

IV. Métodos para tratar el agua residual

Ing. Pedro Vera Toledo

Introducción

La superficie de México se calcula en cerca de un millón 964 mil kilómetros cuadrados; sus litorales bordean 11 mil 122 kilómetros, bañados por las aguas de tres grandes cuencas marinas: el Océano Pacífico, el Golfo de México y el Mar Caribe.

La precipitación en el territorio se concentra principalmente entre los meses de junio a septiembre; sin embargo, en la zona norte de la península de Baja California pueden presentarse precipitaciones durante el invierno. La orografía determina la existencia de 37 regiones hidrográficas, muchas de ellas con ríos grandes y caudalosos, entre los que pueden citarse el Grijalva, Usumacinta, Balsas y Papaloapan. También se cuentan 70 lagos de diversos tamaños^[1].

El agua es considerada como uno de los recursos más importantes para el desarrollo de la sociedad, por lo que su uso racional, y la correcta gestión es fundamental para alcanzar un completo bienestar. En este capítulo se analiza el agua, primero un panorama general y somero de la potabilización, y en segundo lugar los sistemas de tratamiento enfocados a la depuración del agua de origen municipal (dejando de lado a todos los efluentes industriales y de servicios). Las modalidades que más se usan en la actualidad en México y particularmente Chiapas, así como la evolución de las diversas variables de los mismos.

Datos estadísticos del agua en México y Chiapas

La disponibilidad natural media total de agua en México (que considera al agua renovable, es decir, la que escurre superficialmente y recarga los acuíferos) es de 474 mil 637 hm³ al año, de la cual se emplea para usos consuntivos cerca de 75 mil 430 hm³.

El grado de presión del recurso difiere notablemente entre zonas: mientras que en el norte del país y la región de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala (XIII) es mayor a 40%, en las regiones del Pacífico Sur (V), Golfo Centro (X) y en la Frontera Sur (XI) no rebasa 5%. Con respecto a los acuíferos nacionales en el 2004, 104 de ellos se encontraron sobreexplotados (es decir, la extracción excede a la recarga), localizándose la mayor cantidad de ellos en las regiones Lerma-Santiago-Pacífico(VIII) y Cuencas Centrales del Norte (VII). En 2004, la disponibilidad natural media anual per cápita en México se estimó en 4 mil 505 m³ [2], volumen clasificado como de disponibilidad baja^[3] y considerado como peligroso en años de precipitación escasa. Debe mencionarse que aunque la disponibilidad se mide por habitante, este volumen debe además satisfacer otros requerimientos, como son la demanda del líquido por los ecosistemas naturales (lagos, ríos, humedales, etcétera). En el último siglo, la disponibilidad de agua per cápita se ha reducido drásticamente a nivel nacional (a inicios del siglo XX era siete veces mayor que en el 2004), lo que se explica fundamentalmente por el crecimiento de la población y no por la disminución de la cantidad de precipitación en el país. Destacan a nivel nacional dos grandes zonas de disponibilidad: la sur y sureste (cuya disponibilidad es en conjunto 68% del total nacional), que contrastan con las zonas norte, centro y noroeste (que en conjunto disponen de 32%, pero albergan 77% de la población y contribuyen con 85% del PIB).

En la zona sur-sureste se concentran la mayor cantidad de recursos hídricos, tan sólo en Tabasco y Chiapas se tiene más del 30 % del total del agua disponible, por otro lado en Tabasco se posee la mayor precipitación pluvial con 2 424.1 mm anuales y en Chiapas el promedio asciende a los 1 963.4 mm anuales^[3] (Precipitación pluvial normal mensual histórica por entidad federativa, en el periodo de 1941 a 2000), por

si fuera poco en estas dos entidades corren los ríos más caudalosos del país el Usumacinta y el Grijalva.

De la totalidad del agua disponible que en términos generales, requiere de cierto tratamiento para alcanzar los criterios de la normatividad correspondiente sobre todo para consumo humano y se tiene que al concluir el año 2000 existían registradas en el país, 336 plantas potabilizadoras en operación, con una capacidad total instalada de 105,003 l/s y un caudal potabilizado de 78,319.01 l/s. Al cierre de 2006, el registro de plantas en operación se incrementó a 491 unidades, con capacidad de 118,137.65 l/s y un caudal potabilizado de 85,398.99 l/s. sin que esto signifique que las plantas que actualmente se encuentran operando alcancen los parámetros exigidos en la normatividad correspondiente.

En comparación con el 2005, la capacidad instalada de la infraestructura en operación se redujo en 3,620.76 l/s y el caudal potabilizado en 1,653.33 l/s, bebido a que en el periodo 2006, se dieron de baja de la infraestructura once plantas en Yucatán, cinco en Quintana Roo y dos en Campeche, que no operaban con su proceso ^[4].

Datos de la agenda estadística 2001 arrojan que en Chiapas existían 3 431 “sistemas de agua potable” y de acuerdo a la propia agenda los “sistemas comprenden”: diferentes tipos, como son: de gravedad, bombeo, pluvial, olla y mixto y que se referían a los sistemas de abastecimiento de agua entubada ^[5]. Para diciembre de 2006 en contraparte, en el inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación, se contaba con solo 3 plantas potabilizadoras en todo el estado, con una capacidad instalada de 2500 l/s sin embargo el caudal potabilizado es de únicamente 2100 l/s, para una población de 4 200 000 habitantes (de acuerdo a las proyecciones del INEGI).

