



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

45  
Z EJ

FACULTAD DE INGENIERIA

PROCESOS DE AUTO DEPURACION  
EN CORRIENTES NATURALES

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**  
P R E S E N T A :  
**ERNESTO DE LA CRUZ TOVAR**



DIRECTOR DE TESIS: M.C. CONSTANTINO GUTIERREZ PALACIOS

MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-120

Señor:  
CRUZ TOVAR ERNESTO DE LA.  
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.C. Constantino Gutierrez Palacios, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"PROCESOS DE AUTODEPURACION EN CORRIENTES NATURALES"**

- I.- INTRODUCCION
- II.- ORIGENES DE LA CONTAMINACION
- III.- EFECTOS DE LA CONTAMINACION
- IV.- PROCESOS NATURALES DE AUTODEPURACION
- V.- MODELOS MATEMATICOS DE LOS PROCESOS
- VI.- EJEMPLO DE APLICACION
- VII.- CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, a 30 de junio de 1992.  
EL DIRECTOR.

ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR\*mlfa

Dedico este trabajo a :

mis padres, de quienes paciencia y dedicación he llevado al límite, pero al final aquí estamos, ustedes lo sabían. Gracias por siempre confiar en mí.

mi hermano, mi compañero de toda la vida, de todos los cambios, de todos los problemas y todas las satisfacciones.

Blanca Elena, gracias por el apoyo, la paciencia y la confianza que siempre me haz tenido.

mis amigos, precisamente por eso, su amistad.

los maestros, sin quienes ningún conocimiento puede trascender, muy en especial al maestro M.C. Constantino Gutiérrez Palacios por su apoyo y paciencia para la realización de este trabajo, todas las gracias del mundo.

La Universidad Nacional Autónoma de México,  
por que no existen mil palabras juntas  
que puedan expresar más, para mí,  
gracias por la educación y la libertad.

La contaminación ambiental es la alteración desfavorable de nuestro entorno, como subproducto total (o en gran parte) de las actividades humanas y a través de los efectos directos o indirectos que se derivan de los cambios en la distribución de la energía, los niveles de radiación, la constitución química y física y la abundancia de los organismos. Estos cambios pueden afectar al hombre directamente o a través del abastecimiento de agua y de los productos agrícolas o biológicos, de sus objetos o bienes materiales o de sus posibilidades de solaz y disfrute de la naturaleza.

Edward J. Kormondy

" Si el hombre continúa permitiendo que su conducta sea dominada por el separatismo, el antagonismo y la avaricia, destruirá el precario equilibrio de su ambiente. Y si alguna vez fuera destruido éste, su vida habrá terminado. "

Bárbara Ward

## INDICE

	Página
I. INTRODUCCION .....	1
1.1 El agua .....	2
1.2 Ciclo hidrológico .....	3
1.3 El agua en México .....	5
1.4 Problemas de contaminación .....	7
1.5 Efectos de la contaminación .....	8
1.6 Autodepuración. Definición .....	9
II. ORIGENES DE LA CONTAMINACION .....	12
2.1 Aguas residuales .....	13
2.2 Desechos de mayor importancia en la contaminación del agua .....	16
2.3 Calidad del agua .....	18
III. EFECTOS DE LA CONTAMINACION .....	35
3.1 Problemática del uso del agua en México .....	35
3.2 Infraestructura hidráulica .....	36
3.3 Generación de aguas residuales .....	39
3.4 Reutilización del agua .....	41
3.5 Eutroficación .....	43
3.6 Lluvia ácida .....	46
3.7 Salud ambiental .....	47
3.8 Enfermedades transmitidas a través del agua .....	48

IV.	PROCESOS NATURALES DE AUTODEPURACION DEL AGUA EN CORRIENTES .....	69
4.1	Procesos físicos .....	70
4.1.1	Dilución .....	71
4.1.2	Sedimentación y flotación .....	72
4.1.3	Filtración .....	74
4.1.4	Transferencia de gas .....	74
4.1.5	Solubilidad .....	76
4.1.6	Velocidad de transferencia .....	77
4.1.7	Transferencia de calor .....	80
4.2	Procesos químicos .....	83
4.2.1	Reacciones químicas .....	84
4.3	Procesos bioquímicos .....	86
4.3.1	Procesos metabólicos .....	86
4.3.2	Microorganismos en sistemas acuáticos naturales .....	93
4.3.3	Bacterias .....	94
4.3.4	Protozoarios .....	96
4.3.5	Algas .....	97
4.4	Respuesta de las corrientes a los desechos orgánicos biodegradables .....	98
4.5	Balance del oxígeno disuelto .....	99
4.6	Reaeración .....	100
4.7	Fotosíntesis de las algas .....	101
V.	MODELO MATEMATICO DEL OXIGENO DISUELTO .....	104
5.1	Velocidad de eliminación de oxígeno .....	104

5.2	Velocidad de oxigenación .....	106
5.3	Curva de oxigenación .....	107
5.4	Limitaciones de la curva de oxigenación .....	111
5.4.1	Variables de la DBO .....	111
5.4.2	Variables de la reaeración .....	112
5.5	Confirmación de la curva de oxigenación .....	113
5.6	Descarga orgánica y la ecología de la corriente .....	113
5.6.1	Modelo Whipple, Fair y Whipple .....	114
5.7	Análisis de la curva de oxigenación en corrientes .....	119
5.7.1	Análisis de la curva por la fórmula de Streeter-Phelps .....	120
5.7.2	Análisis de una corriente por métodos estadísticos .....	120
5.7.3	Análisis gráfico de Thomas para curvas cortas .....	121
5.7.4	Modificación de Hull del análisis de la curva .....	122
5.7.5	Nomogramas de Mc. Bride .....	123
5.7.6	Método Velz .....	124
VI.	EJEMPLO DE APLICACION .....	126
6.1	Antecedentes Históricos .....	127
6.2	Planteamiento del problema .....	129

6.3	Medio físico .....	135
6.4	Ubicación de la corriente .....	139
6.4.1	Descripción de los sitios de muestreo .....	140
6.5	Muestreo y análisis realizados .....	142
6.5.1	Descripción de los análisis realizados en campo .....	143
6.5.2	Pruebas de laboratorio .....	145
6.6	Comparación de valores .....	147
6.7	Índice de calidad del agua .....	148
6.8	Posibles usos del agua en los diferentes puntos de muestreo .....	149
6.9	Parámetros obtenidos en campo y laboratorio .....	150
6.10	Ejemplo de aplicación de la curva de la DBO .....	151
VII.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	156
7.1	Conclusiones .....	156
7.2	Recomendaciones .....	160
ANEXO 1 (TEMARIO DE LA ASIGNATURA CONTAMINACION DE AGUAS)		
BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS .....		164

## I INTRODUCCION

El presente trabajo escrito corresponde a un tema de la asignatura Contaminación de Aguas, denominado «Procesos de Autodepuración del Agua», cuyo propósito es desarrollar en él los puntos concernientes al mencionado tema. Para ello, en esta introducción se describirá el contenido general que se detallará en los capítulos posteriores. En el anexo # 1 se presenta el temario completo de la materia.

El desarrollo de las sociedades humanas y la preservación del medio ambiente no son incompatibles, sin embargo el progreso científico y tecnológico ha aumentado de tal manera, y la capacidad del hombre para modificar el medio natural es tal, que ya no es posible considerar a la naturaleza como una reserva inagotable y autorregenerable. Es evidente que no es el progreso de la ciencia y la tecnología lo que causa daños irreversibles al medio ambiente, sino el uso irresponsable de las mismas.

La importancia del agua es ampliamente reconocida a través de la historia, y actualmente se le considera como un recurso natural escaso, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de las actividades económicas; es irremplazable, no ampliable por mera voluntad del hombre, irregular en su forma de presentarse en el tiempo y en el espacio, fácilmente vulnerable y susceptible de usos sucesivos.

Este elemento es uno de los principales recursos que ofrece la naturaleza, al mismo tiempo, es indispensable para la vida del hombre y para la realización de sus actividades productivas. En la naturaleza tiene diferentes formas de presentación: en estado líquido en ríos, lagos, lagunas, corrientes subterráneas, océanos y precipitación pluvial; en estado sólido, básicamente en témpanos, ya que en forma de granizo o nieve su estado es transitorio; en estado gaseoso en la formación de nubes o en la humedad del ambiente.

El agua tiene varias propiedades importantes, pero su particularidad de mayor interés reside en que forma parte sustancial de todos los organismos vivos, tanto animales como vegetales.

### 1.1 El agua

Son muchos los usos que el hombre da a este elemento; la diversidad va de acuerdo con el adelanto de la técnica y el aumento de las necesidades. Las formas más importantes de utilización del agua van desde el riego agrícola y la producción de energía, hasta el uso directo industrial y el consumo humano. Se usa además, como fuente de alimentos por constituir el medio propicio para producir y desarrollar especies animales que pueden servir a la alimentación humana; en las comunicaciones por la navegación en océanos, ríos y lagos; como valor estético (fuentes, etc.); para la salud (aguas termales, medicinales y potables) y por interés deportivo y recreativo.

El agua utilizada en el riego agrícola es indispensable para asegurar el abastecimiento de diversos tipos de alimentos. Por otro lado, actualmente se utilizan grandes cantidades de agua para generar energía a través de plantas hidroeléctricas, cumpliendo así con este propósito y en algunos casos con los de proveer volúmenes suficientes para riego.

El aprovechamiento del agua para usos doméstico e industrial es mayor en el sector urbano. Para el primer caso es necesario tratarla, ya que todas las fuentes de abastecimiento poseen diversas características físicas, químicas y biológicas que en muchas ocasiones no cumplen con la calidad de potable y se hace necesario su tratamiento. Para fines industriales se requiere también un cierto grado de tratamiento, de acuerdo al uso y a los volúmenes de la misma, dependiendo del tipo de proceso de las diferentes plantas.

De esta manera el agua es susceptible, previo tratamiento, de utilizarse en forma cíclica una o más veces. En cambio, el agua de riego se evapora en gran cantidad y el agua de retorno puede variar según las circunstancias de 20 a 60 % del agua originalmente empleada.<sup>1</sup>

#### 1.2 Ciclo hidrológico

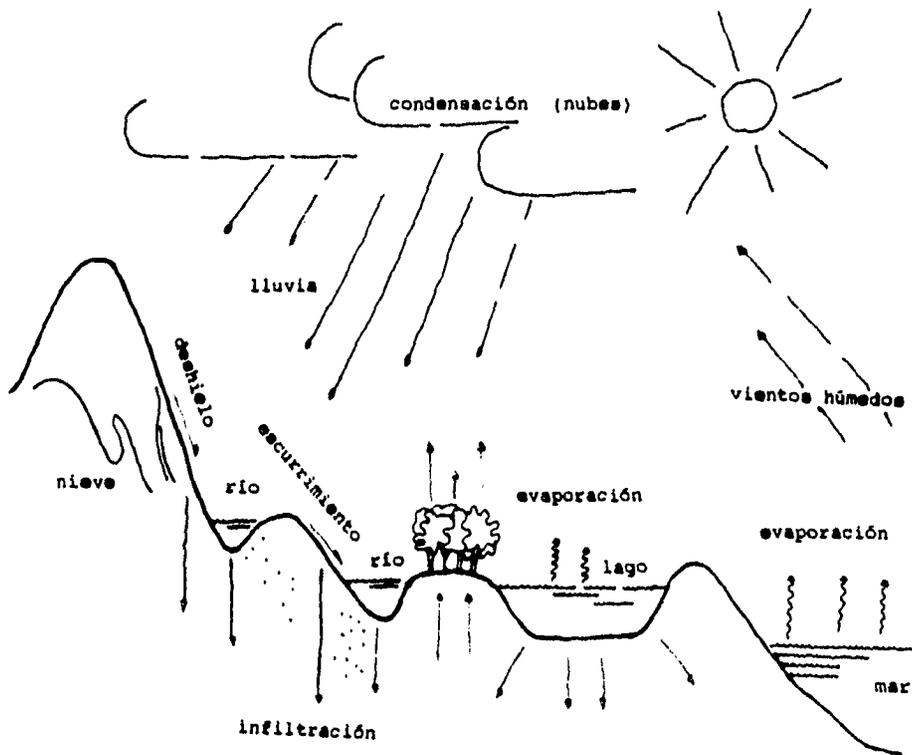
El agua puede considerarse como riqueza permanente debido a que el volumen existente en el planeta es más o menos constante,

---

<sup>1</sup> Referencia No. 15

gracias a que ocurre un proceso natural conocido como ciclo hidrológico que comprende las fases de evaporación-condensación-precipitación-escurrimiento-infiltración, continuándose nuevamente este proceso.

### **ciclo hidrológico**



Este ciclo, se lleva a cabo principalmente por efecto del calor del Sol, ya que el agua de los ríos, lagos, lagunas y mares se evapora y al llegar a un nivel de altura, por el cambio de temperatura, se condensa formando nubes, de las cuales el agua se

precipita en forma de lluvia (siempre que se cumplan ciertas condiciones físicas sobre la superficie terrestre) y se canaliza otra vez hacia los ríos, lagos, lagunas y mares.

Puede afirmarse que el agua es el elemento natural más abundante en la superficie de la Tierra, ya que los océanos cubren cerca de las tres cuartas partes de la misma. Además, depósitos y corrientes subterráneas vienen a aumentar su proporción.

### 1.3 El agua en México

Según estudios realizados en nuestro país, por la Comisión del Plan Nacional Hidráulico, la altura media anual de lluvia en México es de 780 mm, lo cual significa que el volumen de agua originado por la lluvia es de 1.53 billones de m<sup>3</sup> al año.

En los ríos que hay en nuestro país escurren aproximadamente 410,000 millones de m<sup>3</sup> por año. Se ha estimado que existen 14,000 millones de m<sup>3</sup> de agua en almacenamientos naturales (lagos y lagunas) y se han construido presas cuyos vasos permiten almacenar 124,700 millones de m<sup>3</sup>. Asimismo, se calcula que por evaporación de vasos y lagos existe un volumen medio anual de agua en ese estado, de 9,300 millones de m<sup>3</sup>. <sup>2</sup>

No obstante de que la disponibilidad potencial renovable de agua es relativamente alta respecto al consumo, en algunas regiones

---

<sup>2</sup> Referencia No. 15

éste es de tal magnitud, que supera a la disponibilidad. Tal es el caso del Valle de México, que demanda enormes volúmenes de agua por las grandes concentraciones urbanas e industriales que hay en la Ciudad de México y área conurbada.

En regiones donde el consumo supera la disponibilidad potencial se emplea como fuente alternativa agua subterránea. Se estima que alrededor del 70% de las demandas del sector urbano industrial y aproximadamente el 25% de las del sector agrícola se satisfacen actualmente con explotaciones de agua subterránea mediante bombeo de pozos, descarga de manantiales y aprovechamiento del flujo subterráneo hacia los ríos, comúnmente llamado flujo base. Asimismo, algunas observaciones permiten detectar que un 93% de la extracción de aguas subterráneas se efectúa en zonas áridas o semiáridas, con fines esencialmente agrícolas, lo cual ha originado que algunos de los mantos acuíferos subterráneos estén siendo sobreexplotados.

Los escurrimientos naturales llegan a formar ríos y todos conforman a su vez, cuencas o territorios, cuyas aguas finalmente se depositan en los lagos o mares. Generalmente en México se acostumbra denominar a las cuencas con el nombre de los ríos (Véase figura I.1).

Los escurrimientos de agua que forman las corrientes se agrupan en vertientes. En el país están consideradas tres vertientes principales que son: la del Pacífico, la del Golfo de México y la



vertiente interna; llamada así porque los ríos desembocan en lagos y lagunas interiores.

#### 1.4 Problemas de contaminación .

Desde hace tiempo, el público se interesa cada vez más por las condiciones que reúnen las aguas de los ríos y de los lagos. La creciente densidad de la población, con el aumento correspondiente del volumen de aguas residuales, domésticas e industriales, ha afectado a los cursos de agua de tal modo, que los ha hecho impropios para su utilización con finalidades recreativas, llegando incluso a ofrecer serios peligros a la salud humana y en general a la vida animal y vegetal cuando no se le da un tratamiento a las aguas residuales, previo a ser descargada a las corrientes o cuerpos de agua, tal como es marcado en las Normas Técnicas Ecológicas.<sup>3</sup>

En la normatividad se define como *contaminante* a toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural; la *contaminación* se define como la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> Referencia No. 7

<sup>4</sup> Referencia No. 11

La contaminación viene seguida por el proceso importante, aunque limitado, de autodepuración, definido como la descomposición aeróbica y anaeróbica de substancias orgánicas, realizada por cientos de microorganismos en aguas naturales contaminadas por residuos orgánicos provenientes de fuentes diversas<sup>5</sup>. La autodepuración, ayuda al ingeniero a establecer métodos de tratamiento para el agua. Debe entenderse, sin embargo, que no puede confiarse en que la autodepuración transforme en potable un agua que no lo sea.

#### 1.5 Efectos de la contaminación

La intensidad de la contaminación varía extraordinariamente. En menor grado puede no ser fácilmente detectable sino mediante análisis físicos, químicos y bacteriológicos del agua. La contaminación en cuanto a sus posibles efectos, ha sido clasificada, por Streeter<sup>6</sup> como sigue:

1.- Contaminación que no afecta directamente a la salud pública.

a) Aquella que tiende a reducir el valor de la calidad del agua para utilizaciones residenciales, agrícolas o recreativas.

b) La que afecta la conservación de la vida de los peces y el empleo de sus aguas para finalidades recreativas.

c) La que puede dar origen a sabor, olor u otras cualidades que hagan el agua inadecuada para los suministros públicos.

2.- Contaminación que afecta a la salud pública.

---

<sup>5</sup> Referencia No. 12

<sup>6</sup> Streeter H.W., "Tendencias in standards of River and Lake Cleanliness", Sewage Works Jour., vol.6 #4, julio 1934.

a) Excesiva contaminación de los manantiales de suministro de agua, ya sea producida por alcantarillas o por residuos tóxicos industriales.

b) Contaminación de lugares dedicados a la cría de mariscos, por alcantarillas o residuos industriales.

c) Contaminación de lugares destinados a baños.

#### 1.6 Autodepuración.

La autodepuración, proceso natural que realiza el agua cuando se le descargan aguas residuales, con tratamiento o sin él, diluyéndolas. Seguidamente se efectúa el tratamiento completo o parcial dentro del cuerpo de agua. Ocurre con mayor frecuencia que, si las aguas no han tenido un tratamiento adecuado, la masa de agua se contamine; la naturaleza provee de elementos para la autodepuración de todas las aguas que hayan sido contaminadas, por descargas ya sean debidas a escurrimientos del suelo, aguas negras o desperdicios industriales. La velocidad a la que se verifica este proceso depende del origen y la cantidad de materia contaminante, así como de las condiciones y características físicas, químicas y biológicas del agua misma.

Frecuentemente se afirma que el agua se autopurifica al fluir a lo largo de cierta distancia o que la aeración natural que tiene lugar en las caídas, oxidará o matará las bacterias, en realidad la distancia en sí no tiene relación directa con la autodepuración, está combinada con el tiempo de trayecto; tampoco la aeración por sí misma realiza la destrucción de las bacterias. Es

cierto que el tiempo y la aeración son los factores más importantes, pero existen otros de igual importancia, como las condiciones adecuadas de temperatura, la luz solar, la velocidad de la corriente y las características físicas, químicas y biológicas del cuerpo receptor.

La sedimentación por reposo en un depósito durante un período de casi un mes, puede lograr generalmente una purificación equivalente a la filtración; el flujo lento de una corriente en una gran distancia, puede llevar a los mismos resultados.

La contaminación del agua por las descargas de desechos o por otras sustancias contaminantes, pone en movimiento un ciclo, difícil de observar en el agua estancada y fácil de ver en una corriente. Este ciclo comprende cuatro fases que son las siguientes, y que son detalladas en un capítulo posterior.

