



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA



***PLANEACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LECHOS
DE CARRIZO (PKA).***



TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

JUAN FRANCISCO DE LEÓN IBARRA

DIRECTOR DE TESIS: M EN I. ENRIQUE CESAR VALDEZ

MEXICO D.F.

NOVIEMBRE DEL 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICO ESTE TRABAJO A MI FAMILIA

Agradecimientos

Agradezco por su apoyo en la realización de este trabajo a:

El M en I. Enrique Cesar Valdez la dirección de esta tesis y su apoyo para la realización de la misma.

Al Ing. Oscar Vega Roldan y al Ing. Arturo Nava Mastache por sus valiosas enseñanzas durante mis años en la facultad de ingeniería.

A la Lic. Maria Sagué y a la hermosa gente de InWent por todo su apoyo y comprensión durante mi estancia en Alemania.

Al Dr. Joachim Krüeger y a todos los miembros de SUBTERRA por compartir su experiencia conmigo durante mi estancia en su firma.

A Dieter Müller y a Anita Heiliger de Medico Internacional por haberme proporcionado el material bibliográfico para esta tesis.

Mis padres Elizabeth Ibarra y Humberto de León por su infinito amor y apoyo en todos los proyectos que me eh propuesto en mi vida y porque sin ellos no sería el hombre que en este momento soy.

Mis hermanas Claudia Jimena y Maria Alejandra de León Ibarra por su amor, apoyo y comprensión.

A Gabriela Serrano por llenar cada uno de mis días de amor y ternura.

A la familia Samayoa Donado por su aprecio y apoyo a lo largo de todos estos años en México.

A Iván Ramírez, Ricardo Gómez, Marco Antonio Álvarez, Maribel Miranda, Juan Carlos Ramírez, Natalia Escobedo, Eduardo Esteban Marban y demás amigos por su apoyo, amistad y momentos compartidos juntos.

Índice

PROLOGO	7
INTRODUCCIÓN.....	9
PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA.....	9.
FIG. 1.1: DISPONIBILIDAD DE AGUA DULCE EN EL PLANETA, EN EL AÑO 2000 (FUENTE: PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, UNEP 2002).....	10.
OBJETIVOS.....	11.
CAPITULO 1: ASPECTOS GENERALES DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	12.
1.1 COMPOSICIÓN Y GASTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO	12.
1.2 PARÁMETROS TÍPICOS DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	14.
1.2.1 Características físicas	14.
1.2.2 pH.....	14.
1.2.3 Demanda química de oxígeno (DQO)	14.
1.2.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	15.
1.2.5 Carbono orgánico.....	15.
1.2.6 Nitrógeno (N).....	15.
1.2.7 Fósforo (P).....	16.
1.2.8 Características higiénicas	16.
1.2.9 Metales pesados y sustancias tóxicas.....	16.
1.3 NORMATIVIDAD EN MATERIA DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL RECURSO AGUA EN MÉXICO	17.
1.4 SISTEMAS DE ALCANTARILLADO	21.
1.4.1 Sistema combinado	21.
1.4.2 Sistema separado	21.
1.5 DESCRIPCIÓN DE LOS DIVERSOS MÉTODOS DE TRATAMIENTO	21.
1.5.1 Mecánicos	22.
1.5.2 Químicos	24.
1.5.3 Biológicos	24.
1.5.4 Ecológicos	25.
1.6 TRATAMIENTO DE LODOS.....	27.
1.6.1 Estabilización de lodos	27.

1.6.2 Deshidratación de los lodos	27.
1.6.3 Eliminación de los lodos.....	27.
CAPITULO 2: SITUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO	28.
2.1 DISPONIBILIDAD Y USO DEL RECURSO AGUA EN MÉXICO	30.
2.2 PROBLEMÁTICA NACIONAL.....	33.
2.3 CONSECUENCIAS POLÍTICAS, SOCIALES Y AMBIENTALES	36.
2.4 ¿PLANTAS DE TRATAMIENTO CENTRALIZADAS O DESCENTRALIZADAS?	37.
CAPITULO 3: LA TÉCNICA DE LOS LECHOS DE CARRIZO (PKA)	38.
3.1 CONSTRUCCIÓN DE PKA'S	39.
3.2 TIPOS DE PKA'S.....	40.
3.3 PLANTAS ADECUADAS PARA LAS PKA'S	42.
3.4 PROCESO BIOQUÍMICO EN EL FILTRO SEMBRADO.....	45.
3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS PKA'S	48.
3.6 CALIDAD DEL EFLUENTE ESPERADA	49.
3.6.1 Temperatura	50.
3.6.2 pH.....	50.
3.6.3 Degradación de la materia orgánica	51.
3.6.4 Transformación del nitrógeno.....	51.
3.6.5 Retención de fosfatos.....	52.
3.6.6 Metales pesados	52.
3.6.7 Eliminación de enfermedades	54.
CAPITULO 4: CONSIDERACIONES PARA LA PLANEACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UNA PLANTA PKA EN MÉXICO	56.
4.1 PLANEACIÓN DE UNA PKA.....	56.
4.1.1 Criterios de decisión para una Pka	57.
4.1.2 Selección del lugar	59.
4.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PARTES PRINCIPALES DE UNA PKA	59.
4.2.1 Tratamiento mecánico primario	60.
4.2.2 Pozo de bombeo	63.
4.2.3 Filtro de materiales sembrado.....	64.
4.2.4 Pozo de control	70.
4.3 OPERACIÓN DE UNA PKA.....	72.
4.4 COSTOS DE UNA PKA	74.

<u>CAPITULO 5: FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN Y SUSTENTABILIDAD DE LA TÉCNICA PKA EN MÉXICO</u>	75.
<u>5.1 COMPONENTE TÉCNICO DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN</u>	75.
<u>5.2 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES POLÍTICAS Y ECONÓMICAS SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE PKA'S EN MÉXICO</u>	77.
<u>5.2.1 El aspecto político-social</u>	77.
<u>5.2.2 El aspecto político-ambiental</u>	78.
<u>5.2.3 El aspecto económico</u>	78.
<u>5.3 COMPONENTES DE SALUD E HIGIENE</u>	79.
<u>5.4 POSIBLES USOS DEL AGUA TRATADA A TRAVÉS DE PKA'S EN MÉXICO</u>	80.
<u>CAPITULO 6: CONCLUSIONES</u>	82.
<u>RECOMENDACIONES</u>	86.
<u>GLOSARIO</u>	87.
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	88.
<u>LISTA DE TABLAS</u>	90.
<u>Bibliografía</u> 91.	

Prologo

Según datos de la agencia alemana GTZ sólo el 5% del agua a nivel mundial es tratada adecuadamente, este porcentaje es claramente mucho menor en los países en desarrollo como México en los cuales el tema del ambiente no es prioridad por diversos factores económicos, políticos y sociales.

Paradójicamente el agua residual municipal proveniente de los grandes y pequeños centros urbanos es la causa principal de la contaminación y destrucción de los mantos acuíferos del país, así como de ríos, lagos, lagunas y de los ecosistemas asociados a ellos.

En las zonas rurales del país, donde en muchas poblaciones no existe un sistema de alcantarillado municipal, el agua corre a cielo abierto siendo la causa fundamental de la proliferación de enfermedades gastrointestinales entre la población y el ganado o bien es almacenada por años en fosas sépticas del tipo de infiltración concentrándose con los años los agentes tóxicos (lodo activado) que posteriormente al ser vertidos al medio ambiente resultan inclusive más dañinos.

A lo largo de esta tesis se demostrará que la técnica de lechos de carrizo (Pka, por sus siglas en alemán o Reed beds en inglés) es una alternativa viable para México en el tratamiento del agua residual de origen domiciliar, puesto que, estas estaciones son fáciles de construir y operar, además, de que su eficiencia en la calidad del efluente es en algunos casos superior a los métodos tradicionales centralizados mucho mas costosos. Estrictamente esta técnica es un humedal artificial de flujo subsuperficial, como se puede apreciar en la figura 0 y viene siendo usada desde los años 60`s en países como Alemania, Austria y Francia en donde se han desarrollado, estudiado y patentado diversas variantes.

Las Pka's han probado ser una alternativa sustentable para el tratamiento de las aguas residuales en países en desarrollo como Tailandia y Egipto donde precisamente la mayor limitante es muchas veces el factor económico y técnico.

Sobre el autor: El autor participó en el programa internacional de capacitación: "Los Principios de la Agenda Local 21 y su Aplicación Práctica: Un Desarrollo Sostenible de la Infraestructura Urbana" por parte del Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo, a través de, Inwent (Internationale Weiterbildung und Entwicklung gGmbH); en el periodo de Agosto del 2004 a julio del 2005, desarrollado en las ciudades de: Munich, Colonia y Berlín en la Republica Federal de Alemania, dentro del programa se contempla la pasantía en una empresa privada alemana la que realizó en la empresa Joachim Krüger Pflanzenkläranlagen GmbH (www.subterra.de) especializada en la construcción de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales .

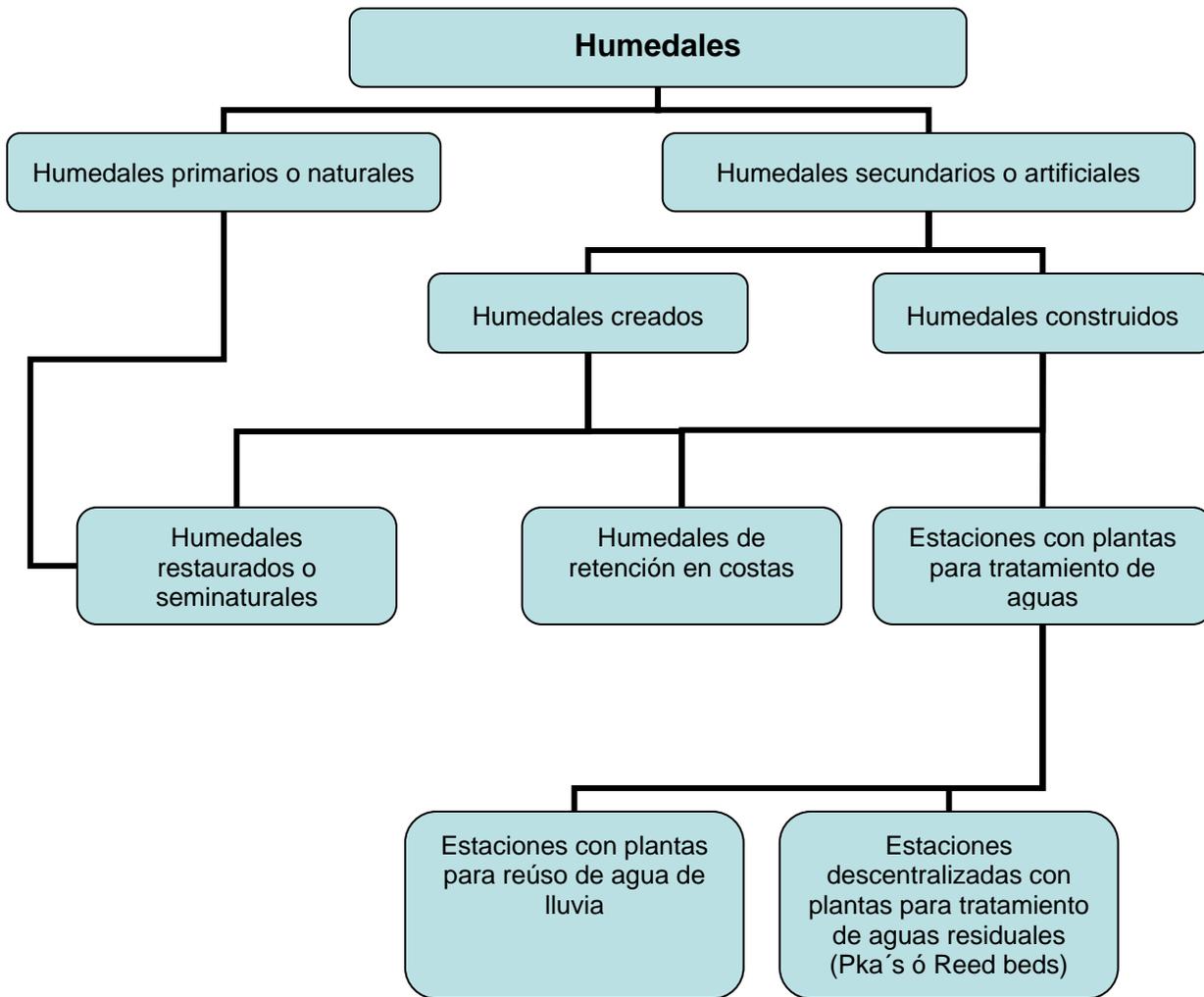


Fig. 0: Clasificación de la técnica Pka. (Fuente: Wissing, F. und Hofmann, K.: 2002; Pág. 129)

Introducción

Presentación del problema

Si bien es cierto que casi toda la superficie del globo terráqueo está cubierta de agua el 90 % es agua de mar, el 2 % es hielo y está en los polos, y sólo el 1 % de toda el agua del planeta es dulce, encontrándose en ríos, lagos y mantos subterráneos.

Las reservas de agua potable del planeta se han ido reduciendo dramáticamente debido al crecimiento poblacional y a la explotación desmedida del recurso.

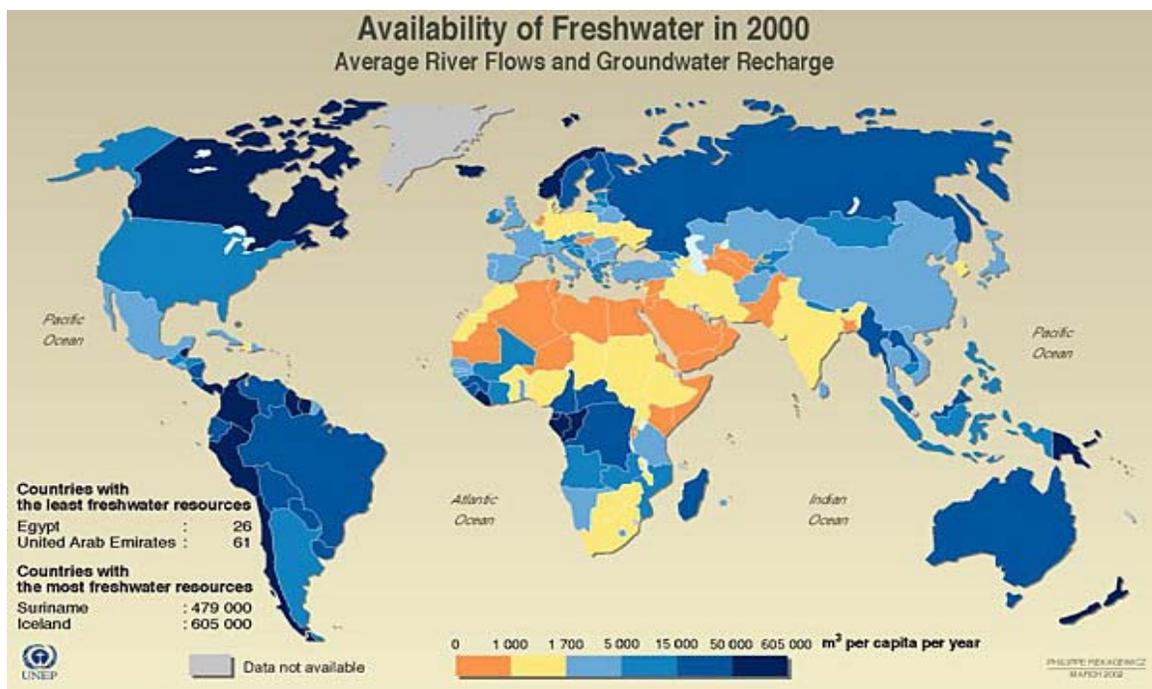
Según el reporte “Perspectivas del Medio Ambiente Mundial 2000” del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA):

- De los 4,600 millones de habitantes del mundo en los países en desarrollo hay mas de 1,100 millones de personas no tienen acceso a agua potable es decir el 18% de la población mundial.
- Aproximadamente 2,400 millones no poseen instalaciones sanitarias adecuadas.
- 31 países carecen totalmente de acceso a fuentes de agua limpia.
- De cada cuatro personas una no alcanza el agua pura.
- Cada ocho segundos muere un niño por beber agua contaminada.
- Más de cinco millones de personas mueren cada año por aguas contaminadas.

Los datos anteriores nos llevan a pensar que así como las guerras durante el siglo 20 se debieron esencialmente al petróleo es muy probable que las nuevas guerras del siglo 21 sean debido al agua.

De todos los sectores, el agrícola es el mayor consumidor de agua con el 65%, no sólo porque la superficie irrigada en el mundo ha tenido que quintuplicarse sino porque no se cuenta con un sistema de riego eficiente, razón principal que provoca que las pérdidas en estos sistemas sean enormes. Le siguen el sector industrial que requiere del 25% y el consumo doméstico, comercial y de otros servicios urbanos municipales que requieren el 10%. Para el año 2015 el uso industrial alcanzará el 34% a costa de reducir al 58% los volúmenes destinados para riego y al 8% los destinados para otros usos. El consumo total de agua se ha triplicado desde 1950 sobrepasando los 4,300 km³/año, cifra que equivale al 30% de la dotación renovable del mundo que se puede considerar como estable.

El siguiente mapa muestra la disponibilidad de agua dulce en ríos y mantos acuíferos subterráneos por área del planeta:



Source: World Resources 2000-2001, People and Ecosystems: The Fraying Web of Life, World Resources Institute (WRI), Washington DC, 2000.
Fig. 1.1: Disponibilidad de agua dulce en el planeta, en el año 2000 (Fuente: Programa de las naciones unidas para el medio ambiente, UNEP 2002)

Es claro que debido a la problemática mundial y a las particularidades de los países en desarrollo se deben buscar alternativas eficaces para asegurar un uso racional y sustentable del recurso agua. Lo anterior se conseguirá no sólo educando a la población y modernizando los sistemas de explotación, captación y distribución, sino además, integrando tecnologías accesibles económica y técnicamente que permitan tratar las aguas residuales generadas en nuestros países con la suficiente calidad para asegurar la protección del medio ambiente y a través de los distintos reúsos de esta “agua tratada” ahorrar agua potable con el fin de proteger las reservas nacionales y mundiales de este vital líquido.

Objetivos

- **Objetivo general.**

Describir el proceso de tratamiento de agua residual a base de lechos de carrizo (Pka's), discutir y evaluar su viabilidad de aplicación y bajo que circunstancias se recomienda sobre otros procesos en México.

- **Objetivos específicos.**

Los objetivos específicos que se persiguen son:

- Determinar si es viable y en que partes de México se podría usar esta técnica para tratar las aguas residuales municipales.
- Determinar si se pueden ahorrar recursos económicos importantes usando este método como alternativa a los métodos tradicionales de tratamiento (grandes plantas de tratamiento centralizadas)
- Demostrar que se puede usar el agua residual tratada por medio de esta técnica en diversas actividades con el fin de ahorrar agua potable y de esta manera proteger y cuidar las reservas de agua del país.
- Determinar si se puede a través de esta técnica impulsar la economía del sector agrícola con posibles reúsos del agua tratada.

Capítulo 1: Aspectos generales del tratamiento de las aguas residuales

El agua dulce deja de ser potable a través de los diversos usos que el hombre a lo largo de su historia le ha dado. Se debe de entender como agua residual no solo el agua que proviene de las casas habitación: duchas, lava trastos, limpieza y excusados, sino también el agua empleada en las industrias y comercios. Al agua residual pertenece también, en menor o mayor cantidad, el agua de lluvia que se mezcla en los sistemas de alcantarillado con los tipos de aguas mencionadas.

Todos los métodos de tratamiento de aguas residuales consisten en la transformación de los agentes contaminantes, como materia orgánica, así como la eliminación de los agentes químicos y los metales pesados. Combinando diversos métodos se busca remover los contaminantes del agua para poder regresarla a la naturaleza sin impactos adversos significativos, o bien, que esta agua tratada pueda ser reusada para riego en las plantaciones agrícolas. También se busca a través del tratamiento del agua residual evitar la difusión de agentes patógenos y con esto evitar brotes infecciosos. Para finalizar, a través, de un adecuado tratamiento se pueden reducir las emisiones de gases que afectan el cambio climático global y además evitar malos olores. Con todo lo anterior se podrá conseguir reducir la sobre explotación del agua subterránea.

1.1 Composición y gastos de las aguas residuales en México

Las cantidades (gastos) de las aguas residuales dependen del consumo de agua que hace la población, así como de su nivel de vida y el grado de conciencia ambiental que posea dicha población. Pero también “el consumo de agua es especialmente diferente en los países en desarrollo de país a país así como de zonas urbanas a rurales” (Imhoff's, K., 1989, Pág. 88 und Wissing, F., 2002, Pág. 12). La composición del agua residual depende en gran medida de su origen. De esta manera un agua residual proveniente en su mayoría de casas habitación será sumamente distinta en comparación con agua que proviene de industrias; además, en las características influye también la estación del año y el clima de la zona. Las diferencias se dan incluso en comunidades del mismo país pues el tipo de sistema de alcantarillado puede ser separado o combinado.

De manera general se puede decir que el consumo diario de agua en casas habitación por habitante es de aproximadamente 150 l/p*d, el cual se divide como se ve en la figura 1.2:

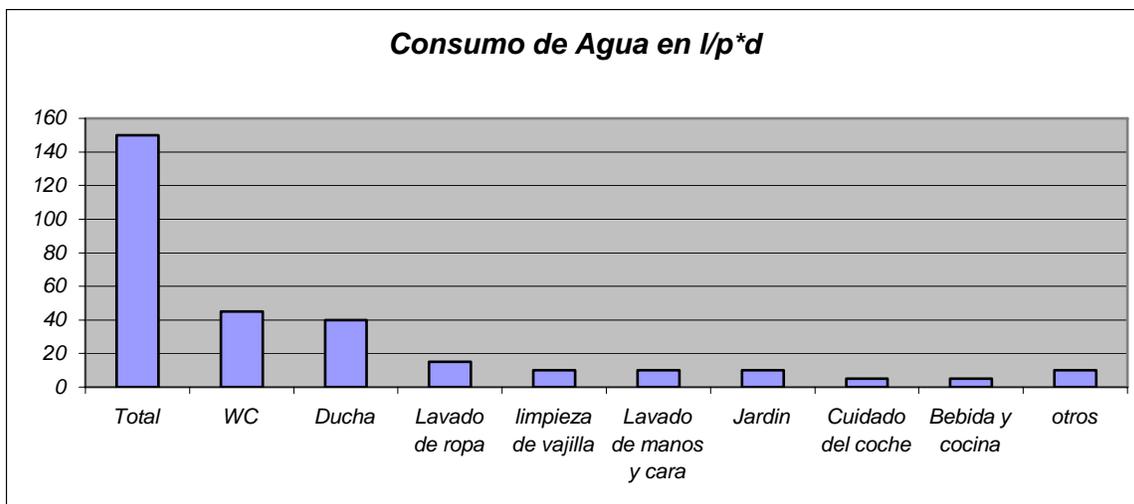


Fig. 1.2: Consumo diario de agua dulce por actividades. (Fuente: Wissing, F. und Hofmann, K.: 2002; Pág. 13)

Como ya se explicó, la composición y características del agua residual varían de país a país pues dependen de razones sociales, ecológicas y climatológicas. El cuadro 1.1 muestra las características del agua residual de origen doméstico típica en México:

Cuadro 1.1

Composición del agua típica de origen doméstico.