En lo referente a la estimación de la generación de aguas residuales en el estado, la Comisión Nacional del Agua propone que para obras de drenaje sanitario se adopta el criterio de aceptar como aportación de aguas negras, el 75% de la dotación de agua potable, considerando que el 25 % restante se “consume” antes de llegar a los conductos ^[6], es importante tomar en cuenta que prácticamente en todas las localidades del estado no se posee sistema de drenaje pluvial lo que da como resultado la mezcla del agua residual con la pluvial aumentado el caudal de la primera.

La CNA a través del IMTA realiza mediciones en diferentes localidades del país, con objeto de definir el porcentaje de aportaciones.

En todo el país se contabilizan un total de 1 593 plantas de tratamiento de aguas residuales a diciembre de 2006, sin dar a conocer la calidad del agua del efluente de las mismas^[4].

Para el 31 de diciembre de 2000, de acuerdo a la agenda estadística 2001, en Chiapas existían 14 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, con 809 l/s de capacidad instalada y se tenían tres tipos de procesos: filtros rociadores, lagunas de oxidación y reactores enzimáticos, diseminados en los municipios de: Chiapilla, Frontera Comalapa, Ixtapa, Palenque, Pijijiapan, Las Rosas, Suchiapa, San Lucas, estas en uso. La misma agenda informa que las restantes seis plantas se encontraban fuera de servicio, en los municipios de: Tuxtla Gutiérrez, Villaflores (dos plantas), Catazajá, Ocosingo, y Pichucalco^[5].

En ese mismo año se cuantificaron 18 122 fuentes de abastecimiento de agua, que incluían pozos profundos, manantiales, ríos, presas, lagunas, norias y arroyos, con un volumen anual de extracción de agua potable que ascendía a 196 500 270 m³, lo que arrojaría de acuerdo a los criterios de la Comisión Nacional de Agua la cantidad anual de 147 375 202.5 m³ de agua residual, en el mismo periodo sólo reciben algún tratamiento 10 375 344 m³/año (329 l/s que se tratan de los 809 l/s instalados)^[3], es decir poco menos del 7%, lo que refleja un enorme reto en materia de saneamiento.

Para diciembre de 2006, se contaba con 11 plantas registradas en el inventario nacional, la suma del total del caudal instalado es de 1,109.20 l/s, con un total tratado de 953.20 l/s, de las once plantas en operación, seis de ellas operan de “forma deficiente por azolvamiento”, cinco lagunas de estabilización, en los municipios de Chiapilla, Playas de Catazajá, Las rosas, Paso Hondo en Frontera Comalapa y Suchiapa y una fosa séptica en la localidad de Santo Domingo en el municipio de Unión Juárez, el total del caudal que fluye en estas plantas asciende a los 71.7 l/s^[4], ver tabla No. 1.

Tabla No. 1

PLANTAS MUNICIPALES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN OPERACIÓN EN EL ESTADO DE CHIAPAS							
							Dic-06
Municipio	Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad instalada (l/s)	Caudal Tratado (l/s)	Cuerpo Receptor o Reuso	Observaciones
CATAZAJA	CATAZAJA	PLAYAS CATAZAJA	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	10	10	LAGO DE CATAZAJA	OPERA EN FORMA DEFICIENTE POR AZOLVAMIENTO
CHIAPILLA	CHIAPILLA	CHIAPILLA	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	6.4	6.4	INFILTRACIÓN AL SUBSUELO Y REUSO EN RIEGO	SE REHABILITÓ EN 2004. OPERA EN FORMA DEFICIENTE POR AZOLVAMIENTO
COMITAN DE DOMINGUEZ	COMITAN DE DOMINGUEZ	COMITAN	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	210	210	RIO GRANDE	EN 2006 SE AMPLIÓ DE 140 A 210 L/S
FRONTERA COMALAPA	PASO HONDO	PASO HONDO	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	8.3	8.3	RIO GRANDE/SALINAS	OPERA DEFICIENTEMENTE POR AZOLVAMIENTO
ROSAS, LAS	ROSAS, LAS	LAS ROSAS	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	30	30	INFILTRACIÓN AL SUBSUELO Y REUSO EN RIEGO	SE REHABILITÓ EN 2004. OPERA EN FORMA DEFICIENTE POR AZOLVAMIENTO
SUCHIAPA	SUCHIAPA	SUCHIAPA	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	16	13	RIO SUCHIAPA	SE REHABILITÓ EN 2002. OPERA EN FORMA DEFICIENTE POR AZOLVAMIENTO
TRINITARIA, LA	TRINITARIA, LA	LA TRINITARIA	RAFA, WAB3 + HUMEDAL	7.5	7.5	SUMIDERO SAN FRANCISCO	INICIÓ OPERACIÓN EN 2005
TUXTLA GUTIERREZ	COPOYA	COPOYA	FILTROS BIOLÓGICOS O ROCADORES O PERCOLADORES	11	11	INFILTRACIÓN AL SUBSUELO	SE REHABILITÓ EN 2004
TUXTLA GUTIERREZ	JOBO, EL	EL JOBO	HUMEDALES (WETLAND)	6	3	INFILTRACIÓN AL SUBSUELO Y REUSO EN RIEGO	INICIÓ OPERACIÓN EN 2005
TUXTLA GUTIERREZ	TUXTLA GUTIERREZ	TUXTLA GUTIERREZ (PASO LIMÓN)	FILTROS BIOLÓGICOS O ROCADORES O PERCOLADORES	800	660	RIO SABINAL	SE REHABILITÓ Y AMPLIÓ EN 2004
UNION JUAREZ	SANTO DOMINGO	SANTO DOMINGO	FOSA SÉPTICA	4	4	RIO SUCHIATE	OPERA DEFICIENTEMENTE POR AZOLVAMIENTO
TOTAL DE PLANTAS:				11	1,169.26	953.20	

Tomada del Inventario Nacional de Plantas Municipales de potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, Comisión Nacional del Agua, Méx. 2006.

