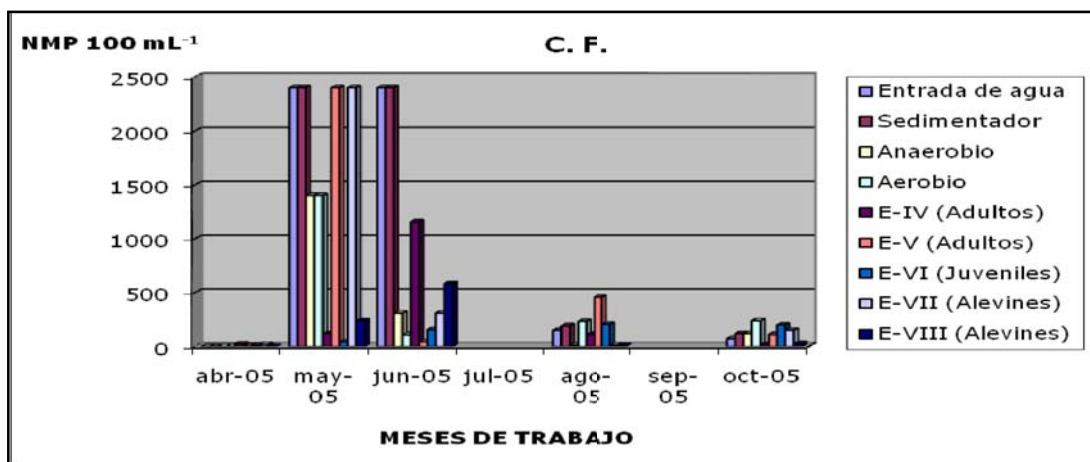


Figura 55. Valores obtenidos de C. F. en el sistema antes de su modificación.

En la ampliación del humedal los valores obtenidos fueron, en enero de 301 a 953 NMP 100 mL⁻¹, y en febrero de 150 y 460 NMP 100 mL⁻¹ de coliformes fecales.

En la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 reporta como límite máximo permitido 2000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 mL para el promedio mensual y diario, la reducción en el número permitido comparada con la de los coliformes totales es de que estos últimos organismos son los más dañinos para la salud del ser humano.

En el mes de mayo se registraron cuatro valores de 2400 mL⁻¹, en la entrada del canal se registra el primer valor de 2400 mL⁻¹, en el sedimentador el segundo, una vez que pasa por la rizosfera la eliminación de estos organismos es evidente ya que los números bajan a 1400 mL⁻¹, después pasa por el sistema de estanques donde están los peces y nuevamente aumenta a 2400 mL⁻¹. En cambio en el caso de los últimos meses de trabajo los valores van decreciendo a medida de que va pasando el efluente por el humedal lo que nos indica un buen funcionamiento del sistema, según lo que se reporta en el proyecto de Texcoco, normalmente se tiene una retención mayor al 90% (Belmont, Cantellano *et al.*, 2004).

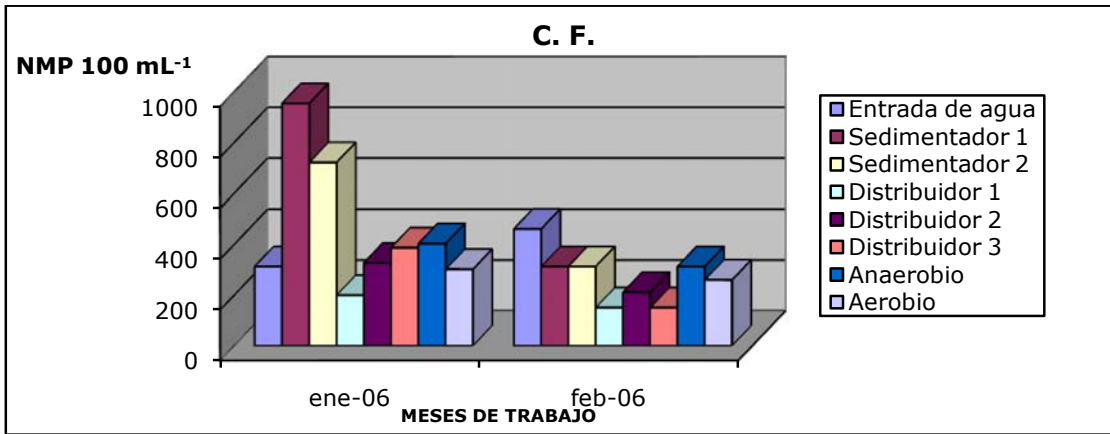


Figura 56. Valores obtenidos de C. F. en la ampliación del humedal.