Parámetro	Valor
Sólidos suspendidos Totales (SST)	200-300 mg/l
Demanda Bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO 5).	200-250 mg/l
Demanda Química de Oxígeno(DQO)	350-450 mg/l
Nitrógeno Total (N)	25-60 mg/l
Fósforo Total (P)	5-10 mg/l
Aceites y Grasas.	80-120 mg/l

Fuente: PNUMA: 1998; cap.2

1.2 Parámetros típicos de las aguas residuales

El agua residual se compone de aproximadamente 99% de agua, a esta se le agregan sustancias orgánicas e inorgánicas así como virus y microorganismos a través de los diversos usos. Los parámetros típicos brindan información acerca de las características físicas, químicas y biológicas del agua residual. Esta información es representativa del uso al que ha sido expuesta el agua, y rige la selección y el posterior diseño del método adecuado de tratamiento, además de servir como parámetros de comparación para determinar la calidad del efluente en los diversos procesos de tratamiento.

1.2.1 Características físicas

Como características físicas del agua residual se debe de entender la temperatura, así como la concentración de sólidos sedimentables ya sean de origen orgánico o inorgánico.

1.2.2 pH

El pH (potencial de hidrógeno) describe la actividad de los iones en una solución acuosa sobre una escala de 0-14. De acuerdo a esa escala las sustancias se clasifican en ácidas, básicas o neutras.

Para el tratamiento de las aguas residuales; el pH es el primer criterio químico en importancia. Un pH sobre 8 ó bajo 6.5 indica que el agua residual en cuestión contiene ácidos o bases, esto es común normalmente cuando se trata de agua residual de origen industrial.

El tratamiento biológico de aguas residuales por medio de microorganismos debe de realizarse en un rango de pH entre 6 y 9. Fuera de ese rango la mayoría de los microorganismos resultan dañados o inactivos. Por esa razón, antes de la etapa biológica de tratamiento, sobre todo tratándose de aguas residuales de origen industrial se requiere ante todo un análisis del pH del agua, para que en caso de que el agua no esté dentro del rango antes mencionado se establezca el pH a través de métodos químicos.

1.2.3 Demanda química de oxígeno (DQO)

Sin el oxígeno no se podrían oxidar los contaminantes en el agua residual, esto significa que el proceso de tratamiento no podría ser exitoso. El valor de DQO indica la cantidad de oxígeno (O₂) en mg/l, que es necesario para que la materia orgánica sea degradada con la ayuda de las bacterias. Este valor se usa como referencia para indicar el grado de contaminación del agua residual con materia orgánica.

Sin ningún método artificial para intensificar el proceso, la demanda de oxígeno -y por consiguiente el proceso de tratamiento- se realiza a lo largo de aproximadamente 25 días; la disminución de la DBO en un día para una $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ es de aproximadamente el 20.6% del resto de la demanda. Para temperaturas menores a los $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ el proceso se desarrolla más lentamente; mientras que para temperaturas mayores el proceso es más rápido.

1.2.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Para comparar diversas aguas residuales se usa el parámetro denominado DBO (demanda bioquímica de oxígeno) a los 5 días. El cual asciende a 68.4% del total de la DBO. La DBO₅ se usa como referencia para definir la concentración de sustancias orgánicas degradables carbonáceas. Mediciones representativas anteriormente realizadas indican que hoy cada habitante en los países desarrollados descarga al ambiente un promedio de 60g de DBO₅ por día (Wissing, F. und Hofmann, K. 2002 Pág. 26 tabla 2). En las naciones con menor calidad de vida los valores son mucho menores como se observa en el cuadro 1.1.

1.2.5 Carbono orgánico

Para medir el contenido de carbono orgánico en una muestra de agua residual se usa el parámetro Carbono Orgánico Total (COT) este parámetro se refiere tanto a compuestos orgánicos fijos como volátiles, naturales o sintéticos y es la expresión más correcta del contenido orgánico total.

1.2.6 Nitrógeno (N)

Para medir el contenido de Nitrógeno en una muestra de agua residual se usa el parámetro Nitrógeno total (N) El Nitrógeno en las aguas residuales se presenta en cuatro tipos de compuestos: amoníaco, nitrógeno orgánico, nitratos y nitritos. El nitrógeno de la biomasa de las aguas residuales, que se encuentra en forma de proteínas, es hidrolizado formando los aminoácidos que, por acción de las bacterias, pasa a transformarse en amoníaco, luego en nitrito y por último en nitrato.

1.2.7 Fósforo (P)

El fósforo total (P) es el parámetro usado para medir la suma de fosfatos, ortofosfatos, polifosfatos, fósforo inorgánico y fosfatos orgánicos en las aguas residuales.

El fósforo llega al agua residual a través de las heces fecales así como de los productos para el lavado de la ropa (detergentes y suavizantes). El contenido de fósforo en forma de fosfatos juega un papel muy importante, ya que es el responsable de la intensificación del crecimiento de las algas en los cuerpos de agua, provocando la destrucción de estos (Eutrofización).

1.2.8 Características higiénicas

La razón original del tratamiento de las aguas residuales fue siempre la higiene y como objetivo último la salud de la población. Como parámetro de la presencia de potenciales brotes patógenos se usa el Coli-Test o índice de Coliformes fecales. Tómese en cuenta que en un litro de agua residual se encuentran alrededor de un millón de bacterias E-coli, coliformes fecales y bacterias de Salmonella, que muy a menudo son los causantes de enfermedades gastrointestinales dentro de la población.

1.2.9 Metales pesados y sustancias tóxicas

Con la revolución industrial creció también la concentración de metales y sustancias tóxicas disueltas en el agua producto de los diversos procesos industriales. Debido a su toxicidad la presencia de cualquiera de ellos en cantidades excesivas interferirá con cualquier posible reúso del agua tratada como por ejemplo usar el lodo activado como abono para el mejoramiento de los suelos en la agricultura, es por eso que los límites permisibles al respecto son tan estrictos.

Los análisis de metales pesados deben de hacerse para Níquel, Cadmio, Cobre, Zinc, Plomo, Mercurio y Cromo. Aunque en general el agua residual de origen domiciliar posee muy bajas concentraciones de estos materiales, se debe tomar en cuenta que no son degradables es decir que cada gramo que se encuentre en el agua residual al inicio del proceso de tratamiento mecánico y/o biológico se encontrará al final de este.

1.3 Normatividad en materia de control de la contaminación del recurso agua en México

La normatividad que rige el tratamiento de las aguas residuales en México se puede resumir de la siguiente manera:

- ❖ Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (artículo 27)
 - Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
 - Ley de Aguas Nacionales
 - Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales
 - Normas Oficiales Mexicanas

Para hacer posible la aplicación de las disposiciones contenidas en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) así como las contenidas en la Ley de Aguas Nacionales, existen un conjunto de normas reglamentarias y técnicas.

Las siguientes normas mexicanas tienen como finalidad prevenir y controlar la contaminación de las aguas y son de observancia obligatoria para los responsables de las descargas:

- **Norma Oficial Mexicana NOM-001- SEMARNAT-1996.** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada el 6 de enero de 1997.
- **Norma Oficial Mexicana NOM-002- SEMARNAT-1996.** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada el 3 de junio de 1998.
- **Norma Oficial Mexicana NOM-003- SEMARNAT-1997.** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicada el 14 de enero de 1998.
- **Norma Oficial Mexicana NOM-004- SEMARNAT-2001.** Que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final. Publicada el 15 de agosto de 2003.

Los límites máximos permisibles son según las tablas No.2 y 3 del apartado 4 de la NOM-001:

TABLA 2

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																				
PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO		HUMEDALES NATURALES (B)	
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)			
(miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura °C (1)	N.A	N.A	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante (3)	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sen te	au sente te	au sen te	au sen te	au sente te
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A	N.A	1	2

Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A	N.A	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno₅	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A	N.A	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A	N.A.	N.A.	15	25	N.A	N.A	N.A	N.A
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A	N.A	N.A.	N.A.	5	10	N.A	N.A	N.A	N.A

(*) Medidos de manera total

(1) Instantáneo

(2) Muestra Simple Promedio Pondera

(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006.

P.D.= Promedio Diario; P.M. = Promedio Mensual:

N.A. = No es aplicable.

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos

TABLA 3

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS																				
PARÁMETROS (*)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
(miligramos por litro)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuros	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

1.4 Sistemas de alcantarillado

A la colección y conducción del agua residual desde el lugar en que se produce - viviendas, instalaciones públicas y negocios- hasta la planta de tratamiento o hacia algún cuerpo de agua se le conoce como alcantarillado este puede ser un sistema combinado o bien separado, por lo general el sistema de conducción es a gravedad a menos que la topografía del terreno haga esto imposible y se tenga que recurrir a bombas para bombear el agua residual a través de las tuberías.

1.4.1 Sistema combinado

Para el sistema de alcantarillado unitario o combinado se debe de contabilizar además de las aguas residuales también el agua de lluvia, que dependiendo del país y la época del año puede provocar que el gasto de diseño aumente considerablemente; sin embargo, debido al agua de lluvia las concentraciones de los contaminantes contenidos en el agua residual disminuirán, este sistema es el más usado en la actualidad pues los costos de construcción son menores que los de los sistemas separados.

1.4.2 Sistema separado

En este sistema se separan las aguas residuales del agua de lluvia desde el principio pues corren por redes de alcantarillado distintas, este sistema presenta las ventajas de que sólo se tratará en las plantas el agua residual producida por lo que los diámetros de los tubos para la conducción de estas serán menores; el agua de lluvia puede ser incluso evacuada con una red de canales abiertos y almacenada para su posterior reúso. Sin embargo, al construirse dos redes de alcantarillado separadas se incrementarán los costos de construcción por lo que en países con problemas económicos como México esta alternativa no es muy usada.

1.5 Descripción de los diversos métodos de tratamiento

El desarrollo de los diversos métodos de tratamiento va acompañado generalmente por la construcción de grandes instalaciones para el tratamiento del agua residual a través de diversos procesos. Todos estos métodos buscan, a través de procesos físicos, químicos o biológicos remover los contaminantes básicos del agua residual de tal manera que esa agua pueda después del tratamiento reusarse o bien dejarla regresar a la naturaleza sin impacto al ambiente, además estas instalaciones deben de garantizar la no contaminación de las fuentes subterráneas de agua y minimizar los problemas de olor que pueden resultar molestos a la población.

La elección del método adecuado de tratamiento depende de diversos factores como el tipo de agua residual (domiciliar o industrial) así como de factores económicos, políticos, sociales y ecológicos.

1.5.1 Mecánicos

Estos métodos tienen como finalidad el eliminar las partículas pesadas como la arena y los objetos grandes flotantes del agua residual. Además el agua residual posee sólidos disueltos y no disueltos. Los sólidos no disueltos pueden también ser eliminados por medio de operaciones mecánicas, se debe de diferenciar entre los sólidos suspendidos, sedimentables y flotantes; es muy importante eliminar estas partículas, ya que constituyen aproximadamente el 30 % de los contaminantes contenidos en el agua residual.

Para las partículas más gruesas como arena y/o restos de ropa se usan rejillas y desarenadores mientras que para los sólidos no disueltos se suelen usar tanques de sedimentación primaria o lagunas de flotación.

A continuación se explicarán brevemente cada uno de los métodos mecánicos mencionados.

- **Rejas:** Las aguas residuales afluentes por lo general fluyen a través de cortinas que eliminan los materiales flotantes y los trapos. La separación entre las barras puede variar entre 5 y 50 mm. Cuando hay que evitar problemas de tratamiento corriente abajo, las barras no deben tener una separación mayor que 12 mm. Normalmente los sistemas de cribado eliminan con eficacia todos los objetos mayores al tamaño de las barras, estos desechos se pueden retirar mecánica o manualmente de las rejillas y después eliminarse en un relleno sanitario una vez que han sido lavados, colados y compactados

- **Desarenadores:** En el caso de la eliminación de arenilla, se eliminan los sólidos inertes y las arenas que dañarían las bombas y otros equipos mecánicos en los procesos corriente abajo. Hay muchos tipos de procesos de eliminación de arenilla, pero la mayoría incluyen una pequeña cámara llamada tanque desarenador a través de la que fluyen las aguas residuales, este tanque debe tener el tamaño suficiente para detener el flujo de manera que los sólidos inertes y pesados se asienten en el fondo.

La mayoría de los diseños de tanques desarenadores eliminan alrededor del 95% de las partículas inertes mayores a 0,21 mm. Algunos diseños modernos pueden eliminar partículas inertes menores a 0,21 mm. La arenilla se puede quitar manualmente por medio de palas, pero este procedimiento requiere de tanques desarenadores redundantes de manera que cada uno se pueda aislar y vaciar por medio del uso de palas. Por lo general, la arenilla se elimina del fondo del tanque con cubetas mecánicas, transportadores inclinados de tornillo o bombas de arenilla. Estas deben ser muy durables, ya que la arenilla es un material muy abrasivo.

- **Sedimentadores primarios:** Los tanques primarios de sedimentación son la forma más común de tratamiento primario. Se colocan después de un proceso de cribado o de eliminación de arenilla. Los tanques primarios de sedimentación asientan los sólidos suspendidos en el flujo de aguas residuales.

En la medida en que el agua residual fluye al tanque de sedimentación, el líquido se mueve muy lentamente, y los sólidos orgánicos inertes se asientan en el fondo. La teoría del proceso es la misma de un tanque desarenador, con la excepción de que la velocidad de sobreflujo es menor, lo que permite asentarse a algunos de los sólidos orgánicos, que tienen una densidad menor que la arenilla. Los sólidos que se asientan se arrastran hacia un punto central y después son drenados con una bomba para lodo. La espuma de las aguas residuales, que se forma básicamente de aceite y grasa, es menos densa que las aguas residuales y flota en la superficie. Como el lodo, la espuma se recolecta con un brazo mecánico y se elimina regularmente.

Los procesos de tratamiento primario por lo general anteceden a procesos de tratamiento secundario o biológico en las instalaciones convencionales de tratamiento de aguas residuales. El principal propósito del tratamiento primario es reducir la carga de sólidos suspendidos y en menor medida de la DBO en los procesos, corriente abajo. Al reducir esta carga se disminuyen los costos de aireación para las plantas de lodo activado y el volumen de desechos de lodo activado que se genera en el tratamiento secundario.

Los tanques de sedimentación se utilizan como un proceso de tratamiento primario en la mayoría de las instalaciones grandes y convencionales de tratamiento de aguas residuales domésticas y en algunas aplicaciones industriales.

Un tanque de sedimentación convencional elimina del 25 al 40% de la DBO influente, 40 a 70% de los sólidos suspendidos totales y alrededor del 50% de la carga de bacterias.

- **Tanques de flotación:** La flotación de aire disuelto (FAD) es otro tipo de proceso de tratamiento primario que se usa con frecuencia para aguas residuales industriales que contengan aceite, grasa y otros sólidos que floten con facilidad. Las refinerías de petróleo, fábricas empacadoras de carne y plantas procesadoras de lácteos usan este tipo de proceso como tratamiento primario ya que los aparatos de FAD pueden producir un efluente con muy poco aceite: hasta 1 a 20 mg/L.

Un proceso de FAD elimina el aceite y las grasas en menos espacio que la sedimentación primaria. Se presurizan las aguas residuales y el aire entre 3 y 5 atmósferas y se liberan en un tanque abierto a la atmósfera. Esto libera burbujas pequeñas de la solución, que flotan a la superficie. Las burbujas se enredan con los sólidos ligeros y los aceites y los llevan a la superficie. Un colador recolecta entonces los sólidos en la superficie del agua y el líquido clarificado continúa corriente abajo a otros procesos.

1.5.2 Químicos

La eficiencia en el proceso crece cuando los sólidos con la ayuda de compuestos químicos son aislados y separados del agua residual, con la ayuda de estos compuestos pueden ser retenidos incluso los sólidos disueltos. Los compuestos químicos se usan especialmente en aguas residuales de origen industrial para lograr lo siguiente:

- Neutralización de agua básica o ácida, porque un pH menor a 6.5 lleva a una marcada disminución en la eficiencia de la nitrificación y la degradación de la materia orgánica, mientras que para un valor de pH por encima de 7.0 el Amonio (NH_4^+) se transforma en el tóxico Amoniaco (NH_3).
- Eliminación de coloides y partículas finas a través de agentes floculantes.
- Eliminación de fósforo a través de sales minerales usualmente se utiliza sulfato de aluminio, cloruro férrico y cal para causar la precipitación de fósforo soluble como fosfatos metálicos e hidróxidos. Estas sustancias pueden ser adicionados en diversas etapas del proceso de tratamiento como: en el lodo activado del tratamiento primario, al licor mixto de aguas residuales activadas o bien en el clarificador secundario.
- Desinfección a través de cloro, ozono o luz ultravioleta.

1.5.3 Biológicos

En los procesos de tratamiento secundarios bacterias aerobias y anaerobias se alimentan del material orgánico en las aguas residuales, transformando la DBO del alcantarillado en masa bacteriana. Las bacterias aerobias, el tipo que se utiliza con más frecuencia para el tratamiento secundario, consumen material orgánico solamente en presencia de oxígeno. Las bacterias anaerobias no requieren oxígeno, pero los procesos aerobios producen un efluente de mejor calidad. Por esta razón, y debido a que el tratamiento anaerobio puede producir olores desagradables, los procesos aerobios son sin ninguna duda el tratamiento secundario más común en las instalaciones de tratamiento de gran tamaño. Los procesos biológicos más utilizados se pueden agrupar en cinco tipos:

- **Procesos aerobios:** Se dan en presencia de oxígeno, se llevan a cabo en lagunas o tanques en las que se mantiene una concentración adecuada de oxígeno, mediante sistemas mecánicos, como agitación, o mediante inyección de oxígeno puro o aire. Los principales procesos aerobios empleados para la eliminación de la materia orgánica son: **lodos activados, lagunas aireadas, biodiscos, filtro percolador, zanjas de oxidación y reactores de digestión aerobia.**

- **Procesos anaerobios:** Se dan en ausencia de oxígeno. Se llevan a cabo en reactores cerrados, generándose gases de reacción ricos en metano, que pueden ser aprovechados para producir energía, dado su alto poder calorífico.

-**Procesos anóxicos:** Se encuentra la desnitrificación o eliminación del nitrógeno en forma de nitrato por conversión en nitrógeno gas en condiciones anóxicas (sin oxígeno).

- **Procesos aerobios, anaerobios y anóxicos combinados:** Procesos de una o varias etapas donde se produce la eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación y eliminación del fósforo.

- **Procesos de lagunaje:** Estanques de estabilización aerobia, se emplean para el tratamiento del agua residual por medio de procesos naturales que incluyen la utilización de algas y bacterias

1.5.4 Ecológicos

Los llamados métodos ecológicos o naturales se basan en los procesos de evacuación y depuración de aguas que se dan en los ecosistemas, al observar la operación de estos procesos en la naturaleza se llega a la conclusión de que favorecen el desarrollo de especies vegetales a las orillas de ríos y lagos, que tienen una gran importancia, pues en los últimos años se ha comprobado su efectividad en el tratamiento de aguas residuales al usarlas en estaciones descentralizadas de tratamiento.

En las zonas rurales donde el agua residual tendría que ser conducida por muchos kilómetros hacia una planta de tratamiento central, las estaciones descentralizadas de tratamiento de aguas residuales pueden ayudar a ahorrar recursos considerables para el desarrollo de la región, además muestran que los altos costos de construcción de las grandes estaciones centralizadas de tratamiento son desfavorables.

Las estaciones descentralizadas han demostrado en los últimos 20 años en Alemania, que los “Métodos ecológicos” son una excelente solución para tratar el agua residual de origen doméstico en pequeñas poblaciones rurales. Se deben distinguir entre los siguientes métodos:

- **Flujo terrestre:** El agua residual es canalizada hacia un área arenosa con cierta pendiente donde escurre. El área requerida está entre 10 – 60 m² por habitante para un promedio de carga hidráulica de 5 mm/d*m².

Con el crecimiento de las ciudades y el consecuente aumento en las necesidades de la población, la cantidad de agua residual producida ha crecido y se ha hecho necesario desarrollar otros métodos que aunque consuman más energía necesitan menos espacio para operar, como las lagunas aireadas o bien los filtros percoladores.

- **Filtros de arena:** El agua residual es canalizada hacia un filtro de arena y grava donde escurre; sin embargo el filtro es susceptible ha taparse fácilmente, por eso es necesario en estas instalaciones un buen tratamiento primario y en intervalos de tiempo una limpieza del filtro recirculando agua limpia a presión a través del cuerpo de arena y grava.

La mayor parte del tratamiento tiene lugar por medio de actividad biológica aerobia en la estructura porosa del medio filtrante y a través de procesos de eliminación físicos y químicos. El proceso de tratamiento es muy estable y confiable, susceptible de producir un efluente de alta calidad que tiene una DBO baja, pocos sólidos suspendidos y patógenos.

- **Lagunas de estabilización:** En las lagunas de estabilización las aguas residuales fluyen a una laguna donde las bacterias transforman y eliminan contaminantes como la DBO, nutrientes, sólidos suspendidos y patógenos.

Existen muchos tipos de lagunas. **Las aereadas** mantienen las condiciones aerobias por medio de equipos mecánicos. La materia orgánica se degrada por medio de organismos que utilizan oxígeno. **Las lagunas facultativas** por lo general tienen periodos de retención mayores que las aereadas, pues no utilizan sistemas mecánicos para la aereación. El oxígeno lo proporciona el crecimiento fotosintético de algas en los niveles superficiales de la laguna. Su diseño permite que la superficie de la laguna sea aerobia, mientras que los niveles inferiores no lo son. **Las lagunas anaerobias** no tienen oxígeno en toda su profundidad. Son las más profundas y más cargadas en términos de contaminantes. **Los estanques con alto contenido de algas (EACA)** son estanques poco profundos que se utilizan como parte de un sistema de estanques integrado que puede incluir mezcladores de bombeo de flujo axial para propiciar el crecimiento de las algas. **Los estanques de maduración** están diseñados para la eliminación de patógenos y su eficacia es mayor dentro de una serie de estanques sucesivos. **El sistema de estanques integrados avanzado (SEIA)** aplica una combinación de estanques anaerobios, facultativos, de alto contenido de algas, de asentamiento y de maduración con recirculación del efluente hacia las celdas anaerobias.

Las lagunas anaerobias eliminan alrededor del 40 al 60% de la DBO afluente. Los otros tipos de lagunas pueden lograr confiablemente una concentración de DBO de 30 mg/L o mejor si son bien diseñadas.

- **Estaciones de tratamiento en lechos de carrizo (Pka's por sus siglas en alemán):** Una Pka es un filtro de materiales graduados compuesto de diversas capas de arena y grava sembrado con plantas de pantano.

Investigaciones demuestran que la cantidad de microorganismos en suelo sembrado es mucho mayor que en el suelo libre de raíces vegetales. Esto se debe a que las partes subterráneas de las plantas están ventiladas lo que permite al oxígeno atmosférico captado por las partes no subterráneas (hojas y tallo) circular y difundirse por todas las raíces. Esta es la condición para una colonización de microorganismos aerobios del entorno inmediato a las raíces y rizomas (Bacterias, hongos y algas), aunque también es posible encontrar al lado procesos de degradación anaerobios, estos son particularmente importantes para la desnitrificación del efluente.