Métodos y tecnologías de tratamiento para el agua residual

En la actualidad existen una gran gama de tecnologías para el tratamiento del agua residual, los métodos individuales de tratamiento de aguas residuales se clasifican usualmente como:

- a. Operaciones físicas unitarias
- b. Procesos químicos unitarios
- c. Procesos biológicos unitarios.

Las operaciones de tratamiento implican una remoción, sin transformación de la materia removida es decir sin reacción al menos en ese instante, en tanto que en los procesos hay una remoción, a través de una transformación o reacción ya sea química o bioquímica (cinética) de la materia^[1].

Operaciones físicas unitarias

Dentro de las operaciones físicas unitarias que básicamente remueven sólidos por medio físico, se encuentran:

- Cribado
- Mezclado
- Desarenado
- Sedimentación
- Flotación
- Filtración
- Transferencia de gases

Procesos químicos unitarios

Para los procesos químicos unitarios que producen la remoción mediante la conversión y/o transformación (reacción química) de los contaminantes a través de la adición de compuestos químicos.

- Precipitación
- Adsorción
- Desinfección

Procesos biológicos unitarios

Son métodos de tratamiento de agua residuales en los cuales la remoción de contaminantes se realiza a través de la actividad biológica.

- Se utiliza para remover sustancias orgánicas, coloidales o disueltas.
- La materia orgánica degradable se transforma en material celular (nuevas células o gases).
- Los procesos biológicos se usan también para remover nutrientes (nitrógeno y fósforo).

Dentro de los procesos biológicos existen dos vías para eliminar la contaminación de los efluentes^[7].

Vía aerobia

Cuando el oxígeno esta asociado a las reacciones bioquímicas. Esta es la vía que espontáneamente se instaura en aguas suficientemente aireadas. El carbono orgánico es transformado en CO_2 , y biomasa.

Vía anaerobia

Cuando las reacciones bioquímicas se efectúan en ausencia de aire y en un medio reductor. Después de la degradación, el carbono orgánico, se encuentra en forma de CO_2 , CH_4 y biomasa.

Otra subdivisión es la que se particulariza en la presencia o ausencia de aire, oxígeno o combinación de ellos y se distinguen cinco grupos principales de procesos biológicos

1. Procesos aerobios
2. Procesos anóxicos
3. Procesos anaerobios
4. Procesos aerobios-atóxicos – anaerobios combinados
5. Procesos por lagunas de oxidación

A su vez los procesos individuales se pueden subdividir en

1. Procesos con biomasa suspendida
2. Procesos con biomasa fija
3. Procesos mixtos

Por último de acuerdo a la calidad que se desea alcanzar en el efluente tratado, existe otra clasificación que, puede incluir operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios o inclusive la combinación de ellos^[9].

Tratamiento preliminar

Remoción del agua residual de los constituyentes que pueden causar problemas de operación y mantenimiento en los procesos y equipos auxiliares. Ejemplo remoción de material grueso por medio de rejillas.

Tratamiento primario

Se eliminan los sólidos suspendidos y la materia orgánica, la remoción se lleva a cabo con operaciones físicas como la sedimentación.

Tratamiento secundario

Se elimina la materia orgánica biodegradable y los sólidos suspendidos. La desinfección se incluye usualmente en tratamientos secundarios. Ejemplo: procesos biológicos por lodos activados, reactores con biomasa fija y lagunas.

Tratamiento terciario o avanzado

Eliminación o control de nutrientes, generalmente se requiere de un control de nutrientes para descarga de agua a cuerpos cerrados donde la eutroficación puede ser causada o acelerada.

Descarga a corrientes donde la nitrificación puede consumir oxígeno y causar la proliferación de plantas acuáticas.

Recarga de acuíferos que pueden ser usados directamente para abastecimiento de aguas. Los nutrientes de interés son nitrógeno y fósforo y pueden ser eliminados mediante procesos químicos o biológicos o una combinación de ambos.

Sistemas naturales

Los sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales se diferencian de los convencionales en la fuente de energía utilizada, los primeros usan fuentes renovables y los segundos fuentes no renovables, además, los naturales hacen uso intensivo del suelo y los convencionales uso intensivo de la energía ^[12].

En el medio ambiente natural, cuando interaccionan el suelo, el agua, las plantas, microorganismos y la atmósfera, se producen procesos físicos, químicos y biológicos.

Con el objeto de tratar el agua residual, los sistemas naturales se diseñan para aprovechar esos procesos.

Los procesos que intervienen en los sistemas de tratamiento natural incluyen muchos de los utilizados en las plantas de tratamiento: sedimentación, filtración, adsorción, intercambio iónico, precipitación química, transferencia de gases, oxidación y reducción química y conversión y descomposición biológicas ^[13]. Junto con procesos propios de los sistemas de tratamiento natural tales como la fotosíntesis, foto oxidación y la asimilación por parte de las plantas a diferencias de los sistemas mecánicos, en los que los procesos se llevan a cabo de forma secuencial, en diferentes tanques y reactores a velocidades aceleradas como consecuencia del aporte energético, en los sistemas naturales los procesos se producen a velocidades naturales y tienden a realizarse de forma simultánea en un único reactor ecosistema.

Entre las tecnologías naturales se tienen dos grandes grupos: el primero, el sistema de aplicación sobre el terreno y el segundo los sistemas que utilizan plantas acuáticas flotantes y los pantanos construidos.