XI. Conclusiones

Los metales pesados, en general, presentan muy bajas concentraciones y puede atribuirse a que la mayoría se tornan solubles en el medio acuático, otro tanto se puede precipitar a los sedimentos y en otros casos pueden ser absorbidos por la rizosfera de las plantas de ornato que son cultivadas en el humedal.

En general los metales pesados no rebasan los límites máximos permisibles por la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 para aguas residuales. Las cantidades reportadas en los resultados no se consideran dañinas para los peces que se producen en los estanques. Además, en algunos casos es evidente una retención de los mismos, aunque varía el lugar en el que se retiene en mayor cantidad. Dicha retención es menor a lo reportado para otros humedales, incluso los valores y las retenciones son diferentes con las modificaciones al sistema. Se plantea como una alternativa que la retención de los metales se lleva a cabo por efecto de precipitación anaeróbica y en los sedimentos.

La remoción de DQO es notable, sobre todo en las primeras etapas del sistema pero menor comparada con otros trabajos. Por otro lado, llega a incrementarse en los estanques piscícolas.

Se observan variaciones considerables en los niveles de contaminación que ingresa, y puede plantearse que el humedal se encuentra funcional con respecto a organismos patógenos y metales pesados.

La variación mostrada en los valores de los parámetros puede atribuirse a diversos factores como la agitación de sedimentos durante la limpieza de los canales y el manejo de los peces.

El oxígeno disuelto y la temperatura presentan valores adecuados y permiten el crecimiento y desarrollo de microorganismos, plantas y peces.

En cuanto al pH, los valores son adecuados considerando que son aguas residuales, tienen una tendencia hacia la alcalinidad, pero permiten el establecimiento de vida acuática, tanto animal como vegetal, la mayoría de los resultados están dentro del margen normal para el uso agrícola y piscícola.

La conductividad eléctrica está considerada como adecuada para el uso destinado de esta agua.

Los resultados obtenidos de los coliformes totales y fecales, aun cuando son relativamente bajos, en algunos puntos fueron elevados, lo que puede explicarse porque en la zona del canal, previo a la toma del humedal construido, existen varios poblados y las casas que están en su margen, desechan directamente residuos orgánicos. Aún así, el humedal demuestra un buen funcionamiento al eliminar estos organismos patógenos.

XII. Recomendaciones

Se tiene que controlar el flujo en la entrada de agua, con el fin de aprovechar de mejor manera la capacidad del humedal en la remoción de contaminantes, aun cuando se vean ligeramente afectadas las actividades de reuso tales como la actividad piscícola y el uso agrícola, ya que el propósito de este humedal es el tratamiento de las aguas residuales de manera natural.

Se tiene que dejar de abastecer los estanques piscícolas con agua que llega directamente del canal, ya que esto disminuye la eficiencia del humedal y provoca la entrada directa de contaminantes al sistema.

Se tiene que hacer una limpieza constante de los sedimentos acumulados en los diferentes puntos del humedal, de no hacerlo, los parámetros pueden ser afectados a la hora de evaluarlos por su concentración, además de colocarlos en un sólo lugar para su posterior análisis y reuso.

Así mismo se debe realizar un seguimiento de este trabajo, con la finalidad de observar el comportamiento del humedal a largo plazo y que este proyecto sea extensivo a otras zonas que presentan el mismo problema que en este distrito de riego.