1. Zona de degradación,
2. Zona de descomposición activa,
3. Zona de recuperación, y
4. Zona de agua limpia.

En el desarrollo de este trabajo se tratarán más a detalle los temas que se han tocado en esta introducción, en el capítulo II se tratará acerca de los orígenes de la contaminación, cuáles son los principales contaminantes de los cuerpos y corrientes de agua y la clasificación de las aguas contaminadas de acuerdo a su procedencia; en el capítulo III se describe la problemática del

uso del agua en el país, el desarrollo poblacional, la generación de las aguas residuales y las enfermedades como efecto de la contaminación del agua; dentro del capítulo IV se detallarán los diversos procesos de autodepuración del agua en sistemas naturales, siendo estos físicos, químicos y biológicos; en el capítulo V se presenta uno de los modelos del oxígeno disuelto, incluyendo su determinación como expresión matemática, mencionando sus alcances y sus limitaciones. Para finalizar, se presenta la aplicación del modelo mencionado en una corriente del sistema de canales de Xochimilco, obteniendo resultados que se comparan con parámetros para definir los posibles usos del agua o comprobar que los usos para esta son los adecuados, lo cual se resume en el capítulo de conclusiones.

## II ORIGENES DE LA CONTAMINACION DEL AGUA

La contaminación del agua tiene su origen desde que se generan desechos provenientes de las distintas fuentes, como la industria, el campo y los centros urbanos, teniendo como desfogue natural las corrientes y los cuerpos de agua, que ocupan tres cuartas partes del globo terráqueo, de las cuales el 97.4 % es salada y sólo el 2.6 % es agua dulce. El escaso manejo de los recursos, la inadecuada conservación de las fuentes naturales, la creciente demanda y la acelerada contaminación deterioran la calidad del agua. Para preservar una aceptable calidad del agua del planeta, es prioritario promover la reducción de los desechos sólidos, líquidos y aéreos (materias suspendidas en el aire) provenientes de la industria, las ciudades y el campo, que reciben los cuerpos de agua.

Entre los elementos contaminantes que enturbian el agua impidiendo el desarrollo de los procesos fotosintéticos, disminuyendo la reoxigenación de las capas inferiores del agua de las corrientes y cuerpos de agua que inciden desfavorablemente en la flora y la fauna y consecuentemente en la vida humana, se encuentran :

- Las descargas de aguas residuales de los centros poblacionales consistentes en caudales de desechos que comúnmente contienen detergentes, jabones, grasas, plásticos, heces fecales, fibras textiles y otras materias sólidas y suspendidas.

- Las aguas de las zonas de riego, frecuentemente cargadas de insecticidas, plaguicidas, sales inorgánicas, minerales, fertilizantes, desechos animales y otras sustancias tóxicas.
- Finalmente en las aguas de desecho industrial se detectan colorantes, solventes, ácidos, grasas, metales pesados, pigmentos y diversas sustancias químicas de variada toxicidad.

En una corriente con un contenido bajo de materia orgánica existen pocas sustancias nutritivas para sostener la vida, de tal forma que aunque se presenten muchos tipos diferentes de organismos vivos, existe solo un número pequeño de individuos de cada tipo. En cuerpos de agua con alto contenido de materia orgánica, las condiciones son inadecuadas para plantas y animales superiores, así que las bacterias son los organismos que predominan. El fenómeno llamado autopurificación permite que eventualmente se estabilice la materia orgánica y se restablezca una comunidad balanceada.

#### 2.1 Aguas residuales

El agua residual acarrea consigo una gran cantidad de desechos producto de las diversas actividades humanas. Estos desechos incluyen materia fecal, desechos orgánicos, grasas y aceites, sólidos de muchos tipos, desechos industriales que pueden contener ácidos o bases muy fuertes, sustancias tóxicas, sustancias orgánicas sintéticas complejas, etc., además de agua pluvial que

arrastra gravas y arenas así como basuras que puede haber recogido durante su paso por las calles y/o cauces.

Existen muchas maneras de identificar al agua residual aunque generalmente se acepta aquella que hace referencia a su origen, según la siguiente clasificación:

*Aguas residuales Municipales* son las que contienen desechos humanos, animales y caseros. También se incluye la infiltración de aguas subterráneas. Estas aguas negras son típicas de las zonas residenciales y los desechos industriales de la población.

*Aguas pluviales* formadas por todo el escurrimiento superficial de las lluvias, que fluyen desde los techos, pavimentos y otras superficies naturales del terreno.

*Desechos industriales* son las aguas de desecho provenientes de los procesos industriales. Pueden colectarse y disponerse aisladamente o pueden agregarse y formar parte de las aguas residuales municipales o combinadas.

Las aguas residuales proceden de:

- a) Excreta.
- b) Desperdicios caseros.
- c) Corrientes pluviales.
- d) Infiltraciones de aguas subterráneas.
- e) Desechos industriales.

a) *Excreta*. Son las exoneraciones corporales que llegan a formar parte de las aguas residuales, mediante los sistemas hidráulicos de los retretes y en cierto grado de los procedentes de los animales, que van a dar a las alcantarillas al ser lavadas en el suelo o en las calles. Estos desechos son los más importantes, por lo que se refiere a la salud pública porque pueden contener organismos patógenos perjudiciales al hombre.

b) *Desperdicios caseros*. Proceden de las actividades domésticas de lavado de ropa, baño, desperdicios de cocina, limpieza y preparación de alimentos y lavado de la loza. Casi todos estos desechos contienen jabones detergentes sintéticos que generalmente tienen agentes espumantes y que son de uso común en las labores domésticas. Los desechos de cocina tienen partículas de alimentos y grasas que, con el uso de aparatos domésticos para triturar basura, se presentan con mayor frecuencia, representando una parte considerable en estos desechos caseros.

c) *Corrientes pluviales*. Las lluvias depositan cantidades variables de agua en la tierra y gran parte de ella lava la superficie o se escurre arrastrando polvo, arena, hojas y otras basuras. En algunas poblaciones se deja que estos escurrimientos pluviales vayan al alcantarillado o drenajes que sirven para coleccionar los desechos propios de la comunidad, formando parte importante de las aguas residuales.

d) *Infiltraciones de aguas subterráneas*. El drenaje o alcantari-

llado que es el dispositivo para coleccionar las aguas residuales, va soterrado, y en muchas ocasiones queda debajo del nivel de los mantos de agua subterráneos, especialmente cuando dicho nivel es muy alto a causa de la excesiva precipitación en la estación lluviosa. Como las juntas entre las secciones de tubería que forman las alcantarillas no quedan perfectamente ajustadas, existe siempre la posibilidad de que se infiltre el agua subterránea.

e) *Desechos industriales.* Los productos de desecho de los procesos fabriles son parte importante de las aguas residuales de una población y deben tomarse las precauciones necesarias para su eliminación. Estos desechos varían mucho por su tipo y volumen, pues dependen de la clase de establecimiento fabril ubicado en la localidad.

## 2.2 Desechos de mayor importancia en la contaminación del agua .....

El fenómeno de la autpurificación involucra uno o más de los siguientes procesos: sedimentación, oxidación química de agentes reductores, decaimiento bacterial debido a las condiciones inhóspitas para los microorganismos patógenos y la oxidación química. La naturaleza de los residuos y las características del agua tendrá una influencia considerable en los efectos de una descarga en particular, siendo los desechos de mayor importancia en la contaminación del agua los siguientes:

A. Compuestos tóxicos que ocasionan la destrucción o inhibición de la actividad biológica en el agua. La mayor parte de ellos se

originan en las actividades industriales e incluyen algunos de los siguientes materiales: metales pesados, fenoles, pesticidas y radioisótopos. Las aguas naturales también pueden contener concentraciones importantes de elementos tóxicos por disolución de los mismos en diversos estratos del suelo; estos compuestos permanecen después del uso del agua y se vierten a los cuerpos receptores. La actividad biológica en el agua también puede producir tóxicos, por ejemplo, hay algas responsables de desprender toxinas en el agua.

- B. Materiales que afectan el balance de oxígeno en el agua y son:
- b1. Sustancias que consumen el oxígeno disuelto. Estas pueden ser materia orgánica que es descompuesta biológicamente y ocasiona una demanda bioquímica de oxígeno, o agentes inorgánicos reductores.
  - b2. Sustancias que impiden la reoxigenación. El oxígeno disuelto en el agua es suministrado por transferencia desde la atmósfera. Productos tales como el aceite y los detergentes pueden formar una capa sobre la superficie del agua, reduciendo la tasa de transferencia de oxígeno y pueden, por tanto, ampliar los efectos de las sustancias consumidoras de oxígeno.
  - b3. Descargas con alta temperatura que pueden alterar el balance de oxígeno porque la concentración de saturación del oxígeno disuelto disminuye al incrementarse la temperatura. Los efectos del calor producen variaciones en la densidad y viscosidad del agua y sirven como acelerador en las reacciones de los contaminantes químicos. La capacidad de autodepuración de la

corriente contaminada con aguas calientes disminuye considerablemente; cuando la capa de agua superficial está caliente, las capas profundas no circulan, por lo que se reduce el contenido de oxígeno en estas capas y altera los procesos biológicos.

C. Altas concentraciones de sólidos inertes que pueden depositarse en el fondo de las corrientes y lagos, impidiendo el crecimiento de la flora acuática que sirve de alimento a los peces.

D. La presencia de microorganismos patógenos pueden ocasionar brotes de enfermedades infecciosas si el agua se emplea para consumo humano.

Cuando se considera el problema de la contaminación de las aguas existen muchos efectos indeseables y no sólo la presencia de organismos patógenos y el déficit de oxígeno. Dependiendo de la dilución disponible, puede haber un incremento importante en el contenido de sólidos disueltos, materia orgánica, nutrimentos (como el nitrógeno y fósforo), turbiedad y otros parámetros indicadores de contaminación. Los principales contaminantes biológicos son los virus, los parásitos y las bacterias.

### 2.3 Calidad del agua

Los cuerpos de agua se caracterizan por tres componentes mayores: hidrológico, fisicoquímico y biológico. Una evaluación completa debe basarse en la observación apropiada de estos tres componentes. La calidad de un ambiente acuático puede definirse

con una batería de indicadores relativos a la concentración de algunas sustancias, a las especiaciones y particiones físicas de sustancias orgánicas e inorgánicas y a la composición y estado de la biota encontrada en el cuerpo de agua.

Se utiliza el Índice de Calidad del Agua (ICA) con el fin de agrupar simplídicamente algunos parámetros capaces de indicar un deterioro en la calidad del agua y determinar si es adecuada o no para un uso específico. Los parámetros para calcular el índice de calidad del agua se describen a continuación:

A *Temperatura*. La temperatura del agua es un aspecto de gran importancia, por su efecto en otras propiedades como: acelerar las reacciones químicas y biológicas y reducir la solubilidad de los gases, acentuar los olores y sabores, inhibir la vida, etc. Los dos efectos más importantes son:

a1. Solubilidad del oxígeno en el agua. Debido a la presión atmosférica, siempre existe una pequeña cantidad de oxígeno en el agua, y a medida que aumenta la temperatura en ésta, disminuye su capacidad de disolver el oxígeno y, como consecuencia, éste irá disminuyendo en el agua.

a2. Actividad microbiológica. Dentro de determinados rangos de temperatura, a medida que aumenta la temperatura del agua se incrementa la actividad de los microorganismos, como consecuencia de este incremento de actividad, los microorganismos necesitarán de más oxígeno.

B) **Color.** Las aguas residuales domésticas tienen color pardo grisáceo y cambian su apariencia a negruzco con el tiempo. Las aguas industriales pueden variar mucho de color, dependiendo del proceso en el que se usa el agua y de las sustancias que se le agregan.

El color que se presenta en el agua puede ser de origen mineral ( Fe, Mn ) o vegetal, como los producidos por materia orgánica en suspensión: algas, semillas, protozoarios, etc. En los desechos industriales puede deberse a sustancias solubles procedentes de minas, refinerías, productos químicos (sustancias orgánicas e inorgánicas), etc.

No existe una correlación entre color y su índice de contaminación o con un efecto específico a la salud, pero es de aspecto sospechoso y desagradable estéticamente. Relacionado con el pH, aumenta al aumentar éste; es decir, a mayor índice de pH, es más oscuro el color del agua. Se conocen los siguientes tipos de color:

*Color Real o Verdadero* : es el que se debe a sustancias en solución.

*Color Aparente* : es el debido a sustancias en solución y suspensión. Puede ser eliminado por centrifugación.

C) **Olor.** Es causado tanto por los gases que produce la descomposición de la materia y por los desechos industriales que transporta el agua. El olor indica el origen del agua y su grado

de descomposición. Es debido a una gran cantidad de substancias, organismos microscópicos vivos (algas), vegetación en estado de descomposición (desagües domésticos e industriales) y a una gran cantidad de productos químicos. Se ha intentado controlar con la adición de cloro, pero hay substancias que producen peor olor al combinarse con él.

No hay una relación directa entre el olor y la salud, pero desde el punto de vista estético, el empleo de aguas con olor puede ser sumamente desagradable.

D) *Turbiedad.* Es la característica que hace aparecer al agua como sucia o borrosa. Es causada por partículas suspendidas y coloidales que limitan el paso de la luz a través del agua. Pueden ser partículas minerales (limo, arcilla, Zinc, Fierro, Manganeseo, etc.) u orgánicas (microorganismos, aserrín, fibras orgánicas, etc.). El origen puede ser el producto de la intemperización y erosión ejercida por los ríos o desechos domésticos e industriales. El crecimiento en el grado de turbiedad depende de la concentración de partículas, tamaño, dispersión y propiedades de absorción de la luz.

No existe una correlación directa de la turbiedad con los aspectos de la salud, ni siquiera de su contaminación con aguas residuales. Sin embargo, las partículas que dan turbiedad constituyen defensas para los microorganismos y les sirven de protección a la acción de desinfectantes.

E) *Sólidos*. Se clasifican de la siguiente manera:

e1. *Sólidos orgánicos e inorgánicos* : Los sólidos orgánicos son aquellos que tienen su origen a partir de la materia viviente. Los sólidos orgánicos son aprovechados por las bacterias para su alimentación mientras que los inorgánicos lo son en una pequeña proporción. A los sólidos orgánicos se les conoce como volátiles debido a que la prueba mediante la cual se determinan consiste en elevar la temperatura de la muestra hasta niveles tales que los compuestos orgánicos que los forman se volatilizan, es decir, se incorporan a la atmósfera en forma de gases y no es posible detectarlos pesando el residuo en una balanza. A los compuestos inorgánicos que no se volatilizan al elevar la temperatura se les conoce como fijos.

e2. *Sólidos totales* : Para comprender mejor este parámetro, se considera una muestra de un litro de agua residual, la cual se calienta hasta lograr que se evapore toda el agua y se pesa el material residual. Este peso incluye tanto los sólidos disueltos, que son aquellos que pasan a través de un filtro, como los sólidos suspendidos, que son los que no son capaces de pasar a través de un filtro determinado.

e3. *Sólidos disueltos* : Para determinar la cantidad de sólidos disueltos se hace pasar una muestra de agua a través de un filtro, los sólidos suspendidos serán retenidos por el filtro y solo pasarán por éste los sólidos disueltos por el agua. Puede ahora evaporarse el agua por medio de calentamiento y volver a pasar el residuo que queda después de la evaporación. El peso de este residuo será el contenido de sólidos disueltos.

e4. *Sólidos suspendidos* : Los sólidos suspendidos se componen de: sólidos sedimentables y sólidos no sedimentables; la diferencia entre éstos depende fundamentalmente del tamaño, peso, forma y volumen de las partículas de los sólidos. Las partículas más grandes tienden a sedimentarse mejor que las partículas de menor tamaño.

e5. *Sólidos flotantes* : Son, como su nombre lo indica, aquellos cuerpos que flotan en la superficie del agua.

F) *Conductividad Eléctrica*. Mide la concentración de electrolitos. Debido a la conductancia tan alta que tienen los iones Hidrógeno u Oxhidrilo, se neutraliza el agua antes de hacer la medición. Aunque no es preciso, la conductividad eléctrica se relaciona con la concentración de sólidos disueltos y es proporcional a otros muchos parámetros como pH, turbiedad, color y temperatura.

G) *Potencial de Hidrógeno (pH)*. El pH es, desde un punto de vista totalmente práctico, una medida de la acidez de un agua. Los valores del pH varían entre 0 y 14, teniéndose dos rangos: Si el pH está entre 0 y 7, el agua está en el rango ácido; si se encuentra entre 7 y 14 está en un rango básico; y si vale exactamente 7, el agua está en la neutralidad.

Este parámetro es sumamente importante ya que los organismos que degradan la materia orgánica no son capaces de sobrevivir si el valor del pH es menor a 4.5 ni mayor a 9.5 . Por otra parte, si

se tienen valores de este parámetro muy bajos, existe la fuerte tendencia por parte de las aguas a corroer todas las tuberías metálicas con las que entren en contacto. Además influye en muchos procesos como la coagulación, desinfección, ablandamiento y en los procesos vitales.

H) Acidez. Es la capacidad de neutralizar el hidróxido (OH). La acidez en las aguas naturales es generalmente debido a la presencia del bióxido de carbono. El bióxido de carbono proviene, en parte de la atmósfera y principalmente es el producto final de la descomposición de la materia orgánica. En aguas de pozo en que el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no puede escapar a la atmósfera, no es difícil encontrar valores de 30 a 50 mg/l . Otra fuente de acidez en el agua es la presencia de ácidos minerales debidos a desechos industriales.

La acidez del agua le da a ésta un alto poder corrosivo, lo que puede ocasionar graves daños en tuberías y en las varillas de acero de refuerzo del concreto.

I) Alcalinidad. Es la capacidad de un agua para neutralizar ácidos. La alcalinidad es debida a la presencia de los iones hidróxido, bicarbonato y carbonato. La alcalinidad no tiene gran importancia desde el punto de vista sanitario.

Altas concentraciones de alcalinidad pueden producir precipitación de sales de calcio en tuberías y está directamente relacionada con la dureza del agua.

J) *Dureza.* La dureza de las aguas se debe a la presencia de cualquier catión polivalente, pero generalmente solo se consideran al Calcio y al Magnesio por ser los más abundantes en las aguas naturales.

Uno de los problemas generados por la dureza del agua es la formación de precipitados dentro de las tuberías, causando la reducción de su capacidad hidráulica.

No se ha demostrado correlación entre las aguas con alto contenido de dureza y daños al organismo. Los problemas son de tipo doméstico e industrial.

K) *Algunos Elementos y Compuestos Químicos.*

*Cloro.* Debido a la práctica de desinfectar el agua con cloro, es frecuente encontrar cloro residual en el agua.

*Nitrógeno.* Los compuestos nitrogenados son un índice químico de contaminación. Asimismo, es un elemento esencial para los diferentes procesos vitales, es indispensable para la formación de aminoácidos y proteínas. Por otro lado, una concentración mayor de amoníaco es evidencia de que existe poco material proteínico en descomposición.

*Sulfatos.* Los sulfatos son compuestos abundantes en las aguas naturales, en combinación con Calcio y Magnesio causan

incrustaciones en tuberías y equipos. En combinación con materia orgánica y bacterias sulforreductoras causan corrosión.

**Fosfatos.** Son un nutrimento esencial para la vida. El exceso de ellos produce proliferación del crecimiento de plantas en el agua ya que en forma natural es un factor limitante.

**Oxígeno Disuelto.** El oxígeno es un elemento indispensable para la vida en cualquiera de sus formas. Es también un gas que puede ser disuelto por el agua, razón por la cual se habla del oxígeno *disuelto en el agua*. Cuando en un agua residual desaparece el oxígeno disuelto, se dice que se trata de una agua séptica, sin embargo, esto no quiere decir que por ello no haya vida en ella. A simple vista, una agua séptica es de color mucho más oscuro que un agua residual fresca, en ocasiones llega a tener un color negro y es posible detectar un olor sumamente desagradable. Cuando el agua residual permanece durante mucho tiempo sin airearse, el oxígeno disuelto que pudiera haber es aprovechado por los microorganismos aerobios existentes para realizar sus funciones vitales hasta el punto que pueden agotar totalmente este elemento, a partir de ese momento, estos microorganismos empiezan a morir y comienzan a tomar su lugar los microorganismos anaerobios, los cuales son capaces de tomar el oxígeno que necesitan para vivir a partir de compuestos químicos presentes en los desechos; a este proceso se le denomina *descomposición anaerobia*. Los productos de la descomposición anaerobia incluyen el ácido sulfhídrico con lo cual empiezan a aparecer burbujas en el agua, de hecho, el color negro de ésta se debe a la reacción entre el ácido sulfhídrico con

el fierro del agua para formar sulfato ferroso, que es de color negro.