El tratamiento biológico del agua residual en este tipo de estaciones va acompañado de un proceso paralelo de filtración proporcionado por el filtro de arena y grava, lo que asegura una calidad en el efluente tanto en el parámetro DBO como en cuanto a los sólidos suspendidos. Para asegurar un correcto funcionamiento de la estación y evitar posibles taponamientos en el cuerpo del filtro de materiales graduados, se debe antes de asegurar la calidad del agua residual a través de un tratamiento preliminar a base de rejillas y de un proceso de sedimentación primario normalmente en 3 etapas.

1.6 Tratamiento de lodos

En las instalaciones de tratamiento de aguas residuales el lodo activado se compone del lodo primario proveniente de la etapa de tratamiento mecánica y del lodo secundario que proviene de la etapa biológica.

La porción de lodos, que proviene de la etapa mecánica está compuesta principalmente de arena, mientras que la porción proveniente de la etapa biológica está compuesta predominantemente por biomasa. Además, el lodo primario contiene materiales orgánicos y minerales así como sustancias tóxicas y metales pesados; pero sobre todo esta compuesto de una gran parte de agua (aproximadamente 98%). Un tratamiento adecuado de lodos debe consistir en tres etapas: *estabilización, deshidratación y eliminación.*

1.6.1 Estabilización de lodos

La estabilización de lodos se lleva a cabo en desechos sólidos espesados procedentes de procesos biológicos. Su propósito es reducir el contenido de sólidos volátiles y de patógenos en el lodo para que se pueda eliminar o aplicar a la tierra con seguridad. Estos procesos también reducen el volumen de sólidos. Los procesos típicos de estabilización de lodos son: *digestión aerobia, secado por aire, digestión anaerobia, elaboración de composta, estabilización por cal.*

1.6.2 Deshidratación de los lodos

Los procesos de deshidratación de lodos incluyen la eliminación del agua de lodos de plantas de tratamiento para disminuir el costo de procesos de tratamiento posterior o anterior a la eliminación de los lodos como un líquido concentrado. Los procesos típicos de deshidratación de lodos incluyen: *deshidratación por prensa de filtro de cinturón, deshidratación centrífuga, deshidratación por prensa de tornillo, deshidratación por placa y marco.*

1.6.3 Eliminación de los lodos

Cuando el lodo está contaminado con metales pesados, se enviará al relleno sanitario, muy rara vez es incinerado. El lodo procedente de aguas residuales domesticas en el que la mayoría de los microorganismos patógenos han muerto puede ser usado en las granjas y plantaciones ya que por ser rico en nutrientes está catalogado como uno de los mejores mejoradores de suelos.

Capítulo 2: Situación del tratamiento de las aguas residuales en México

México está ubicado a la altura del Trópico de Cáncer, es un país que posee una variedad de climas sorprendente, pudiéndose encontrar desde el clima árido desértico en el norte del país hasta climas templados o fríos en la región centro del país así como bosque tropical húmedo en las zonas sur y sureste.

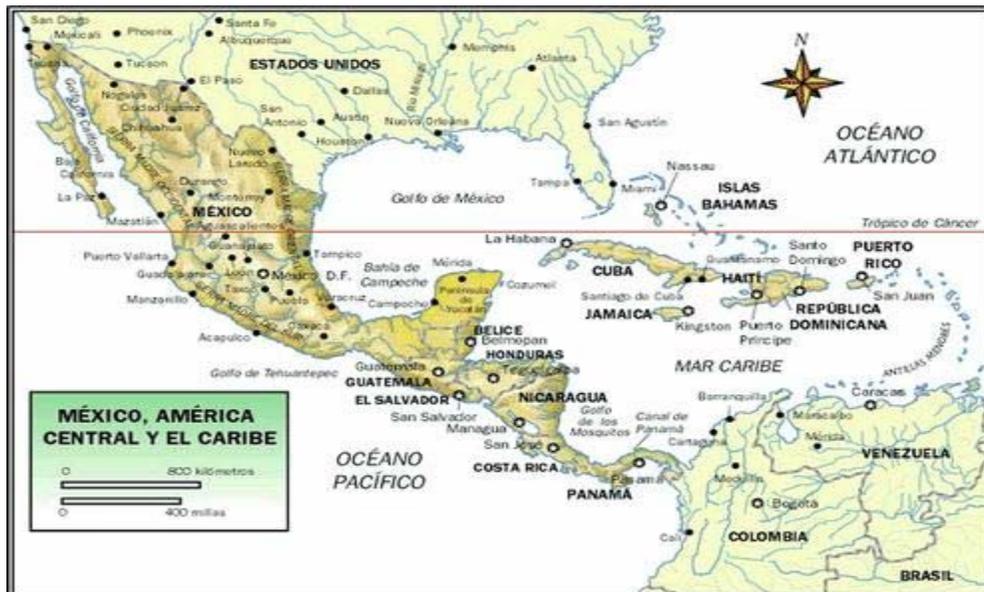


Fig. 2.1: Ubicación geográfica de México. (Fuente: <http://www.mhhe.com/socscience>)

Políticamente México se divide en 31 estados y un distrito federal, mismos que están constituidos por 2 446 municipios (incluidas las 16 delegaciones políticas del D. F.); con una extensión territorial de 1 964 375 km².



Fig.2.2: División política de México; (Fuente: INEGI 2002)

La precipitación pluvial y por ende la disponibilidad del recurso agua en México, como se puede observar en la figura 2.3, es desigual ya que en las zonas norte y centro (donde se asienta el 77% de la población) sólo se tiene el 32% de la disponibilidad natural media del recurso, además a lo largo del año la precipitación es irregular como se observa en la grafica 2.4, siendo los meses de más lluvias los meses de junio a octubre pero llegándose en varios meses del año a precipitaciones inferiores a los 20 mm por mes sobre todo en la zona norte del país (6 meses).

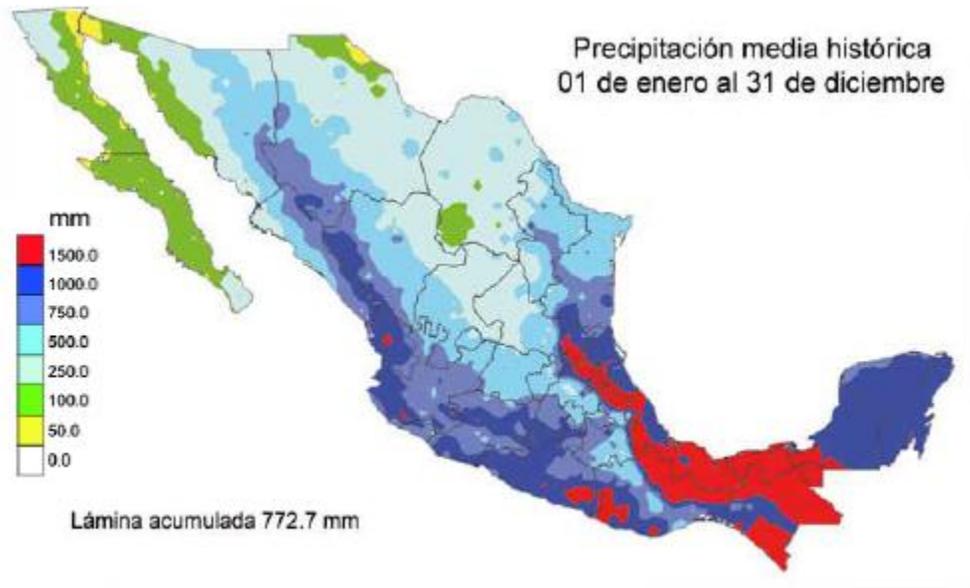


Fig.2.3: Distribución de las lluvias a nivel nacional; (Fuente SUIBA; México 2005:)

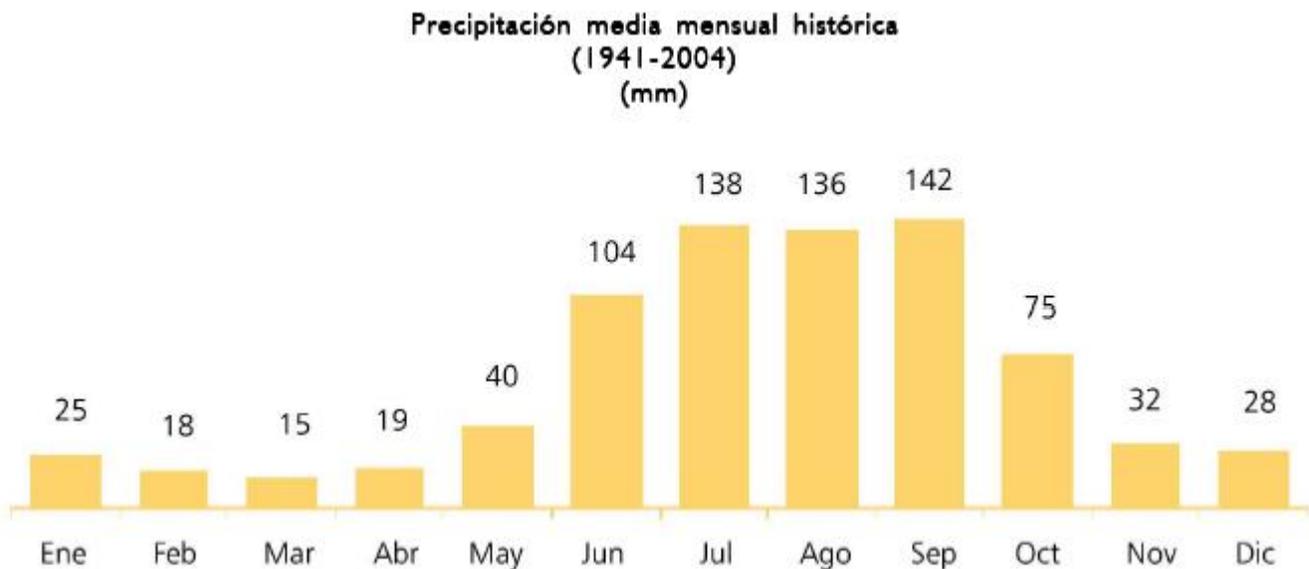


Fig. 2.4: Distribución de la precipitación a lo largo del año; (Fuente: SUIBA; México 2005)

Si sumamos a esta característica histórica de carácter climático el hecho de que el crecimiento poblacional en México de las últimas décadas ha sido desmesurado (según el INEGI, México pasó de 66 millones de habitantes en los 80's a casi los 100 millones en el año 2000) se entiende que se haya disparado la explotación del agua potable para el consumo humano, además, dicho crecimiento poblacional llevó a la intensificación de la actividad agrícola para la producción de alimentos al mismo tiempo que se daba un crecimiento en el sector industrial sin ningún tipo de normativa acerca del uso y protección del agua dulce.

2.1 Disponibilidad y uso del recurso agua en México

Según el INEGI en su reporte "Estadísticas a propósito del día mundial del agua" del año 2002, en México existe una disponibilidad natural promedio de 483,271 hm³ de agua al año, que a nivel mundial lo ubican como uno de los países con disponibilidad media, la cual se distribuyó por región administrativa para el año 2004 según la CNA de la siguiente manera:

Cuadro 2.1

Disponibilidad natural media de agua por región administrativa.

Región Administrativa	Disponibilidad natural media total (hm ³)	Disponibilidad natural media per cápita 2004 (m ³ /hab/año)	Escorrentamiento natural medio superficial total * (hm ³)	Recarga media total de acuíferos (hm ³)
I Península de Baja California	4 423	1 317	3 012	1 411
II Noroeste	8 213	3 210	5 459	2 754
III Pacífico Norte	24 839	6 038	22 159	2 680
IV Balsas	28 924	2 703	24 944	3 980
V Pacífico Sur	32 508	7 782	30 799	1 709
VI Río Bravo	14 182	1 356	8 962	5 219
VII Cuencas Centrales del Norte	6 841	1 726	4 729	2 112
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	36 977	1 820	29 594 ^b	7 383
IX Golfo Norte	23 347	4 666	22 070	1 277
X Golfo Centro	102 544	10 574	98 930	3 614
XI Frontera Sur	158 260	24 549	139 839	18 421
XII Península de Yucatán	29 646	8 255	4 330	25 316
XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala	3 934	188	1 996 ^c	1 938
Total Nacional	474 637	4 505 ^d	396 823	77 814

Fuente: SUIBA; México 2005

En 1999 la extracción bruta ascendió a 78,402 hm³; de los cuales 53,009 hm³ fueron de origen superficial y 25,385 provinieron del subsuelo. El 82.7% de la extracción total se destinó a riego agrícola, 12.6% a uso público y 4.7% a uso industrial. Para el 2004 los porcentajes de uso han cambiado y como se aprecia en la figura 2.5, el porcentaje del agua destinada a procesos industriales ha crecido en un 5%, lo mismo que el agua destinada a uso público que creció en un 1.4% no así el sector agropecuario que descendió en 6.7% en un lapso de 5 años.

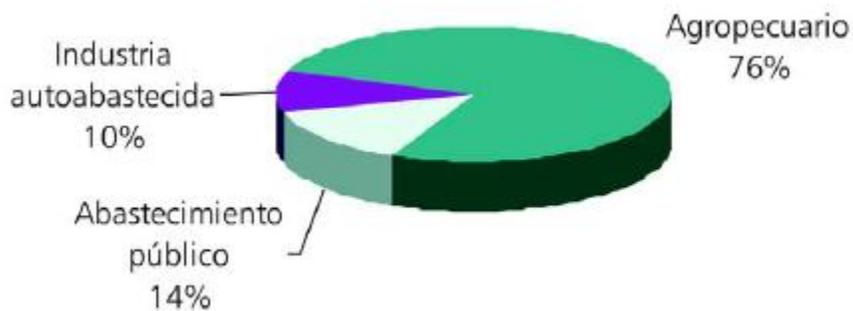


Fig. 2.5: Volúmenes de agua concesionados para usos fuera del cuerpo de agua (Acumulado a diciembre de 2004); (Fuente SUIBA; México 2005:)

Así mismo los volúmenes concesionados para explotación de agua potable se distribuyen por región administrativa como se muestra en la figura 2.6.

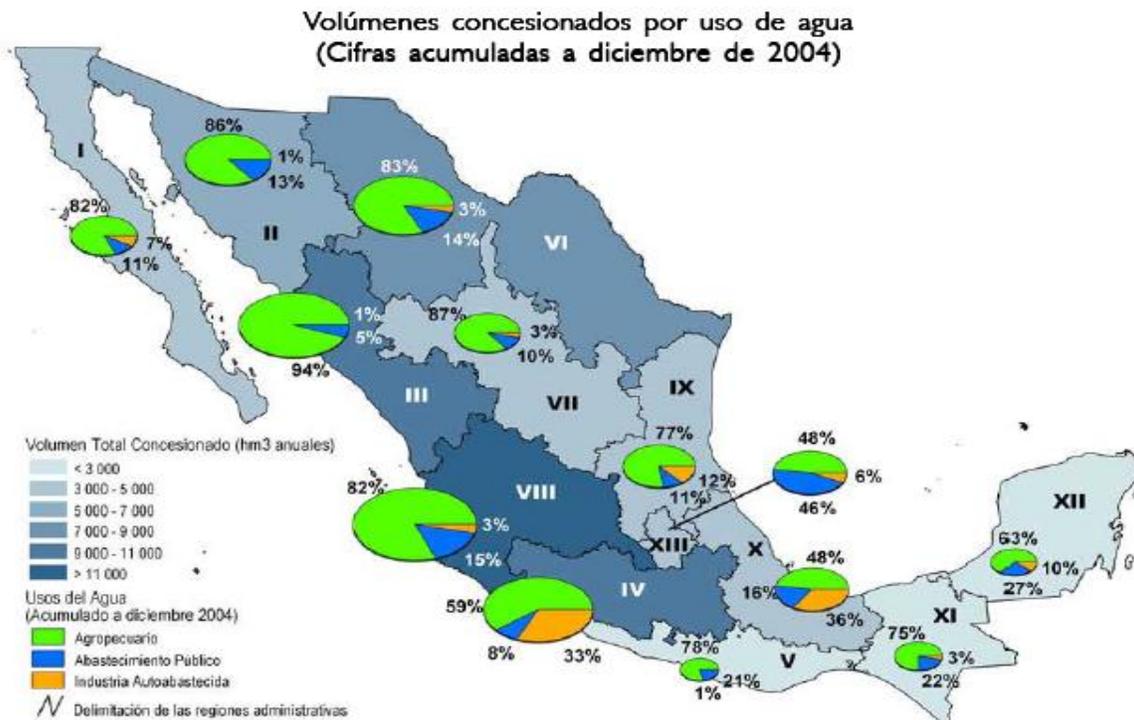


Fig. 2.6: Volúmenes concesionados por uso de agua (Fuente: SUIBA; México 2005)

Lo anterior conlleva a que el grado de presión sobre el recurso hídrico, sea en algunos casos, superior al 60 % y en el Distrito Federal el increíble porcentaje del 120 % como se aprecia en la figura 2.7.

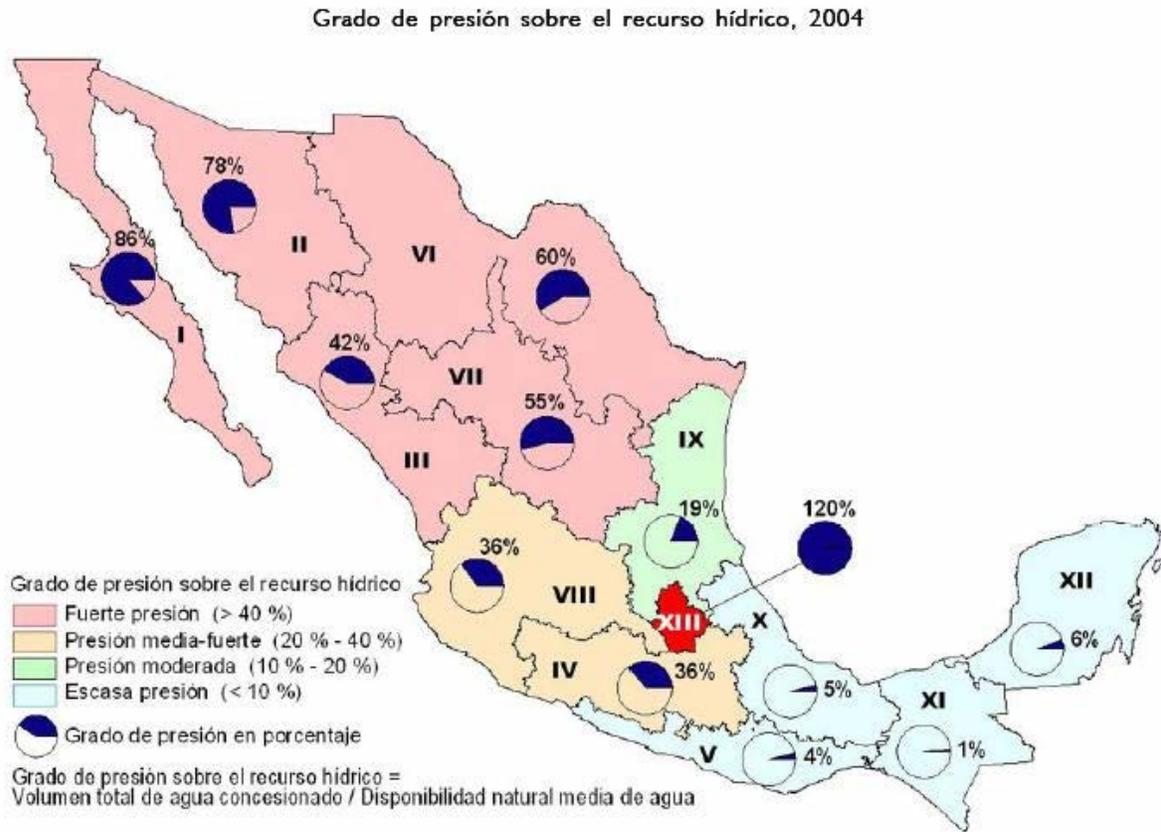


Fig. 2.7: Grado de presión sobre el recurso hídrico (Fuente: SUIBA; México 2005)

2.2 Problemática nacional

México enfrenta actualmente graves problemas de disponibilidad, desperdicio y contaminación del agua. Parte de esta problemática se enfrenta con la construcción de la infraestructura hidráulica que permite satisfacer de agua a los diferentes sectores de la población: el agrícola, el industrial, el doméstico y de servicios y para la generación de energía eléctrica, entre otros, según la CNA:

- Alrededor de 100 acuíferos de los 650 están sometidos a sobre explotación, los cuales suministran aproximadamente 50% del agua subterránea que se destina a todos los usos. Debido a esta sobreexplotación la reserva de agua subterránea se está minando a un ritmo cercano a 8 km³ por año.

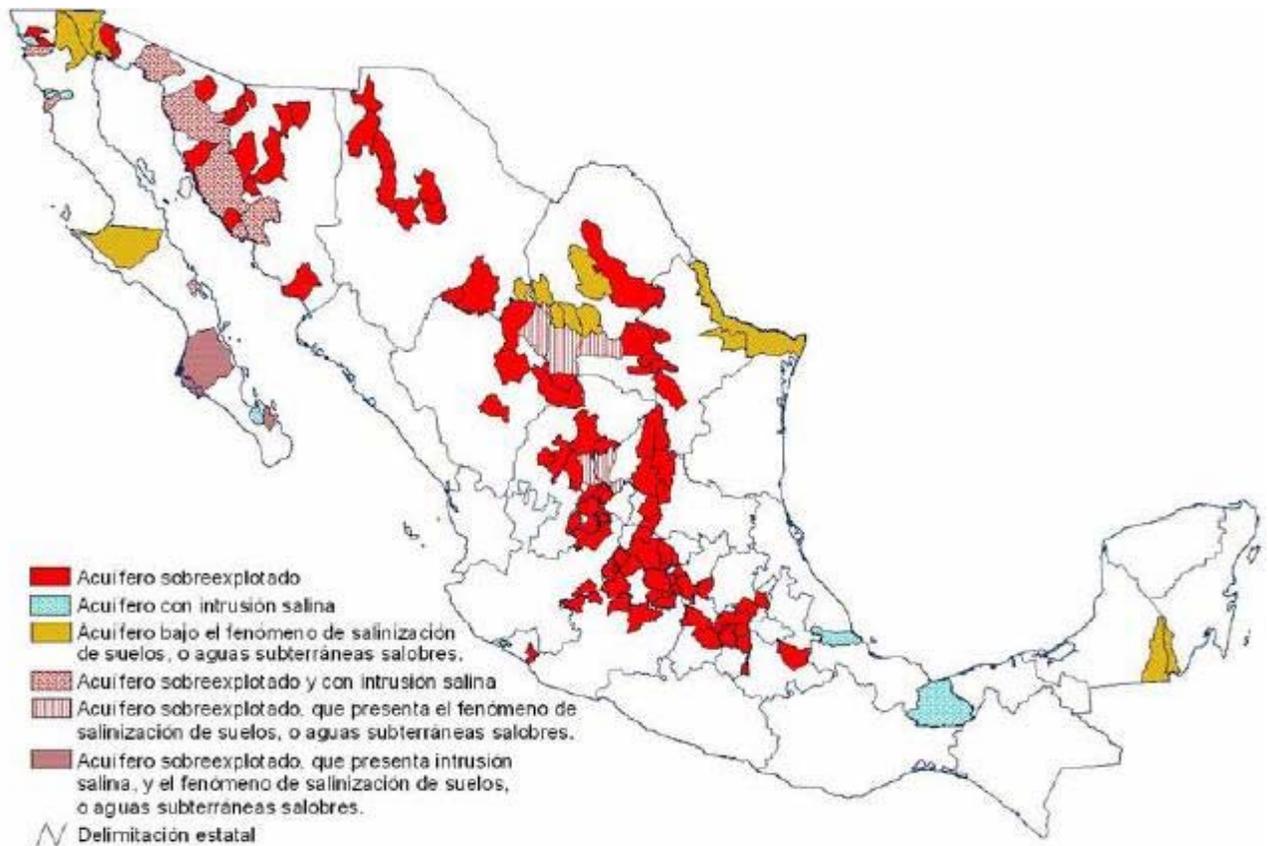


Fig. 2.8: Acuíferos sobreexplotados, con intrusión salina, y/o bajo el fenómeno de salinización de suelos al año 2004 (Fuente: SUIBA; México 2005)

- 16.8 millones de viviendas (78.1% del total de viviendas habitadas) y 72.6 millones de personas (76.1% de los ocupantes a nivel nacional) contaban con drenaje al año 2000. Sin embargo, las descargas no son todas al sistema de alcantarillado, como se aprecia en la figura 2.9. Mientras que 22.1 millones de personas (23.1%) que habitan en viviendas particulares y 4.5 millones de viviendas (21.3%) no cuentan con ningún tipo de drenaje por lo que esa agua residual corre a cielo abierto con los consabidos problemas de higiene y salud entre la población que habita en esas comunidades.