XIII. Referencias

1. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Pollution Control Federation (WPCF). 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater (Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales). Editorial Díaz de Santos S.A., Madrid, España.
2. Ahmad, M.N., Lim, P.E., Koh, H.L. and R.B.E. Shutes. 2002. Constructed wetlands for runoff treatment and wetlands: bringing partnerships modeling. *In: Ahyaudin, A., Salmah, C.R., Mansor, M., Nakamura, R., Ramakrishna, S & Mundkur, T. (ed). Proceedings of a workshop on the Asian into good wetland practices, E.U.*
3. Armstrong, W., Armstrong, J. and Beckett, P.M. 1990. Measurement and modeling of oxygen release from roots of *Phragmites australis*. *In: Use of Constructed Wetlands in Water Pollution Control (eds Cooper, P.F & Findlater, B.C.)*. Pergamon Press, Oxford, UK.
4. Bavor, H.J. and Mitchell, D.S. 1994. *Wetland Systems in Water Pollution Control*. Ed. Pergamon. E.U.
5. Belmont M.A., Cantellano E., Thompson S., Williamson M., Sánchez A. and Metcalfe C.D. 2004. Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central México. *Ecol. Eng.*
6. Brix, H. and Schierup, H.H. 1990. Soil oxygenation in constructed reed beds: the role of macrophyte and soil-atmosphere interface oxygen transport. *Water Research* 29 (2), E.U.
7. Comisión Nacional del Agua. 2004. *Compendio del Agua*. Ciudad de México, México.
8. Comisión Nacional del Agua. 2005. *El agua en le Valle de México*. Ciudad de México, México.
9. Comisión Nacional del Agua-SEMARNAT. 2004. *Estadísticas del agua*. Ciudad de México, México.
10. Comisión Nacional del Agua-SEMARNAT. 2005. *Estadísticas del agua*. Ciudad de México, México.
11. Comisión Nacional del Agua- SEMARNAT. 2004. *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*. Ciudad de México, México.
12. Cheng, S., Wolfgang, G., Friedhelm K., Manfred T. 2002. Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals. *Ecol. Engi.*
13. EPA. 2000. *Guiding principles for constructed treatment wetlands: providing for water quality and wildlife habitat*. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., E.U.

14. EPA. 2004. Managing Nonpoint Source Pollution from Agriculture. Pointer No. 6 EPA841-F-96-004F.EUA. <http://www.epa.gov/owow/nps/facts/point6.htm> (23 abril 2006).
15. Gleick, P. H. 1998. Water in Crisis: Paths to sustainable water use. *Ecological Applications* 8(3).
16. Gobierno del Estado de Hidalgo. 1987. Los Municipios de Hidalgo. Estado de Hidalgo, México.
17. Gobierno del Estado de Hidalgo. 1993. Monografía del Estado de Hidalgo, Instituto Hidalguense de la Cultura, tomo I. Estado de Hidalgo, México.
18. Gobierno del Estado de Hidalgo. 1994. Cuaderno Estadístico Municipal Ixmiquilpan. 1994. Estado de Hidalgo, México.
19. Gobierno del Estado de Hidalgo. 1996. Cédula Municipal Estado de Hidalgo. Dirección de Información para la Planeación. Estado de Hidalgo, México.
20. Gobierno del Estado de Hidalgo (Secretaría de Desarrollo Social) – INEGI. 2000. Anuario Estadístico Hidalgo, Estado de Hidalgo, México.
21. Gobierno del Estado de Hidalgo. 2000. Cuaderno de Información Básica Ixmiquilpan. Dirección General de Planeación Estado de Hidalgo, México.
22. Greenway, M. 2005. The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia. School of Environmental Engineering, Griffith University, Australia.
23. Hernández-Muñoz A. 1992. Depuración de Aguas Residuales. Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España.
24. Hamer, A.D. 2000. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Ed. Lewis Publisher. E.U.
25. Hamilton, R. and Fraser, W. W. 1978. A case history of natural underwater revegetation: Mandy mine high sulfide tailings. E.U.
26. INEGI. 2005. Estadísticas de población, Censo anual. México.
27. Jackson, R. B., Carpenter, S. R., Dahm, C.N., McKnight, D. M., Naiman, R. J., Postel, S. L. and Running, S. W.. 2001. Water in a Changing World. *Issues in Ecology*. No. 9.
28. Koottatep, T., Polprasert, C., Oanh, N.T.K., Surinkul, N., Montagero, A. and Strauss, M. 2002. Constructed wetlands for septage treatment - towards effective faecal sludge management. In: Proceedings of the 8th International conference on wetland systems for water pollution control. E.U.
29. Leslie, C.P.G., Glen, T.D. and Henry, C.L.. 1999. Biological Wastewater Treatment. E.U.
30. Lim, P.E., Wong, T.F. and Lim, D.V. 2001. Oxygen demand, Nitrogen and Copper removal by free-water-surface and subsurface-flow constructed wetlands under tropical conditions. *Environment International*. E.U.