*Substancias tóxicas.* Son muchas las substancias tóxicas que pueden llegar a las aguas residuales. Entre ellas destacan las siguientes: Plomo, Selenio, Arsénico, Cromo hexavalente, Mercurio, Cianuro, Cadmio, Bario, Zinc y multitud de compuestos orgánicos que constantemente sintetiza la actividad industrial.

L) *Demanda Bioquímica de Oxígeno.* El parámetro de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es una forma indirecta de medir la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual. Lo que procede es medir en el laboratorio la cantidad de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el agua para "estabilizarla", esto es, para reducir la materia orgánica a compuestos más simples y que no provoquen daños. Se puede decir, de otra manera, que la DBO es una medida de la cantidad de materia orgánica que tiene el agua. Cuanto mayor sea la DBO, mayor será la cantidad de materia orgánica en el agua.

LL) *Demanda Química de Oxígeno.* Es una medida de la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación química de la materia presente en el agua. Como no sólo la materia orgánica es oxidable, sino que también lo son los compuestos inorgánicos; este parámetro normalmente es mayor que la DBO.

M) *Substancias Radioactivas.* La contaminación radioactiva en el agua proviene de la extracción y procesamiento de minerales radiactivos, de materiales radiactivos refinados utilizados en reactores para utilización industrial, médica y de investigación; para generación de energía eléctrica y en armas nucleares.

N) *Petróleo.* La contaminación del petróleo se puede presentar en cualquiera de las vías acuáticas, áreas costeras o en altamar a causa de descargas premeditadas, derrames accidentales, fugas, almacenamiento o transportación (recuérdese el caso del Pozo Ixtoc I en la sonda de Campeche en la República Mexicana en 1980, más recientemente, en 1989, la Exxon Valdez derramó 10 millones de toneladas de petróleo en Alaska). Se calcula que cada año son derramadas al mar entre 3 y 6 millones de toneladas de petróleo, ya que de cada 1,000 toneladas transportadas por los mares una es tirada ahí mismo, y no sólo por accidentes, sino porque los tanques contenedores son lavados en los puertos.

Los daños causados por este tipo de contaminación son tan significativos como diversos y, en algunos casos, desconocidos. Este contaminante puede destruir o limitar la vida marina, arruinar habitats silvestres, matar aves, limitar o destruir el valor recreativo del área de esparcimiento, contaminar reservas acuíferas y crear peligro por incendios y/o explosiones.

### SITUACION DE LA CALIDAD DEL AGUA

La información sobre la calidad del agua proviene directamente de la Red de Monitoreo de la Comisión Nacional del Agua (CNA). En total se identificaron 1 185 sitios de muestreo, de los cuales 902 (76%) se ubican en aguas superficiales, 283 (24%) en estaciones localizadas en pozos de extracción o de observación de acuíferos. Se hizo una estimación con base en los parámetros anteriormente descritos de la situación del recurso hídrico en las cuencas hidrológicas, en los mantos acuíferos, puertos industriales y turísticos, en especial en aquellas en que se encuentran zonas de influencia de los grandes polos de desarrollo.

Los valores del ICA en las regiones hidrológicas del país en el período 1989-1991, se presentan en el cuadro siguiente :

Rangos de estado de calidad del agua (agua potable)		
Rango	Calificación	Clave
90 - 100	Excelente	E
80 - 90	Aceptable	A
70 - 80	Levemente Contaminada	LC
50 - 70	Contaminada	C
40 - 50	Fuertemente Contaminada	FC
0 - 40	Excesivamente Contaminada	EC

E: No requiere purificación para consumo humano.  
 A: Requiere purificación menor previamente a su consumo.  
 LC: Sin purificación su consumo es riesgoso.  
 C: Requiere necesariamente de purificación.  
 FC: Riesgo consumirla.  
 EC: Inaceptable para consumo humano.  
 Fuente: Comisión Nacional del Agua, SARH, 1992.

Valores de los índices de calidad del agua (ICA)

Región Hidrológica	Valor ICA		
	1989-90	1991	Variación
Baja California Norte	52.1 C	52.2 C	0.10
Baja California Centro	-	-	-
Baja California Sur	-	-	-
Sonora Norte	-	-	-
Sonora Sur (R. Yaqui)	30.3 EC	39.7 EC	9.40
CR Culiacán y Fuerte	41.8 FC	40.9 FC	-0.90
CR Presidio	46.3 FC	49.7 FC	3.40
PRC R. Santiago	30.4 EC	26.9 EC	-3.50
PRC R. Lerma	30.9 EC	32.4 EC	1.50
Costa de Nayarit	50.8 C	51.6 C	0.80
CR Ameca	44.4 FC	49.4 FC	5.00
Costa de Jalisco	51.0 C	51.6 C	0.60
CR Armenia y Coahuayana	48.4 FC	46.2 FC	-2.20
CR Nexapa	-	-	-
PRC Medio y Bajo Balsas	41.8 FC	45.7 FC	3.90
PRC R. Amacuzac	29.1 EC	24.6 EC	-4.50
PRC Alto Balsas	22.8 EC	22.8 EC	0.00
Costa de Guerrero	39.3 EC	33.1 EC	-6.20
Costa de Oaxaca	62.3 C	54.9 C	-7.40
CR Tehuantepec	77.4 LC	76.5 LC	-0.90
Costa de Chiapas	-	-	-
PRC Alto Bravo y Conchos	52.0 C	47.2 FC	-4.80
PRC Bajo Bravo	42.5 FC	41.5 FC	-1.00
CR Soto la Marina	57.1 C	53.9 C	-3.20
PRC R. Pánuco	45.7 FC	51.1 C	5.40
PRC R. San Juan y Tula	29.6 FC	20.5 EC	-9.10
CR Tuxpan y Nautla	42.3 FC	42.2 FC	-0.10
CR Papaloapan	40.6 FC	43.1 FC	2.50
CR Coatzacoalcos	42.7 FC	45.4 FC	2.70
CR Grijalva y Usumacinta	37.3 FC	49.4 FC	12.10
Costa de Campeche	42.7 FC	47.1 FC	4.40
Península de Yucatán	-	-	-
Costa Mar Caribe	62.2 C	64.2 C	2.00
Chihuahua Norte	-	-	-
Cuenca Cerrada del Norte	-	-	-
CR Nazas	-	-	-
CR Salado	-	-	-

CR: Cuenca río

PCR: Parcial

Fuente: Comisión Nacional del Agua, SARH, 1992.

La media de las calidades de agua se elevó 0.93 puntos del ICA (44.16 en el período 1989-1990, a 45.09 en 1991), con lo que se mantuvo en la categoría de contaminada. En algunas regiones se puede observar un deterioro marcado en la calidad del agua. De conservarse esta tendencia, al inicio del próximo siglo más de la

mitad de las regiones hidrológicas estarán en ese caso y algunas de ellas, como la de Tula, requerirán largo tiempo e inmensos recursos para recuperarse de los estragos causados por decenios de uso inadecuado del agua y prácticas contaminantes.

Las áreas con mayor cantidad de mantos freáticos contaminados son la Comarca Lagunera, el Valle de México y la península de Yucatán. Las que presentan intrusión salina son los acuíferos de los valles de Santo Domingo y de Guaymas; la costa de Hermosillo; Vizcaíno y La Paz. En cuanto a degradación del recurso por infiltración de aguas superficiales contaminadas, se cuentan los acuíferos del Valle de México, de Tula y Mérida.

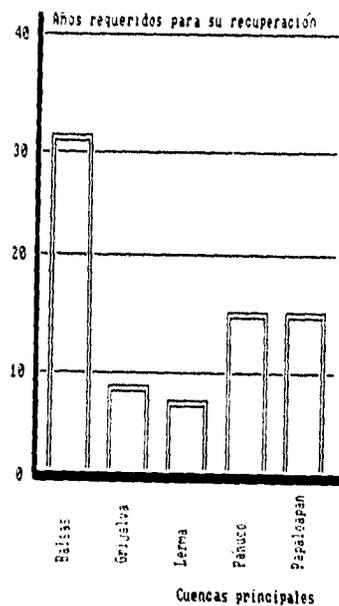
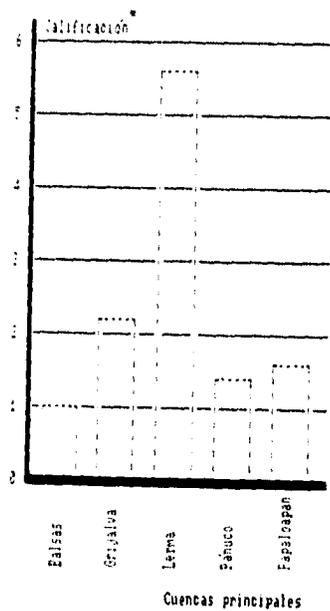
Entre las corrientes más contaminadas del país se encuentran las cuencas de los ríos Lerma-Chapala-Santiago, San Juan, Balsas, Blanco, Pánuco, Nazas y Bravo, por lo que se ha considerado de primer orden darles atención y saneamiento.

Con Base en el análisis de los resultados del monitoreo de la calidad del agua en las principales cuencas hidrológicas y en el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos evaluados, se han hecho estimaciones del tiempo que tardará su recuperación si se conservan las tendencias actuales.

Es evidente que para acelerar el proceso de recuperación de las cuencas se necesita invertir una mayor cantidad de recursos a los ya aplicados. Hay que tener en cuenta que a largo plazo las

inversiones para recuperar los ecosistemas deteriorados son más costosas que las empleadas en la prevención de la contaminación. De ahí los cambios en la legislación hidráulica. Modificaciones que implican cobrar precios justos, en proporción al uso de agua y para hacer pagar más, a quienes la contaminan, induciendo de esta forma el uso eficiente del agua y el tratamiento de las aguas residuales, entre otras medidas.

#### Calidad del agua



\* Calificación mínima = 0; máxima = 10  
FUENTE: COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, SAPM-1992.

## Servicios de agua potable, drenaje y tratamiento de agua residual en el Distrito Federal.

### Problemática

#### General

- . Crecimiento incesante de la ciudad y su demanda de agua potable y drenaje.
- . Incremento de la complejidad de la operación del sistema, por la antigüedad de algunos componentes del mismo y hundimientos del subsuelo en zonas de transición.
- . Extracción superior a la infiltración de agua del Acuífero del Valle de Méx.
- . Reducción del área de recarga del Acuífero.
- . Deficiencia en el suministro de la zona oriente.
- . Carencia de infraestructura para mover mayores caudales hacia la zona oriente.
- . Se requieren volúmenes adicionales de fuentes externas para cubrir las necesidades de agua de los habitantes a mediano plazo.
- . Poca conciencia de la población adulta acerca de la importancia de utilizar eficientemente el agua.

#### En materia de drenaje y agua residual tratada

- . Vertimiento de basura al sistema de drenaje.
- . Invasiones en cauces, presas, vasos y lagunas por asentamientos humanos.
- . Rezago de 15% de la población en el servicio de drenaje sanitario.
- . Gran parte del sistema de drenaje es de tipo combinado que limita el aprovechamiento de las lluvias.
- . Descargas adversas al sistema de drenaje que dañan la infraestructura, complican y encarecen el tratamiento de agua residual.

### Estrategias

#### General

- . Controlar el crecimiento urbano con base en la factibilidad de suministro de los servicios.
- . Operar con mayor eficiencia los componentes del sistema hidráulico.
- . Crear la infraestructura para suministrar los servicios a los habitantes que carecen de ellos.
- . Mejorar la administración de los servicios para que sean autofinanciables.
- . Fomentar la innovación y desarrollo tecnológico.
- . Reforzar la implantación del reglamento del servicio de agua y drenaje.
- . Lograr participación más activa de la pob. en el suministro de los servicios.

#### En materia de agua potable

- . Construir la infraestructura que se requiera para aprovechar al máximo los caudales que ingresan a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
- . Reforzar mecanismos para obligar a los habitantes a usar eficientemente el agua y reducir sus consumos.
- . Disminuir la extracción de agua del Acuífero del Valle de México conforme se reduzcan los consumos de los usuarios y se incorporen los caudales adicionales del sistema Cutzamala.
- . Continuar administrando el agua que la población requiere con la calidad adecuada para su consumo.
- . Ampliar la sustitución de agua potable por agua residual tratada en base en que sea factible.

#### Suministro de los servicios de drenaje y agua residual tratada

- . Incrementar la infraestructura para el saneamiento y desalco de los caudales generados.
- . Implantar los mecanismos e incentivos necesarios para que las industrias traten el agua residual y la reusen.
- . Conservar el agua de lluvia y lograr un mayor aprovechamiento de ella.

Fuente: Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, DGF, 1991.

**Avances en el suministro de agua potable, drenaje y tratamiento de agua residual en Distrito Federal. (1991-1992)**

**Ampliación de la cobertura mediante tomas domiciliarias y vigilancia de la calidad del agua.**

- . Las acciones realizadas han permitido incrementar en los últimos tres años el nivel de cobertura mediante tomas domiciliarias, del 37 al 98 %.
- . El 2 % de la población es abastecida por carros-cisterna y tanques portátiles.
- . Se ha reforzado el abastecimiento en la zona oriente.
- . Se vigila permanentemente en la calidad del agua suministrada a los habitantes.
- . Se obtuvo de la Secretaría de Salud el certificado de la calidad del agua desde 1992.
- . Se rehabilitan las plantas potabilizadoras y se construyen nuevas unidades.

**Preservación del agua.**

- . Se han desarrollado acciones de expropiación de áreas para la recarga en el Ajusco Medio, Cerro de la Estrella y las sierras de Sta. Catarina y Guadalupe.
- . Saneamiento de cauces y barrancas del sur, oriente y poniente de la ciudad, mediante colectores marginales.
- . Separación de drenaje casa por casa.
- . Captación de agua en presas y su distribución previa potabilización.
- . Se ha incrementado la infraestructura del sistema de drenaje, permitiendo incorporar al sistema a un millón de habitantes más en los últimos cuatro años, con una cobertura actual del 85%.
- . Se ha incrementado la capacidad de regulación de agua de lluvia que se genera en la ciudad en un 40 %.

**Uso eficiente del agua.**

- . Opera el centro de información de los servicios hidráulicos.
- . Se ha establecido el concurso del superinspector H<sub>2</sub>O.
- . Se sustituyen inodoros que requieren 16 litros por descarga por otros que sólo utilizan seis.
- . Se han remplazado 420.000 retretes en escuelas, mercados, oficinas públicas, hoteles, restaurantes y comercios ahorrando más de 40 millones de litros de agua potable diariamente.
- . Se han establecido 940 convenios para uso de agua residual tratada que permite utilizar en promedio 2.500 l/s, más del doble de lo que se empleó en 1988.

**Rescate ecológico de Mixqui, Tláhuac y Xochimilco.**

- . Comprende la preservación de las fuentes de abastecimiento, el saneamiento de la zona y el tratamiento del agua residual y su reuso.
- . Se mejora la calidad de vida de los habitantes de la zona sur-oriente.
- . Se recupera el ambiente ecológico y el acuífero.
- . Se intensifican las actividades productivas y recreativas de la región.

Fuente: Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. DDF, 1993.

### III EFECTOS DE LA CONTAMINACION

#### 3.1 Problemática del uso del agua en México

En las últimas décadas, la calidad del agua en el país se ha deteriorado sensiblemente debido a un conjunto de problemas de muy diversa naturaleza, con características muy complejas y con una elevada demanda de recursos técnicos y económicos para su solución. Dentro de esta problemática destacan por su importancia los puntos siguientes: la magnitud del crecimiento demográfico y su distribución geográfica; la situación actual de la infraestructura de los servicios de agua potable y alcantarillado; las condiciones de la infraestructura del tratamiento de las aguas residuales; la carencia de suficientes recursos humanos calificados, y finalmente el uso de las aguas sin tratar en el riego agrícola.

#### *El Desarrollo Poblacional.*

Aunque el resultado del último censo de población (1991), 81.1 millones de habitantes, corresponde a una cifra menor a la esperada, el crecimiento demográfico en México sigue siendo mayor al deseable. Aunado a lo anterior se tiene que de las 125,300 localidades existentes en el país, en solamente 98 se concentra el 60% de la población total, lo cual provoca una concentración muy alta de personas en unas cuantas localidades, las cuales aglutinan a su vez, por este motivo, la mayor parte de la vida económica. Por otra parte, la migración de la población rural a las ciudades es un fenómeno que ha sido constante en las últimas décadas, de

tal manera que la población urbana pasó de representar el 50% del total de la población en 1960 al 70% en el año de 1990.

La suma de cada uno de estos componentes ha resultado en que la demanda de agua se haya incrementado desmesuradamente en unas pocas cuencas del país, en las cuales, sin embargo, se mantiene invariable la cantidad de agua disponible para consumo, lo cual dificulta la satisfacción de las necesidades del vital líquido.

### 3.2 Infraestructura hidráulica

La infraestructura hidráulica de la que se dispone, permite cubrir gran parte de las demandas de agua para las ciudades, la producción de alimentos, la industria y el control de avenidas. Del volumen medio anual escurrido (410 mil millones de  $m^3$ ), se captan o controlan en las presas unos 100 mil millones y se aprovechan anualmente 146 mil millones.

La infraestructura hidráulica construida durante los últimos 65 años proporciona una capacidad de almacenamiento de 150 mil millones de  $m^3$ , equivalente a 37 % del escurrimiento medio anual, para regular las variaciones estacionales y anuales. La mayor parte de los grandes ríos están parcial o totalmente controlados dentro de los límites técnicos y económicos, a través de presas de propósitos múltiples que protegen áreas agrícolas significativas y ciudades densamente pobladas.

Con seis millones de ha bajo riego, México ocupa el sexto lugar a nivel mundial en área irrigada. Una quinta parte de la producción total de electricidad se obtiene gracias a una capacidad instalada de más de 7,700 megawatts en plantas hidroeléctricas.

En las áreas rurales hay sitios donde falta totalmente el agua o es muy difícil conseguirla; y otros en los que el suministro es aceptable, pero la infraestructura existente es precaria o requiere ser rehabilitada.

Los 77 distritos de riego que operan en el país abarcan 60 % de la tierra total irrigada, mientras que el restante 40 % (más de 2.5 millones de ha) se distribuye entre más de 27 mil pequeñas unidades de riego.

La totalidad de los distritos de riego necesitan ser rehabilitados en diversos grados; además, 400 mil ha de unidades de pequeña irrigación son subutilizadas debido a diversos problemas, se estima que sólo 35 % de la tierra con infraestructura disponible se riega durante el ciclo primavera-verano y 60 % en el ciclo otoño-invierno; esto es, 50 % global. En cuanto a la eficiencia global de riego (el agua que realmente llega a la parcela) es de 40 % actualmente.

De los 20 millones de ha cultivadas en el país los seis millones que se encuentran bajo riego; contribuyen con 50 % de la producción agrícola nacional, lo que significa, entre otras cosas,

que la productividad de la tierra con riego es 2.5 veces superior a la de temporal.

Actualmente, los servicios de agua potable alcanzan a una parte importante de la población, pero existe un déficit considerable en materia de acceso al alcantarillado. En las áreas urbanas, los 12.7 millones de personas que no cuentan servicios de agua se localizan generalmente en zonas de bajos ingresos. Cerca de 21.5 millones de personas en áreas urbanas no tienen servicio de drenaje público. La ausencia de drenaje, mayor que la del agua potable, genera serios problemas para la salud, pues las aguas servidas fluyen sin control ni protección, generalmente por las calles.

En el caso de las ciudades, las bajas tarifas producen ingresos insuficientes para mantener la infraestructura y estimulan el uso ineficiente del agua. Aunque se carece de información confiable, se estima que las pérdidas en las conducciones y redes de distribución, así como en las tomas domiciliarias, asciende al 40 por ciento.

En las ciudades, las tarifas promedio varían de N\$ 0.60/ m<sup>3</sup> en Oaxaca (17 centavos de dólar) a más de N\$ 3.4 en Tijuana (un dólar). Sin embargo, como regla general, el precio es mucho menor que los costos. La industria ha mostrado desinterés en usar aguas tratadas debido a los bajos precios del suministro de agua potable.

### 3.3 Generación de aguas residuales

Actualmente, la descarga de aguas residuales proviene de los centros urbanos que arrojan a las cuencas hidrológicas 120 metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ). 44  $m^3$  provienen de la Ciudad de México, 8.5  $m^3$  de Monterrey y 8.2  $m^3$  de Guadalajara. Estas tres ciudades representan el 12 % del total descargado a nivel nacional.