Los sistemas naturales se dividen en aplicación al terreno de baja carga, de infiltración rápida y de riego superficial y sistemas acuáticos: terrenos pantanosos (humedales) naturales y artificiales, y sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas.

Los sistemas de aplicación sobre el terreno son: Sistemas de baja carga

Contempla la aplicación del agua residual sobre un terreno con vegetación para conseguir el grado de tratamiento así como crecimiento de la vegetación existente. El agua aplicada puede consumirse por evapotranspiración o percolar vertical u horizontalmente. Toda el agua que pueda fluir se recoge y se vuelve a aplicar al sistema. El tratamiento se da conforme se percola en el terreno. En la mayoría de los casos el agua percolada alcanzará las aguas subterráneas pero, en algunos casos, pueden ser interceptadas por aguas naturales superficiales o recuperada mediante sistemas de drenaje o pozos. El caudal aplicado por unidad de superficie de terreno (carga hidráulica) y la elección y el control del tipo de

vegetación dependen de la permeabilidad, la altura de columna del suelo hasta alcanzar las aguas subterráneas y la presencia de sistemas de roca.

Infiltración rápida

La aplicación del agua para alcanzar el funcionamiento correcto es necesario que la permeabilidad del terreno sea mayor de 25 mm/h. los tipos de suelos aptos incluyen arenas, margas arenosas, y gravas. Las arenas y gravas gruesas presentan el inconveniente que permite la circulación a gran velocidad del agua en los primeros metros del suelo, donde se tiene la mayor actividad tanto química como biológica. Los suelos uniformes son preferibles, por operatividad y ensayos de campo.

Como condiciones de operación mínima (calma y cielo cubierto), características del suelo y del acuífero, y movimiento del agua en el terreno y en acuíferos adyacentes.

Pretratamiento; con el objetivo de reducir el sellado del suelo por obturación de los poros del mismo y evitar condiciones desagradables (olores). Mínimo recomendado es el tratamiento primario u otro equivalente.

Sistemas de riego superficial

Como su nombre lo indica en este sistema el agua residual se “riega” utilizando métodos como: rociadores o aspersores, tubería con compuertas o ranuradas, las características del suelo con baja permeabilidad (< 15 mm/h), aunque se ha observado que se trabaja en el rango de 15 a 50 mm/h.

Distancia a nivel freático como mínimo de 0.3 m, con topografía del terreno de pendiente uniforme de entre 1 y 8%, con climas preferentemente calidos, ya que los climas fríos pueden afectar negativamente el sistema; para obtener mejores resultados el agua debe ser tratada previamente, recuenta con reportes que el nivel mínimo de pretratamiento es el tamizado fino^[18].

Siempre existe la posibilidad de obturación de los utensilios utilizados para el riego por la película biológica que se forma en los conductos, por lo que se debe tener especial atención y limpieza de estos.

Los sistemas acuáticos de tratamiento

Sistemas de tratamientos mediante humedales

Los pantanos construidos o humedales artificiales, se definen como aquel sistema que pretende simular un humedal artificial, específicamente construido para tratar desechos, bajo condiciones controladas de ubicación, dimensionamiento y capacidad de tratamiento agua residual [14].

Algunas características que se deben de tomar en cuenta para la implementación de estos sistemas son: la topografía (uniforme horizontal o ligera pendiente 5%), suelo (permeabilidad < 0.5 cm/h), riesgo de inundación, uso actual del terreno (agrícola próxima a terreno pantanoso), clima (se reportan en operación hasta a 3°C) y el pretratamiento (del agua a tratar), selección y control de cubierta de vegetación.

Ventajas y desventajas:

Las ventajas que se atribuyen a los humedales artificiales con relación a los sistemas convencionales de tratamiento son:

1. Son relativamente económicos para construir y operar.
2. Es fácil obtenerlos.
3. Proveen tratamiento efectivo y real.
4. Son relativamente tolerantes a las fluctuaciones hidráulicas y de carga de contaminantes.
5. Tienen beneficios indirectos como espacios verdes, hábitat silvestre y áreas educacionales y recreativas.
6. Eficientes energéticamente.

Entre las desventajas relativas a los procesos convencionales están^[10]:

1. Tienen relativamente grandes requerimientos de áreas para tratamiento avanzado.
2. Generalmente los criterios de diseño y operación no son precisos.
3. Hidráulica y biológicamente son complejos y falta por entender la dinámica del proceso.
4. Existe la posibilidad de plagas indeseables.

Se diferencian dos tipos de humedales, los FWS y los SFS, (por sus siglas en inglés).

FWS

Sistemas de agua libre o de flujo libre con vegetación emergente, consistente en estanques o canales de poca profundidad de agua y baja velocidad.

SFS

Sistemas libre de flujo lento, también conocidos como de lecho vegetal sumergido o de flujo subsuperficial; son sistemas de caudal bajo la superficie con vegetación emergente, consistente en una red de trincheras o lechos de drenaje, barreras contra escapes y bajas velocidades.

Sistemas de tratamiento con plantas acuáticas

Estos sistemas consisten en uno o más estanques poco profundos en los que crecen una o más especies de plantas vasculares. La escasa profundidad y la presencia de microfitos acuáticos en vez de algas son las diferencias más importantes entre lagunas de estabilización y estos sistemas. Las plantas representan que el efluente del sistema sea de mejor calidad para tiempos de retención menor o iguales.

En estos sistemas el agua residual se trata mediante metabolismo bacteriano y sedimentación física

Sistemas de tratamiento con plantas flotantes

Los sistemas habituales incluyen el jacinto y la lenteja de agua. El sistema se distingue por la capacidad de estas plantas de captar directamente CO_2 y oxígeno requerido de la atmósfera, mientras que los minerales y nutrientes lo toman del agua. Esto último es común en plantas de raíces suspendidas.