31. Liu J., Dong Y., Xu H., Wang D. and Xu J. 2007. Accumulation of Cd, Pb and Zn by 19 wetland plant species in constructed wetland. Department of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu Polytechnic University, University Town, Changzhou, Jiangsu 213164, China.
32. Mays, P. A. and Edwards, G. S. 2001. Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage. *Ecol. Eng.* E.U.
33. Means, L.J. and Hinche, E.R. 2000. Emerging Technology for Bioremediation of Metals. Lewis. Publishers. E.U.
34. Mejía-Saénz, E., Palacios Vélez, E., A., García, E. y Santos Hernández, A. L. 2002. Problemas operativos en el manejo del agua en Distritos de Riego. *TERRA* 20(2).
35. Metcalf & Eddy Inc. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, 3rd ed., revised by G. Tchobanoglous and F.L. Burton, McGraw-Hill E.U.
36. Moshiri, A.G. 2000. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Lewis Publisher. E.U.
37. NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales
38. NMX-AA-003-1980. Aguas residuales-muestreo. [http: www. economia-noms. gob. mx/](http://www.economia-noms.gob.mx/).
39. NMX-AA-008-SCFI-2000. Análisis de Agua. Determinación de pH. Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-008-1980).
40. NMX-AA-012-SCFI-2001. Análisis de Agua. Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-012-1980).
41. NMX-AA-014-1980. Cuerpos receptores-muestreo. [http: www. economia-noms. gob. mx/](http://www.economia-noms.gob.mx/).
42. NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de Agua. Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-030-1981).
43. NMX-AA-42-1987. Calidad del agua. Determinación del Número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva.
44. NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de metales pesados por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-051-1981).
45. Organización Mundial de la Salud. 2004. Informe anual OMS. México.
46. Organización de Cooperación Económica y el Desarrollo, 1998, OCDE.

47. Phillips, B.C., Lawrence, A.I. and Nawang, W.M. 2002. Constructed ponds and wetlands in tropical urban areas. In: Proceedings of an international conference on urban hydrology for the 21st Century. Kuala Lumpur, Malasia.
48. PNUMA. GEO. 2004. Anuario 2003. Nueva York, E.U.
49. Ramalho, R. S. 1996. Tratamientos de Aguas Residuales. Ed. Reverte S.A. Madrid, España.
50. Ramsar Convention. 2004. ¿Qué son los humedales? Documento Informativo Ramsar No. 1 Gland, Suiza. Ramsar Convention. Disponible en: http://.ramsar.org/about_infopack_1s.htm (23 febrero 2006)
51. Revenga, C. J., Brunner, N., Henninger, K., Kassem and Payne R.. Pilot Analysis of Global Ecosystems, 2005: Freshwater Systems. World Resources Institute, Washington D.C. E.U.
52. Rodier, J., Laporte, J. y Plissier, M. 1991. Análisis de aguas, aguas naturales, aguas residuales, agua de mar, Química, Fisicoquímica, Bacteriología. Traducción al Español de Santiago B. Dolz. Madrid, España.
53. Ryszowski, L. 2001. Landscape Ecology in Agroecosystems Management. CRC Press. Boca Ratón, Florida, E.U.
54. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2003. Acuerdo que establece las Reglas de Operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos. DOF. Ciudad de México, México.
55. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2005. Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México. Ciudad de México, México.
56. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2005. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Ciudad de México, México
57. Swackhamer, D.L., Paerl, H. W., Eisenreich, S. J., Hurley, J. and Hornbuckle, K. C. M. 2004. Impacts of Atmospheric Pollution on Aquatic Ecosystems. Issues in Ecology <http://www.esa.org/science/issues> (13 marzo 2006).
58. Tanner, C.C. 2001. Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. Water Science and Technology. E.U.
59. UN. 2003. Water for People-Water for Life. The United Nations World Water Development Report. UNESCO Publishing / Berghahn Books. Paris, France.
60. Walker, D.J. and Hurl, S. 2002. The reduction of heavy metals in a stormwater wetland. Ecol. Eng. E.U.
61. Wetzel, R.G. 2000. Fundamental processes within natural and constructed wetland ecosystems: short term versus long-term objectives. Water Science and Technology. E. U.
62. Mitsch, W. J. and Gosselink, J.G. 1993. *Wetlands*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, S. M. Harmon, Soil. New York, E.U.

63. WRI. 1999. Water: Critical shortages ahead? En WRI, UNEP, UNDP, and WB, World Resources 1998-99: Environmental change and human health. http://pubs.wri.org/pubs_content_text.cfm?ContentID=1030
(9 mayo 2006)

64. WRI. 2000. Pilot analysis of global ecosystems: freshwater systems. E.U.