Asimismo, se señala que el 30% de la población no cuenta con abastecimiento suficiente mediante un sistema formal de agua potable, y que el 51% no dispone de servicios sanitarios de alcantarillado.

Según datos de la Comisión Nacional del Agua, a estos rezagos hay que agregar la dispersión de las descargas, lo que dificulta la labor de saneamiento y tratamiento de aguas residuales, además de que de las 448 plantas de tratamiento existentes, 168 están fuera de servicio debido a fallas en su diseño o de operación, por lo cual solamente se atiende y trata el 18.5% de las descargas.

Por lo que respecta al sector industrial, se tiene que éste genera aguas residuales de características muy variadas, las que en su mayoría resultan altamente contaminantes para los cuerpos de agua receptores por descargarse a los mismos sin tratamiento alguno.

Se estima que la industria genera, a nivel nacional, un gasto de aguas residuales de 82  $m^3/s$ , siendo los principales giros

industriales responsables de la mayor carga, los correspondientes a la industria del azúcar, química, celulosa y papel, petrolera, de bebidas, textil, siderúrgica y de alimentos.

<b>Principales Giros Industriales responsables de las mayores descargas de aguas residuales en México.</b>			
<b>Tipo de Industria</b>	<b>Extracción (%)</b>	<b>Consumo (%)</b>	<b>Descarga (%)</b>
<b>Azucarera</b>	<b>35.2</b>	<b>22.3</b>	<b>30.0</b>
<b>Química</b>	<b>21.7</b>	<b>24.4</b>	<b>21.0</b>
<b>Papel y Celulosa</b>	<b>0.2</b>	<b>16.1</b>	<b>6.0</b>
<b>Petróleo</b>	<b>7.2</b>	<b>3.7</b>	<b>0.2</b>
<b>Bebidas</b>	<b>3.3</b>	<b>6.4</b>	<b>2.4</b>
<b>Textil</b>	<b>2.6</b>	<b>2.4</b>	<b>2.7</b>
<b>Siderúrgica</b>	<b>2.5</b>	<b>5.5</b>	<b>1.7</b>
<b>Alimentos</b>	<b>0.2</b>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>
<b>Resto del sector</b>	<b>19.1</b>	<b>17.9</b>	<b>19.0</b>

La industria azucarera es la principal generadora de aguas residuales, contribuyendo con el 39% del total producido por el sector industrial, le sigue en importancia la industria química con el 21%, correspondiendo a los restantes seis giros señalados 21% y al resto del sector un 19% del total.

El sector agrícola contribuye principalmente con aguas usadas en riego agrícola, las cuales contienen residuos agroquímicos que causan problemas de contaminación en las aguas naturales con sustancias tóxicas e hiperfertilización. Actualmente se generan

alrededor de 265 m<sup>3</sup>/s de aguas contaminadas, mismas que son descargadas en cuerpos de agua o en el mar.

En la actualidad no se dispone de información suficiente en el país respecto a la generación de aguas residuales debido a las actividades pecuarias, dados los escasos estudios hechos en este campo.

A pesar de que los esfuerzos por controlar la contaminación se iniciaron a mediados de la década de 1970, los resultados obtenidos en los últimos 20 años han sido escasos; principalmente por que las acciones se han enfocado más a restituir la calidad del agua que a controlar la contaminación.

La estrategia de exigir el tratamiento del agua residual, sin considerar la capacidad técnica-financiera de las empresas y municipios, ni la capacidad institucional para establecer una adecuada vigilancia y seguimiento, así como disponer de medios jurídicos-legales para hacer cumplir tales exigencias, ha provocado que tanto por el sector público como el privado no se cumpla con la legislación, o bien, que las plantas no operen o lo hagan de manera deficiente.

#### 3.4 Reutilización del agua

Debido a la escasez de aguas de primer uso y su difícil explotación, se tiende a utilizar cada vez más aguas residuales

para actividades agrícolas; fenómeno que se presenta principalmente en las inmediaciones de las ciudades con mayor población.

En el país se riegan con agua residual 165 mil ha, aprovechando 51 m<sup>3</sup>/s de las descargas de las principales ciudades, en las que se genera un gasto promedio de 72 m<sup>3</sup>/s .

En los municipios se utiliza agua residual tratada, aún en forma incipiente, para riego de parques y jardines y para llenar lagos artificiales con fines recreativos. Es el caso de los lagos de Chapultepec, San Juan de Aragón, Xochimilco y Texcoco. La Ciudad de México aprovecha 1 m<sup>3</sup>/s para satisfacer este tipo de demanda y la ciudad de Monterrey 200 l/s. En la zona turística de Cancún se generan actualmente 110 l/s de agua residual tratada, mismos que se inyectan al subsuelo.

La cantidad de agua consumida en la mayor parte de las industrias es considerable; se utiliza para procesos de elaboración, transformación y en muchos casos para enfriamiento. Se estima que la industria ocupa un volumen anual de 4 600 millones de metros cúbicos.

La provisión de agua a las industrias se hace principalmente por medio de fuentes subterráneas. El 85% del volumen total extraído para este fin proviene del subsuelo y el resto se capta a través de escurrimientos superficiales, complementados por un porcentaje despreciable de agua reutilizada. Debido a que más de tres

cuartas del volumen extraído por las industrias proviene de captaciones propias, se tiene poco control de los pozos, lo que ocasiona desperdicio del agua, sobreexplotación de los mantos acuíferos y poco interés en la reutilización del recurso.

El alto costo que representa tratar el agua residual para usos industriales ha limitado su utilización. Las industrias que usan agua residual, la emplean en procesos industriales como el enfriamiento, para el cual la calidad del agua no tiene gran importancia.

#### **Capacidad instalada**

En todo el país se encuentran distribuidas 177 plantas de tratamiento en el sector industrial, con una capacidad instalada de  $12.2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sin embargo, el gasto promedio de reutilización es de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  y se aprovecha principalmente por parte de la industria de las ciudades de México ( $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ), Monterrey ( $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y Guadalajara ( $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Existen 721 plantas de tratamiento de aguas municipales e industriales, de las cuales operan 464 (64%) equivalente a un gasto de  $21 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 3.5 Eutroficación .

La eutroficación, (que consiste en la proliferación de materia orgánica planctónica, que de por sí no es peligrosa, pero que acarrea la disminución o incluso desaparición del oxígeno disuelto

en el agua, y la continua erosión de las orillas debido a la subida y bajada del nivel de las aguas, así como por el oleaje que provocan los vientos) es otro de los efectos de la contaminación, debido a los fosfatos, estas sales que proceden, en gran parte, de los detergentes que se utilizan para lavar la ropa, mantener la higiene personal, lavar los trastes o el automóvil, pero también de distintos procesos industriales y de la fertilización de los campos con abonos minerales.

Los fosfatos, en sí mismos, no constituyen riesgo alguno para los seres vivos, sino todo lo contrario. El fósforo está presente en nuestros huesos, en las células del sistema nervioso, en la orina, en el sudor y en las heces.

Desde finales del siglo pasado, los piscicultores saben que añadiendo una pequeña cantidad de fosfato en la dieta diaria de los peces, la productividad mejora notablemente. Pero en este caso se trata de una actividad sin riesgo, perfectamente controlada, a partir del momento en que el aporte de fosfatos se hace de forma masiva y exagerada, aparecen los primeros síntomas de la llamada eutroficación.

En principio, todas las aguas estancadas están condenadas a eutroficarse, pero de una forma natural; lenta y escalonada. En la cadena alimenticia, los carnívoros se alimentan de los herbívoros, que a su vez se alimentan de los vegetales, y éstos se nutren de materia orgánica. Los fosfatos se sitúan en la base de esta

pirámide. Pero cuando su concentración se dispara por encima de los 400 microgramos por litro, entonces los cimientos de la pirámide se desequilibran, y provocan una reacción muy difícil de detener. La población de cianobacterias (algas verdeazuladas) se ve sorprendida por un alud de alimentos, que aprovecha.

Flotando en la superficie aparecen las conocidas *flores de agua*, unas enormes redes enmarañadas de algas filamentosas que, incluso, llegan a impedir que las aves acuáticas puedan avanzar. Además, algunas cianobacterias, como la *Microcystis aeruginosa*, producen toxinas, unos venenos que secretan al medio. Otras fabrican sustancias orgánicas que al reaccionar con el cloro (generalmente en estaciones depuradoras) se transforma en compuestos organoclorados. Algunos de éstos, como el cloroformo, son cancerígenos. A medida que avanza el proceso de eutroficación, las especies delicadas como la trucha, el salmón o el robalo, son sustituidas por otras menos exigentes: carpas, lucios, sierras, etc. Debido a que las algas acaban con las reservas de oxígeno disuelto en el agua, pues lo utilizan para su metabolismo, los peces mueren asfixiados. La carencia de oxígeno en los fondos facilita la aparición de bacterias anaerobias. Estos microbios, además de ser perjudiciales para la salud humana, liberan al medio fósforo, sulfuros, amoníaco y metano, compuestos que enrarecen, enturbian las aguas, son fuente de malos olores y evitan el paso de la luz interrumpiendo la fotosíntesis.

### 3.6 Lluvia ácida

En los últimos años se ha observado un incremento en las concentraciones de iones hidrógeno, de entre 2 y 15 veces, en las lluvias de diversas parte del mundo. Este incremento, junto con la asociación de otras sustancias, ha causado daños ecológicos que han resultado algunas veces irreparables. A este fenómeno, conocido como lluvia ácida, también se le atribuyen el deterioro de muchos edificios y monumentos de gran importancia histórica y cultural.

La lluvia ácida, o más correctamente, la precipitación ácida, pues no sólo se deposita por medio de la lluvia, sino también como partículas secas, que tienen su origen en la quema de hidrocarburos por los motores de combustión interna. De esta combustión se producen dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) que, al reaccionar con la humedad de la atmósfera o con la lluvia directamente, forman ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), respectivamente.

Desde la revolución industrial el hombre ha vertido a la atmósfera cantidades considerables de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$ , entre otras sustancias, por la quema de combustibles. Ya desde 1852 Robert Angus Smith detectó por primera vez que la lluvia estaba más ácida de lo normal, cerca de las zonas industriales de Manchester, Inglaterra.

En este siglo, hasta fines de los 60's, el estudio de este fenómeno volvió a tomar importancia, ya que el problema empezó a

tener graves repercusiones. No sólo afectaba a niveles locales sino comenzó a exportarse, gracias a los patrones de vientos dominantes, hacia otros países y lugares boscosos remotos.

### 3.7 Salud ambiental

La salud humana no puede concebirse sin considerar al medio ambiente y su constante interacción con el hombre. Es indudable la importancia que en este tienen el acceso al agua potable, el manejo adecuado de las aguas servidas, la disposición correcta de basura y excreta o el control de la fauna nociva y de la contaminación biológica, física y química del ambiente.

Dadas sus condiciones peculiares, nuestro país se encuentra en un proceso de transición epidemiológica retardado en el que coexisten padecimientos transmisibles y enfermedades crónico-degenerativas propias de las últimas décadas de la vida. Las primeras derivadas de nacimiento, pobreza y falta de educación en materia de salud; y las segundas generalmente asociadas con el desarrollo urbano e industrial, como son la hipertensión arterial, la *diabetes mellitus* y el cáncer.

Unas y otras obligan, sin embargo, a conocer y evaluar el impacto del ambiente en la salud y a integrar esta información al terreno de la salud pública tradicional para lograr una mayor comprensión y un desarrollo progresivo del área de la salud ambiental.

### VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO.

Las enfermedades gastrointestinales se relacionan con una mala calidad del agua y un deficiente saneamiento básico, dos factores que se encuentran entre las primeras 10 causas de enfermedad en México. En vista de que estos padecimientos afectan particularmente a niños menores de cinco años y ocasionan alrededor de 30 mil muertes anuales, la Dirección General de Salud Ambiental -con base en el Plan Nacional de Salud- propuso un serie de actividades relacionadas con el agua y el saneamiento básico para contribuir a corregir estas anomalías, las cuales se resumen en el siguiente recuadro :

<b>Actividades de Saneamiento Básico</b>
- Programa "Agua Limpia"
- Programa de Vigilancia y Certificación de la Calidad del agua para Uso y Consumo Humano en Sistemas Públicos y Privados.
- Manejo, desinfección y distribución del agua a nivel domiciliario.
- Manejo y disposición adecuado de los desechos sólidos.
- Disposición adecuada de excreta.
- Educación comunitaria.

### 3.8 Enfermedades transmitidas a través del agua

#### **Definición**

Estas son enfermedades en las cuales el patógeno, es decir, un agente o microorganismo productor de enfermedad, ingresa al cuerpo como un componente pasivo del agua ingerida. En una definición pragmática, se deben incluir otros dos criterios :

1. Un porcentaje significativo de la enfermedad es transmitida por vía del agua ingerida y
2. como corolario, la eliminación del patógeno presente en el

agua ingerida tendrá en muchos casos un impacto significativo sobre la incidencia de la enfermedad; en otras palabras, el suministro de agua potable segura tendrá un efecto significativo sobre la transmisión de la enfermedad.

Las enfermedades transmitidas por el agua pueden además categorizarse como aquellas originadas por organismos microbiológicos y aquellas producidas por sustancias tóxicas inanimadas suspendidas o disueltas en el agua. Una diferencia importante entre las dos subcategorías es que las enfermedades producidas por organismos microbiológicos generalmente se manifiestan en los individuos en episodios agudos, mientras que las producidas por sustancias químicas tóxicas pueden manifestarse tanto en forma aguda como en forma acumulativa crónica, dependiendo de su concentración en el agua.

**Enfermedades microbiológicas transmitidas por el agua: transmisión fecal-oral.**

Muchas de estas enfermedades se transmiten por vía fecal-oral o ano-a-boca. Las fuentes de agua potable son contaminadas por excretas humanas (o en algunas enfermedades "zoonóticas" por excretas de animales) evacuadas por alguien con una infección. Esa persona puede estar enferma o ser un "portador". Un portador hospeda dentro de su cuerpo los organismos patógenos sin manifestar síntomas. Frecuentemente, los portadores son más importantes en la transmisión que las personas realmente enfermas. La mayoría de las enfermedades de vía fecal-oral se manifiestan en el tracto intestinal, es decir, son "enfermedades entéricas". El síndrome más frecuente es la diarrea, es decir, deposiciones sueltas frecuentes. El agente etiológico, es decir, el patógeno, podría ser uno de los muchos organismos candidatos, incluyendo a

los virus. Estas enfermedades también pueden propagarse a otras partes del cuerpo.

**Otras vías.**

Los animales también transmiten algunas enfermedades relacionadas con el agua. La leptospirosis, por ejemplo, puede transmitirse por vía de agua contaminada por la orina de ratas infectadas. La tularemia puede transmitirse por la orina de conejos infectados.

La filaria o dracontiasis, una enfermedad importante aunque localizada, se transmite exclusivamente a través del agua ingerida. Los huevos de la lombriz ingresan al agua procedentes de la lombriz madre cuando ésta sale de la piel de la persona infectada que está recolectando agua en un pozo, un estanque o una corriente no protegidos. Los huevos son ingeridos por un pequeño crustáceo de la especie de los *ciclopodos* que habitan en el agua, desarrollándose hasta su etapa de infección. El hombre ingiere los copépodos infectados al beber agua de la fuente contaminada. Las larvas de la filaria se liberan durante la digestión y migran a través de las vísceras hacia los tejidos subcutáneos debajo de la piel. Desde aquí, la lombriz hembra grávida sale a través de una ampolla ulcerada en la piel, descargando los huevos en el agua y reiniciando el ciclo.

**Enfermedades transmitidas por el agua mediante agentes químicos o físicos.**

Las enfermedades debido a agentes químicos o físicos son causadas por la ingestión de agua que contiene sustancias dañinas o

tóxicas. No es común que el daño sea agudo sino que normalmente se presenta luego de una ingestión a largo plazo de bajas concentraciones. Muchas de las sustancias tóxicas provienen de actividades del hombre, como la fumigación con pesticidas. Otras pueden presentarse en forma natural -el arsénico es un ejemplo, afortunadamente poco frecuente.

En los Estados Unidos, la atención de las investigaciones se ha centrado recientemente en el papel que desempeña el abastecimiento de agua en la incidencia del cáncer y de enfermedades cardíacas. Existirá una relación entre algunos tipos de cáncer y la gran cantidad de productos químicos orgánicos que encuentran su vía de acceso en los sistemas de abastecimiento de agua de las áreas industriales. Existe la duda de si las enfermedades cardíacas están relacionadas con la dureza del agua u otros parámetros de calidad del agua, hasta el momento, los estudios son conflictivos y controversiales. Aun bajo los supuestos más negativos, sólo un reducido número de personas se verían afectadas. El costo de eliminar algunos productos químicos del agua potable requeriría enormes inversiones.

En los países pobres, donde mueren grandes cantidades de niños debido a enfermedades convencionales transmitidas por el agua, la prioridad se manifiesta en "un abastecimiento adecuado para la mayoría más que un abastecimiento perfecto para las minorías". En muchos lugares, todo el problema podría obviarse con una selección juiciosa de las fuentes de agua.

### Resumen de las enfermedades transmitidas por el agua.

El cuadro 3-1 resume las enfermedades transmitidas por el agua. En un orden aproximado, las más importantes son las enfermedades diarreicas, el cólera, la tifoidea, la disentería bacilar o shigelosis, la filaria y la leptospirosis. Las diarreas frecuentemente no son específicas, pero en la mayoría de los casos los agentes son bacterias *E. coli* y virus entéricos, particularmente los rotavirus.

Enfermedades transmitidas por el agua<sup>1</sup>

Fuentes microbiológicas enfermedad o síndrome <sup>3</sup>	Vías de tipo fecal-oral <sup>2</sup>
<i>Disenteria amebica</i> (Amebiasis)	Epidémicamente es transmitida principalmente a través del agua, endémicamente se propaga a través del agua, alimentos y contacto mano-a-boca. Es resistente a la cloración.
Ascariasis (Lombriz gigante)	Generalmente transmitida a través del suelo, pero también en ocasiones por el agua.
<i>Disenteria bacilar</i> (Shigelosis)	También a través de comidas, leche, moscas y contacto directo.
<i>Disenteria balantidial</i> (Balantidiasis)	Epidémicamente, principalmente a través del agua. Endémicamente, a través de agua, comidas y moscas.
Enteritis campilobacteriana	Sólo recientemente se le ha reconocido como una causa importante de la diarrea pediátrica.
<i>Cólera</i> (Clásico y El tor)	Enfermedad clásica transmitida por el agua. Actualmente pandémica. Alto índice de mortalidad en los casos no tratados.
Coccidiosis	Rara, benigna.
<i>Diarreas</i> (Incluye diarreas infantiles y gastroenteritis)	Síndromes clínicos de etiología variada, generalmente no identificada, ataca especialmente en los países menos desarrollados donde aparece con frecuencia como una de las principales causas de muerte. Principalmente de vía fecal-oral.
<i>E. coli</i> (Enteroinvasiva, enteropatógena y enterotóxica)	Creciente comprensión de su rol en las diarreas de niños y viajeros. Muchos son patógenos. Su rol no es bien comprendido. Pueden causar enfermedades del sistema nervioso central.
<i>Virus entéricos</i>	Recibe cada vez mayor atención. Es resistente a la cloración.
<i>Giardiasis</i>	Varias rutas de transmisión. Incluyendo la fecal-oral. En 1955-56 se produjo en Nueva Delhi una epidemia de 30,000 casos.
Virus de hepatitis A.	Normalmente, la larva del suelo penetra en la piel desnuda, generalmente del pie. También puede transmitirse por agua.
<i>Anquilostomiasis y estrongiloidiasis</i>	Se transmite mediante la ingestión de huevos infectados en agua y alimentos contaminados por heces de perros.
<i>Enfermedad hidatídica (Echinococcosis)</i>	Cada vez más reconocidos como una causa de diarreas.
<i>Otros vibrios aparte del cólera</i>	Aparentemente, una causa significativa de diarreas.
<i>Infección viral Norwalk</i>	Contacto directo o indirecto con heces y orina de paciente o portador. Generalmente se propaga indirectamente a través de alimentos, especialmente leche y mariscos, y ocasionalmente a través del suministro de agua.
<i>Fiebre paratifoidea</i>	Se ha observado transmisión vía agua, pero es rara.
<i>Poliomielitis</i>	Agente de diarrea infantil recientemente identificado. Probablemente fecal-oral.
<i>Infección de rotavirus</i>	

(Continuación).