Sistemas de tratamiento con plantas sumergidas

Para estos sistemas típicamente se utilizan las plantas como el berro y la elodea mielenrama (*Myriophyllum*), y se distinguen por la capacidad de absorber CO_2 y oxígeno, los minerales y los nutrientes de la columna del agua. Las plantas sumergidas se inhiben cuando la turbidez del agua es elevada puesto que la planta encargada de la fotosíntesis permanece por debajo de la superficie del agua.

Sistemas convencionales

Los sistemas convencionales se han desarrollado y utilizado en países industrializados con el objetivo de prevenir la contaminación de los cuerpos de agua y los sistemas naturales en países en vías de desarrollo donde además es necesario reusar el agua, por ejemplo en riego agrícola, para proteger el recurso ^[8] y de manera general haciendo uso intensivo de la energía.

Clasificación de los métodos de tratamiento de aguas residuales vía anaerobia

Los microorganismos anaerobios pueden estar en cultivos en suspensión o como una película adherida de cualquier manera, los reactores anaerobios se diseñan para optimizar el crecimiento microbiano. Existen diferentes sistemas, entre ellos se tienen:

Los sistemas de cultivo en suspensión

Los 3 tipos de reactores son:

1. Lagunas anaerobias
2. Contactores anaerobios
3. Reactores anaerobios zonales también conocidos como digestores

Lagunas anaerobias

Se emplean cuando no se requiere un control estricto del proceso, ni alto grado de tratamiento, las variables físicas como la temperatura no se controlan y puede o no emplearse un clarificador, en función de tiempo de retención en el tanque y la calidad requerida para el efluente final.

Contactores anaerobios

También conocido como “*Reactor de contacto*”, emplea una unidad de separación de sólidos por gravedad, para recircular los sólidos biológicos, como si se tratara de un proceso de lodos activados, sin embargo se emplea un desgasificador a vacío para eliminar el gas producido a la salida del reactor, y que interferiría con el proceso de sedimentación. El control del sistema reside en la adecuada sedimentación y recirculación de los sólidos al reactor principal.

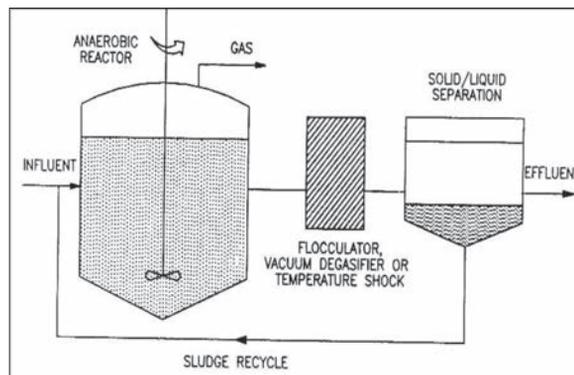


Figura 1. Reactor de contacto.

Reactores anaerobios zonales (digestores)

Emplea una combinación de reactor anaeróbico con una unidad de separación de sólidos, de manera que el líquido clarificado (efluente) sobrenada el reactor el tiempo de contacto en el reactor se determina mediante el caudal y el volumen. La concentración de sólidos se contro-

la mediante el vaciado periódico de los sólidos biológicos mientras que la clarificación se mantiene ajustando la velocidad ascensional de flujo en vez de la velocidad de sedimentación de la biomasa. La técnica del control de los sólidos resulta ser el aspecto más crítico para el proceso.

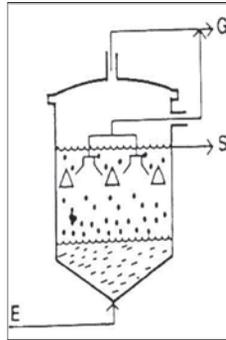


Figura 2. Reactor anaerobio zonal. Manto de lodos flujo ascendente

Sistemas de cultivo fijo

Debido a las dificultades para la clarificación en los sistemas con biomasa en suspensión, los sistemas con cultivo fijo se emplean en agua que no posee sólidos en suspensión, se reconocen por lo menos tres tipos de estos sistemas:

1. Reactor anaerobio de flujo superior
2. Reactor anaerobio de flujo inferior
3. Reactor anaerobio de lecho fluidizado
4. Reactor anaerobio combinado

Reactor anaerobio de flujo superior

Este tipo de reactor posee empaque o soporte para que la película biológica se adhiera a él, el material de empaque va desde madera hasta plásticos o rocas, con distribuciones al azar, que incluyen formas de anillos sueltos, de diversos tamaños o placas corrugadas dispuestas horizontal o verticalmente. El reactor contiene generalmente un espacio vacío para la recolección y eliminación de los sólidos.

Reactor anaerobio de flujo inferior

En muchos sentidos este reactor es similar al reactor anaerobio de flujo superior, y la principal diferencia es que posee el empaque de manera únicamente vertical, el empaque puede ser placas corrugadas. Puede tratar agua residual con elevado contenido de sólidos en suspensión ya que todos los sólidos se arrastran a través del medio de soporte. El efluente tiene lugar en la parte inferior del equipo.

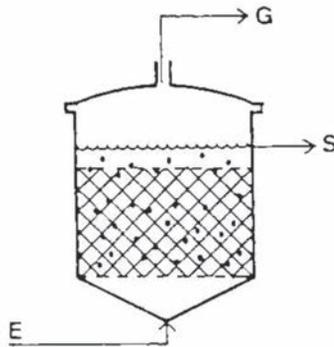


Figura 3. Reactor anaerobio de flujo inferior.