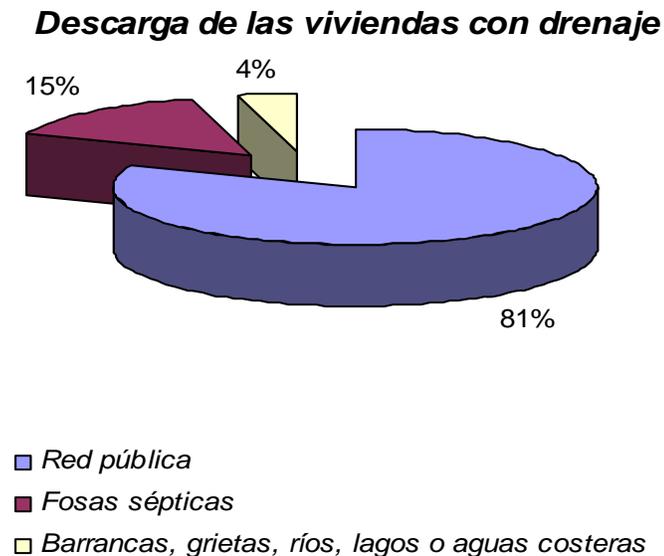


Fig.2.9: Descarga de las viviendas con drenaje al año 2000 (Fuente: en base a datos de la SUIBA; México 2005)

- De acuerdo con la CNA, en el 2000 había 1,018 plantas de tratamiento para aguas residuales municipales, con capacidad para tratar 75,952 L/s; en operación se encontraban 793 y registraban un gasto tratado de 45,927 L/s, para el año 2003 se reportan un total de 1182 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación por lo que se ha avanzado grandemente en este rubro. Sin embargo de los 178 m³/s que se recolectan en el alcantarillado, sólo el 23.8% (42.4 m³/s) del total de aguas residuales procedentes de localidades urbanas a nivel nacional reciben tratamiento. De los 42.4 m³/s de aguas residuales tratadas, 29.3 m³/s cumplen con la norma ecológica NOM-001-SEMARNAT-1996. Es decir que solo el 16.46 % del total del agua residual captada por los sistemas de alcantarillado recibe un adecuado tratamiento.

Los porcentajes de uso de las tecnologías de tratamiento para el agua residual municipal se muestran en la figura 2.10.

Uso de las diversas tecnologías de tratamiento en México

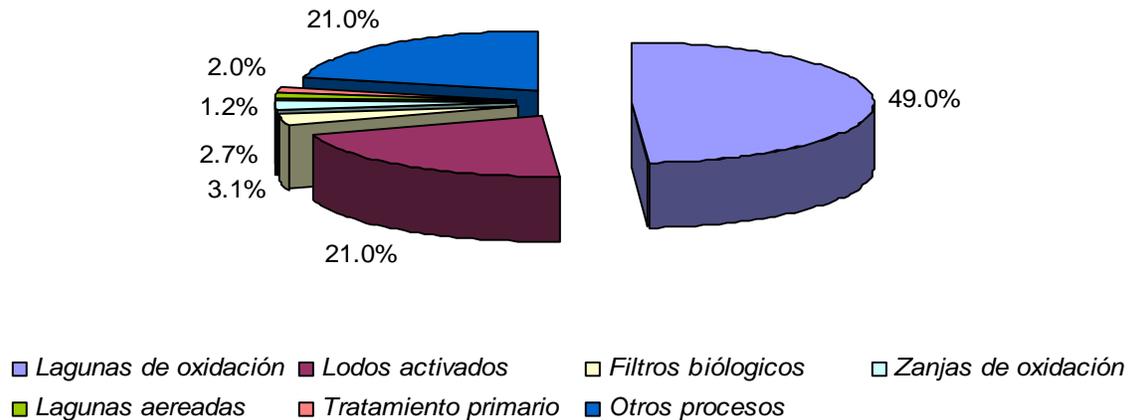


Fig.2.10: Uso de las diversas tecnologías de tratamiento en México al año 2000 (Fuente: en base a datos de la SUIBA; México 2005)

- En el 2003, la industria generó agua residual por un equivalente a 8.14 km³ anuales (258 m³/s), de este volumen se tratan 27.3 m³/s en 1579 plantas de tratamiento, es decir que la industria trata solamente el 10.6 % del total de su agua residual; contra casi el 24 % de las aguas residuales municipales.
- Con respecto a la carga orgánica total del país, hay que puntualizar que en 20 cuencas se genera el 89% de esta (medida en términos de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, entre las que destacan: Valle de México, Lerma, San Juan y Pánuco.
- Las aguas residuales generadas en los centros urbanos al año 2003 representan 2.17 millones de toneladas de DBO₅ al año, de las cuales 1.73 millones de toneladas se recolectan en el drenaje municipal y sólo 0.51 millones de toneladas son removidas en los sistemas de tratamiento es decir solo el 23.5% del total de la DBO₅ generada. Así mismo la industria genera una carga contaminante de 9.5 millones de toneladas de DBO₅, de las cuales sólo 1.01 millones de toneladas son removidas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales es decir en términos de porcentaje un 10.63 por ciento.

Como se aprecia el problema de generación y tratamiento de aguas residuales en México es un verdadero reto, sin embargo, habría que puntualizar que si bien el agua residual de origen municipal es un problema, el mayor problema lo originan las industrias en este país, no solo porque ellas producen más del 50% de las aguas residuales en volumen y remueven apenas el 10 % de los contaminantes de tipo orgánico contenidas en estas, sino también porque las aguas de origen industrial están contaminadas con metales pesados, debido a los procesos en que se usan. Toda la problemática anteriormente expuesta origina diversas consecuencias en los rubros político, social y ambiental.

2.3 Consecuencias políticas, sociales y ambientales

En México hay varios organismos federales e institutos que son responsables en el rubro agua potable y tratamiento de aguas residuales, ellos supervisan la planificación y el diseño de las nuevas plantas de tratamiento así como el uso del recurso agua y la disposición final de las aguas tratadas, desgraciadamente estos ministerios no trabajan en conjunto con otros actores como organizaciones de la sociedad civil o las empresa privada para buscar soluciones conjuntas y compartir las dificultades que enfrentan en la planeación, implantación y operación de sus instalaciones, así como para monitorear el cumplimiento de las leyes y normas de protección ambiental.

México, como muchos otros países del tercer mundo, debe de establecer un objetivo nacional común; políticos y sociedad civil deben de entender que el tratamiento de aguas residuales juega un rol vital no sólo en la protección ambiental si no también como fuente de irrigación barata en la agricultura. El tratamiento de aguas residuales así como el ahorro de agua potable deben ser prioridades en la agenda política y parte integral de un plan nacional que no solo se escriba, sino que, además se siga y ejecute.

Se debe de impulsar un programa que integre todos los aspectos posibles con el fin de ahorrar agua, como: eficientizar los sistemas actuales de distribución de agua potable y de tratamiento de aguas residuales, poner en operación técnicas de ahorro de agua para riego y utilizar otras fuentes de agua para aquellos cultivos que no necesiten agua de primer uso como el caso de frutales y forrajes, así como campañas eficientes de educación para la población.

Como ya se dijo en el punto 2.1 en México aproximadamente el 76% del volumen concesionado de aguas se destina a usos agropecuarios, sin embargo, sólo el 6.5 % de esta agua corresponde a usos pecuarios, acuacultura y otros, esto quiere decir que cerca del 70 % del agua extraída *es utilizada para riego en aproximadamente 6.3 millones de hectáreas, esto es casi la tercera parte de los 20 millones que se cosechan anualmente y de donde provienen el 54 por ciento del volumen nacional de producción de alimentos.* (Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación; México 2005). A pesar de la creciente demanda de agua para riego en actividades agrícolas el reúso del agua residual municipal (reciclaje) para esta actividad sigue siendo un tema tabú aún entre los círculos de investigadores y especialistas del ramo, pues se considera que no reúne la calidad en cuanto a factores de higiene, por supuesto que el reúso de agua tratada en la agricultura requiere una estricta administración y vigilancia en cuanto a las características químicas, físicas e higiénicas de dicha agua tratada. Pero proveería al sector agrícola de agua barata y rica en nutrientes que elevarían la producción de alimentos, al mismo tiempo, que se protege el medio ambiente y se ahorra importante cantidad de agua potable.

La contaminación ambiental a través de la práctica común en México de usar el agua residual sin tratar para el riego agrícola (como en el caso del distrito 3 de riego en Tula, Hidalgo) agrava la situación; para mejorar esta situación en un campo totalmente descapitalizado como el mexicano es siempre un factor muy importante (sino es que el más importante) el dinero. En este rubro la construcción y desarrollo de efectivas Pka's puede ayudar grandemente pues son muchísimo más baratas y fáciles de operar, en comparación con los sistemas tradicionales centralizados. Si bien en países como Alemania y Austria esta técnica es utilizada desde hace más de 30 años, en México simplemente el tratar de explicar cómo las plantas son capaces de ayudarnos a limpiar el agua es prácticamente imposible, por lo que se debe de construir proyectos piloto con la finalidad de que la sociedad civil así como los políticos y especialistas se familiaricen con la tecnología y se de cuenta que no sólo son baratas y efectivas si no que además son amigables con la naturaleza y se disimulan bien en el entorno rural, además de no generar molestos olores durante el proceso de tratamiento.

2.4 ¿Plantas de tratamiento centralizadas o descentralizadas?

En México hasta ahora se han planeado y construido solamente plantas de tratamiento de agua residual centralizadas, a pesar de que en contra de esta práctica existen muchos argumentos:

- ✓ Todos los usuarios resultan afectados cuando falla el sistema.
- ✓ Los costos para la construcción de las instalaciones y el mantenimiento de los canales son enormes.
- ✓ Debido al mezclado en el sistema de alcantarillado de todos los tipos de agua (industrial, municipal y de lluvias) el dimensionamiento y diseño de las diversas etapas de tratamiento es complicado pues el gasto de diseño varía grandemente así como la concentración de contaminantes a lo largo del año.
- ✓ Debido al mezclado de todos los tipos de agua no existen posibilidades de usar el lodo primario como abono en la agricultura, pues éste está contaminado con metales pesados y sustancias tóxicas.
- ✓ Nuevos asentamientos o barrios de las ciudades son simplemente conectados a las plantas de tratamiento ya existentes, lo que provoca que las instalaciones trabajen sobrecargadas y como consecuencia la eficiencia en el tratamiento descienda.
- ✓ Entre más larga es la distancia entre la planta de tratamiento y los nuevos usuarios, los costos por concepto de tendido de tubos y mantenimiento del sistema de alcantarillado en general, aumenten; además de que siempre existe la posibilidad de que los tubos resulten averiados.

Capítulo 3: La técnica de los lechos de carrizo (Pka)

En el pasado la acción de los procesos naturales era suficiente para controlar el efecto de los contaminantes vertidos en los cuerpos de agua superficial. Con el incremento en el consumo de agua y por ende el aumento en la producción del volumen de aguas residuales, esta “capacidad natural” de autodepuración de los cuerpos de agua se vio superada y hubo que buscar soluciones técnicas adecuadas para enfrentar el problema.

La conducción a través de canales mediante los cuales el agua residual era descargada en los ríos fue una de las primeras formas de eliminación de agua residual en muchas grandes ciudades europeas. En la ciudad de Londres como resultado de un estudio se recomendó mantener el sistema de canales pero no realizar las descargas en el río Tamesis sino más bien sobre campos y praderas. Dichas recomendaciones propiciaron el desarrollo de técnicas de eliminación de aguas residuales en filtros de suelo y fueron usadas en grandes ciudades como Danzig, Münster y Berlín (Wissing, W., 2002, Pág. 20).

El desarrollo de la industria así como el continuo crecimiento del consumo de agua unido al enorme requerimiento de área de los sistemas naturales, condujeron al desarrollo de nuevas técnicas de tratamiento y a la construcción de las grandes plantas de tratamiento modernas que hoy en día han alcanzado un gran nivel de desempeño y complejidad.

Con el crecimiento de la conciencia ambiental en las sociedades europeas cada vez más gente vuelve los ojos hacia las Pka's como tecnología apropiada para tratar las aguas residuales, pues esta tecnología utiliza las capacidades de autodepuración propias de la naturaleza, combinadas con una mínima o nula utilización de energía eléctrica, así como, costos de construcción muy reducidos. Pero ¿porque no simplemente usar tecnologías básicas como las lagunas de estabilización o filtros de materiales? La razón es que estudios donde se compararon cantidad y tipo de microorganismos presentes en filtros de suelo sembrados con trigo contra filtros de materiales sin sembrar, demostraron que en un suelo sembrado se encuentran más microorganismos que en uno que no lo está.

Cuadro 3.1

Cantidad de microorganismos en un suelo sembrado y en un suelo libre de raíces.

<i>Microorganismos</i>	<i>Suelo con raíces. (Cantidad por gramo de masa seca)</i>	<i>Suelo sin raíces. (Cantidad por gramo de masa seca)</i>
<i>Bacterias</i>	$1200 * 10^6$	$50 * 10^6$
<i>Actinomicetos</i>	$46 * 10^6$	$7 * 10^6$
<i>Hongos</i>	$12 * 10^5$	$1 * 10^5$
<i>Protozoos</i>	$24 * 10^2$	$10 * 10^2$
<i>Algas</i>	$5 * 10^3$	$27 * 10^3$

Fuente: Bahlo, K. und Wach, G., 1992, Pág. 5.

La cantidad de microorganismos enseña claramente que las raíces de las plantas pueden mejorar las condiciones de vida de estos, sin embargo su función no termina ahí, sino que también ayudan a mantener abierto el cuerpo del filtro, ya que sin las raíces el filtro se compactaría y tataría con el transcurso del tiempo.

3.1 Construcción de Pka's

Las Pka's son sistemas preponderantemente biológico-naturales en las cuales el filtro de materiales, las plantas de pantano y los microorganismos trabajan conjuntamente en armonía, para poder limpiar el agua residual y paralelamente filtrarla. Su componente principal es el filtro de materiales que se siembran con plantas de pantano las cuales crecen en él.

De manera general se recomienda contar con sedimentación primaria antes del filtro sembrado para de esta manera prevenir posibles taponamientos. Con el fin de proteger el agua subterránea se cubre el fondo de la excavación del filtro con un folio sintético resistente al agua residual, concreto o arcilla compactada. El agua residual se reparte sobre el filtro con ayuda de una red de tuberías perforadas, por último el agua se infiltra y ya tratada es captada y enviada a un pozo de control con ayuda de una tubería de drenaje enterrada en el cuerpo del filtro.

La eficiencia del filtro en una Pka es afectada ligeramente por el tipo de los materiales que lo componen así como por largos periodos de sequía. En las épocas de sequía se dispone de oxígeno, de tal manera que el carbono y el nitrógeno pueden oxidarse.

Debido al paso del agua residual por el filtro, se da lugar un proceso de descomposición, a través del cual la materia orgánica es desintegrada y como humus enriquece el suelo. Además, el agua residual es liberada de sólidos sedimentables y no sedimentables, por lo que no son las plantas las responsables del proceso de tratamiento, si bien, son ellas las que favorecen la vida y reproducción de miles de microorganismos que hacen posible la desintegración de la materia orgánica.

3.2 Tipos de Pka's

Las Pka's se pueden clasificar en diferentes tipos:

Debido al material del que está construido el filtro:

a).- Con materiales calcáreos, arena y grava y sembrado con diversos tipos de plantas de pantano.

b).- Con material limo arcilloso y sembrado con carrizo (*Phragmites australis /communis*) con el fin de facilitar la permeabilidad del suelo a través de las raíces de dicha planta. (Wissing, F., 2002, Pág. 113-115).

Debido al sentido del flujo de agua residual en el cuerpo del filtro:

a).- De flujo horizontal: cuando el agua fluye de un lado del filtro al otro de manera horizontal se dice que son *Pka's horizontales*.

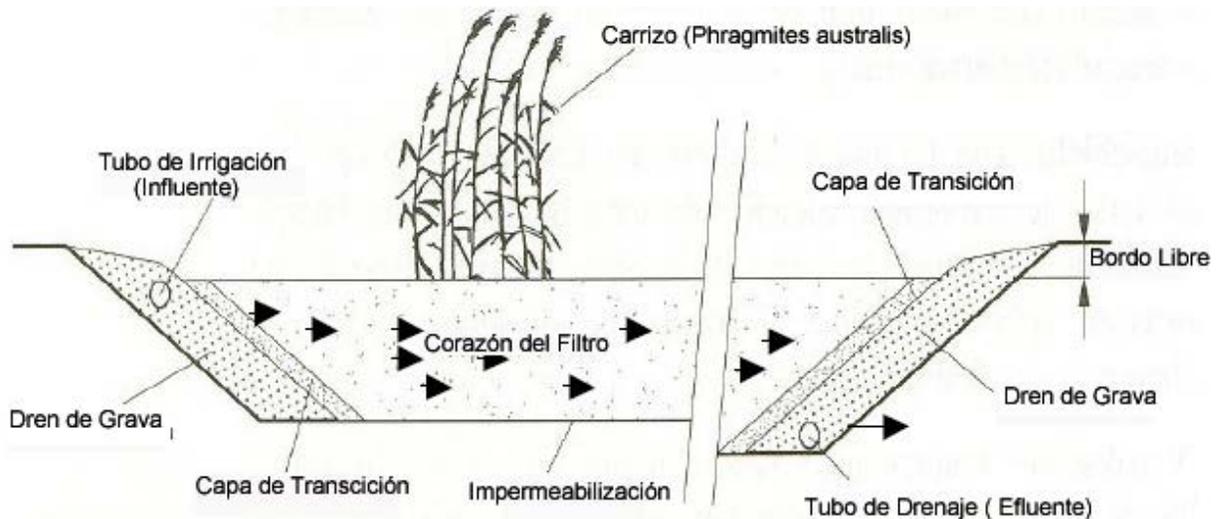


Fig. 3.1: Esquema típico de una PKA horizontal y sentido del flujo (Fuente: modificada a partir de Geller, G. und Höner, G; 2003; Pag. 66)

b).- De flujo vertical: cuando el agua fluye de arriba hacia abajo a través del filtro se habla de *Pka's verticales*.

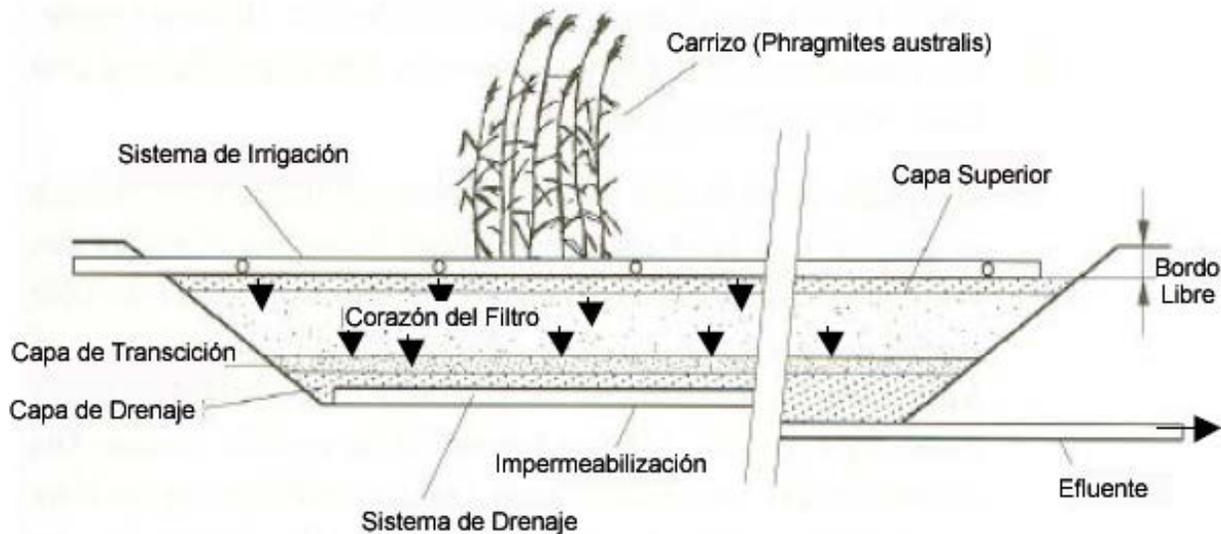


Fig. 3.2: Esquema típico de una PKA vertical y sentido del flujo (Fuente: modificada a partir de Geller, G. und Höner, G; 2003; Pag. 63)

En Alemania Después de muchos estudios se llegó a las siguientes conclusiones¹:

- ✓ Las *Pka's verticales*, son buenas nitrificadoras del efluente.
- ✓ Las *Pka's verticales*, usan menos área que las *Pka's horizontales*.
- ✓ En las *Pka's verticales* el agua se reparte uniformemente en todo el área del filtro sembrado.
- ✓ En las *Pka's horizontales*, siempre permanece seca una parte del filtro.
- ✓ Las *Pka's horizontales*, alcanzan generalmente una mejor eficiencia en la desnitrificación del efluente que las verticales.
- ✓ La eficiencia en el tratamiento del agua residual es en la mayoría de los casos mayor para las *Pka's verticales* que en las *Pka's horizontales*.
- ✓ Las *Pka's*, pertenecen a las tecnologías de tratamiento mas baratas debido al poca o nula utilización de energía eléctrica y al la simplicidad de su operación y mantenimiento)

¹ Geller, G. und Höner, G., 2003; Wissing F., 2002; Ambros, Ehrhardt, Kerschbauner 1998 y ATV-A262, Arbeitsblatt; Alemania 1998

3.3 Plantas adecuadas para las Pka's

Para plantar el filtro de una Pka son adecuadas las plantas de pantano, que se encuentran normalmente en zonas de tierra que se inundan periódicamente. Este tipo de plantas crece bajo el agua y emergen en las riveras de lagos y pantanos (hidrófitos emergentes o halófitas), son por naturaleza resistentes a las aguas con alto contenido de materia orgánica y en condiciones controladas crecen sin ningún problema.