<i>Otras vías</i>	
<i>Enfermedad o síndrome</i>	<i>Observaciones</i>
Antrax	Transmisión por agua potable, dudosa, aunque citada por varios autores. Documentada, pero probablemente muy escasa.
Brucellosis	
Cisticercosis (Lombrices de la vejiga)	Ingestión de los huevos a través de alimentos o agua. Infección larval con <i>T. solium</i> . Otras vías de transmisión. Enfermedad grave.
Gongilomiasis (Lombricilla filiforme escutiforme)	Rara. Ingestión de agua que contiene larvas de insectos huéspedes desintegrados.
Filariasis (Dracontiasis)	Ruta de transmisión compleja con vector intermedio (ciclópodo). No utiliza vía fecal-oral. Se encuentra sólo en los países en vías de desarrollo y se transmite sólo por agua.
Sanguijuelas (Hirudiniasis)	Infección a través de sanguijuelas acuáticas de corta edad.
Leptospirosis (Enfermedad de Weil)	Una zoonosis. Su transmisión más frecuente es por el contacto de la piel con agua contaminada.
Enfermedad del tremátodo (Clonorchiasis y otras)	Ocasionalmente por ingestión de agua potable que contiene metacercaria de pescado descompuesto. La mayoría de casos se da por comer pescado crudo.
Meloidosis	Rara. Sudeste asiático.
Sparganosis	Ingestión de agua que contiene ciclópodos infectados con ciertas larvas cestodas. Otras rutas de transmisión.
Tularemia	Ingestión de agua no tratada de cuencas donde dicha infección predomina entre los animales silvestres; los conejos constituyen uno de los varios mecanismos de transmisión.
Salmonelosis	Enfermedad gastroenterítica aguda, infecciosa; generalmente se propaga a través de alimentos contaminados fecalmente. Se sabe de epidemias transmitidas por agua; por ejemplo, 15,000 casos en Riverside, California, en 1966, debido a la contaminación de un sistema público de agua.
Esquistosomiasis	Puede transmitirse a través del agua, pero la penetración por la piel es la principal puerta de entrada.
Diarrea de viajeros	Frecuentemente causada por uno de los muchos serotipos de bacteria <i>E. coli</i> .
Tricuriasis (Lombriz latigoforme)	Generalmente se transmite por el suelo, pero ocasionalmente también por el agua.
Fiebre tifoidea	Se transmite a través de agua y alimentos contaminados. Los portadores urinarios son frecuentes en áreas con <i>S. hematobium</i> .
Yersiniosis	De alcance mundial, pero escasamente reconocida.

<sup>1</sup> Transmitidas por ingestión de agua potable contaminada.

<sup>2</sup> En algunas enfermedades de vía fecal-oral, los organismos patógenos pueden encontrarse también en la orina (como en la tifoidea) o en el vómito (como en el cólera).

<sup>3</sup> Las enfermedades de mayor importancia se encuentran en cursivo.

Enfermedades transmitidas por el agua<sup>1</sup>

<i>Fuentes químicas y otras</i>		
<i>Fuente</i>	<i>Enfermedad o Síndrome</i>	<i>Observaciones</i>
	Bocio endémico, asbestosis y mesotelioma Hipertensión	Agua deficiente en yodo o con bociógenos. Se sabe que el asbesto en los pulmones produce cáncer. Aún no se conoce su efecto en el tracto intestinal. Se requieren dietas bajas en sodio para ciertos sectores de la población.

<i>Fuentes químicas y otras</i>		
<i>Fuente</i>	<i>Enfermedad o síndrome</i>	<i>Observaciones</i>
Metales	Toxicosis	Ingestión de metales (provenientes de fuentes naturales o de actividades humanas) con el agua potable, los alimentos o el aire. Estos incluyen arsénico, cadmio, cobre, cromo, plomo, mercurio, selenio, vanadio, zinc y otros. Puede ser de importancia a nivel regional; por ejemplo, el arsénico en lugares de la Argentina.
Productos químicos orgánicos	Toxicosis, cánceres, mutaciones y defectos congénitos	Ingestión de ciertos productos químicos, especialmente ciertas sustancias químicas orgánicas sintéticas, incluyendo algunos pesticidas. También algunos subproductos trihalometanos de la cloración son posibles cancerígenos. En la actualidad no representa un problema de alta prioridad en los países subdesarrollados.
Radionúclidos	Cánceres	Radioactividad natural y artificial. En la actualidad no son de alta prioridad en los países subdesarrollados.
Dureza	Enfermedades cardiovasculares	Cierta evidencia epidemiológica indica una correlación inversa entre las enfermedades cardiovasculares y la dureza del agua potable.
Otras	Fluorosis	Daño producido en los dientes y en los huesos como resultado de la ingestión a largo plazo de altas concentraciones de fluoruros naturales.
	Metahemoglobinemia	Grave, algunas veces conduce a un envenenamiento mortal en los niños que ingieren agua de pozos con contenido de nitratos (NO <sub>3</sub> ) en concentraciones mayores a 45 mg/litro

**Amebiasis**

Aunque el término amebiasis realmente significa infección con amebas, por lo general, dicha palabra se utiliza para designar la infección del intestino grueso, producida por la *Entamoeba histolytica*, ya que es la única de las seis especies de amebas que parasitan naturalmente en el intestino humano que causa una enfermedad significativa. No obstante, la *Dientamoeba fragilis* aparentemente puede causar síntomas intestinales leves.

La amebiasis se encuentra en todo el mundo, afectando quizás a un 10% de la población mundial. La prevalencia en áreas con higiene o saneamiento deficiente es mucho mayor, frecuentemente un 30%, y en algunos países en vías de desarrollo llega hasta un 83% (OMS).

**Disentería bacilar (shigelosis)**

La shigelosis es una enfermedad aguda, principalmente del intestino grueso, caracterizada por presentar diarreas, fiebre, náuseas, algunas veces calambres, vómitos y tenesmo. La shigelosis es una enfermedad grave con un índice significativo de mortalidad en infantes y niños. La enfermedad siempre ha encontrado su caldo de cultivo en las condiciones de sobrepoblación con saneamiento deficiente.

**Enteritis campilobacteriana**

La diarrea causada por la infección de *Campilobacter jejuni* (feto vibrión) es una enfermedad entérica aguda, autolimitante, caracterizada por diarreas, dolor abdominal, malestar, fiebre, náuseas y

vómitos. La transmisión se produce a través de alimentos o agua contaminados -y por contacto con animales o infantes infectados. Las medidas preventivas contra la campilobacteria incluyen la cocción total de los alimentos, la pasteurización de la leche, el control de las infecciones en mascotas y animales domésticos, la correcta elección de las personas encargadas de manipular alimentos y el correcto lavado de las manos.

### **Cólera**

El cólera es una enfermedad aguda provocada por la colonización del intestino delgado por parte del *Vibrio cholerae*, el bacilo del cólera. La enfermedad se caracteriza porque se presenta en forma epidémica y porque produce, en los casos más graves diarrea masiva con una rápida depleción de fluido extracelular y electrolitos.

El *Vibrio cholerae* produce proteína enterotoxina que parece ser la responsable de todos los procesos patofisiológicos en el cólera. El período de incubación toma por lo general de 6 a 48 horas. Este es seguido por un repentino ataque de diarrea acuosa, generalmente sin dolor. En los casos más severos, la evacuación inicial de deposiciones diarreicas puede ser superior a 1.000 ml y en horas se pueden perder muchos litros de líquidos, conduciendo rápidamente a un estado de shock profundo. Generalmente, el acceso de diarrea va seguido de vómitos, aunque algunas veces éstos lo preceden; la característica del vómito es que no va acompañado de dolor ni es precedido por náuseas. A medida de que la depleción salina progresa, se presentan severos calambres musculares, que por lo general atacan a las pantorrillas.

La mayoría de las principales epidemias se han producido claramente a través del agua, pero probablemente también la contaminación directa de alimentos por heces infectadas contribuyó a su propagación. El saneamiento deficiente parece ser el principal responsable de la continua presencia del cólera, pero los factores huéspedes, tales como la aclorhidria (ausencia de ácido clorhídrico), también desempeñan un papel importante en la susceptibilidad del individuo al contagio. En áreas endémicas, el cólera es predominantemente una enfermedad infantil. Sin embargo, cuando la enfermedad se propaga a áreas que no han sido previamente atacadas, los índices de incidencia son en un principio cuando menos tan altos en adultos como en niños.

#### **Enfermedades diarreicas**

Los dramáticos síntomas de las enfermedades diarreicas han concitado la atención del hombre desde tiempos inmemorables. En la actualidad, todos los países reconocen que estas enfermedades se deben en gran medida a un medio ambiente insalubre. La falta de agua confiable y adecuada, la falta de protección contra los excrementos humanos, los alimentos contaminados, la suciedad y las moscas -todo es lo que fomenta la diarrea.

La diarrea es tan universal y resulta de tantas etiologías (ver cuadro 3-3) que no tiene una definición más precisa que la evacuación anormalmente frecuente de deposiciones sueltas, acuosas. Los hábitos del intestino de las personas saludables pueden variar considerablemente, de modo que el término diarrea tiene un

significado limitado a menos que se le considere como un cambio en el patrón de costumbres del individuo.

El acceso súbito de diarrea en personas que no tienen otro problema de salud está relacionado la mayoría de las veces con un proceso infeccioso. Frecuentemente está acompañada de una variedad de síntomas, que incluyen fiebre, dolor de cabeza, anorexia, vómitos, malestar y mialgia, pero éstos no siempre pueden usarse para distinguir con certeza el agente causante de la diarrea. Fue sólo durante la última década que la ciencia médica pudo identificar con una certeza razonable a los organismos patógenos de muchas de las más importantes enfermedades diarreicas.

Algunas causas potenciales de diarrea.

<i>Con agentes infecciosos</i>
Gastroenteritis infecciosa aguda no específica
Amebiasis (dysenteria amebica)
Balantidiasis (dysenteria balantidial)
Enteritis campilobacteriana
Capilariasis intestinal
Cólera
Clonorchiasis (lombriz china)
Coccidiosis
Difilobotriosis (lombriz cestoda de peces)
Diarrea por <i>Escherichia coli</i> (Enteroinvasiva, enteropatógena, enterotoxigena)
Fasciolopsiasis
Giardiasis
Filariasis (dracontiasis)
Leishmaniasis
Malaria pernicioso
Enfermedades causadas por vibriones, aparte del cólera
Opisthorchiasis
Fiebre paratifoidea
Gastroenteritis por rotavirus
Salmonelosis
Esquistosomiasis
Shigelosis

(continuación)

<i>Con agentes infecciosos</i>
Estrongiloidosis
Triquinosis
Tuberculosis
Tricuriasis
Tularemia
Fiebre tifoidea (estreñimiento más común que diarrea)
Diarrea viral (tipo Norwalk)
Yersiniosis
Y otras.
<i>Con agentes no infecciosos</i>
Amiloidosis
Cáncer
Catarsis
Enfermedad de Crohn
Diverticulitis
Drogas
Desórdenes endocrinos
Colon errático
Desórdenes por mala absorción (por ejemplo: psilosis)
Envenenamiento
Químico
Alimenticio (por ejemplo: toxinas estafilococicas y botulinicas, toxinas naturales en pescados, hongos y otros)
Radiación
y otras

**Cuadro 2-4** Virus entéricos del hombre que pueden estar presentes en el agua.

Grupo de virus	No. de tipos	Enfermedad causada
Enterovirus:		
Virus de la polio	3	Parálisis, meningitis, fiebre.
Ecovirus	34	Meningitis, enfermedades respiratorias, erupciones, diarrea, fiebre.
Coxsackievirus A	24	Herpangina, enfermedades respiratorias, meningitis, fiebre.
Coxsackievirus B	6	Miocarditis, anomalías cardíacas congénitas, erupciones, fiebre, meningitis, enfermedades respiratorias, pleurodinia.
Enterovirus nuevos	4	Meningitis, encefalitis, enfermedades respiratorias, conjuntivitis hemorrágica aguda, fiebre.
Hepatitis tipo A (probablemente un enterovirus)	1	Hepatitis infecciosa.
Virus de la gastroenteritis (agentes del tipo Norwalk)	2	Vómitos y diarreas epidémicos, fiebre.
Rotavirus (familia Reoviridae)	?	Vómitos y diarreas epidémicos, principalmente en niños.
Reovirus	3	No claramente establecido.
Adenovirus	+ de 30	Enfermedades respiratorias, infecciones a los ojos.
Parvovirus (asociado a los adenovirus)	3	Asociados a enfermedades respiratorias infantiles, pero sin etiología claramente establecida.

*Nota:* Otros virus que debido a su estabilidad pueden contaminar el agua son los siguientes:

1. Papovavirus del tipo SV40, que aparecen en la orina. El subtipo JC está asociado con la leucoencefalopatía multifocal progresiva.
  2. Virus de la enfermedad de Creutzfeld-Jacob (C-II). Al igual que el virus de la coquecía de las ovejas (scrapie), el virus C-J resiste al calor y al formaldehído. Produce una encefalopatía espongiiforme, caracterizada por una severa demencia progresiva y ataxia.
- Fuente:* Organización Mundial de la Salud. "Human Viruses in Water, Wastewater and Soil". WHO Technical Report Series 639. Ginebra.

**Virus A de la hepatitis**

La hepatitis viral, una enfermedad a nivel mundial, es común en los lugares con saneamiento ambiental deficiente. Se presenta a una edad temprana y es transmitida de persona a persona. Frecuentemente se producen brotes de vehículo común debido a agua o alimentos contaminados, especialmente leche y mariscos. La enfermedad varía de leve hasta fulminante, con fiebre, anorexia, malestar e ictericia. El índice de mortalidad es bajo. Las medidas preventivas recomendadas incluyen educación sobre higiene y salud, higiene personal, adecuada disposición de las excretas y un cuidadoso lavado de las manos.

**Fiebre tifoidea**

La fiebre tifoidea es una enfermedad infecciosa sistemática. El índice de mortalidad en el caso de enfermedades no tratadas puede llegar al 10%. Se producen casos leves y poco evidentes, especialmente en las áreas endémicas. El agente infeccioso es el *Salmonella typhi* o bacilo de la tifoidea.

Esta enfermedad se presenta a nivel mundial, propagándose a través de alimentos o agua contaminados por las heces u orina de un paciente o portados. Los moluscos y la leche son también importantes vehículos de transmisión.

**Causas de la tifoidea**

La fiebre tifoidea, a diferencia de la mayor parte de las otras salmonelosis, se limita estrictamente al hombre. La infección se

produce por la ingestión de *S. typhi*, en un rango delimitado experimentalmente entre los 1,000 a 100,000 organismos. La dosis de infección es probablemente menor en los contagios naturales. Las fuentes de infección las constituyen los enfermos o, más frecuentemente, los portadores, que eliminan los *S. typhi* en sus deposiciones y orina.

La epidemiología de la tifoidea ha sido exhaustivamente estudiada. Las numerosas observaciones no dejan duda en cuanto al rol de los alimentos y el agua. La infección se transmite frecuentemente a través de agua contaminada. Como el *S. typhi* puede sobrevivir en el agua de mar, son particularmente peligrosos los mariscos, especialmente aquellos dotados de conchas, recolectados en las cercanías de las desembocaduras de desagües.

### **Salmonelosis**

La salmonelosis es una enfermedad aguda, infecciosa, de origen bacteriano que presenta accesos repentinos de dolor abdominal, diarreas, náusea, fiebre y algunas veces vómitos. El índice de mortalidad es reducido, excepto entre los muy jóvenes, los ancianos y las personas debilitadas. Más de 2,000 serotipos de *Salmonella* son patógenos, siendo el más común el *S. typhimurium*. La fiebre tifoidea y paratifoidea son tipos de salmonelosis que están asociadas con los animales, al igual que con el hombre.

La transmisión es fecal-oral de persona a persona y vía agua o alimentos contaminados. Las epidemias generalmente se originan por los alimentos o la leche. En algunas epidemias de gran

magnitud ha intervenido la contaminación fecal de abastecimientos públicos de agua clorada. En todo el mundo se pueden encontrar los diferentes tipos de salmonella.

#### **Enfermedades cardiovasculares y dureza del agua potable**

Se ha detectado que existe relación entre la dureza del agua potable local y los índices de mortalidad por enfermedades cardiovasculares. La mayor parte de estos estudios se han limitado a unidades geográficas donde los índices de mortalidad tienen relación con las concentraciones promedio de los diversos constituyentes del agua potable. Sin embargo, no se ha demostrado la plausibilidad biológica de estas asociaciones geográficas.

#### **Cancerígenos en el agua potable**

El incremento del número de productos químicos orgánicos que llegan a los abastecimientos de agua en las zonas industrializadas ha generado una creciente preocupación en cuanto a su potencial cancerígeno en el agua potable. Se han encontrado ciertos compuestos que se sabe son cancerígenos (mediante pruebas realizadas con animales expuestos a altas dosis) en sistemas de abastecimiento de agua, si bien en bajas concentraciones. Uno de éstos es el cloroformo, que puede ser un subproducto del proceso de cloración para la desinfección del agua.

En México, la segunda causa de mortalidad es debida a padecimientos gastrointestinales en los que el agua tiene un papel

muy importante, no solo por consumo, sino también por su uso en la elaboración y venta de alimentos.

### **Resumen**

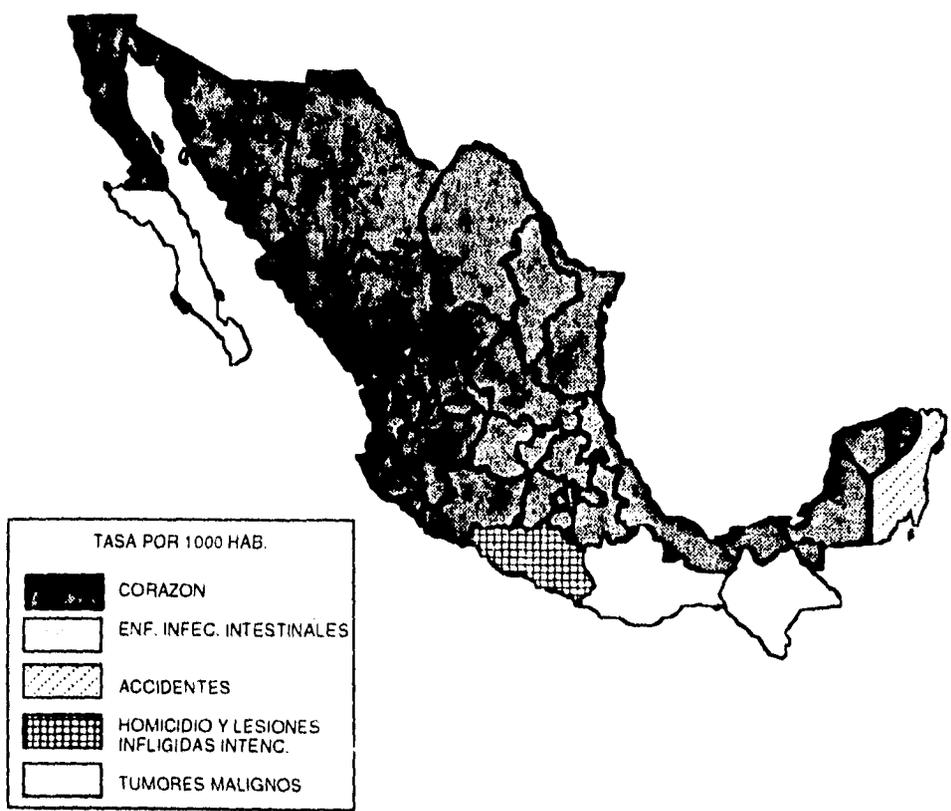
#### *Contaminantes - Epidemias:*

La gran diversidad de contaminantes que hay en el agua causan serias enfermedades que pueden provocar endemias y epidemias. El agua contaminada por microorganismos produce cólera, ceguera por tracoma, elefantiasis, amebiasis, diarreas y disentería, fiebre tifoidea, etcétera. Algunos contaminantes químicos, como los fluoruros y el mercurio, suelen causar alteraciones de huesos, dientes y esqueleto, mientras que otros como el plomo, el hierro, el cadmio y el arsénico, afectan el desarrollo físico y mental del ser humano.