Reactor anaerobio de lecho fluidificado

Opera en modo de flujo superior con una elevada proporción de recirculación del efluente, de entre 10 – 15 gpm/ft² y emplea como medio inerte.

Una variación de es el Reactor de lecho fluidificado inverso (LFI), Integrado de un cilindro con una relación L/D=13. Unido a él se encuentra un separador que tiene como función atrapar las partículas que se hayan desplazado del lecho. Éste a su vez se encuentra conectado a una bomba de recirculación por medio de la cual se obtiene la expansión del lecho y por lo tanto la fluidización. Cuenta además, con una bomba de alimentación. Por otra parte, se encuentra adaptado un colector de gas que está conectado al lecho y al separador de partículas, este colector se encuentra comunicado a un contador de biogás que mide el volumen producido.

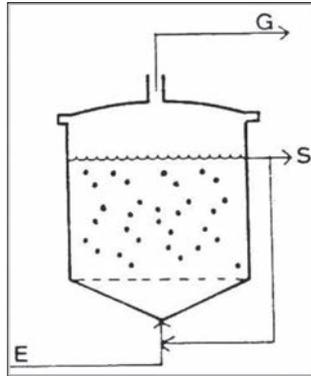


Figura 4. Esquema de reactor anaerobio de lecho fluidificado.

Reactor anaerobio combinado

El tratamiento anaerobio también puede llevarse a cabo en un reactor que emplea al mismo tiempo cultivo en suspensión y soportado. Se trata de reactores de flujo superior con un espacio libre en la parte inferior para promover el cultivo en suspensión.

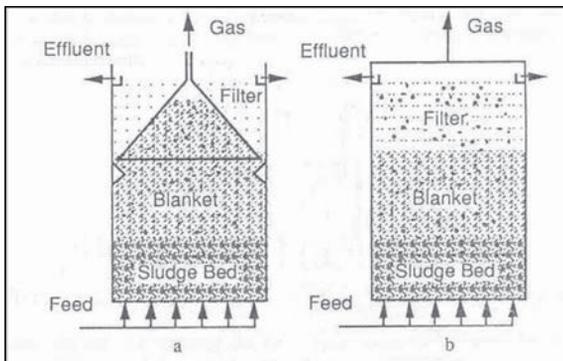


Figura 5. Diseño esquemático de reactor combinado.

La parte superior contiene un medio entrecruzado, con el objetivo de promover el crecimiento de los microorganismos soportados y proporcionar un entorno en que los microorganismos en suspensión sedimenten hacia la zona inferior del reactor, se conoce también como reactor híbrido.

Clasificación de los métodos de tratamiento de aguas residuales vía aerobia

Procesos en estanques o lagunajes

Existen una gran gama de sistemas lagunares, entre las que se encuentran; lagunas aerobias, lagunas facultativas, lagunas anaerobias y lagunas de maduración o terciarias.

Este proceso fue desarrollado por primera vez en Inglaterra en 1914, por Arden y Lockett, y su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo por vía aerobia.

En el tratamiento biológico de aguas residuales mediante el proceso de lodos activados el residuo orgánico se introduce en un reactor, donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. El contenido del reactor se conoce con el nombre de licor mezclado.

En el reactor, el cultivo bacteriano lleva a cabo la conversión en concordancia general con la estequiometría de las ecuaciones de “oxidación y síntesis” y “respiración endógena”. (En dichas ecuaciones, COHNS representa la materia orgánica del agua residual).

En este proceso las bacterias son los microorganismos más importantes, ya que son los causantes de la descomposición de la materia orgánica del afluente; aunque también intervienen otros microorganismos como los protozoos y rotíferos que ejercen una acción de refinado de los efluentes.

Las lagunas aireadas

Se desarrollaron a partir de lagunas de estabilización facultativas, en las que se instalaron aireadores de superficie para eliminar los olores que se producían al estar sometidos a sobrecargas orgánicas.

Este proceso es esencialmente el mismo que el de lodos activados de aireación prolongada convencional, excepto que se usa como reactor un depósito excavado en el terreno y el oxígeno se suministra mediante difusores o aireadores superficiales. La microbiología es similar a la de lodos activados. En estas lagunas es posible llevar a cabo el proceso de

nitrificación, tanto de forma estacional como continua; y el grado de nitrificación depende del diseño y funcionamiento del sistema y de la temperatura del agua residual.

Los factores que hay que tener en cuenta en el diseño de las lagunas aireadas son:

- La eliminación de la DBO, que se basa en el tiempo medio de retención celular (valores típicos entre 3 y 6 d), además la eliminación de DBO_5 se mide en la entrada y salida de la laguna aireada.
- Las características del efluente, que revisten mayor importancia son la concentración de DBO_5 y de sólidos suspendidos.

Filtro percolador

Se puso en funcionamiento en Inglaterra en el año 1893. El concepto de filtro percolador se originó del uso de filtros de contacto, que eran estanques impermeables rellenos con piedra machacada.

El filtro percolador moderno consiste en un lecho formado por un medio filtrante al que se adhieren los microorganismos, y a través del cual percola el agua residual, fenómeno por el cual recibe nombre el proceso.

El medio filtrante suele estar formado por piedras (su diámetro oscila entre 2.5 y 10 cm), o diferentes materiales plásticos de relleno. La profundidad del lecho varía en cada diseño entre 0.9 y 2.5 m, con una profundidad media de 1.8 m. Los de medio filtrante de piedra suelen ser circulares y los de material plástico pueden ser circulares, cuadrados, o de otras formas y con profundidades entre 4 y 12 m.