El oxígeno juega un papel muy importante en los procesos de tratamiento de aguas residuales, ya que sin él las bacterias aerobias no pueden realizar el intercambio de nutrientes. También las plantas necesitan oxígeno para el crecimiento de sus raíces, que en suelos bien ventilados obtienen del aire que circula por los poros del suelo hasta las raíces. Sin embargo, las plantas de pantano crecen en suelos completamente saturados donde la mayoría de las veces hay muy poco o nada de oxígeno; esto es posible gracias a que hojas, tallos y raíces se encuentran interconectados mediante una serie de canales que transportan el oxígeno desde las hojas hacia las raíces y viceversa, con lo que se tiene un proceso de aireación natural sumamente efectivo. En el caso del carrizo este mecanismo sigue funcionando aunque la parte vegetal esté aparentemente seca.

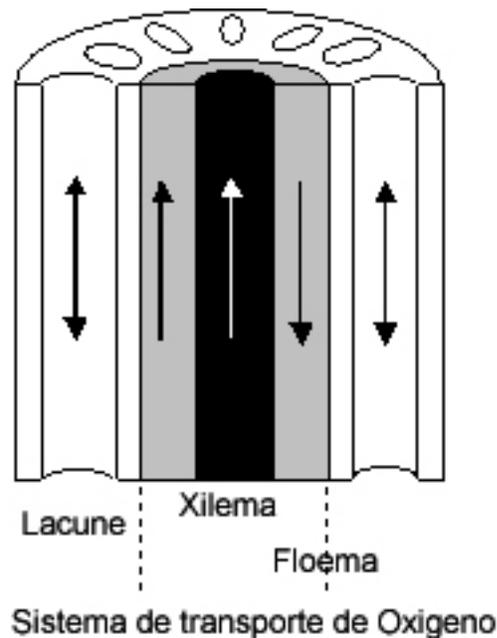


Fig. 3.3: Sistema de transporte de Oxígeno en plantas acuáticas (Fuente: Wissing, F. und Hofmann, K; 2002; Pág. 63)

Una parte del oxígeno es transferido al interior del filtro a través de los rizomas, sin embargo, la mayor parte la transfieren las raíces más delgadas que están asociadas a los rizomas, por lo cual se crea un mosaico de zonas aerobias y anaerobias al interior del filtro lo cual hace posible que se den al mismo tiempo con éxito los procesos de nitrificación y desnitrificación.

En el tratamiento del agua residual colaboran las plantas sólo de manera indirecta. Su función más importante es proporcionar un medio propicio para la desintegración aerobia de los nutrientes y la nitrificación, así como, el mantenimiento de la porosidad y la aireación del filtro, a través, de la creación de nuevos canales en el mismo debido al crecimiento de las raíces, además, estas plantas consumen una gran parte de los nutrientes para seguir creciendo.

La siguiente figura muestra, que el consumo diario de oxígeno en un filtro sembrado con carrizo (*Phragmites australis*) asciende a 5 g/m^2 , lo que corresponde al menos a 15 litros de aire al día.

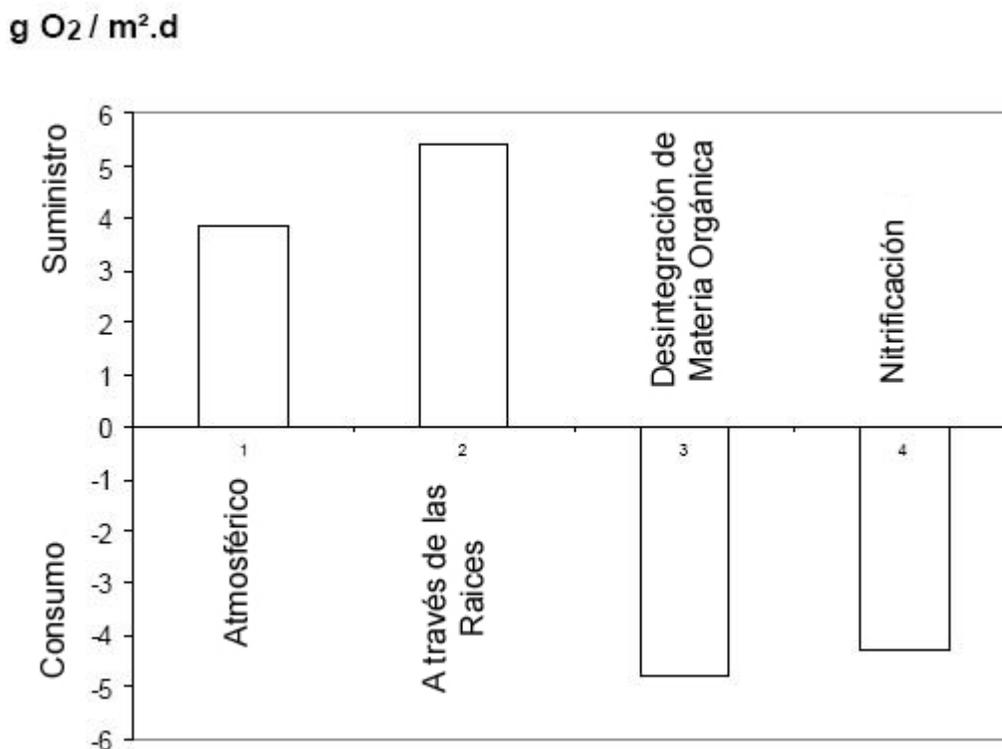


Fig. 3.4: Sistema de transporte de Oxígeno en plantas acuáticas (Fuente: Wissing, F. und Hofmann, K; 2002; Pág. 64)

Hay muchas plantas de pantano que se pueden usar para plantar una Pka, sin embargo solo con pocas especies se han llevado a cabo experimentos exhaustivos, por lo que se recomienda usar cualquiera de los siguientes tipos:

Carrizo (*Phragmites australis*): el carrizo es una gramínea que habita en las márgenes de lagos y arroyos en lugares soleados. Los rizomas crecen horizontal y verticalmente y pueden llegar hasta una profundidad de 1.5 –2 m. Esta planta puede resistir aguas altamente contaminadas con sustancias orgánicas y se alimenta de los nutrientes, en particular nitrógeno, debido a su adaptabilidad esta planta se encuentra distribuida en todo el mundo. El carrizo es la especie mas usada en la construcción de Pka's.

Caña de castilla (*Arundo donax*): esta especie de planta desarrolla rizomas gruesos y nudosos que crecen hasta 2 m de profundidad, mientras que los tallos alcanzan los 8 m de alto.

Junco verde azul (*Juncus inflexus*): esta planta crece entre 40 y 60 cm de alto y las raíces aproximadamente 30-50 cm de profundidad.

Tule y tulillo (*Typha angustifolia*, *T. latifolia* u.a. Arten): las raíces de esta planta alcanzan aproximadamente los 50 cm de profundidad y la parte aérea hasta los 2 m de alto.

Iris amarillo (*Iris pseudacorus*): las raíces crecen hasta una profundidad de 40 cm, mientras que los tallos alcanzan los 100 cm y poseen flores amarillas.

La decisión final sobre qué tipo de planta se usará dependerá mucho de la disponibilidad en el lugar de la construcción, aunque siempre se recomienda usar carrizo o caña de castilla por las razones antes expuestas.

3.4 Proceso bioquímico en el filtro sembrado

En el agua residual encontramos en primera línea sólidos suspendidos y disueltos tanto de origen orgánico como inorgánico, que deben de retirarse del agua a través de los procesos de tratamiento.

En la etapa de sedimentación primaria se retienen la gran mayoría de los sólidos suspendidos, lo que libra al agua residual de aproximadamente un tercio de su carga orgánica. Después, el agua llega al filtro y a través de procesos biológicos, físicos y químicos íntimamente ligados continúa su purificación. Los microorganismos en el filtro toman los nutrientes del agua residual, crecen, se reproducen y finalmente mueren.

Para la mayoría de procesos de desintegración, transformación y fijación es necesario un abastecimiento continuo y suficiente de oxígeno. Así, la desintegración aerobia de materia orgánica como los compuestos de carbono (nitrificación y fijación de fósforo) dependen en gran medida de la presencia de oxígeno. La concentración de materia orgánica en el agua residual se mide mediante los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO).

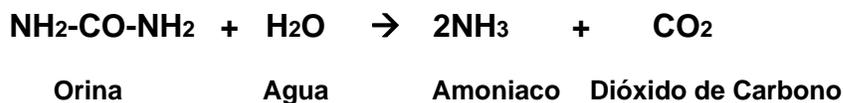
Los procesos de desintegración aerobia oxidan los compuestos orgánicos a través de diversas etapas de desintegración hasta que se convierten en productos finales como dióxido de carbono (CO₂) o agua (H₂O). En el caso de la desintegración anaerobia esta transforma los compuestos orgánicos en biogás (NH₄) y dióxido de carbono (CO₂). En general la oxidación de las sustancias orgánicas sigue el siguiente proceso:



Al lado de los microorganismos que son responsables de la desintegración de las sustancias orgánicas, existen otros organismos que viven de otros procesos de oxidación mineral.

En los procesos de tratamiento biológico se deben de desintegrar a través de un proceso de nitrificación los compuestos de nitrógeno que se retienen en el sistema como orina y proteínas.

Orina: la orina se disocia a través de actividad enzimática en amoníaco y dióxido de carbono; a este proceso se le conoce como amonificación:



Proteínas: las proteínas están compuestas por aminoácidos en los cuales el nitrógeno es un compuesto muy importante. Los aminoácidos se desintegran en compuestos de amonio, una parte preponderante de esa amonificación se da en el drenaje, en donde el amoníaco se convierte en amonio.

Amonio: el amonio es una forma de nitrógeno fácilmente asimilable por las plantas acuáticas y las algas. Es producido a partir de nitrógeno molecular por algunas bacterias fijadoras de nitrógeno. El amonio se oxida en nitrito o nitrato, el proceso puede desarrollarse de dos maneras distintas:

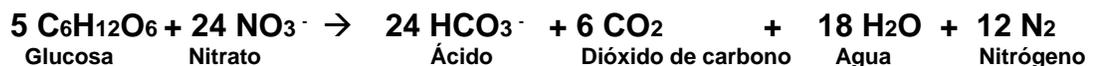


La transformación a amoniaco sucede, cuando el pH se encuentra por encima de 7 (medio alcalino)



Puesto que el amoniaco es una sustancia venenosa para la mayoría de microorganismos se deberá vigilar que el pH del agua residual no esté por encima de 7. Donde hay poca disposición de oxígeno, continúa el proceso de desnitrificación. De esa manera es reducido el nitrato producido en nitrógeno molecular (N₂). Por esa razón las plantas de tratamiento tecnificadas deben de poseer también un proceso anaerobio. Por el contrario en las *Pka*'s este paso no se necesita pues en el filtro sembrado existe un mosaico de zonas ricas y pobres en oxígeno, que permiten que se den los procesos de nitrificación y desnitrificación al mismo tiempo. Para la reducción de nitratos es decisiva la presencia de una fuente de carbono (glucosa).

El proceso de desnitrificación se describe a continuación:



También el amonio puede oxidarse anaerobiamente a través de determinados microorganismos bajo la presencia de nitrato:



Desintegración aerobia de la glucosa:



Desintegración anaerobia de la glucosa:



La energía, que se libera por la oxidación del amonio, nitrito y glucosa es utilizada por todos los agentes nitrificantes para construir nueva biomasa:



3.5 Ventajas y desventajas de las Pka's

Desde el inicio de los años ochentas del siglo pasado se han construido en Alemania Pka's descentralizadas con el propósito de tratar el agua residual de origen domestico. En este momento se encuentran en Alemania en operación un gran numero de Pka's, toda la experiencia largamente acumulada a través de los años con esta tecnología les ha permitido a los expertos alemanes definir las como un método apropiado en el tratamiento de aguas residuales de diversos usos, pero principalmente domestico y municipal.

Las Pka's tienen muchas ventajas²:

- ✓ Precio adecuado por una alta efectividad.
- ✓ Uso de las capacidades biológicas de la naturaleza para auto limpiarse.
- ✓ Creación de biotopos naturales que se disimulan muy bien en áreas rurales.
- ✓ Poca o nula utilización de energía eléctrica para su operación.
- ✓ El tratamiento se da en el lugar mismo de la producción de agua residual por lo que son innecesarias largas redes de canalización.
- ✓ Poca supervisión técnica.
- ✓ Proceso estable y escasos costos de mantenimiento.
- ✓ No producen mal olor.
- ✓ Eliminación eficaz de muchos de los agentes patógenos causantes de infecciones y enfermedades gastrointestinales como bacterias y huevos de helmintos.
- ✓ Escaso mantenimiento y supervisión.
- ✓ Los fosfatos que se retienen debido al proceso de purificación pueden ser utilizados como abono agrícola.
- ✓ Alta aceptación por parte de propietarios y vecinos.
- ✓ Fácil de ampliar en caso de necesitarse.

Las desventajas son:

- ✓ Necesitan gran área de terreno para su construcción y ampliación.
- ✓ La eficiencia del tratamiento disminuye para temperaturas por debajo del punto de congelación.(< 5°C)
- ✓ Funcionamiento poco manipulable.
- ✓ Peligro de salinización de los suelos debido a largos periodos de sequía.
- ✓ Reducción de la calidad del efluente por causa de taponamientos de los poros del filtro debido a crecimiento excesivo de raíces o de la biomasa.
- ✓ El sistema es difícil de controlar en caso de grandes oscilaciones en el gasto de agua residual.

² Geller, G. und Höner, G., 2003; Wissing, F., 2002; Ambros, Ehrhardt, Kerschbauner 1998 y ATV-A262, Arbeitsblatt; Alemania 1998

3.6 Calidad del efluente esperada

La eficiencia en cuanto a la remoción de materia orgánica es muy superior a los límites máximos permisibles establecidos en la normativa europea vigente (DIN 4261) y en la mexicana (NOM-001); como lo demuestra un estudio realizado en Austria durante los años 1993 a 1997 en 67 PKA's menores a 50 habitantes.

Cuadro 3.2

Promedio medido en el efluente y máximos permisibles para la DIN 4261 y la NOM-001-SEMARNAT1996.

Contaminante	Promedio estadístico	Limite permisible	
		DIN 4261	NOM-001
DQO	32.0 mg/l	90 mg/l	
DBO ₅	7.0 mg/l	25 mg /l	60 mg /l
NH ₄ -N	5.5 mg/l	10 mg/l	

Fuente: Ambros, Ehrhardt, Kerschbauner, 1998; Pág. 116

Además, como han demostrado diversos autores la eficiencia de este sistema mejora con el tiempo de operación de la instalación, esto quiere decir que entre más antigua es una Pka mejor es su desempeño en la remoción de materia orgánica y otros contaminantes contenidos en el agua residual.

Cuadro 3.3

Eficiencia en la remoción de materia orgánica en Pka's a los 2, 7 y 12 años de operación.

Año	Parámetro	Concentración		Eliminación. %
		Influyente (mg/l)	Efluente (mg/l)	
1987	DBO ₅	90	8	90
	DQO	199	44	74
	N _{total}	56	39	17
	P _{total}	8.2	4.4	37
1992	DBO ₅	134	6	95
	DQO	307	30	89
	N _{total}	37	19	46
	P _{total}	6	1.9	70
1997	DBO ₅	166	3	98
	DQO	369	27	92
	N _{total}	42	12	71
	P _{total}	6	1.3	79

Fuente: Resumido y traducido de Wissing, F. und Hofmann, K; 2002; Pág. 162

Sin embargo, existen diversos factores que afectan el desempeño de una Pka, puesto que al tratarse de un método mecánico-biológico cualquier agente externo que afecte directa o indirectamente a las bacterias afectará al sistema entero y por ende la calidad en el efluente.

3.6.1 Temperatura

La temperatura ambiente juega un importante rol en el desempeño del sistema de tratamiento. En regiones áridas la evapotranspiración puede ser tal que toda el agua que llegue al filtro se evapore antes de siquiera haberse infiltrado o bien en lugares donde en ciertas épocas del año la temperatura desciende por debajo de cero se tendrá un “aletargamiento” de la actividad biológica y por ende también se reducirá la eficiencia en el tratamiento, sin embargo, el sistema continua trabajando como lo han demostrado plantas piloto construidas en Suiza y Austria.

Según Börner el sistema se ve afectado cuando la temperatura del agua residual desciende por debajo de los 3°C como se muestra en el cuadro 3.4:

Cuadro 3.4

Factores de compensación para la época invernal.

<i>Parámetro</i>	<i>Reducción de desempeño en invierno contra el promedio anual (%)</i>	<i>Factor de compensación (Requerimientos de Área para el periodo invernal)</i>
<i>DQO</i>	1	1.01
<i>DBO5</i>	8	1.09
<i>Fosfatos</i>	35	1.54
<i>Fósforo total</i>	14	1.16
<i>Amonio</i>	32	1.47
<i>Nitratos</i>	26	1.35
<i>Nitrógeno total</i>	16	1.19

Fuente: Wissing, F. und Hofmann, K; 2002; Pág. 142

Es preciso en los lugares donde la temperatura pueda ser un factor compensar esta afectación desde el diseño de la planta de tratamiento.

3.6.2 pH

El tratamiento de aguas residuales biológico por medio de microorganismos debe de realizarse en un rango de pH entre 6 y 9. Fuera de ese rango la mayoría de los microorganismos resultan dañados o inactivos. Por lo general esto no es un problema en aguas de origen domiciliar y menos aún en las Pka's particulares pues los dueños, que a su vez son los operarios de este sistema, cuidan que productos químicos usen y desechan al drenaje de su vivienda, con tal de no afectar la calidad del agua que finalmente ellos mismos reusarán en jardines o sembradíos.

3.6.3 Degradación de la materia orgánica

Para asegurar una correcta degradación de la materia orgánica el filtro debe estar construido y operar de manera que:

- ✓ *No se sobrepase la capacidad de diseño de la estación:*
 - *Para Pka's horizontales se recomienda un área $\geq 5 \text{ m}^2/\text{EW}^3$ y una carga hidráulica $\leq 40 \text{ mm/d}$ (ATV-DVWK-A262 (propuesta), Alemania 2004).*
 - *Para Pka's verticales un área $\geq 4 \text{ m}^2/\text{EW}$ y una carga hidráulica $\leq 80 \text{ mm/d}$ (ATV-DVWK-A262 (propuesta), Alemania 2004).*
- ✓ *La elección de la granulometría y la calidad de los materiales que constituirán el filtro sea la adecuada para así evitar taponamientos futuros: Se recomienda que el coeficiente de infiltración sea $k_f = 10^{-4} - 10^{-3} \text{ m/s}$ (ATV-DVWK-A262 (propuesta), Alemania 2004).*
- ✓ *Se asegure un abastecimiento suficiente de oxígeno: en el caso de las Pka's horizontales se deberá cuidar que el área superior del filtro sea la mínima recomendada y en el caso de las Pka's verticales que posean un sistema de aireación e infiltración intermedio. (Geller, G. und Höner, G., 2003)*

3.6.4 Transformación del nitrógeno

Para asegurar una correcta nitrificación así como degradación del nitrógeno total se recomienda tomar en cuenta que:

- ✓ *Nitrificación: usar Pka's verticales (aproximadamente el 90 % de degradación).*
- ✓ *Degradación del nitrógeno total: usar Pka's horizontales ya que éstos degradan aproximadamente el 50% del nitrógeno total o bien concebir la instalación con una combinación de filtros verticales/horizontales (aproximadamente de 60-80% de degradación). En caso de que la Pka deba ser vertical (por razones de espacio o economía) se deberá de recircular parte del gasto tratado. (Geller, G. und Höner, G., 2003)*

³ 1 EW = Consumo promedio de agua por persona al día = 150 l/d

3.6.5 Retención de fosfatos

Los fosfatos no se pueden degradar en el filtro sembrado sin embargo, pueden ser retenidos y fijados por las partículas de suelo, por lo que se recomienda:

- ✓ *Elección de la porción fina del filtro (arena): Material con alto contenido de hierro, aluminio, calcio o humus.*
- ✓ *Material para un filtro efectivo en la retención de fósforo: se recomienda usar grava lavada y recién triturada, esto da una capacidad de absorción > 1000 mg P/kg (Geller, G. und Höner, G., 2003).*

3.6.6 Metales pesados

Los metales pesados llegan al agua residual de origen doméstico básicamente a través de los materiales de limpieza. Una gran parte de estos se retienen en la sedimentación primaria, sin embargo, una pequeña parte permanece en el agua y no es posible su remoción por lo que se recomienda, considerar que:

- *Los metales pesados no son biodegradables por lo que cada gramo que se vierta al drenaje domiciliar se encontrará en el lodo primario o bien en el filtro o rizomas de las plantas.*

Cuadro 3.5

Retención de metales pesados en el suelo del filtro sembrado medido después de 12 años de operación en mg/Kg (peso seco).

Parámetro	Concentración	
	Influente (mg/Kg.)	Efluente (mg/Kg.)
Plomo (Pb)	4.8	3.1
Cadmio (Cd)	0.07	0.04
Cromo (Cr)	11.7	10.3
Cobre (Cu)	7.0	6.7
Níquel (Ni)	7.8	7.1
Zinc (Zn)	51.5	41.9
Mercurio (Mg)	0.02	0.01

Fuente: Resumido y traducido de Wissing, F. und Hofmann, K; 2002; Pág. 163

- *Las Pka's han sido desarrolladas para tratar agua preponderantemente de origen doméstico por lo que se debe cuidar qué calidad y en que cantidad se vierte al drenaje pues esto influirá directamente en la calidad del agua y el posible reuso de ésta.*
- *El agua residual tratada contiene normalmente una concentración no significativa de elementos metálicos y no metálicos. (Ambros, Ehrhardt, Kerschbauner;1998)*

En caso de que el agua residual a tratar tenga por cualquier razón un alto contenido de metales pesados que se requiera remover se deberá de combinar tecnologías con el fin de que el agua tratada cumpla con los requerimientos de las normas al respecto. Una opción de bajo costo es usar vegetación acuática en lagunas de estabilización, con el fin de remover dichas sustancias metálicas, antes de la etapa de sedimentación primaria .