Se estima que la contaminación de las aguas en la actualidad ha rebasado las barreras puramente estéticas y ante el crecimiento poblacional más explosivo de la historia, se ha convertido en un asunto de supervivencia de la humanidad con todas las implicaciones económicas, políticas, ambientales, de salud y éticas que conlleva.

Se presentan a continuación tablas de datos con criterios de usos de agua, parámetros y/o contaminantes; y un mapa de la República Mexicana que muestra la primera causa de muerte por estado.

# PRIMERA CAUSA DE MUERTE POR ENTIDAD FEDERATIVA 1992



**DEFUNCIONES GENERALES, SEGUN CAUSA DE MUERTE Y GRUPOS DE EDAD  
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS. 1992.**

C A U S A S	TOTAL	<1	1-4	5-14	15-64	>65
EGES. UNIDOS MEX.	409.814	52.502	11.054	8.665	156.982	178.053
ENFERMEDADES INFECCS.						
INTESTINALES	14.191	5.153	2.062	545	2.585	3.785
COLERA	69	1	3	6	34	25
FIEBRE TIFOIDEA	333	26	25	30	148	103
SHIGELOSIS	97	26	21	5	19	26
INTOX. ALIMENTARIA	378	24	30	36	175	112
AMIBIASIS	674	75	71	25	234	261
INFECCS. INTESTINALES DERIVAS A OTROS ORGS. ESPECIFICADOS	314	151	51	11	41	59
INFECC. INTESTINAL MAL DEFINIDA	12.324	4.850	1.861	431	1.934	3.198
LAS DEMAS	2	0	0	1	0	1
TUBERCULOSIS	5.219	24	76	113	3.112	1.843
TUBERCULOSIS PULMONAR	4.486	11	24	59	2.650	1.695
OTRAS TUBERCULOSIS DEL APARATO RESPIRATORIO	22	0	0	0	11	11
TUBERCULOSIS DE LAS MENINGES Y DEL SIST. NERVIOSO CENTRAL	239	6	39	25	143	24
TUBERCULOSIS DE LOS INTESTINOS	73	1	4	8	44	16
TUBERCULOSIS DE LOS HUESOS Y ARTICULACS.	23	0	0	1	18	4
TUBERCULOSIS DEL APA- RATO GENITOURINARIO	64	0	1	0	46	17
LAS DEMAS	312	6	8	20	200	76
OTRAS ENFERMEDADES						
BACTERIANAS	2.909	633	183	122	866	1.087
BRUCELOSIS	31	1	1	2	16	11
LEPRA	34	1	0	0	16	17
DIFTERIA	2	0	1	0	0	1
TOSFERINA	63	33	15	3	7	5
ANGINA ESTREPTOCOCICA, ESCARLINATA Y ERISPELA	56	5	5	9	15	22
INFECCS. MENINGOCOCICAS	7	3	1	2	1	0
TETANOS	156	6	4	16	95	33
SEPTICEMIA	2.418	567	148	88	666	933
LAS DEMAS	142	17	8	2	50	65
ENFERMEDADES VIRICAS	1.094	134	164	118	478	199
SARAMPION	23	9	6	5	3	0
RUBEOLA	5	1	0	3	0	0
ENCEFALITIS TRANSMITIDA POR ARTRÓPODOS	1	0	0	1	0	0
HEPATITIS VIRICA	644	54	93	40	324	133
EASIA	30	0	3	11	12	4
TRACOMA	1	0	0	0	0	1
LAS DEMAS	390	70	62	58	139	61
RICKETTSIOSIS Y OTRAS ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR ARTRÓPODOS	21	0	1	1	15	4
OTRAS RICKETTSIOSIS	5	0	0	1	3	1
LEISHMANIASIS	5	0	1	0	3	1
TRIPANOSOMIASIS	11	0	0	0	9	2
ENFERMEDADES VENEREAS	49	22	4	3	14	6
SIFILIS	45	21	4	3	13	4

**DEFUNCIONES GENERALES SEGUN CAUSA DE MUERTE Y GRUPOS DE EDAD  
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS. 1992. CONTINUACION.**

C A U S A S	TOTAL	<1	1-4	5-14	15-64	>65
INFECCIONES GONOCOCICAS	2	0	0	0	1	1
LAS DEMAS	2	1	0	0	0	1
OTRAS ENF. INF. Y PARASITARIAS Y EFECTOS TARDIOS DE LAS ENF. INF. Y PARASITARIAS	1.164	112	154	98	462	311
MICOSIS	191	40	10	11	77	52

REFERENCIA. INEGI-SSA 1992

<b>CONTAMINANTES DEL AGUA. EFECTOS EN LA SALUD.</b>		
SUSTANCIA	FUENTE	RIESGO EN LA SALUD
Solventes clorinados	Agentes químicos para catabolizar grasas; mantenimiento de maquinaria subproductos en la fabricación de químicos.	Cáncer
Trihalometanos	Producidos por reacciones químicas en el agua tratada con cloro.	Daño hepático y renal posiblemente cáncer.
Bifenilos policlorados (PCBs)	Desperdicios de muchos sistemas de producción y manufactura.	Daño hepático, posiblemente cáncer.
Plomo	Tuberías y soldaduras viejas en los sistemas de distribución pública del agua en hogares y otros tipos de construcciones.	Problemas nerviosos, de aprendizaje, malformaciones congénitas posiblemente cáncer.
Bacterias patógenas	Fugas en fosas sépticas y drenajes de aguas no tratadas.	Enfermedades gastrointestinales.

**ANEXO DE LA TABLA No. 2**

- (a) Máximo 30°C excepto cuando sea causada por condiciones naturales.  
Medida en la superficie fuera de la zona de mezclado.
- (b) Este límite, en no más del 10% del total de las muestras mensuales (5 mínimo), podrá ser mayor a 2000 coliformes fecales.
- (c) No deben existir en cantidades tales que provoquen una hiperfertilización.
- (d) El criterio con respecto a sustancias tóxicas es el siguiente:  
Ninguna sustancia tóxica sola o en combinación con otra estará presente en concentraciones tales que conviertan el agua del cuerpo receptor en inadecuada para el uso específico a que se destine.  
La tabla No. 3 resume algunas de las sustancias tóxicas que de acuerdo con la información disponible se encuentran bajo reglamentación y estudio en varias partes del mundo. Los valores de las sustancias de esta tabla no son limitativos y están sujetos a modificación de acuerdo con el futuro avance tecnológico.
- (e) Este límite, en no más del 10% del total de las muestras mensuales (5 como mínimo), podrá ser mayor a 2000 coliformes fecales.
- (f) No será permitido color artificial que no sea coagulable por tratamiento convencional.
- (g) Removible por tratamiento convencional.
- (h) 2000 coliformes fecales como promedio mensual, ningún valor mayor de 4000.
- (i) Conductividad no mayor de 2000 mohs/cm. Si el valor de RAS es mayor de 6, la Secretaría de Recursos Hidráulicos fijará el valor definitivo.  
RAS = relación de absorción de sodio.  
Boro 0.4 mg/l. Para valores superiores, la autoridad competente fijará el valor definitivo.
- (j) Para riego de legumbres que se consuman sin hervir o frutas que tengan contacto con el suelo.

**CLASIFICACION DE LAS AGUAS DE LOS CUERPOS RECEPTORES  
SUPERFICIALES EN FUNCION DE SUS USOS Y CARACTERISTICAS DE CALIDAD.**

Tabla 2

Clase	Usos	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
		pH	Tempera- tura (°C)	O.D. (mg/l)	Bacterias Coliformes NMP (Organismos/	Aceites y Grasas (mg/l)	Sólidos Disueltos (mg/l)
				Límite Mínimo	Límite Máximo	Límite Máximo	Límite Máximo
DA	Abastecimiento para sistemas de agua potable e industria alimenticia con desinfección únicamente. Recreación (contacto primario) y libre para los usos DI, DII y DIII	6.5	C.N.	4.0	200	0.76	No mayor de 1000
		a 8.5	más 2.5 (a)		fecales		
DI	Abastecimiento de agua potable con tratamiento convencional (coagulación, sedimentación, filtración y desinfección) e industrial.	6.0	C.N.	4.0	1000	1.0	No mayor de 1000
		a 9.0	más 2.5 (a)		fecales (e)		
DII	Agua adecuada para uso recreativo, conservación de flora, fauna y usos industriales.	6.0	C.N.	4.0	10.000	Ausen-	No mayor de 2000
		a 9.0	más 2.5 (a)		coliformes tot. como prom. mensual; ningún valor mayor de 20.000 (h)	cia de película visible.	
DIII	Agua para uso agrícola e industrial.	6.0	C.N.	3.2	1000 (j) y li-	Ausen-	(i)
		a 9.0	más 2.5 (a)		bre para los demás cultivos.	cia de película visible.	
DIV	Agua para uso industrial (excepto procesamiento de alimentos)	5.0		3.2			
		a 9.5					

pH = Potencial hidrógeno  
O.D. = Oxígeno disuelto  
N.M.P. = Número más probable  
U.T.J. = Unidades de turbiedad Jackson  
mg/l = miligramos por litro  
C.N. = Condiciones naturales  
°C = Grados centígrados



**VALORES MAXIMOS PERMISIBLES, DE SUBSTANCIAS  
TOXICAS EN LOS CUERPOS RECEPTORES**

Límite máximo en miligramos por litro.

Clasificación (Tabla 2)	DA	DI	DII	DIII
	0.05	0.05	1.00	5.00
Arsénico				
Bario	1.00	1.00	5.00	-
Boro	1.00	1.00	-	2.00
Cadmio	0.01	0.01	0.01	0.005
Cobre	1.00	1.00	0.1	1.0
Cromo hexavalente	0.05	0.05	0.1	5.00
Mercurio	0.005	0.005	0.01	-
Plomo	0.05	0.05	0.10	5.00
Selenio	0.01	0.01	0.05	0.05
Cianuro	0.20	0.20	0.02	-
Fenoles	0.001	0.001	1.00	-
Substancias activas al azul de metileno (detergentes)	0.50	0.50	3.0	-
Extractables con Cloroformo	0.15	0.15	-	-
<b>Plaguicidas</b>				
Aldrin	0.017	0.017		
Clordano	0.003	0.003		
D.D.T.	0.042	0.042		
Dieldrin	0.017	0.017		
Endrin	0.001	0.001		
Heptacloro	0.018	0.018		
Epóxico de heptacloro	0.018	0.018		
Lindano	0.056	0.056		
Metoxicloro	0.035	0.035		
Fosfatos orgánicos con carbamatos	0.100	0.100		
Toxafeno	0.005	0.005		
Herbicidas totales	0.100	0.100		
<b>Radioactividad</b>	picocuries por litro			
Beta	1.000	1.000	1.000	
Radio-226	3	3	3	
Estroncio	10	10	10	

CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUAS RENOVADAS

PARAMETRO Y/O CONTAMINANTE	RIEGO DE AREAS VERDES	LLENADO DE LAGOS
pH	6.5	7.7
Color	60.0	37.5
Turbidez	20.0	15
Alcalinidad total	500.0	500
Alcalinidad Fenolftaleina	10.0	50
Carbonatos	10.0	50
Bicarbonatos	500.0	450
Hidróxidos	10.0	0
Conductividad eléctrica	3000	3000
Cloruros	500	1000
Boro	2	2
Sólidos totales	1500	2000
Sólidos totales fijos	1000	1000
Sólidos totales volátiles	500	200
Sólidos disueltos totales	1000	1000
Sólidos disueltos fijos	500	500
Sólidos disueltos volátiles	500	185
Sólidos suspendidos totales	500	1000
Sólidos suspendidos fijos	500	500
Sólidos suspendidos volátiles	10	15
Sólidos sedimentables	1	1
R.A.S. soluble	2.489	
R.A.S. total	2.489	
Nitrógeno amoniacal	5	2.5
Nitrógeno total	10	10
Nitratos	50	50
Fósforo total	50	50
Calcio soluble	150	
Magnesio soluble	100	
Sodio soluble	100	
Potasio soluble	150	
Calcio total	150	150
Magnesio total	100	100
Sodio total	100	250
Potasio total	150	100
Hierro soluble	0.3	
Manganeso soluble	0.05	
Plomo soluble	0.05	
Cadmio soluble	0.01	
Mercurio soluble	1.5 E-04	
Arsénico soluble	1.7 E-04	
Cromo soluble	0.05	
Hierro total	0.3	0.3
Manganeso total	0.05	0.1
Plomo total	0.05	1.0
Cadmio total	0.01	0.1
Mercurio total	1.5 E-04	1.5 E-03
Arsénico total	1.75 E-04	0.1
Cromo total	0.05	0.1
Coliformes fecales		
Coliformes totales		
DBO soluble	20	20
DQO soluble	50	50
Grasas y aceites	10	10
S.A.A.M.	1	5

Nota: Todos los valores están expresados en mg/l, excepto pH (unidades); color (unidades Pt-Co); turbidez (unidades nefelométricas); conductividad eléctrica (micromhos/cm); coliformes fecales y totales (NMP/100 ml), sólidos sedimentables (ml/l) y R.A.S. soluble y total (adimensional).

Ref: Evaluación de Sistemas Biológicos de Tratamiento (Operación y Muestreo del Dispositivo Experimental), DGCOH, 1981.

**CALIDAD RECOMENDABLE DEL AGUA CRUDA  
PARA USO DOMESTICO**

	<b>EXCELENTE SOLO REQUIERE DESINFECCION</b>	<b>BUENA, REQUIERE FILTRACION Y DESINFECCION</b>	<b>POBRE, REQUIERE TRATAMIENTO ESPE- CIAL Y DESINFECCION</b>
<b>D.B.O. (mg/l)</b>			
<b>PROMEDIO MENSUAL</b>	0.75 - 1.5	1.5 - 2.5	mas de 2.5
<b>MAXIMO DIARIO</b>	1.0 - 3.0	3.0 - 4.0	mas de 4.0
<b>COLIFORMES (NMP/100 ml)</b>			
<b>PROMEDIO MENSUAL</b>	50 - 100	50 - 5000	mas de 5000
<b>MAXIMO DIARIO</b>	menos del 5 %	menos del 20 %	menos de 5 %
<b>OXIGENO DISUELTO</b>			
<b>PROMEDIO (mg/l)</b>	4.0 - 7.5	4.0 - 8.5	4.0
<b>% DE SATURACION</b>	75 o mas	80 o mas	-----
<b>pH</b>	6.0 - 8.5	5.0 - 9.0	3.8 - 10.5
<b>CLORUROS (mg/l)</b>	50 o menos	50 - 250	mas de 250
<b>FLUORUROS (mg/l)</b>	menos de 1.5	1.5 - 3.0	mas de 3.0
<b>COMP. FENOLICOS</b>	nada	0.005	mas de 0.005
<b>COLOR</b>	0 - 20	20 - 150	mas de 150
<b>TURBIEDAD</b>	0 - 10	10 - 250	mas de 250

#### IV PROCESOS NATURALES DE AUTODEPURACION DEL AGUA EN CORRIENTES.

Las formas naturales de contaminación han estado siempre presentes en las aguas superficiales. Mucho antes de las primeras civilizaciones, muchas de las impurezas mencionadas en los capítulos anteriores ya se encontraban en el aire, erosionaban la superficie terrestre o lixiviaban los sólidos y de alguna u otra manera encontraban cauce en alguna corriente superficial. Con pocas excepciones los procesos de autopurificación eran capaces de eliminar esas substancias. Sin estos procesos de autodepuración, la vida en la tierra no se habría desarrollado como la conocemos.

El desarrollo de la civilización humana ha incrementado las actividades, cambiando la naturaleza y cantidad de los contaminantes que se vierten a los cuerpos de agua. Como resultado del crecimiento demográfico en poblaciones rurales y urbanas, la cantidad de agua residual aumentó al punto de que la capacidad de autopurificación de los cuerpos de agua ha sido excedida. Las pequeñas corrientes se afectaron primero, hasta que las corrientes mayores y los grandes lagos se contaminaron también. En los últimos años, los programas de control de la contaminación se han venido implantando, en un intento por reducir las descargas contaminantes hacia los cuerpos de agua, a un nivel en que los procesos naturales de purificación puedan asimilarla otra vez.

Los procesos de autopurificación de los ecosistemas acuáticos pueden ser: *físicos, químicos y biológicos*. La rapidez con que se

llevan a cabo depende de algunas variables específicas de cada sistema. Las características como el gasto, velocidad y turbulencia del flujo, características físicas del fondo de la corriente y el tipo de material de la orilla, variaciones en la cantidad de luz solar y temperatura, como también la naturaleza química de los cuerpos de agua, todos los sistemas son cambiantes e influyen en los procesos de purificación natural. En los cuerpos naturales de agua, estos sistemas son estables por naturaleza y rara vez se alteran.

El mismo proceso, físico, químico, y biológico, que sirve para purificar los sistemas acuáticos, también se emplea en los sistemas ingenieriles. En las plantas de tratamiento de aguas residuales, la velocidad y extensión de los procesos son controlados por diversos métodos. Un completo conocimiento de los procesos naturales de purificación es esencial para entender la similitud de ambas capacidades (aguas superficiales y plantas de tratamiento).

#### 4.1 Procesos físicos .

Los procesos físicos más comunes en la autodepuración de corrientes son: *La dilución, sedimentación y flotación, filtración, transferencia de gas y la transferencia de calor.*

Estos procesos por sí solos no son tan importantes, pero aumentan su significancia al combinarse con ciertos procesos químicos y bioquímicos de autopurificación.

#### 4.1.1 Dilución

En las primeras décadas del presente siglo, las prácticas de disposición de las aguas residuales se basaban en la idea de que "la solución de la contaminación es la dilución". La dilución fue considerada la manera más económica de disponer de las aguas residuales, considerándose como una buena práctica ingenieril. Los primeros trabajos en el campo de la zona de mezcla, basaron sus conceptos en las características de dispersión lateral, vertical y longitudinal de las corrientes afluentes. Las fórmulas proyectan el espacio y el tiempo requerido para la dilución de ciertos contaminantes a reserva de la concentración en que se encuentre en la corriente. Aunque la dilución es una gran ayuda a los mecanismos de autolimpieza de las aguas superficiales, la eficiencia de este proceso depende de que las descargas residuales sean relativamente pequeñas cantidades a lo largo del cuerpo receptor.

Debe prevenirse el uso de las corrientes de agua para la dilución de las aguas crudas o con algún tratamiento muy leve. En México, legalmente<sup>7</sup> se restringe el uso de los cuerpos de agua para la dilución de aguas residuales. Bajo el mencionado reglamento, la carga permisible máxima es independiente de la capacidad de dilución. Solamente cuando se sobrepasan los límites de carga se considera la capacidad de dilución de la corriente, entonces se determina el grado de tratamiento necesario para el agua que se ha de descargar.

---

<sup>7</sup> Referencia No. 7

La capacidad de dilución de una corriente se puede calcular usando los principios del balance de masas. Si el gasto y la concentración de las sustancias en estudio, es conocida en ambas corrientes, la concentración después de mezclarse los gastos, de la corriente con la descarga, se calcula de la siguiente forma:

$$C_s Q_s + C_w Q_w = C_m Q_m$$

donde C = concentración (masa/vol) de la sustancia en estudio,

Q = gasto (vol/tiempo), y los subíndices s, w, y m :

s = corriente

w = descarga

m = condiciones de la mezcla.

#### 4.1.2 Sedimentación y flotación

Los sólidos suspendidos son uno de los contaminantes más comunes del agua, incluyendo las domésticas e industriales y los arrastres del agua por las actividades agrícolas, silvícolas y a su paso por superficies urbanas. Estos sólidos pueden ser orgánicos o inorgánicos y/u organismos vivos, pudiendo variar en tamaños desde grandes partículas orgánicas hasta diminutas, casi invisibles, coloides. Los sólidos en suspensión aumentan la turbiedad, y reducen la penetración de luz reduciendo la actividad fotosintética de las plantas, impidiendo la visión de los animales acuáticos, interfiere con la alimentación de los mismos que obtienen su comida por filtración, y es abrasivo a la estructura del sistema respiratorio, como las branquias de los peces.