La comunidad biológica está compuesta principalmente de bacterias facultativas, nitrificantes, aerobias, anaerobias, hongos, algas y protozoos.

Los principales factores a tener en cuenta a la hora de predecir el adecuado funcionamiento son las cargas orgánicas e hidráulicas y el grado de tratamiento.

Los filtros percoladores se clasifican en función de la carga orgánica en filtros de baja carga, filtros de media y alta carga, filtros de muy alta carga, filtros de desbaste, y filtros de dos etapas.

Filtros de baja carga

Emplea roca como medio de soporte aplicando el agua residual mediante un distribuidor rotatorio. Es un dispositivo relativamente sencillo y de gran facilidad, que produce una calidad estable del efluente con independencia de la naturaleza cambiante del afluente.

Generalmente, se mantiene una carga hidráulica constante, no por recirculación, sino por medio de bombas con control del nivel de succión o con sifones dosificadores. Éstos bien operados pueden producir un efluente con un elevado nivel de alimentación de DBO y altamente nitrificado. El desprendimiento de olores es un gran problema, en especial si el agua residual es séptica o el clima es caluroso. No se deben ubicar en lugares que el desprendimiento de olores pueda ser un inconveniente.

Filtros de media y alta carga

En estos filtros la recirculación del efluente del filtro o del efluente final permite la utilización de cargas orgánicas más elevadas. En los filtros de media carga el flujo del caudal al filtro suele ser continuo; y los de alta carga se proyectan para cargas notablemente superiores a las correspondientes a los filtros de baja carga, y el caudal es continuo, la recirculación ayuda a prevenir el encharcamiento y a reducir los problemas de olores y proliferación de moscas.

Filtros de muy alta carga

Estos filtros de muy alta carga trabajan a altas cargas hidráulicas y orgánicas. Las principales diferencias entre estos y los de alta carga radican en las mayores cargas hidráulicas y la mayor profundidad.

Filtros de desbaste

Son filtros de alta carga que se proyectan para trabajar con cargas orgánicas superiores a $1,6 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ y cargas hidráulicas elevadas, superior-

res a $187 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ [15]. Se utilizan como pretratamiento del agua residual antes del tratamiento secundario, y usa medios plásticos. Se emplean principalmente para reducir la carga orgánica aplicada a los procesos posteriores y para obtener una nitrificación estacional. Tienen tendencia al uso de medios sintéticos, con profundidades entre 3.7 y 12 m. Su funcionamiento depende de la temperatura, y necesitan tasas altas de recirculación por las cargas hidráulicas elevadas. La actividad biológica es similar a la de un filtro percolador.

Filtros de dos etapas

En el tratamiento de aguas residuales muy concentradas se suele usar un sistema de dos filtros en serie con un decantador intermedio para la eliminación de sólidos generados en el primer filtro. El filtro de la primera etapa y el clarificador reducen la DBO carbonosa y en la segunda etapa se produce la nitrificación.

Sistemas biológicos rotativos de contacto o biodiscos (RCB)

Un biodisco consiste en una serie de discos circulares de poliestireno o cloruro de polivinilo, situados sobre un eje, a corta distancia unos de otros; los discos están parcialmente sumergidos en el agua residual y giran lentamente en el seno de la misma. Los biodiscos se pueden utilizar como tratamiento secundario, y también para la nitrificación y desnitrificación estacionales o permanentes. Son fiables debido a la gran cantidad de biomasa presente.

En el diseño de un sistema de biodiscos, se debe prestar atención a:

- La distribución en etapas de las unidades de biodiscos
- Los criterios de carga
- Las características del efluente
- Los tanques de sedimentación

Este diseño se basa en la DBO soluble por unidad de superficie ($\text{kg DBO}_5/\text{m}^2$), o en el caso de la nitrificación ($\text{kg NH}_3/\text{m}^2$), y se pueden diseñar para llevar a cabo tratamientos secundarios o avanzados.

Los problemas operacionales que presentan los sistemas de biodiscos están relacionados con la rotura del medio, fallos en los cojinetes de apoyo, y problemas de olores.

El reactor secuencial por tandas (Sequencing Batch Reactor, SBR)

Sistema de lodos activados para tratamiento del agua residual que utiliza ciclos de llenado y descarga. En este sistema el agua residual entra en una tanda a un reactor único, recibe tratamiento para remover componentes indeseables y luego se descarga.

La homogenización de caudales, la aireación y la sedimentación se logran en ese reactor único. Para optimizar el desempeño del sistema, se utilizan dos o más reactores en una secuencia de operación predefinida. Los sistemas SBR han sido utilizados con éxito para tratar aguas residuales tanto municipales como industriales.

Estos sistemas son especialmente efectivos para aplicaciones de tratamiento de agua residual caracterizadas por caudales reducidos o intermitentes.

Los procesos de llenado y descarga por tandas, similares a los de reactores SBR no son un desarrollo reciente como se cree comúnmente. Entre 1914 y 1920 varios sistemas de llenado y descarga se encontraban en operación. El interés en los SBR se revivió a finales de la década de 1950 e inicios de la década de 1960 con el desarrollo de nuevos equipos y tecnología ^[16] (Las mejoras de los sistemas de aireación y de controles permitieron que los SBR compitieran con éxito con los sistemas convencionales de lodos activados.

Los procesos unitarios de los SBR y los sistemas convencionales de lodos activados son iguales. Un informe de la EPA de 1993 resumió esto al indicar que “los SBR son simplemente sistemas de lodos activados que operan en el tiempo en lugar del espacio”. La diferencia entre las dos tecnologías es que los SBR logran la homogenización de caudales, el tratamiento biológico y la sedimentación secundaria en un tanque único usando una secuencia de tiempo controlada. Este tipo de reactor realiza también, en algunos casos, la sedimentación secundaria. En un sistema convencional de lodos activados estos procesos serían realizados en tanques separados.