La capacidad de retención de diversas especies vegetales se muestra a manera de guía en la figura 3.5:

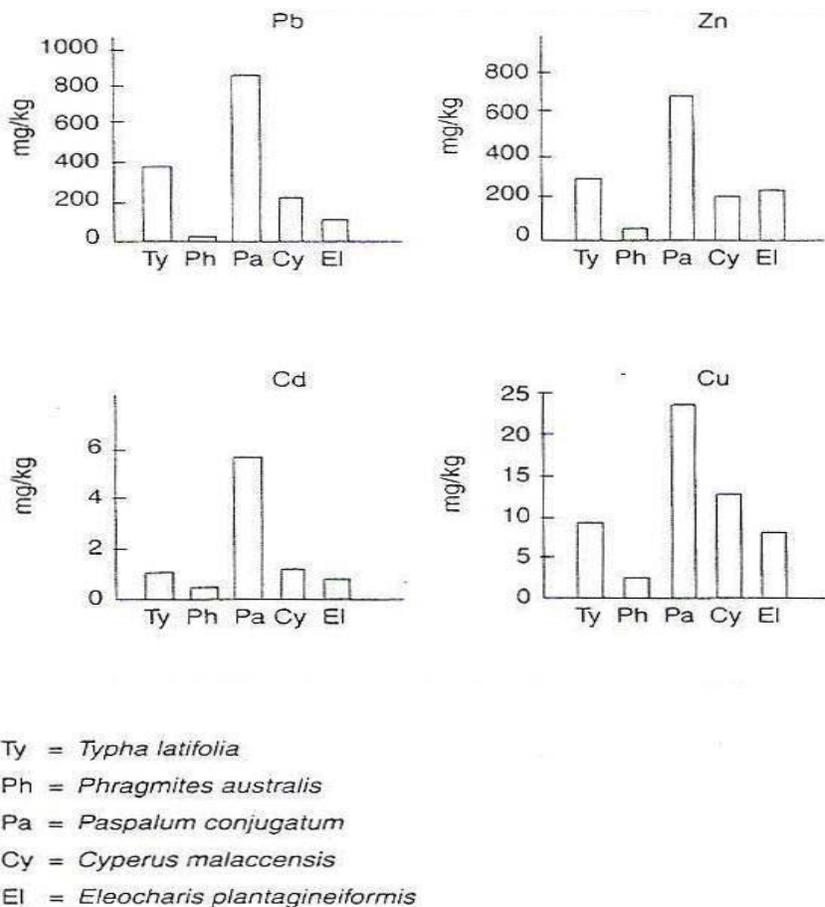


Fig. 3.5: Capacidad de retención de metales pesados de diversas especies vegetales en lagunas de estabilización (Fuente: Wissing, F. und Hofmann, K; 2002; Pág. 160)

3.6.7 Eliminación de enfermedades

Según Gersberg la remoción de bacterias (en Pka's) que son de relevancia sanitaria es en general muy alta. En el caso de *Escherichia coli* y otros coliformes la reducción va de 10^2 - 10^3 por cada ml (Wissing, F. und Hofmann, K; 2002; Pág. 154). Por ejemplo en filtros de material granular sembrados se tuvo una reducción del 99% de los coliformes contra el 96% en filtros no sembrados. Algunos autores (Seidel, Cardenas, Kaitzis y Kickuth) en la década de los 70's estudiaron el hecho de que los rizomas de algunas halófitas (*Iris pseudacorous* y *Schoenplectus lacustris*) liberan un bactericida natural, pero no pudieron probar que este bactericida ayudara de alguna manera en la reducción de coliformes fecales y otras bacterias.

Hoffman (1992) realizó estudios detallados acerca de la flora entobacteriana presente en un filtro sembrado con carrizo y encontró que se tenía una reducción del 98 % en éste contra el 94% del filtro sin sembrar (control), como se muestra en la figura 3.6:

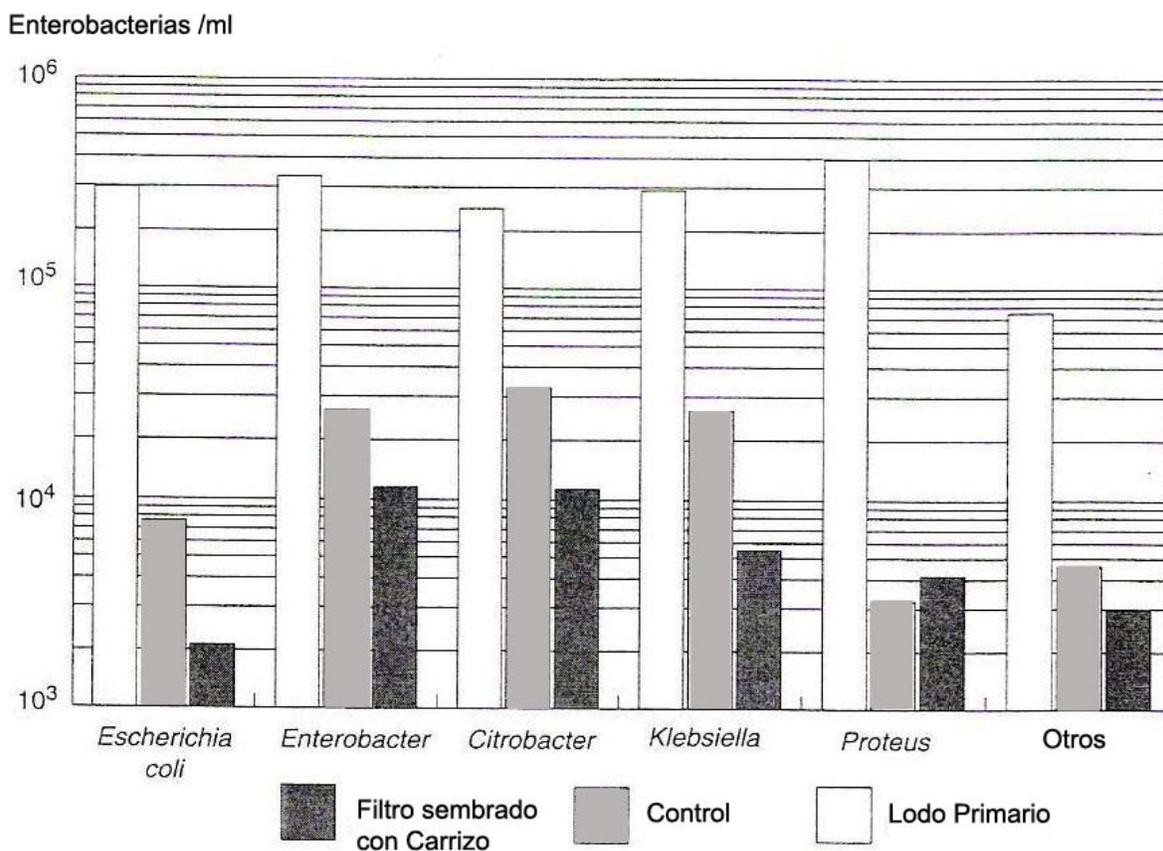


Fig. 3.6: Concentración de diversos tipos de enterobacterias (Fuente: Wissing, F. und Hofmann, K; 2002; Pág. 155)

Para asegurar la destrucción de la mayoría de bacterias o virus presentes en el agua residual que podrían producir algún tipo de enfermedad se recomienda⁴:

- ✓ *Usar estaciones con varias etapas de tratamiento.*
- ✓ *Mantener una carga hidráulica de 80 mm/d en la etapa principal de tratamiento y de 120 mm/d en las posteriores (filtros verticales).*
- ✓ *Evitar problemas de operación como taponamiento del filtro o cortocircuitos hidráulicos.*
- ✓ *Usar como parámetro principal de control la bacteria *E. coli*, realizar pruebas en días representativos del verano y el invierno, al menos dos veces al año.*

⁴ Geller, G. und Höner, G., 2003.

Capítulo 4: Consideraciones para la planeación, construcción y operación de una planta PKA en México

En el presente capítulo se darán lineamientos generales de planeación, diseño, construcción y operación de una planta de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en lechos de carrizo (Pka), este capítulo no pretende ser exhaustivo en su planteamiento, sino más bien ilustrativo para técnicos e investigadores del área de saneamiento.

4.1 Planeación de una Pka

Para una Pka como para cualquier obra de ingeniería civil una correcta planeación es la parte fundamental de una obra exitosa y duradera, pues dependiendo del área disponible, la topografía, el reúso previsto para el agua y de los recursos económicos y humanos disponibles el ingeniero a cargo podrá escoger entre una variedad de filtros, combinaciones de éstos, uso de bombas o de sifones; con el fin de satisfacer las necesidades requeridas en cada caso particular.

La planeación de una Pka estará dividida en cinco etapas:

(a).- Establecimiento de los fundamentos para la realización del proyecto

En esta primera etapa debemos de visitar el lugar y platicar con el solicitante en cuestión con el fin de conocer la situación sanitaria real, número de usuarios de la futura estación y tipo de instalaciones sanitarias con que se cuenta, los pasos a seguir son:

- Aclaración de la problemática.
- Influenciamiento:
 - ✓ ¿Qué se debe planear?
 - ✓ ¿Quiénes participarán?
 - ✓ ¿Qué se puede usar de la antigua infraestructura?

(b).- Preplaneamiento

En esta etapa trabajan íntimamente ligados el ingeniero, el solicitante, el municipio que es el encargado de autorizar la obra. Los pasos a realizar son:

- Análisis de la problemática.
- Análisis y decisión acerca de las diversas posibilidades de solución.
- Contacto con la municipalidad para la autorización del sistema.
- Contacto con el solicitante.
- Consenso.

(c).- Anteproyecto y planos de construcción

Los pasos que se siguen en esta etapa son los siguientes:

- Reconocimiento del terreno y de ser necesario levantamiento topográfico
- Ubicación de las diversas instalaciones (tendido eléctrico, red de agua potable y evacuación de aguas residuales)
- Elaboración de los detalles constructivos
- Reporte con costos unitarios del proyecto
- Consenso

(d).- Autorización y permisos

Esta etapa le corresponde exclusivamente al gobierno municipal o al organismo encargado de la supervisión en el aspecto ambiental de las obras que se construirán en el lugar, dicho organismo deberá de revisar cada aspecto de la propuesta y emitir los correspondientes permisos.

(e).- Construcción

La construcción de la estación puede ser llevada a cabo por gente no especializada y en algunos casos por el propio dueño, aunque se recomienda la supervisión constante del ingeniero a cargo del diseño, por tratarse de una técnica nueva en nuestro país.

(f).- Supervisión y mantenimiento

La supervisión y el mantenimiento de la estación puede ser realizada por los propios usuarios y solo en casos de estaciones mayores a la media se necesita de equipo especializado.

4.1.1 Criterios de decisión para una Pka

Puesto que las posibilidades y variantes que ofrece esta tecnología son muchas, en el diagrama de la figura 4.1 se muestra el proceso recomendado para la decisión sobre el tipo de filtro que conviene diseñar y construir dependiendo de las particularidades del caso.

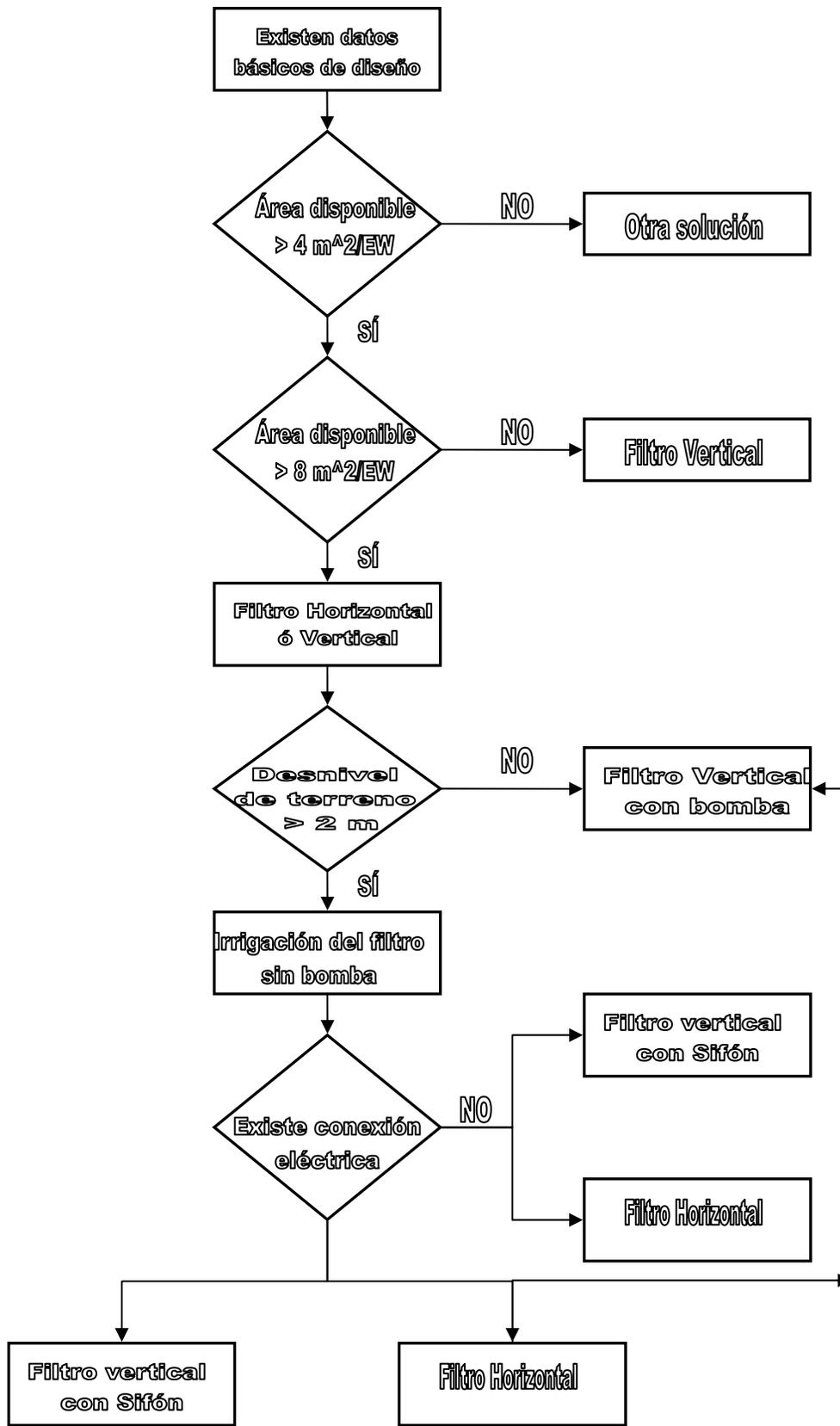


Fig. 4.1: Diagrama de flujo del proceso de decisión para la selección del tipo de filtro. (Fuente: Geller, G. und Höner, G., 2003; Pág. 194)

4.1.2 Selección del lugar

El aspecto que más influye en la posibilidad de construcción de una Pka es el de área disponible (3 - 5 m²/Hab.), esta tecnología se recomienda en zonas rurales donde no existe red de alcantarillado municipal, aunque, por su ausencia de olor, además, de su fácil operación y mantenimiento, también se pueden desarrollar en grandes propiedades e incluirlas al entorno del jardín así como en hoteles y escuelas.

Se prefieren terrenos planos de fácil excavación, si el terreno posee además una pendiente moderada esto ayudará muchísimo en la reducción de costos pues se puede sustituir el pozo de bombeo con un sistema de vertido por cubeta o bien usar sifones. En lugares donde no se cuenta con tendido eléctrico y la topografía del lugar no permite el uso de sifones se podrán usar paneles solares para la alimentación de la bomba.

4.2 Diseño y construcción de las partes principales de una Pka

Si bien es cierto que una Pka es sumamente sencilla en su diseño y construcción comparada con otros métodos tradicionales de tratamiento, se debe de evitar el empirismo y en la medida de lo posible acudir a un despacho especializado en el aspecto ambiental para el diseño de la futura instalación y el trámite de los permisos correspondientes. En América Latina debido a que esta tecnología es prácticamente nueva no se cuenta aun con las normas correspondientes, así como con empresas que se dediquen al diseño y construcción de estos sistemas de tratamiento, los pocos proyectos que se han hecho en países como Perú y Chile han sido en cooperación con agencias alemanas como la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Gtz) GmbH o bien universidades alemanas como la Technische Universität Berlín.

Una Pka consta fundamentalmente de 4 partes como se ilustra en la figura 4.2:

- Tratamiento mecánico primario.
- Pozo de bombeo (de ser necesario).
- Filtro de materiales sembrado.
- Pozo de control.



Fig. 4.2: Esquema general de una Pflanzenkläranlage (Pka)

En el punto 3.6.3 del presente trabajo ya se dieron algunas recomendaciones de diseño para el filtro, sin embargo, en los subsiguientes apartados se ampliará esta información con esquemas constructivos y fotos.

4.2.1 Tratamiento mecánico primario

Esta primera etapa es de vital importancia para la vida útil y el correcto funcionamiento del filtro de materiales graduados y por ende de toda la instalación, pues en ella se remueven prácticamente el 100% de los sólidos sedimentables y el 70 % de los sólidos suspendidos que de no ser separados del agua residual con el tiempo provocarían taponamientos en el filtro, así como daños al equipo de bombeo. Aunque existen diversas alternativas se recomienda el uso de tanques prefabricados de concreto u otro material resistente a los agentes corrosivos contenidos en el agua residual.

Criterios de diseño para un tanque de sedimentación de 3 cámaras según lo establecido en la DIN 4261, 2002; parte 1:

- ✓ El volumen útil de diseño es de 500 l/EW y no debe ser menor de 2000 l totales.
- ✓ El volumen de la primera cámara debe ser aproximadamente de $\frac{1}{2}$ del volumen total de diseño, mientras que las cámaras 2 y 3 contendrán $\frac{1}{4}$ del volumen total respectivamente.
- ✓ Las tres cámaras interiores estarán interconectadas con "T's" de PVC sanitario con un diámetro de no menos de 20 cm; sumergidas 30 cm al menos.
- ✓ El grosor de las paredes de las cámaras interiores no será menor de 5 cm
- ✓ El tubo del influente estará colocado a 10 cm con respecto al espejo de agua máximo en el interior del tanque.
- ✓ El ancho de la tapa del tanque será mayor a 60 cm
- ✓ Existirá una altura libre para inspección en el interior del tanque de por lo menos 50 cm
- ✓ La profundidad del agua en el tanque deberá de ser mayor de 1.2 m, pero, menor de 2 m para tanques con un volumen útil total entre 2 – 4 m³

Esquemas constructivos:

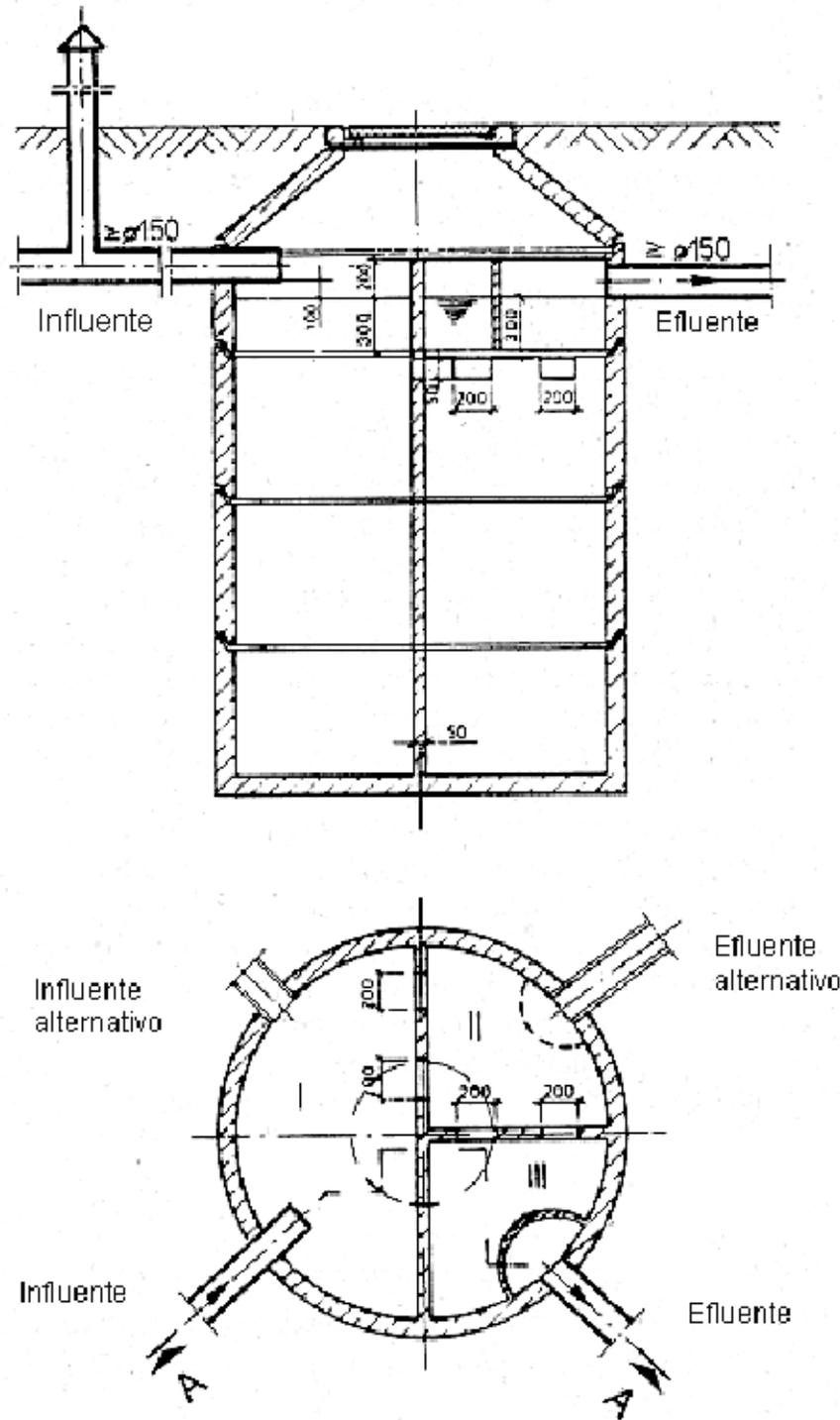


Fig. 4.3: Esquema constructivo de un tanque de sedimentación en tres etapas (Fuente: DIN 4261, 2002; parte 1)



Fig. 4.4: Tanque prefabricado de concreto para sedimentación en tres etapas. (Foto propia)

Fig. 4.5: Primera cámara de sedimentación, nótese el influente que viene de la casa y la "T" de PVC para el flujo entre cámaras. (Foto propia)



4.2.2 Pozo de bombeo

La construcción de un tanque extra para bombear el agua hacia el filtro de materiales dependerá del tamaño de la Pka y del espacio disponible, pues se puede usar sin problemas la tercera cámara del tanque de sedimentación como “pozo de bombeo” y de esta manera reducir costos de construcción y operación; esto para Pka's menores a 10 EW, *para Pka's >10 EW se recomienda construir un pozo aparte con un volumen de no menos de ¼ del volumen total útil del tanque de sedimentación (ATV-DVWK-A262, Arbeitsblatt; Alemania 2004).*

Existen dos posibilidades para irrigar el filtro:

(a) Bomba de inmersión: En el caso de que la irrigación del filtro se de a través de una bomba se deberá de instalar un control programable de bombeo que funcionará a través de flotadores, además, de un sistema de seguridad con sirena y luz de advertencia.

(b) Sifón (si las condiciones topográficas lo permiten): En el caso de poder usarse un sifón se deberá cuidar sobre todo la instalación de éste, así como proveerlo de algún sistema para evitar taponamientos.



Fig. 4.6: Bomba de inmersión para heces fecales; activada por flotadores. (Foto propia)



Fig.4.7: Montaje de la bomba en la tercera cámara de sedimentación. (Foto propia)

4.2.3 Filtro de materiales sembrado

El filtro sembrado es el corazón de una Pka pues es ahí donde se produce la degradación de la materia orgánica, por lo que el correcto diseño y construcción de este, merece especial atención, como ya se dijo en el capítulo 3 de la presente tesis existen 2 variantes de filtro según como se da el flujo de agua en el interior del filtro, a continuación se darán criterios generales de diseño para ambos tipos.