La sedimentación o asentamiento, es un proceso natural de remoción de las partículas suspendidas de una corriente, las partículas sólidas más grandes se asientan con facilidad en las aguas quietas. Las partículas de tamaño coloidal pueden permanecer en suspensión por largos períodos de tiempo. No obstante, muchas de estas partículas se llegan a asentar.

Este proceso natural de sedimentación tiene sus desventajas. Las condiciones anaeróbicas se dan, probablemente, por la formación de los depósitos de sedimentos, y cualquier organismo atrapado en ellos se descompondrá, liberando compuestos solubles en la corriente. Los depósitos de sedimentos pueden también alterar el fondo de la corriente, saturando los poros del lecho original, creando condiciones inapropiadas para la reproducción de algunos organismos acuáticos.

La formación de azolve y lodos a lo largo del fondo de la corriente alteran su curso o impiden las actividades de navegación. La acumulación de sedimentos reduce la capacidad hidráulica de los canales, azolvándolos, e incrementando la probabilidad de desbordes.

Los sólidos flotantes son comunes en las temporadas de inundaciones o desbordamientos. En estos casos, aumenta la turbulencia y los sólidos flotantes, anteriormente depositados a lo largo de las áreas de aguas quietas, son acarreados a distancias considerables aguas abajo en la corriente.

Con el tiempo estas partículas se asentarán, pero no antes de que su presencia haya aumentado la turbiedad de las aguas en que han estado presentes.

#### 4.1.3 Filtración

A lo largo de los tramos del lecho de la corriente, en donde se depositan los desechos, es frecuente que éstos se alojen o adhieren al junco, trozos de madera o piedras, donde permanecen hasta que los niveles de la corriente aumentan y los remueven, devolviéndolos al flujo de la corriente.

Pequeñas partículas de materia orgánica o inorgánica (barro, arcilla) y algunos otros sedimentos pueden ser filtrados por grava o rocas en el fondo de la corriente. Así como el agua puede filtrarse desde la superficie hacia los mantos acuíferos, la filtración se puede dar de otras maneras más complejas y, si los estratos inferiores están saturados, la eliminación de las partículas suspendidas se completa al momento en que el agua ingresa al acuífero. Muchas corrientes intercambian libremente con mantos acuíferos que se encuentran debajo de ellas, de esta manera el agua vuelve a reingresar a la corriente en algún punto de ella, aguas abajo.

#### 4.1.4 Transferencia de gas

La transferencia de gases hacia el interior y hacia afuera del agua es una parte importante de los procesos naturales de purificación. La sustitución del oxígeno perdido por la

degradación bacteriana o los residuos orgánicos, es realizado por la transferencia de oxígeno del aire hacia el agua. Contrariamente, los gases que se liberan en el agua por los procesos químicos y biológicos pueden ser transferidos desde el agua a la atmósfera. Un conocimiento de los principios de la transferencia de gas es esencial para la comprensión de este proceso natural. Consideremos un sistema sencillo, como se muestra en la figura , en la cual un envase con líquido es sellado, dejando gas atrapado en la parte superior. Si el líquido está limpio inicialmente, con respecto a el gas, las moléculas de gas emigrarán, a través de la interface líquido-gas y se disolverán en el líquido. Aunque algunas moléculas de gas comenzarán a dejar el líquido y retornarán a la fase gaseosa, la reacción será hacia el estado líquido hasta alcanzar el equilibrio. En este punto, el número de moléculas que se salen del líquido es igual a el número de moléculas que entran otra vez, y se dice que el líquido está saturado con el gas. El equilibrio en este caso implica un estado dinámico uniforme (estable), y no un estado suspendido en el cual todos los movimientos de las moléculas de gas se detendrían una vez que la saturación ocurriera.

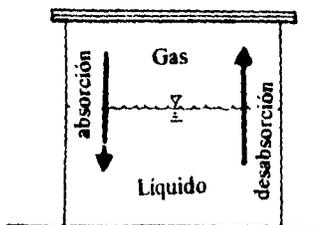


Figura Gas-Líquido contacto con transferencia de gas entre las fases.

Dos características sobre este proceso que son importantes en el agua son:

1. *Solubilidad*, o el grado hasta en el que el gas es soluble en el agua (la concentración de gas en el agua en equilibrio).
2. *Tipo de transferencia*, o la manera en la que la disolución o liberación ocurre.

#### 4.1.5 Solubilidad

La solubilidad de un gas en equilibrio con un líquido se calcula por medio de la Ley de Henry, y se expresa matemáticamente por :

$$x = P/H$$

en el que:  $x$  es el equilibrio (mol fracción) de la disolución del gas en 1 atm, o :

$$x = \frac{\text{moles de gas (ng)}}{\text{moles de gas (ng)} + \text{moles de líquido (nl)}}$$

$H$  es el coeficiente de absorción (coeficiente de Henry, el cual es único para cada sistema gas-líquido), y  $P$  es la presión del gas sobre el líquido. Otros factores que afectan a  $x$  son la temperatura (la solubilidad aumenta cuando la temperatura disminuye) y la concentración de otros gases disueltos y sólidos (la solubilidad disminuye cuando otro material disuelto en el líquido aumenta). Si el espacio sobre el líquido es ocupado por una mezcla de gases, cada gas tendrá su propio equilibrio mol-fracción. Según la Ley de Dalton, cada gas en una mezcla ejerce una presión parcial en proporción a su porcentaje por volumen en la mezcla; esto es :

$$PV = (p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n)V \quad \text{ó} \quad P = \sum p_i$$

Sustituyendo en la Ec. de la Ley de Henry, tenemos que  $x_i$  del gas en la mezcla es :

$$X_i = P_i / H_i$$

en el que  $X_i$ ,  $H_i$  y  $P_i$  son, respectivamente, el equilibrio mol-fracción, coeficiente de absorción y presión parcial del  $i$ -ésimo gas.

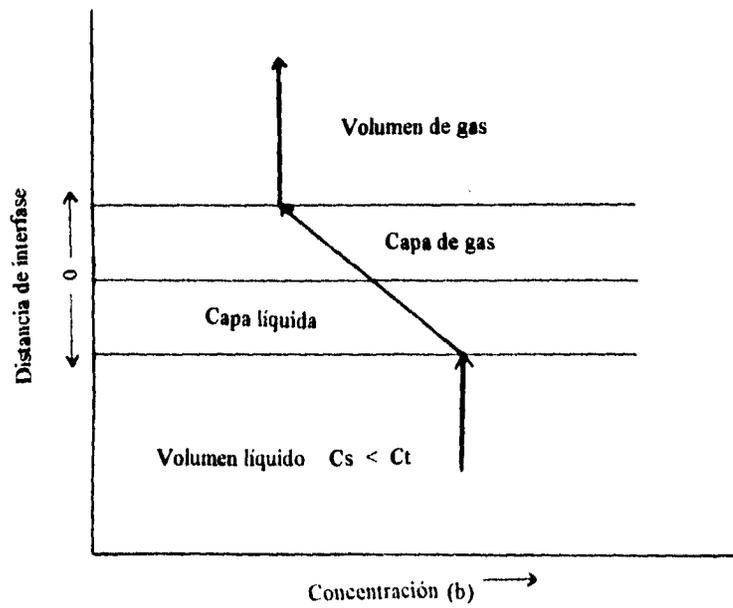
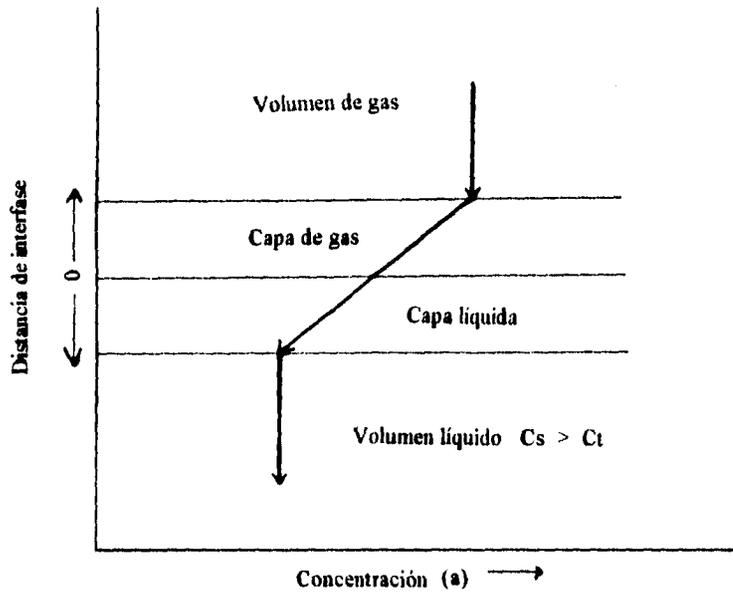
#### 4.1.6 Velocidad de transferencia

La velocidad con que el gas se transfiere es un parámetro importante en la aireación. La velocidad de transferencia es gobernada por varios factores, y su expresión matemática es :

$$dC/dt = (C_s - C) k_a$$

donde  $dC/dt$  es la velocidad instantánea de cambio de la concentración de gas en el líquido,  $C_s$  y  $C$  son la concentración de saturación y la concentración inicial, respectivamente, y  $k_a$  es una constante relacionada a las condiciones físicas. Sería notada que la desabsorción del gas ocurre cuando  $C$  es mayor que  $C_s$ . La magnitud de  $k_a$  es conocida y depende de tres factores que son : la temperatura del sistema, el área interfacial disponible para la transferencia de gas y la resistencia al movimiento de una fase a la otra. Mientras el efecto de la temperatura puede ser previsto por la Regla de Van't Hoff-Arrhenius, la otra variable es un sistema específico y el área interfacial disponible para la transferencia de gas es medida por el área total de contacto entre el gas y el líquido. Entre mayor sea el área interfacial por volumen dado será mayor la transferencia de gas.

La resistencia al movimiento entre las fases, explicado frecuentemente por dos gráficas y la teoría de la transferencia de masas, postulada inicialmente por Lewis y Whitman en 1924. De acuerdo a esta teoría, la interface se compone de dos distintas capas, una en el lado del gas y otra en el lado líquido, que sirve como una barrera entre las fases. Este sistema se muestra gráficamente en la figura 5.2a. Una molécula de gas en el interior de la fase de gas será transferida al interior de fase líquida, moviéndose a través del volumen de gas y la de líquido, y finalmente distante de la interfase y dentro del volumen líquido. En sistemas donde el líquido está sobre saturado con respecto a el gas, el movimiento de las moléculas de gas será en la dirección contraria. Figura 5.2b.



Modelo de dos capas de la interfase gas y líquido: (a) forma de absorción y (b) forma de desabsorción.

La fuerza causante de la transferencia de masa es la concentración del gradiente,  $C_s - C$ . La resistencia a la transferencia de masa debe ser superior para el proceso que sucede, y cada uno de los pasos listados al respecto es probable que muestren un diferente nivel de resistencia. El paso que ofrece mayor resistencia a el movimiento de las moléculas de gas es la velocidad límite del paso. En una situación estancada (por ejemplo; sin movimiento interno de los volúmenes de las fases), el movimiento de las moléculas de gas hacia las interfases depende totalmente de la difusión, y el proceso es muy lento. Sin embargo, sí el movimiento interno del volumen de las fases ocurre, las moléculas de gas son transferidas hacia la interfase por turbulencia y difusión, y la velocidad de la transferencia de masa es muy probable que sea gobernada por una o ambas capas.

En la mayoría del agua natural, existe suficiente agitación del volumen de las fases, y las capas se convierten en factores limitantes. En general, los gases que son altamente solubles en agua, tales como el amoníaco, encuentran mayor resistencia en pasar a través de la capa de gas y el proceso se llama *capa de gas controlada*. Contrariamente, gases poco solubles tales como oxígeno y nitrógeno encuentran mayor resistencia en la capa líquida, y el sistema es *capa líquida controlada* con respecto a esos gases. Los gases de solubilidad intermedia, tales como sulfuro de hidrógeno, encuentran aproximadamente igual resistencia a través de las dos capas y el sistema es llamado *mezcla de capas controladas*.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

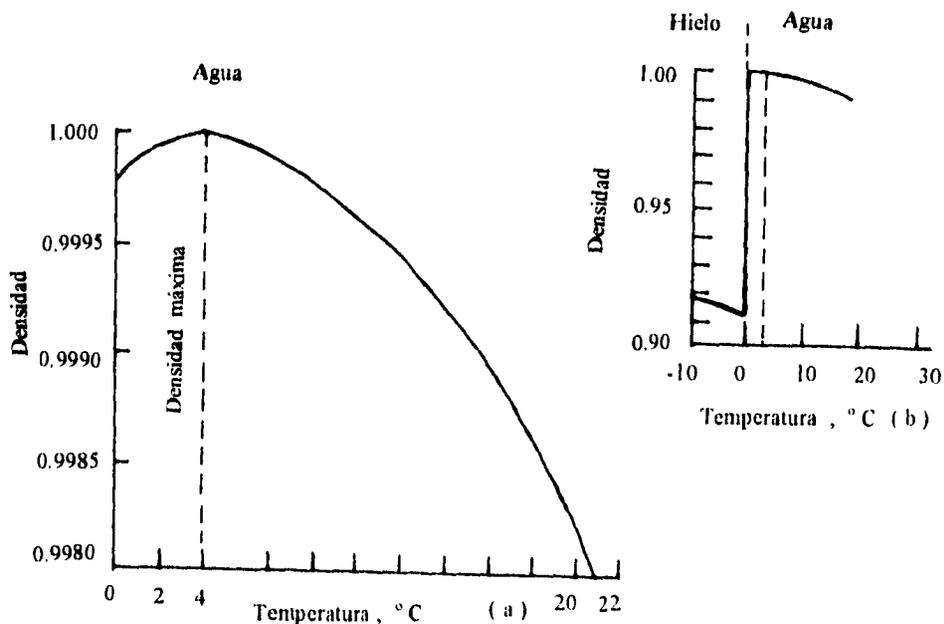
#### 4.1.7 Transferencia de calor

Los cuerpos de agua ganan y pierden calor más lentamente que la tierra o masas de aire, y bajo algunas circunstancias, la temperatura del agua es regularmente constante y cambia gradualmente con las estaciones climatológicas. Por lo tanto, las plantas y animales acuáticos no desarrollan suficiente adaptabilidad para asimilar los cambios bruscos en la temperatura, y únicamente las especies más fuertes sobreviven a tales cambios. Por esto, deben evitarse los incrementos de temperatura que disminuyen el número de especies acuáticas. Además, los incrementos en la temperatura del agua, afectan el grado de concentración de iones, la conductividad, las constantes de disociación, solubilidad y potencial corrosivo, todos estos factores asociados con la calidad del agua.

Sí se mantienen las condiciones meteorológicas constantes, teóricamente el agua requiere un tiempo infinito de exposición para lograr el equilibrio, después de incrementar la temperatura. Además, se requeriría un área infinita de exposición para enfriar el agua caliente que se descarga a una corriente o cuerpo de agua y equilibrar la temperatura. Sin embargo, dado que el descenso de la temperatura se comporta logarítmicamente, el equilibrio se puede considerar proporcional (con ciertas limitaciones) al tiempo y al área de exposición. Algunas variables meteorológicas, así como las características hidráulicas de la corriente (profundidad, anchura, área de exposición), gasto, etc., afectan el grado de transferencia de calor en los cuerpos de agua. Para corrientes

calentadas por radiación solar a lo largo de varios kilómetros de exposición al calor, el enfriamiento se da únicamente en áreas sombreadas o durante la noche y puede ser un procedimiento mucho más lento que el enfriamiento en corrientes en las cuales se incrementa la temperatura por una descarga.

En zonas templadas, la transferencia de calor en estanques y lagos donde la influencia de turbulencia y la corriente es insignificante, es controlada por un fenómeno conocido como estratificación térmica. El agua dulce tiene su máxima densidad a los 4°C (39°F), con disminución en la densidad cuando se acerca al punto de congelamiento o cuando aumenta la temperatura. Ver figura.



Cambios en la densidad del agua (a) y (b) hielo al variar la temperatura ( Warren )

De esta forma, durante las temporadas cálidas y cuando crece el tirante medio de la corriente, el agua se divide hacia un lecho superior de temperatura, circulando agua conocida como *Epilimnion* y en un lecho inferior de agua fría, relativamente sin movimiento, agua conocida como *Hypolimnion*. Estos dos lechos están separados por el *Thermocline*, o *Metalimnion*, una región puntual del gradiente térmico. Esta estratificación se muestra en la figura

.4a.

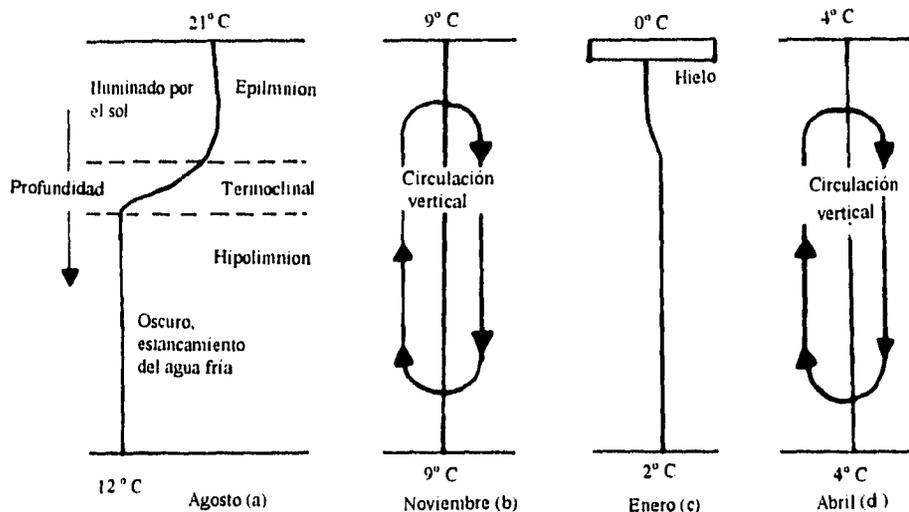


Fig. 4-A

Perfiles de la temperatura del agua en un lago profundo, se muestra (a) estratificación térmica, (b) circulación otoñal, (c) estancamiento de invierno, y (d) circulación de primavera. ( Hammer )

La estratificación es interrumpida usualmente en otoño (fig. 4b), cuando el agua fría de la superficie empieza a

circular o sumergirse. La acción del viento puede causar la circulación general del cuerpo de agua hasta invertir los estratos en el lago, la estratificación desaparece, y el cuerpo de agua uniforma la temperatura en toda su sección. En las regiones frías, la superficie del agua se congela con las corrientes de aire. El agua a 2°C (36°F) comienza a ser más densa que el agua más fría superior, formando un lecho a lo largo del fondo, un lecho en el que el ecosistema acuático sobrevive tanto como oxígeno haya disponible, sin importar la superficie congelada del lago (fig. 4c). En primavera, el proceso es contrario al deshielo y vuelve a ocurrir (fig. 4d), y en el verano la estratificación empieza, dependiendo del calentamiento de las radiaciones solares.

La naturaleza y extensión de la estratificación varía, dependiendo sobre todo del tamaño, profundidad, configuración, y terreno del cuerpo de agua, la relación área-volumen, la orientación de los vientos predominantes, características hidrológicas de los afluentes y efluentes, así como las variaciones climatológicas de la temperatura.

#### 4.2 Procesos químicos

Los cauces naturales contienen muchos minerales disueltos y gases que interactúan químicamente con uno u otro en variadas y complejas formas. Oxidación-Reducción, Disolución-Precipitación, y otras conversiones químicas que pueden alternadamente ayudar u

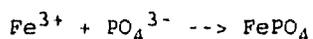
obstruir los procesos naturales de purificación en los sistemas acuáticos.

#### 4.2.1 Reacciones químicas .

Estrictamente hablando, muchas de las reacciones oxidación-reducción que toman parte en la autopurificación de las corrientes de agua son mediante procesos bioquímicos y que serán discutidos en secciones subsecuentes de este capítulo. Debido a que los sólidos en el agua son necesarios para las actividades metabólicas y reproductivas de los microorganismos que degradan y estabilizan los desechos orgánicos, algunos de esos procesos están directa o indirectamente influenciados por las reacciones de disolución-precipitación que ocurren en las corrientes. Como ciertos minerales entran y salen de las soluciones, ellos llegan a ser más o menos fáciles de obtener para los microorganismos que dependen de ellos para lograr completar sus procesos vitales.