Una versión modificada de SBR es el sistema de aireación extendida de ciclo intermitente (Intermittent Cycle Extended Aeration System, ICEAS). En el sistema ICEAS el agua residual afluyente entra al reactor en forma continua.

Como tal, no es un sistema de SBR convencional. Una pared de deflexión puede ser usada en el ICEAS para dispersar el flujo continuo. Con esta excepción, las configuraciones de diseño de los ICEAS y los SBR son muy similares.

Conclusiones

La disponibilidad natural media per cápita, que resulta de dividir el valor nacional entre el número de habitantes, ha disminuido de 18 035 m³/hab/año en 1950 a tan solo 4 416 en el 2006, a nivel nacional ^[3], y es de esperar que en el estado Chiapas se observe el mismo fenómeno, aunado a lo anterior, el constante aumento en la generación de contaminantes que de manera inexorable llegan a todos los cuerpos de agua, esto plantea la urgente necesidad de trabajar en el tratamiento de las aguas residuales municipales; para que se detenga la tendencia negativa de disponibilidad de la misma. Por otro lado las tecnologías con que se cuenta en estos momentos, implican altos costos en cuanto al diseño construcción pero sobre todo la operación, a lo anterior se le suma que para operar estos sistemas se requiere personal en muchas ocasiones altamente capacitado.

Es imperante que se realice investigación en ese sentido para ofrecer sistemas de tratamiento que sean opciones viables y que posean las siguientes características:

1. Capaces de eliminar los contaminantes y cumplir con la normatividad vigente.
2. A costos alcanzables o razonables para la mayoría de las poblaciones usuarias.
3. La continuidad del proceso en cuanto garantizar la operatividad de los mismos.

Esto por que, en una entidad con rezagos históricos en el tratamiento de las aguas residuales de origen municipal y las condiciones socioeconómicas-políticas y de medio ambiente, se pensaría que los sistemas naturales de tratamiento son la opción ideal por las ventajas que ofrecen; sin embargo, los tratamientos naturales en su modalidad de “sistemas de aplicación sobre el terreno”, de acuerdo a estudios sobre la irrigación en el Valle del Mezquital (90,000 Ha) concluyen que esta práctica ha sido de gran beneficio para la región por la grandes cosechas que se levantan gracias al agua y a la materia orgánica y nutrientes que contiene. Los metales que contiene el agua no se absorben en las plantas pero se acumulan en las capas superficiales del suelo, que tiende a salinizarse lentamente. Estos problemas no deben eludirse, sin embargo los más importantes son los de: salud pública ocasionados por la gran cantidad de bacterias fecales y huevos de helmintos que transporta el agua y la calidad de las aguas subterráneas ocasionados por la lixiviación de nitratos y otras sales^[17]. Por tales motivos no son una opción viable para el tratamiento de las aguas residuales por si solos.

Bibliografía

1. Iniciativa Latinoamericana y Caribeña para el Desarrollo Sostenible. Indicadores de seguimiento: México 2005.
2. CNA. 2005. Estadísticas del agua en México. 2005. México. 2005. Comisión Nacional del Agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
3. CONAGUA. 2007. Estadísticas del Agua en México, 2007. Comisión Nacional del Agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
4. CONAGUA. 2006. Inventario Nacional de Plantas Municipales de potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, Comisión Nacional del Agua. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
5. Agenda estadística, Chiapas 2001.
6. CNA. 2004. Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Octubre 2004.
7. Corbitt, Robert A., Manual de referencia de la Ingeniería Ambiental. Editorial Mc Graw Hill

8. Williams, J., Bahgat. M., May, E., Ford, M. & Bullet, J. 1995. Mineralisation and pathogen removal in gravel bed hydroponic. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Wat. Sci. Tech.* Ppg 49-58
9. Manual del Participante “Tratamientos de Aguas Residuales Domésticas e Industriales” UNAM – UNICACH, Marzo 2005.
10. Bastian, R.K., and D.A. Hammer. 1993. The Use of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Recycling. In G.A. Moshiri (ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, CRC Press, Boca Raton, FL. Ppg 59-68
11. Apuntes de la primera parte del curso taller, “Criterio de diseño y evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales” junio de 2002
12. Metcalf & Eddy, Inc.: *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*, Segunda Ed. Mc Graw Hill. 1979
13. Keily, Gerard, *Ingeniería ambiental, Fundamentos entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Editorial Mc Graw Hill. ppg 669-757.
14. Universidad de Texas, 1993, *Tratamientos naturales para agua residual municipal*, 1993.
15. Monroy O., Cervantes F., Viniegra G., Castilla P., Meraz M., *Biotecnologías para el Tratamiento de las Aguas Residuales de la Ciudad de México*, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
16. United States Office of Water EPA 832-F-99-073. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. Septiembre de 1999. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales reactores secuenciales por tandas.

17. Gutierrez Ruiz, M., Siebe Ch y Sommer I.(1995) Effects of Land Application of Wastewater From Mexico City Soil Fertility and Heavy Metal Accumulation: a bibliographical review, *Environ Rev.* 3: ppg, 318-330 .
18. Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización, tomo II, editorial Mc Graw Hill. ppg 1051-1150.
19. Nodal Becerra, Elida, (2001) Procesos Biológicos Aplicados al Tratamiento de Agua Residual, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. XXII, No. 4.