Criterios de diseño para la construcción de un filtro de flujo horizontal según la ATV-DVWK-A262 (propuesta), Alemania 2004:

- Área de diseño $\geq 5 \text{ m}^2/\text{EW}$.
- Área mínima total $\geq 20 \text{ m}^2$
- Coeficiente de infiltración $k_f = 10^{-4} - 10^{-3} \text{ m/s}$
- Profundidad del corazón del filtro $\geq 50 \text{ cm}$
- Carga orgánica (DQO) $\leq 16 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
- Carga hidráulica $\leq 40 \text{ mm/d}$

Esquema típico de un filtro horizontal:

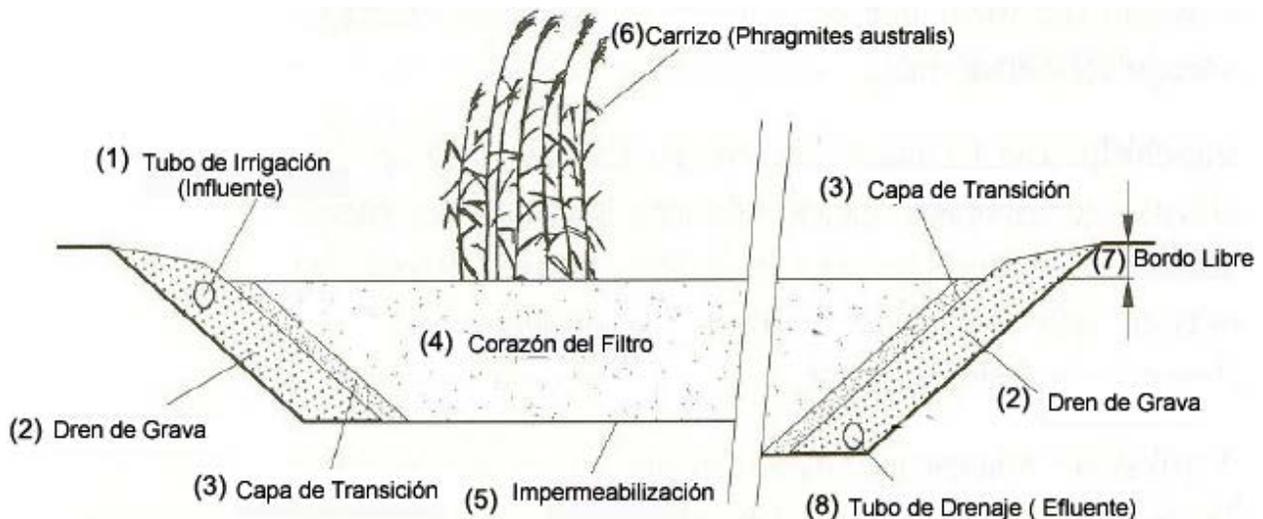


Fig. 4.8: Esquema típico de una PKA horizontal (Geller, G. und Höner, G; 2003; Pág. 66)

Criterios de diseño para la construcción de un filtro de flujo vertical según la ATV-DVWK-A262 (propuesta), Alemania 2004:

- Área de diseño $\geq 4 \text{ m}^2/\text{EW}$
- Área mínima total $\geq 16 \text{ m}^2$
- Coeficiente de infiltración $k_f = 10^{-4} - 10^{-3} \text{ m/s}$
- Profundidad del corazón del filtro $\geq 50 \text{ cm}$
- Carga orgánica (DQO) $\leq 20 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
- Carga hidráulica $\leq 80 \text{ mm/d}$

Esquema típico de un filtro vertical:

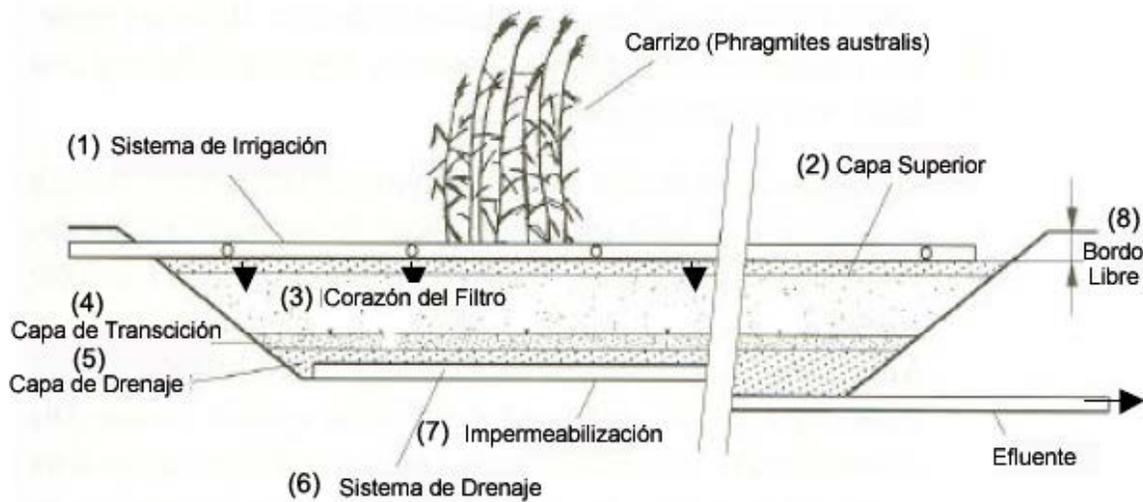


Fig. 4.9: Esquema típico de una PKA vertical (Fuente: Geller, G. und Höner, G; 2003; Pág. 63)



Fig. 4.10: Excavación de la zanja para el filtro, nótese el pozo de control colocado en el punto más bajo de la excavación a un extremo. (Foto propia)

Fig. 4.11: Impermeabilización del fondo del filtro con geomembrana y llenado de la parte inferior del corazón del filtro con arena. (Foto propia)





Fig. 4.12: Colocación del sistema intermedio de aireación pasiva, nótese al fondo de la imagen la torreta de inspección, que es a su vez, la toma de aire. (Foto propia)

Fig. 4.13: Llenado de la parte superior del filtro de arena y nivelación a mano.(Foto propia)





Fig. 4.14: Tendido y nivelación a mano de la cama superior de grava. (Foto propia)

Fig. 4.15: Colocación del sistema de irrigación a base de mangueras. (Foto propia)





Fig. 4.16: Tendido y nivelación de la capa superior de grava. (Foto propia)

Fig. 4.17: Sembrado del filtro. (Foto propia)



4.2.4 Pozo de control

Como se observa en la figura 4.2 el pozo de control es la última sección en una Pka; sin embargo, no carece de importancia pues en dicho elemento se regula mucho del funcionamiento de la instalación en su conjunto; su función principal es recolectar y redireccionar el agua ya tratada que proviene del filtro sembrado.

Criterios de diseño:

- Respecto al volumen no se recomienda un volumen específico; sin embargo, debe ser lo suficientemente amplio para albergar en su interior las instalaciones accesorias del sistema de irrigación y a un operador el cual tomará en este lugar las muestras de agua y dará mantenimiento.
- El pozo de control se ubicará en la zona más baja del filtro, a la par de éste, pero separado por el sistema de impermeabilización (membrana geosintética, concreto o capa de arcilla) se conectará al sistema de drenaje del filtro por medio de un tubo con diámetro mayor de 15 cm

Esquema constructivo:

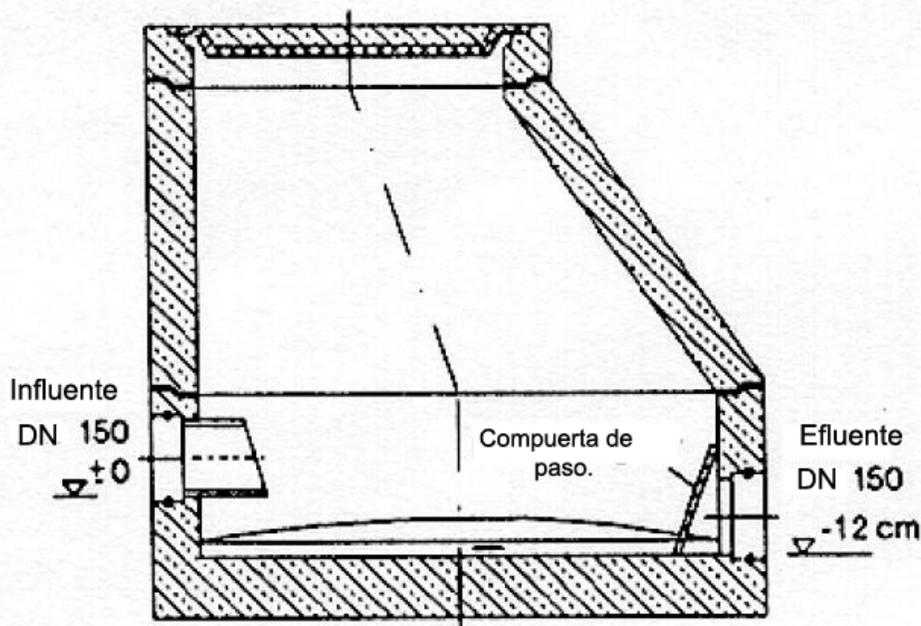


Fig. 4.18: Esquema constructivo de un pozo de control.



Fig. 4.19: Pozo de control, nótese las mangueras del sistema de irrigación y el efluente que viene del filtro (foto propia)

Fig. 4.20: Instalación del distribuidor del sistema de irrigación (Foto propia)



4.3 Operación de una Pka

Una de las mayores ventajas de una Pka contra otros sistemas de tratamiento radica en su simpleza, lo que conlleva una alta estabilidad de operación libre de problemas, así como, un mantenimiento sencillo, el que se puede llevar a cabo a través de personal especializado o de los mismos usuarios; de esta manera se pretende involucrar activamente a la sociedad civil en el proceso de tratamiento y reúso de las aguas residuales y por ende de uno de los aspectos fundamentales de la protección ambiental.

- Mantenimiento del sedimentador primario

Una condición esencial previa para el correcto funcionamiento a largo plazo de una Pka es un esmerado tratamiento primario. El punto fuerte o esencial de una operación eficiente del sedimentador es el monitoreo constante de las tres cámaras de sedimentación. Los siguientes puntos son para el mantenimiento de un sedimentador primario de 3 etapas:

- Llevar un registro detallado de las mediciones de cantidad y turbiedad del lodo.
- Programar con anticipación el vaciado del tanque de sedimentación.
- Realizar el vaciado del lodo usando un camión-cisterna o en su defecto una bomba para aguas negras.
- Después del vaciado del tanque de sedimentación cuidar que al menos 1/10 de la cantidad total de lodo permanezca en el sedimentador.
- Para evitar que el lodo en la primera cámara se levante, es recomendable rellenar el volumen extraído con agua de lluvia o agua limpia hasta que el agua circule a la segunda y tercera cámara.
- Como regla práctica se debe de tapar los pasos entre cámaras para evitar que esta se enturbie producto de la operación de la bomba.
- Si el sedimentador primario está diseñado con $0.5 \text{ m}^3/\text{EW}$ es recomendable realizar el vaciado del lodo una vez al año.
- Cuidar de no dejar tapados los pasos entre cámaras, así como, las tuberías de entrada y de salida del tanque de sedimentación.
- Si se forma lodo flotante en la tercera cámara del sedimentador se deberá de vaciar lo antes posible el sedimentador.

- Tratamiento y disposición de lodos

Una vez vaciado el tanque de sedimentación existen dos posibilidades; se puede contratar un camión cisterna que lleve el lodo a una planta de tratamiento municipal o empresa privada que cuente con un sistema de digestión de lodos o bien si se quiere usar el lodo primario extraído del tanque, se deberá primero de degradar a través de una instalación de desecado de lodos sembrada también con carrizo, pues debe de tomarse en cuenta que las heces humanas pueden contener importantes bacterias y virus que deben de ser eliminados antes de que el lodo se pueda usar como abono para el jardín o el huerto.

- Mantenimiento del pozo de bombeo y del sistema de irrigación

El punto fuerte de la supervisión del pozo de bombeo y del sistema de irrigación radica en llevar a cabo un control semanal regular de las partes constitutivas de éste. Independientemente de si la irrigación se realiza a través de una bomba o de un sifón, se debe de ubicar registros de supervisión a lo largo de toda la tubería, que se revisarán periódicamente y a través de los cuales se limpiará la tubería usando agua a presión.

La bomba y el sifón deben de ser revisados y limpiados periódicamente para evitar fallas en el funcionamiento.

- Mantenimiento del filtro sembrado

Las diversas operaciones de mantenimiento del filtro se limitan a mantener la superficie de este libre de malas hierbas así como a una revisión visual y auditiva de la infiltración del agua a través del filtro. En caso de que existan problemas de infiltración y el agua se encharque en la superficie del filtro se deberá de remover el material en esa sección y reemplazar con material nuevo.

- Control del efluente en el marco de la supervisión

En el pozo de control se lleva a cabo quizás la parte de supervisión más importante pues es acá donde se toman las muestras de agua que posteriormente se enviarán a un laboratorio para realizarles las diversas pruebas con el fin de asegurar que la estación opera adecuadamente y cumple con la normativa ambiental vigente en cuanto a límites permisibles.

En cuanto a las pruebas de olor y color de las muestras, las puede realizar en el lugar el operador, la muestra deberá estar libre de cualquier mal olor a heces y el color tendrá que ser de claro a ligeramente turbio; sin embargo, estas son pruebas subjetivas y no deberán de ninguna manera regir el criterio de calidad del agua tratada.

4.4 Costos de una Pka

Los costos de inversión general de una Pka en Alemania ascienden a 400 -2 500 Euros (5 440 – 34 000 Pesos mexicanos) por habitante mientras que los costos por concepto de mantenimiento y consumo de energía van desde 13 hasta 90 Euros (177 – 1 224 Pesos mexicanos) por habitante al año (Geller, G. und Höner, G; 2003) dichos costos se pueden resumir como sigue (Ambros, Ehrhardt, Kerschbauner, 1998):

- o Material.....50%
- o Planeación y supervisión de la construcción.....20%
- o Movimiento de tierras.....10%
- o Mano de obra.....15%
- o Otros.....5%

Dependiendo del país y del tipo de agua residual estos costos varían mucho, pero según experiencias de empresas del ramo, *estos costos pueden ser en países del tipo denominado en vías de desarrollo hasta 50 o 60 % menos que en Alemania, casos concretos de Tailandia, Vietnam y Egipto. (Joaquim Krüger Pflanzenkläranlagen GmbH), como se muestra en el cuadro 4.1.*

Cuadro 4.1

Costos de construcción y operación para Pka's tipo SUBTERRA construidas en diversos países.

Costos					Habitantes Beneficiados	Proyecto	País
Construcción	Operación (consumo de energía) *	Mantenimiento **	Costo Unitario (€/hab)	Costo Unitario (MXN/hab)			
€ 35 000	€ 75	€ 250	505	6 868	70	HOTEL "Buchholzmühle"	Alemania
€ 125 000	€ 240	Realizado por los propietarios	250	3 400	500	ALFA BEACH Hotel	Grecia
€ 70 000	€ 90	Realizado por los operadores	262	3 563	267	"Dwarsfontein" Estación de descanso en Autopista	Sudáfrica
€ 170 000	€ 90	Realizado por los propietarios	225	3 060	755	"Phiphi Princess" Hotel	Tailandia
€ 45 000	€ 66	Realizado por los operadores	170	2 312	267	"Solar-autarke Parkanlagen, Autobahn A20"	Alemania
€ 60 000	€ 120	Realizado por gente de la comunidad	600	8 160	100	"Kussow", Grevesmühlen ; Municipalidad	Alemania

* El costo por consumo de energía es anual.

** El costo por mantenimiento es anual.

Fuente: Integrada en base a datos contenidos en Joachim Krüger; 2004

Capítulo 5: Factibilidad de aplicación y sustentabilidad de la técnica

PKA en México

México es -desde un punto de vista ambiental y económico- un atractivo mercado para la aplicación de esta tecnología pues en este momento sólo cerca del 17 % del agua residual que se produce en los 2446 municipios, es tratada de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 y prácticamente no existe reúso de agua tratada salvo casos aislados.

Con la entrada en vigencia de la NOM-002-SEMARNAT-1996 el 01 de enero del año 2009 que obliga a los municipios -cuya población es de hasta 20,000 habitantes- a tratar el 100% del agua residual que producen, se prevé que el sector tratamiento de agua residual sea uno de los sectores con más amplio crecimiento, por lo que los municipios y particulares se verán obligados a tratar las aguas que generen, esta demanda futura de tecnologías eficientes y económicas, abrirá una amplia gama de ofertas de todo tipo de servicios en el sector saneamiento; sin embargo, surgen muchas dudas acerca de si una tecnología importada como las Pka's es del todo apropiable y factible en México, dadas las condiciones climáticas, económicas, políticas y sociales tan diferentes de nuestro país con respecto a Europa.

5.1 Componente técnico de construcción y operación

En el aspecto constructivo la posibilidad más interesante e innovadora que nos permite esta tecnología, es que, en vez de construir un gran filtro donde se trate el total del agua residual generada, es mucho más sencillo y económico construir y operar varias pequeñas instalaciones, ubicadas estratégicamente dentro del municipio con lo que se ahorrarían importantes costos operativos y constructivos por concepto de tendido de tubos, pues al ser menor el caudal colectado, se podría usar cómodamente diámetros menores de tubería.

Otra posibilidad interesante para ahorrar costos es la posibilidad de escoger entre diversos materiales para la impermeabilización del filtro. Hay varias opciones a elegir: Concreto, arcilla o folio sintético (Geomembrana), el tipo de material a utilizar estará regido por el precio y la disponibilidad del material en la región. Cuando por ejemplo en un lugar existan bancos de arcilla explotable, no tendría sentido usar otro material pues la arcilla -si se trabaja adecuadamente- provee una adecuada impermeabilización y es de los tres materiales el único que por ser parte de la naturaleza no contamina en absoluto.

Otro punto a favor de esta tecnología es precisamente su gran "flexibilidad", pues en la construcción de toda instalación de este tipo se debe considerar en la fase de planeación cual será el destino o reúso del agua tratada, y esta tecnología nos lo permite. Cuando el efluente descargue en un río, lago o laguna deberá de cuidarse en especial los límites máximos permisibles de nitratos y fosfatos, por el contrario si el agua tratada fuese reusada para el riego de cultivos agrícolas o del propio jardín, serían incluso deseable la presencia de residuos de nitratos y fosfatos.

Por otra parte, uno de los mayores problemas en las instalaciones tecnificadas tradicionales es la presencia de agentes patógenos así como de huevos de helminto en el agua tratada, lo que muchas veces imposibilita el reúso de esta agua; expertos han determinado que *la eliminación de agentes patógenos y de huevos de helminto en filtros sembrados es mas eficiente que en los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales (Geller, G. und Höner, G., 2003, Págs. 26 - 28)*. Por eso se recomienda usar Pka's como etapa de tratamiento secundario en instalaciones tecnificadas, siempre que los requerimientos de espacio lo permitan.

Con respecto a la escasez de agua en el norte de nuestro país la reutilización de agua tratada de origen industrial es otro gran tema a discutir, cuando fuese posible usar la capacidad de tratamiento de las Pka's, como tratamiento primario o secundario, para también reusar esta agua, debería de aplicarse, sin embargo, en ese aspecto aun queda mucho trabajo de investigación por realizar, pues, para cada caso y tipo de agua residual industrial se deben de probar diversas especies de plantas así como arreglos y combinaciones de filtros, a fin de encontrar la solución óptima para cada caso.

Otro aspecto a considerar es finalmente la influencia del clima en la operación de una Pka, sería interesante construir proyectos piloto en zonas costeras, zonas áridas, zonas frías y zonas tropicales; con el fin de determinar qué influencia -positiva o negativa- tiene la variabilidad de climas de nuestro país en la aplicación de esta tecnología, aunque la experiencia mundial es positiva pues empresas como la ya mencionada **Joachim Krüger Pflanzenkläranlagen GmbH**, ha construido proyectos en todos los tipos de climas antes mencionados (Alemania, Siria, Tailandia y Egipto) siendo el resultado global más que positivo.

En el aspecto de operación la pregunta más importante a contestar es siempre qué tan efectivas son las plantas de pantano para tratar aguas residuales, no obstante que se han realizado muchos estudios al respecto, la duda con respecto a este tipo de tecnologías persiste en los ciudadanos comunes, para aclarar dudas y divulgar el uso de esta tecnología es de capital importancia tanto proyectos de investigación en institutos como la construcción de plantas municipales y domésticas.

5.2 Influencia de las condiciones políticas y económicas sobre la construcción de Pka's en México

El antiguo modelo de desarrollo que imperó hasta finales de la década de los 60's en la mayoría del mundo sostenía que para que un país se desarrollara adecuadamente debía de existir un equilibrio entre los aspectos económico y social, sin embargo, Europa misma estuvo a punto del colapso ambiental durante los 70's y 80's, a raíz de esta situación y de una activa participación de la sociedad civil se logró presionar a los dirigentes políticos para que a su vez obligaran a las grandes empresas que contaminaban a cambiar radicalmente sus modelos de producción, por lo que en la actualidad cuando después de dos generaciones se habla de desarrollo sustentable se dice que el modelo adecuado de desarrollo ya no son sólo estos dos aspectos; sino, que el desarrollo de una nación es posible sólo cuando se logran equilibrar 3 aspectos fundamentales: social, económico y ambiental.

En México, como en tantos otros países en "vías de desarrollo", muchas de las grandes decisiones pasan por el aspecto político, por eso no se puede hablar de desarrollo sustentable sin considerar este factor dominante.

5.2.1 El aspecto político-social

El factor más importante a la hora de pensar en nuevas tecnologías de tratamiento de aguas como las Pka's es la aceptación del público, pues por lo general el tratamiento y reúso de agua residual enfrenta oposiciones de todo tipo, inclusive de tipo religioso, quizás una de las oposiciones más importantes en nuestro país es la antigua creencia muy arraigada en la población rural y urbana de que todo tipo de servicio en el rubro agua debe ser gratuito, lo que a su vez explotan algunos políticos que lo convierten en un tema mas de campaña.

En la tesis de Jahnke, M. (2003) "Pflanzenkläranlagen in Entwicklungsländern, Faktoren zur Verbreitung dieses Abwasserreinigungsverfahrens ermittelt durch eine Expertenbefragung" ("Pka's en países en vías de desarrollo, factores para la divulgación de este tipo de tecnología de tratamiento de aguas residuales investigado a través de consultorías expertas") se demostró que *las Pka's chocan en muchos casos con el modelo conceptual de los países. Sin embargo, se debe a que en muchos casos no se consideran los complejos factores socioeconómicos que imperan en cada país, para de esta manera evitar dificultades en el proceso de ejecución. Se recomienda que para fomentar el uso de esta tecnología deben de considerarse todas las recomendaciones que pudieran realizar al respecto los diversos actores participantes (JAHNKE, M., 2003).*

Seguramente todavía deberá de pasar mucho tiempo para que la población entienda y se convenza de que una Pka no solo tiene ventajas económicas sino que en muchos casos puede significar más limpieza, más salud, mayores cosechas, más independencia y mayor prosperidad. A manera de ejemplo la firma **Joachim Krüger Pflanzenkläranlagen GmbH** tardó 7 años para poder poner en operación una Pka en Egipto.

5.2.2 El aspecto político-ambiental

En un país como México, donde la mayoría de instituciones políticas y sociales son centralizadas, se requiere de un cierto tiempo para que el pensamiento de plantas de tratamiento descentralizadas e independientemente administradas por los usuarios, pueda germinar. Si bien es cierto que se han logrado ciertos avances en cuanto a la conciencia ambiental de la sociedad mexicana, aún se necesita tiempo antes de que las personas se hagan responsables de sus actos hacia el medio ambiente y que se animen, ya sea como ciudadanos, grupo o comunidades, a organizarse para tomar acciones al respecto.

No podemos seguir pensando que el cuidado ambiental es un lujo que sólo las naciones desarrolladas se pueden dar o que hay que salir de la pobreza antes de empezar a ocuparnos de nuestro entorno, se deben de resolver los problemas mientras son pequeños, no basta con campañas de concienciación o con tener leyes que impongan multas duras a los infractores, cada una de estas acciones coercitivas o que apelan a la buena voluntad ciudadana son inútiles si no se complementan mutuamente, a la vez debe de haber un cambio radical en la política ambiental gubernamental para poder superar el atraso que México aún padece, pues mientras cada año los costos por agotamiento y degradación ambiental ascienden al 9% del PIB sólo se invierte el 0.6 % del PIB en protección ambiental (INEGI , 2004).

5.2.3 El aspecto económico

No es casualidad que en México hasta junio de 2001 los municipios hayan acumulado sanciones por 55,000 mdp a causa de descargas de aguas residuales que superaron los límites máximos permisibles de contaminantes, en la mayoría de los municipios no se cuenta con recursos humanos y económicos suficientes para echar a andar sistemas sustentables de tratamiento de aguas residuales y las empresas privadas usualmente arguyen que en el tema agua, sólo participan en el abastecimiento de agua potable, pues las tarifas están muy castigadas lo que no les permitiría recuperar su inversión en el caso de prestar el servicio de tratamiento de aguas.

La distribución geográfica de la disponibilidad del recurso agua (ver punto 2.0) ocasiona que por ejemplo, en el norte sea más barato tratar un m³ de agua residual (2.5 \$/m³ en promedio), que extraerlo del subsuelo, hacerlo potable y entregarlo al usuario final (5.1 – 10.2 \$/ m³, dependiendo del consumo) esto hace que se tengan casos aislados aunque dignos de tomar en cuenta como el de Monterrey, municipio que da tratamiento a la totalidad de sus aguas residuales. Sin embargo, lo anterior no aplica en el centro y sur del país en donde sigue siendo mucho mas barato (proporción de 1:6) extraer un m³, que tratarlo y reusarlo, esto aunado a la pobreza y a la poca conciencia ambiental de la población motivada por la alta disponibilidad del recurso hace prácticamente imposible que se implanten sistemas de tratamiento tecnificados tradicionales que sean sustentables.

Ante esta situación las Pka's han probado a lo largo de los años y en diferentes partes del mundo, ser económicamente viables y rentables en donde otros sistemas han fallado, esto se debe como bien se fundamentó en el capítulo 4, a los bajos costos de construcción y operación, así como, a su efectividad y flexibilidad; lo que nos brinda amplias posibilidades de reúso de las aguas tratadas mediante esta tecnología y una mayor posibilidad de que los propios municipios la comercialicen para diversos usos.

5.3 Componentes de salud e higiene

En México como ya se dijo en el capítulo 3 de este trabajo *en la actualidad existen 23.2 millones de personas que carecen de los servicios de saneamiento básico (alcantarillado); de las cuales 15.67 millones se asientan en poblaciones rurales con menos de 2500 habitantes (INEGI 2000 y SUIBA 2005)*. Por lo que en estas zonas la eliminación de excretas es mediante letrinas de pozo ciego o bien en el mejor de los casos letrinas ecológicas secas (LASF) en la mayoría de lugares donde por falta de recursos económicos y/o información la gente no elimina las aguas residuales de ninguna manera el agua corre a cielo abierto contaminando las aguas superficiales y los acuíferos de donde la propia comunidad se abastece de agua "potable" lo que ocasiona enfermedades gastrointestinales y parasitarias que afectan principalmente a los niños menores de 5 años siendo entre estos la cuarta causa principal de mortalidad.

Por otro lado este foco latente de infecciones y enfermedades se traduce cada año en importantes costos económicos gubernamentales por concepto de salud, así como la afectación de la capacidad productiva de prácticamente *el 63 % de la población que vive en el campo mexicano y que carece de drenaje (SUIBA 2005)*. Y como consecuencia la afectación del Producto social bruto de la nación.

Con la implantación de proyectos de saneamiento a través de un sistema integral y económicamente accesible como son las Pka's (ver punto 4.4), se lograría una mejoría sustancial de la situación de salud de la población que habita en estos lugares, así como de su capacidad laboral y productiva, y México podría cumplir como nación cabalmente con uno de los puntos principales de los objetivos del milenio "Agua y saneamiento para todos".

5.4 Posibles usos del agua tratada a través de Pka's en México

La clave en la sustentabilidad del sector agua en México esta en el reúso de agua tratada y como consecuencia directa el ahorro de agua potable pues en este momento sólo se reusa el 5% del agua potable que se consume anualmente (SUIBA; 2005) se necesita de la participación conjunta de todos los sectores y actores, así como, de una fuerte y decidida voluntad política y ciudadana para el cumplimiento de leyes y normas. Entre los posibles reusos del agua tratada a través de esta tecnología se pueden mencionar:

- ✓ Riego agrícola de cultivos que no están en contacto directo con el suelo como frutales, forrajes y granos.
- ✓ Riego de áreas verdes y de campos deportivos.
- ✓ Usos industriales en aquellos procesos que no necesiten de la potabilidad del líquido.

Lo que se busca con la divulgación de esta tecnología es hacer más viable y real la implantación en México ,así como, en otros países en vías de desarrollo de nuevos conceptos integrales de saneamiento como el programa ECOSAN, divulgado por la GTZ, que busca cambiar la manera tradicional en que se conceptualiza y por ende realiza el saneamiento (figura 5.1), por un modelo alternativo (figura 5.2) que sostiene que la clave en el saneamiento es la no reinserción del agua tratada a los mantos acuíferos superficiales y subterráneos, sino un reúso continuo de ésta, donde se aprovechen los nutrientes para obtener más y mejores cosechas.



Fig.5.1: Modelo actual de saneamiento
(Fuente: <http://www.gtz.de>)

Capítulo 6: Conclusiones

Como resultado del trabajo realizado se presentan las siguientes conclusiones:

- i. Las pka's son ideales para tratar el agua residual doméstica que se produce en los centros urbanos y en los medios rurales mexicanos, por distribución de la disponibilidad de agua en el país es una tecnología ideal para el norte y sureste mexicano, ya que, en el caso del norte se cuenta con espacio y se carece de agua en cantidades suficientes y en el sureste el factor económico, así como, la integración a la arquitectura del paisaje es fundamental.
- ii. En México a través de sistemas descentralizados como las Pka's se podría incentivar el reúso del agua en el sector agrícola a un bajo costo; aprox. 2 \$/m³ contra los casi 8 \$/ m³ que cuesta el tratamiento por métodos convencionales centralizados, ya que en la actualidad solo se reúsan a nivel nacional 4.2 km³ de los 75.4 km³ que se producen anualmente.
- iii. El reúso del agua tratada en el agro mexicano significaría un ahorro de importantes recursos económicos e hídricos, así como, la posibilidad de recuperar la fertilidad de los suelos y por consecuencia obtener más y mejores cosechas.
- iv. Experiencias, que se han tenido en México con plantas de tratamiento centralizadas, muestran que por razones técnicas y económicas, seguir construyendo este tipo de instalaciones donde toda el agua es mezclada y tratada a la vez no tiene sentido, pues es tanta la variabilidad a lo largo del año del tipo de agua residual, así como, la cantidad de esta, que la mayor parte del tiempo las plantas trabajan por encima de su capacidad de diseño, lo que lleva a que el tratamiento no sea adecuado o que se tengan que hacer inversiones mayores en equipo, personal e instalaciones con tal de cumplir con los límites máximos permisibles en las descargas.
- v. En el futuro inmediato de nuestro país, una solución inteligente será tratar el agua residual en muchas pequeñas instalaciones de tratamiento, lo que permitirá que el agua tratada pueda ser reusada en el mismo sitio en el que se trata, ahorrando como ya se dijo importantes recursos económicos e hídricos, pero a la vez proveyéndoles a los usuarios y comunidades rurales más independencia y prosperidad.

- vi. La experiencia a nivel mundial demuestra que los métodos de tratamiento descentralizados son una excelente solución en el área rural o en los nuevos asentamientos de las ciudades, pues se ahorran costos por largas canalizaciones y es posible construirlas y operarlas con recursos humanos y materiales locales como se muestra en el cuadro 6.1.

Cuadro 6.1

Comparación entre las diversas tecnologías de tratamiento

Técnica	Ventajas	Desventajas	Costes en euros para una instalación en Francia de 1000 hab.	
			Inversión	Operación (€/año)
Lodos activados	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptado para cualquier tamaño de colectividad (excepto las muy pequeñas) • Buena eliminación del conjunto de los parámetros de contaminación (MES, DQO, DBO₅, N mediante nitrificación y desnitrificación) • Adaptado para la protección de medios receptores sensibles • Lodos ligeramente estabilizados • Facilidad de implantación de una desfosfatación simultánea 	<ul style="list-style-type: none"> • Costes de inversión bastante importantes • Consumo energético importante • Necesidad de personal cualificado y de vigilancia regular • Sensibilidad a las sobrecargas hidráulicas • Decantabilidad de los lodos que no siempre es fácil de dominar • Fuerte producción de lodos que hay que concentrar 	230, 000 (± 30%)	11,500
Lechos bacterianos Y	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo consumo de energía • Funcionamiento sencillo que necesita menos mantenimiento y control que la técnica de los lodos activados • Buena decantabilidad de los lodos • Menos sensible a las variaciones de carga y a los tóxicos que en la técnica de los lodos activados 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento inferior que en la técnica por lodos activados, debido en gran parte a las normas antiguas de diseño. • Un dimensionado más realista debe permitir alcanzar una calidad de agua tratada satisfactoria • Costes de inversión bastante elevados (pueden ser aproximadamente 20% superior a la técnica de un lodo activado) • Necesidad de pretratamientos eficaces • Sensible al atasco • Obras de tamaño importante si se imponen los objetivos de eliminación del nitrógeno 	180,000(± 50%)	7,000

<p>Discos biológicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Generalmente adaptados para las pequeñas colectividades • Resistencia al frío (los discos están siempre protegidos por cubiertas o por un pequeño edificio). 		<p>220,000(± 45%)</p>	<p>7,000</p>
<p>Lagunas aireadas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tolerante a variaciones de cargas hidráulicas y/o orgánicas importantes ; • Tolerante a los efluentes muy concentrados • Tolerante a los efluentes desequilibrados en nutrientes (causa de abundancia filamentosa en lodos activados) • Tratamiento conjunto de efluentes domésticos e industriales biodegradables. • Buena integración en el paisaje • Lodos estabilizados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vertido de una calidad media para todos los parámetros • Presencia de materiales electromecánicos que necesita el mantenimiento por un agente especializado • Ruidos ambientales relacionados con la presencia de sistema de aireación • Fuerte consumo energético 	<p>130,000(± 50%)</p>	<p>6,500</p>
<p>Lagunas naturales</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La aportación de energía no es necesaria si el desnivel es favorable • La explotación es ligera, pero si la limpieza global no se realiza a tiempo, el rendimiento de la laguna se reduce sensiblemente • Elimina una gran parte de los nutrientes: fósforo y nitrógeno (en verano). • Buena eliminación de los gérmenes patógenos en verano • Se adapta bien a fuertes variaciones de carga hidráulica • No hay construcción "en duro", obra civil sencilla • Buena integración en el paisaje • Ausencia de ruido ambiental • Los lodos procedentes de limpieza están bien estabilizados excepto los presentes al principio de la primera laguna. 	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie importante (10 m²/h.e.) • Coste de inversión que depende mucho de la naturaleza del subsuelo. En un terreno arenoso o inestable, es preferible no utilizar este tipo de laguna • Rendimiento inferior que con los procesos intensivos sobre la materia orgánica. Sin embargo, el vertido de materia orgánica se efectúa en forma de algas ; lo que es menos perjudicial que una materia orgánica disuelta para la oxigenación del medio río abajo • Calidad del vertido variable según las estaciones • El control del equilibrio biológico y de los procesos depuratorios queda limitado 	<p>120,000(± 60%)</p>	<p>4,500</p>

<p>Decantador digestor + infiltración percolación sobre arena</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Excelentes resultados con la DBO₅, la DQO, las MES y nitrificación a fondo •Superficie necesaria menor que para un lagunaje natural •Capacidad de descontaminación interesante. 	<ul style="list-style-type: none"> •Necesidad de una obra de decantación primaria eficaz •Riesgo de atasco a gestionar •Necesidad de disponer de grandes cantidades de arena •Adaptación limitada a las sobrecargas hidráulicas 	<p>190,000(± 50%)</p>	<p>6,000</p>
<p>Decantador digestor + lecho plantado de cañas (Pka)</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Facilidad y pequeño coste de explotación. •Ningún consumo energético si la topografía lo permite •Tratamiento de las aguas residuales domésticas brutas ; •Gestión reducida al mínimo de las sedimentaciones orgánicas retenidas en los filtros del 1er piso ; •Buena adaptación a las variaciones estacionales de población. •Bajo consumo energético ; •No hay ruido ambiental y buena integración en el paisaje •No se necesita de cualificación especial para el mantenimiento •Buena reacción a las variaciones de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> •Explotación regular, segado anual de la parte aérea de las cañas, deshierba manual antes del predominio de las cañas •El uso de esta técnica para capacidades superiores a 2 000 h.e. sigue siendo muy delicado debido a la dificultad de controlar la parte hidráulica y además es necesario considerar el coste respecto a las técnicas clásicas •Riesgo de presencia de insectos o de roedores 	<p>190,000(± 35%)</p>	<p>5,500</p>

Fuente: Integrada en base a datos contenidos en Comisión Europea / Oficina Internacional del Agua; 2001

Recomendaciones

En este tema aun hay mucho que investigar y abundar por lo que se recomienda que como tema de futuras tesis se traten temas como:

- i. Tratamiento de lodos en lechos de carrizo.
- ii. Especies vegetales originarias de México que se pueden usar en esta tecnología.
- iii. Uso de la técnica de lechos de carrizo como etapa de tratamiento biológico en plantas tecnificadas.

Glosario

Pág.	Página
Fig.	Figura
GTZ	Gesellschaft für technischer Zusammenarbeit (Asociación para la cooperación técnica)
Pka	Pflanzenkläranlage (Depuradora vegetal en lechos de carrizo)
Inwent	Internationale Weiterbildung und Entwicklung gGmbH (capacitación internacional y desarrollo)
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung (Sociedad limitada)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto alemán para normativas)
EW	Einwohnerwert (consumo de agua promedio de una persona al día según las normas alemanas)
ATV-DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Asociación alemana para la industria del agua, agua residual y basura)
LASF	Letrinas ecológicas secas o aboneras
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
MES	Materias en suspensión
DQO	Demanda química de oxígeno
pH	Potencial de hidrogeno
NH₃	Amoniaco
NH₄-N	Amonio
NO₂-N	Nitrito
NO₃-N	Nitrato
Kf	Coefficiente de infiltración en m/s
DN	Diámetro nominal
ECOSAN	Saneamiento ecológico
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP)
SUIBA	Sistema Unificado de Información Básica del Agua
CNA	Comisión Nacional del Agua ahora CONAGUA
INEGI	Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática
PIB	Producto interno bruto
NOM	Norma oficial mexicana
SEMARNAT	Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales

Lista de figuras

- Fig. 0:** CLASIFICACIÓN DE LA TÉCNICA PKA. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 1.1:** DISPONIBILIDAD DE AGUA DULCE EN EL PLANETA, EN EL AÑO 2000..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 2.1:** UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE MÉXICO..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig.2.2:** DIVISIÓN POLÍTICA DE MÉXICO ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig.2.3:** DISTRIBUCIÓN DE LAS LLUVIAS A NIVEL NACIONAL..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 2.4:** DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN A LO LARGO DEL AÑO..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 2.5:** VOLÚMENES DE AGUA CONCESIONADOS PARA USOS FUERA DEL CUERPO DE AGUA ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 2.6:** VOLÚMENES CONCESIONADOS POR USO DE AGUA ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 2.7:** GRADO DE PRESIÓN SOBRE EL RECURSO HÍDRICO ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 2.8:** ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS, CON INTRUSIÓN SALINA, Y/O BAJO EL FENÓMENO DE SALINIZACIÓN DE SUELOS AL AÑO 2004 ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig.2.9:** DESCARGA DE LAS VIVIENDAS CON DRENAJE AL AÑO 2000 ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig.2.10:** USO DE LAS DIVERSAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO EN MÉXICO AL AÑO 2000 ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 3.1:** ESQUEMA TÍPICO DE UNA PKA HORIZONTAL Y SENTIDO DEL FLUJO..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 3.2:** ESQUEMA TÍPICO DE UNA PKA VERTICAL Y SENTIDO DEL FLUJO..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 3.3:** SISTEMA DE TRANSPORTE DE OXIGENO EN PLANTAS ACUÁTICAS ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 3.4:** SISTEMA DE TRANSPORTE DE OXIGENO EN PLANTAS ACUÁTICAS ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 3.5:** CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE METALES PESADOS DE DIVERSAS ESPECIES VEGETALES EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 3.6:** CONCENTRACIÓN DE DIVERSOS TIPOS DE ENTEROBACTERIAS..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 4.1:** DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE DECISIÓN PARA LA SELECCIÓN DEL TIPO DE FILTRO ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 4.2:** ESQUEMA GENERAL DE UNA PFLANZENKLÄRANLAGE (PKA)..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 4.3:** ESQUEMA CONSTRUCTIVO DE UN TANQUE DE SEDIMENTACIÓN EN TRES ETAPAS ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 4.4:** TANQUE PREFABRICADO DE CONCRETO PARA SEDIMENTACIÓN EN TRES ETAPAS..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 4.5:** PRIMERA CÁMARA DE SEDIMENTACIÓN ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 4.6:** BOMBA DE INMERSIÓN PARA HECESES FECALES
- Fig.4.7:** MONTAJE DE LA BOMBA EN LA TERCERA CÁMARA DE ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 4.8:** ESQUEMA TÍPICO DE UNA PKA HORIZONTAL..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- Fig. 4.9:** ESQUEMA TÍPICO DE UNA PKA VERTICAL..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

- FIG. 4.10:** EXCAVACIÓN DE LA ZANJA PARA EL FILTRO..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG. 4.11:** IMPERMEABILIZACIÓN DEL FONDO DEL FILTRO CON GEOMEMBRANA Y LLENADO DE LA PARTE INFERIOR DEL CORAZÓN DEL FILTRO CON ARENA..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG. 4.12:** COLOCACIÓN DEL SISTEMA INTERMEDIO DE AIREACIÓN PASIVA..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG. 4.13:** LLENADO DE LA PARTE SUPERIOR DEL FILTRO DE ARENA Y NIVELACIÓN A MANO ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG. 4.14:** TENDIDO Y NIVELACIÓN A MANO DE LA CAMA SUPERIOR DE GRAVA ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG. 4.15:** COLOCACIÓN DEL SISTEMA DE IRRIGACIÓN A BASE DE MANGUERAS..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG. 4.16:** TENDIDO Y NIVELACIÓN DE LA CAPA SUPERIOR DE GRAVA ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG. 4.17:** SEMBRADO DEL FILTRO ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG. 4.18:** ESQUEMA CONSTRUCTIVO DE UN POZO DE CONTROL ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG. 4.19:** POZO DE CONTROL ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG. 4.20:** INSTALACIÓN DEL DISTRIBUIDOR DEL SISTEMA DE IRRIGACIÓN ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG.5.1:** MODELO ACTUAL DE SANEAMIENTO ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- FIG.5.2:** MODELO ECOSAN ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Lista de tablas

- CUADRO 1.1:** COMPOSICIÓN DEL AGUA TÍPICA DE ORIGEN DOMÉSTICO. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- TABLA 2:** LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- TABLA 3:** LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS ... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- CUADRO 2.1:** DISPONIBILIDAD NATURAL MEDIA DE AGUA POR REGIÓN ADMINISTRATIVA. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- CUADRO 3.1:** CANTIDAD DE MICROORGANISMOS EN UN SUELO SEMBRADO Y EN UN SUELO LIBRE DE RAÍCES..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- CUADRO 3.2:** PROMEDIO MEDIDO EN EL EFLUENTE Y MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LA DIN 4261 Y LA NOM-001-SEMARNAT1996..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- CUADRO 3.3:** EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN PKA'S A LOS 2, 7 Y 12 AÑOS DE OPERACIÓN. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- CUADRO 3.4:** FACTORES DE COMPENSACIÓN PARA LA ÉPOCA INVERNAL..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- CUADRO 3.5:** RETENCIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO DEL FILTRO SEMBRADO MEDIDO DESPUÉS DE 12 AÑOS DE OPERACIÓN EN MG/KG (PESO SECO)..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- CUADRO 4.1:** COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN PARA PKA'S TIPO SUBTERRA CONSTRUIDAS EN DIVERSOS PAÍSES. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- CUADRO 6.1:** COMPARACIÓN ENTRE LAS DIVERSAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO .. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Bibliografía

- Wissing, F. und Hofmann, K.: Wasserreinigung mit Pflanzen. Ulmer, Stuttgart 2002.
- Ambros, Ehrhardt, Kerschbauner : Pflanzenkläranlagen "selbst Gebaut". Leopold Stocker Verlag, Stuttgart 1998.
- Geller, G. und Höner, G.: Anwenderhandbuch Pflanzenkläranlagen. Springer, Berlin / Heidelberg / New York 2003.
- INEGI : Estadísticas a propósito del día mundial del agua, "datos nacionales". México 2002.
- INEGI : Censos de población y vivienda 2000. México 2000.
- INEGI : Sistema de cuentas económicas y ecológicas de México 1999 -2004. México 2004.
- Imhoff's, K.: Handbook of Urban Drainage and Wastewater Disposal. John Wiley & Sons, Canada 1989.
- PNUMA:Tecnologías Apropriadas para el Control de la Contaminacion de Aguas de Alcantarillado en la Region del Gran Caribe.
- SUIBA: Estadísticas del Agua en México (Sintesis); México 2005.
- Joachim Krüger : Technische Beschreibung SUBTERRA; Mecklenburg 2004.
- Deutsches Institut für Normung e.V.: Din 4261, Teil 1; Alemania 2000.
- Abwassertechnischen Vereinigung e.V. : ATV-A262, Arbeitsblatt; Alemania 1998.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V.(Propuesta) : ATV-DVWK-A262, Arbeitsblatt; Alemania 2004.
- Jahnke, M.: Pflanzenkläranlagen in Entwicklungsländern, Faktoren zur Verbreitung dieses Abwasserreinigungsverfahrens ermittelt durch Expertenbefragung; Diplomarbeit an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fachbereich Naturwissenschaftliche Technik, August 2003.
- Comisión Europea / Oficina Internacional del Agua: Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales adaptadas a las pequeñas y medias colectividades;Luxemburgo 2001