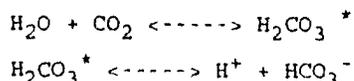
El nitrógeno y fósforo son usualmente considerados como los más esenciales nutrientes que se encuentran en los cauces. Otros elementos que son igualmente importantes para el crecimiento y reproducción de los microorganismos y el plancton, considerando que ellos necesitan una pequeña cantidad. Hierro, manganeso, cobre, zinc, molibdeno, y cobalto, son micronutrientes usualmente presentes en el agua. Las reacciones químicas naturales que toman lugar en el agua y pueden cambiar esos elementos cuando se disuelven y por consiguiente, ser aprovechados por varios organismos acuáticos.

Las reacciones químicas que ocurren en los depósitos y fondo de los lagos juegan un importante papel en la accesibilidad del fósforo. El fósforo puede entrar al cuerpo de agua dependiendo de partículas y asentarse en el fondo con esas partículas. El fósforo puede también entrar al agua como soluble ortofosfato y llegar a incorporarse en la biomasa que eventualmente se asienta en el fondo. Cuando el hierro está presente, la siguiente reacción ocurre :



El insoluble fosfato férrico se precipita y asienta en el fondo. Entonces, en la relativa ausencia de oxígeno, el hierro se reduce a forma ferrosa y los iones entran en solución. Durante la primavera o los cambios otoñales, el fósforo se mezcla por todo el cuerpo de agua, con algo de lo usado al principio por las plantas vivas y algo de lo mezclado con el hierro y reformando el insoluble compuesto de fosfato férrico, con esta precipitación otra vez se asientan en el fondo a esperar la reducción.

Las reacciones químicas que toman lugar en las corrientes y lagos pueden ayudar a estabilizar el pH de esos cuerpos de agua. Por ejemplo, las calizas y otras formas de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) que se disuelven con facilidad en aguas con contenido de  $\text{CO}_2$ .



Los iones de hidrógeno forman así reacción con el poco soluble carbonato de calcio, produciendo un calcio altamente soluble y más iones de bicarbonato.



El bicarbonato actúa como un amortiguador para proteger a la corriente de las fluctuaciones del pH que pueden ser dañinas para el sistema acuático.

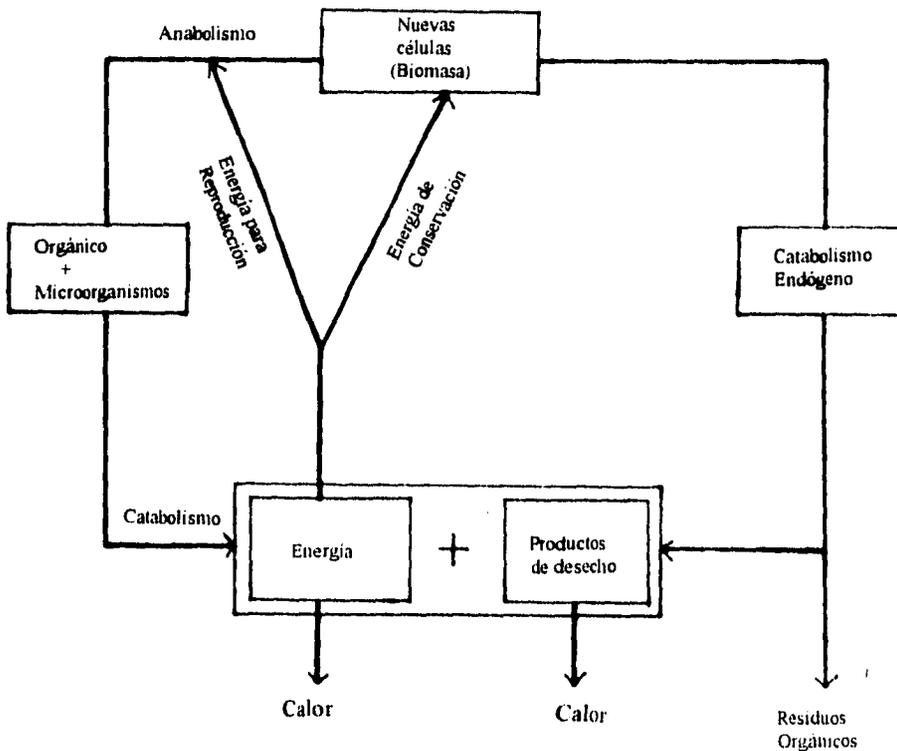
#### 4.3 Procesos bioquímicos

Muchas de las reacciones químicas que intervienen en los procesos de autopurificación se realizan biológicamente. Estas reacciones químicas no son espontáneas, ya que requieren un origen externo de energía para iniciar. En el caso de los desechos orgánicos biodegradables y otros nutrientes, esta activación de energía puede ser sustituida por microorganismos que utilizan estos materiales para alimentarse y como energético. La suma de los procesos por los cuales los organismos vivos asimilan y desintegran el alimento para subsistir, crecer y reproducirse es llamado *metabolismo*. El proceso metabólico y los organismos comprenden una parte vital de los procesos de autopurificación de los sistemas acuáticos naturales.

##### 4.3.1 Procesos metabólicos

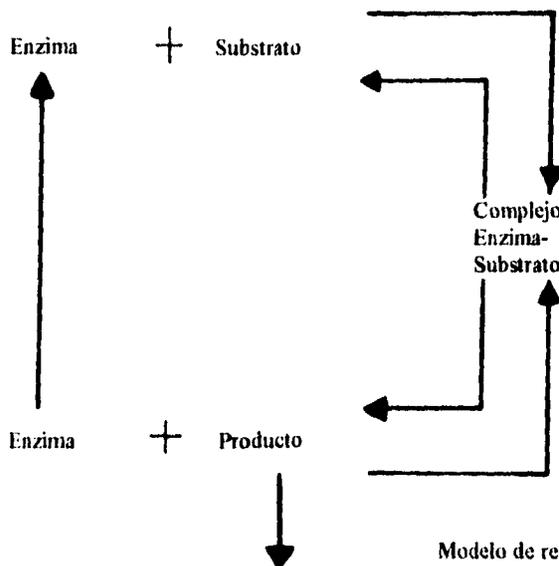
Las reacciones bioquímicas involucradas en el metabolismo son en extremo complicadas y no son motivo de este trabajo. Existen dos tipos de procesos, cada uno comprendiendo varios pasos, que ocurren simultáneamente. Un proceso, llamado *catabolismo*, provee la energía para la síntesis de nuevas células, como también para el mantenimiento de otras funciones de las células. El otro proceso, llamado *anabolismo*, provee el material necesario para el

crecimiento de las células. Cuando una fuente externa de alimento se interrumpe, los organismos usarán la comida almacenada para mantener energía, en un proceso llamado *catabolismo endógeno*. Cada tipo de microorganismo tiene su propio sistema catábólico para reaccionar específicamente y dar productos finales específicos. Un concepto generalizado de los sistemas catabólicos de importancia en los sistemas acuáticos naturales se muestra en la figura:



Trayectoria general del Proceso Metabólico.

Las enzimas juegan un gran papel en las reacciones bioquímicas. Las enzimas pueden ser consideradas como catalizadores orgánicos que influyen en reacciones sin llegar a ser propiamente un reactivo. En los procesos bioquímicos, las enzimas bajan sus necesidades de energía para iniciar las reacciones. Las enzimas entonces vuelven a su forma original para su reuso. Un modelo de reacción Enzima-Substrato (alimento) se muestra en la figura :



Modelo de reacción de las enzimas

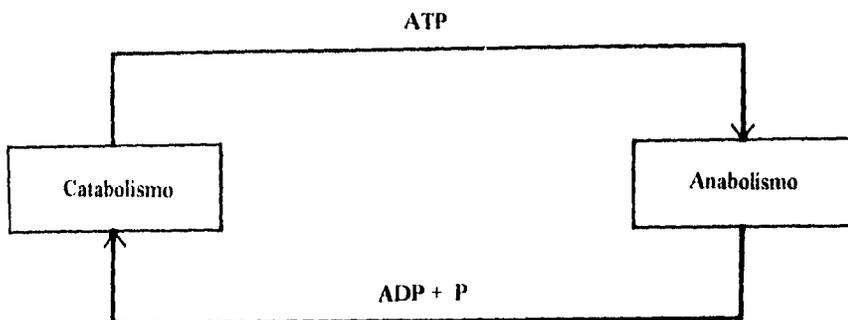
Las enzimas son complejos compuestos proteínicos y son muy específicos en términos de las reacciones que propician. Un microorganismo de esta forma necesita enzimas específicos para cada reacción en su proceso metabólico. El hecho de que las enzimas no sean consumidas completamente en el proceso metabólico es bueno, ya que esto libera a los microorganismos para que

dediquen sus energías y recursos a la formación de nuevas células antes que a la constante reconstrucción de enzimas.

Los microorganismos están provistos con enzimas que los acompañan para el aprovechamiento de tipos particulares de materia orgánica. Cuando estas enzimas son una parte normal de un microorganismo particular, ellas son llamadas *constitutivas*. Las células producen enzimas especiales, llamadas *enzimas adaptadas*, cuando se exponen inusualmente a sustancias tóxicas. Esta aclimatación (adaptación) ocurre naturalmente, aunque muy lentamente. En muchos casos, la continua presencia de una sustancia tóxica llevará a la gradual formación de una bacteria específica capaz de descomponer y utilizar los compuestos tóxicos. Por ejemplo, los fenoles fuertes, bacterias que se encuentran a menudo en las corrientes que han recibido descargas de aguas con fenoles.

La energía es transferida de las reacciones catabólicas a las reacciones anabólicas directamente de la energía de los enlaces de los fosfatos. La eliminación de hidrógeno o la separación de los enlaces carbono-carbono en el proceso catabólico libera energía. Una considerable fracción de esta energía es usada para sumar un átomo de fósforo a (adenosine) difosfato (ADP), convirtiéndolo a adenosine trifosfato (ATP). El ATP es transferido a la reacción anabólica donde el átomo extra de fósforo es eliminado, liberando la energía almacenada en la reacción de síntesis. El ADP resultante es entonces transferido de vuelta (regresado) a la

reacción catabólica para reenergizar al ATP, y el ciclo se repite. Este proceso se muestra gráficamente en la figura:



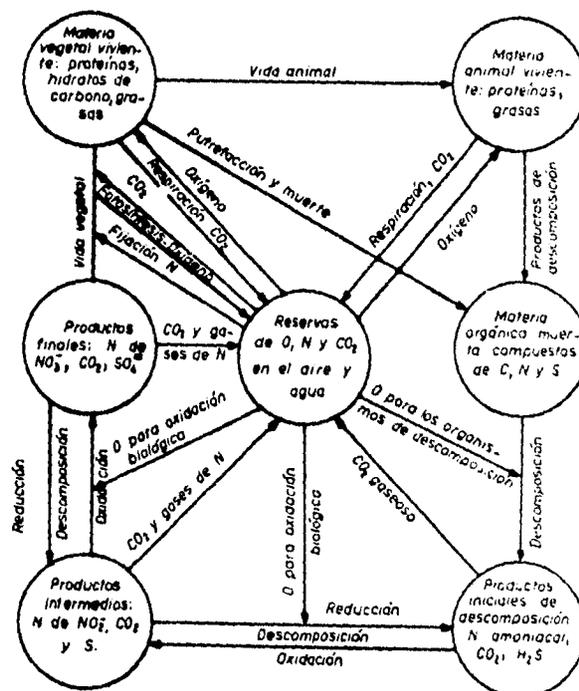
**Modelo de transferencia de Energía**

Esta descripción es sobre simplificada, como hay varios pasos en el proceso, cada ser fija sus propias enzimas.

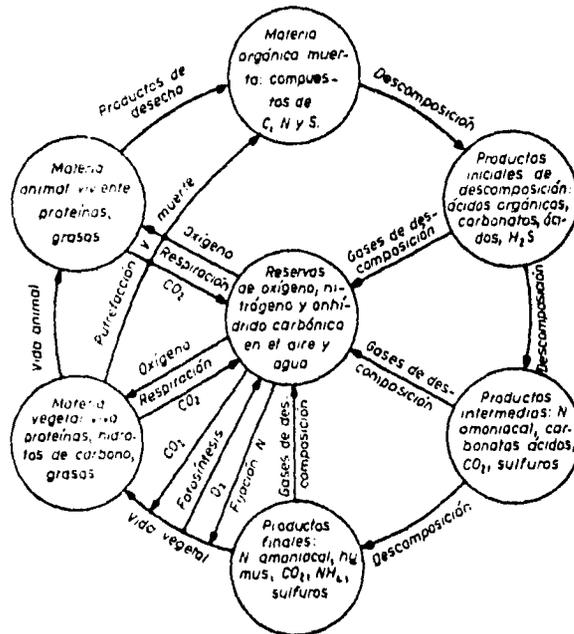
El proceso catabólico comprende cualquiera de las dos reacciones de oxidación o reducción del material en la capa inferior (proveyendo alimento). Si el oxígeno está disponible, será adicionado al substrato y los productos residuales se oxidarán. En ausencia de oxígeno libre, el oxígeno puede ser liberado de los compuestos de oxígeno e hidrógeno adicionado a elementos del substrato. El resultado es: productos residuales formados por la reducción de los compuestos. Las reacciones de oxidación son más eficientes porque liberan grandes cantidades de energía. Consecuentemente, el metabolismo aeróbico predomina cuando el

oxígeno está disponible. Esto es bueno porque la oxidación de la materia en un proceso aeróbico es menos inconveniente en un sistema natural de agua, que la reducción de materia en un proceso anaeróbico. Sin embargo, el metabolismo anaeróbico juega un importante papel en la asimilación de desechos en aguas con bajo contenido de oxígeno disuelto y sedimentación.

Algunos pasos intermedios pueden intervenir en el metabolismo de la materia orgánica. Cada paso intermedio tiene su propio producto final, algunos de los cuales pueden llegar a ser substrato en la subsecuente reacción. Esto se ilustra en el ciclo del nitrógeno, carbono, y azufre.



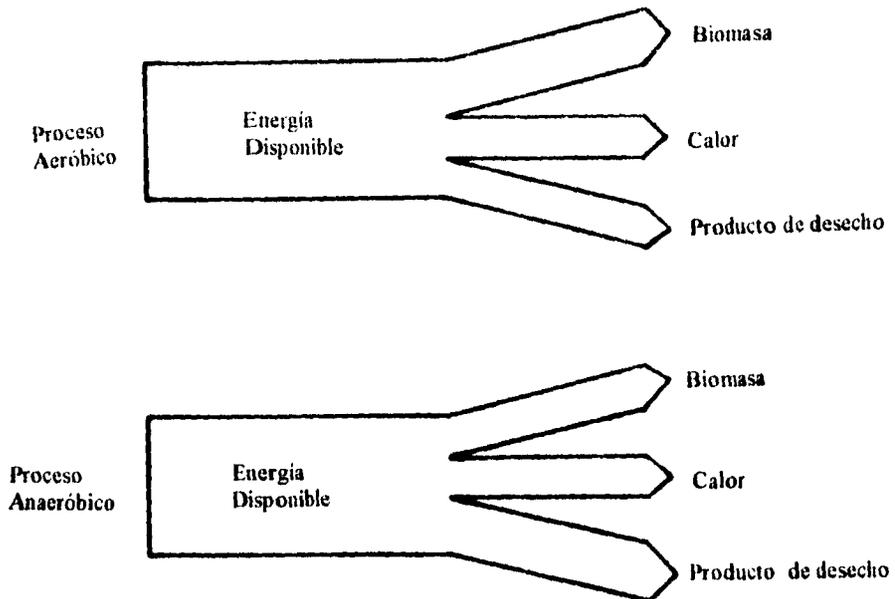
Descomposición aerobia del ciclo del nitrógeno, carbono y azufre. (Calidad del Agua Potable. P. J. Caballero. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la U. de Chile. 1965.)



Descomposición anaerobia del ciclo del nitrógeno, carbono y azufre.  
(Sewage Treatment. Imhoff y Fair.)

Como la materia, la energía no puede ser creada ni destruida, la energía liberada en el proceso metabólico se transfiere a la materia celular sintetizada en el proceso anabólico, almacenado en el desecho del catabolismo, o liberando como calor o energía mecánica. Las cantidades relativas dispersadas de esta manera dependen de la naturaleza de la reacción, como se describe en la figura.

El producto final (resultado) del catabolismo aeróbico es de baja energía, los compuestos estables, con más energía almacenada en la materia celular. En contraste, más de la energía liberada en el catabolismo anaeróbico permanece en la materia de desecho.



**Balance de la Energía en el proceso metabólico ( Steel y Mc Ghee )**

**4.3.2 Microorganismos en sistemas acuáticos naturales**

La nomenclatura clásica divide a los organismos vivos en dos grandes subdivisiones o reinos, plantas y animales. El término *protista* es usado frecuentemente para clasificar a los organismos en los que no existen células específicas, esto es, que cada célula es capaz de realizar todas las funciones de esos organismos. Los miembros del grupo *protista* son llamados *protistas* y pueden pertenecer a cualquiera de los reinos (animal o vegetal) bajo la nomenclatura clásica. Muchos de los organismos de significación en los procesos naturales de purificación (bacterias, algas, y protozoarios) son *protistas*.

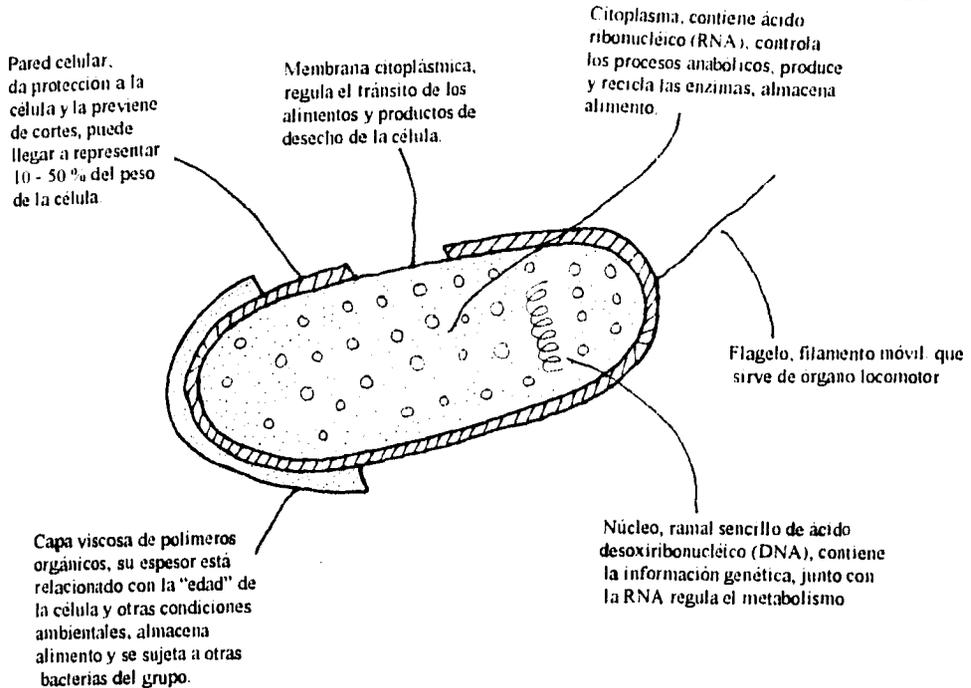
### 4.3.3 Bacterias

Las bacterias son los descomponedores primarios de la materia orgánica. Las bacterias son unicélulas protistas que aprovechan el alimento disuelto. Aunque las bacterias pueden enlazarse en cadenas (o racimos), cada célula es un organismo independiente, capaz de realizar todas sus funciones vitales necesarias. La estructura de las células bacterianas típicas de los sistemas naturales se ilustran en la figura. Un listado de la abundancia (afluencia) de elementos de que constan las células se presenta en la tabla.

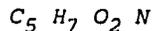
#### Composición de las células bacterianas

Elemento	Concentración % Peso
Carbón	50
Oxígeno	20
Nitrógeno	14
Hidrógeno	8
Fósforo	3
Azufre	1
Potasio	1
Sodio	1
Calcio	0.5
Magnesio	0.5
Cloro	0.5
Hierro	0.2
Otros	0.3

Fuente : Gaudy y Gaudy



La fórmula química que describe a las bacterias celulares es:



La energía para el crecimiento y reproducción bacteriana se deriva de la oxidación bioquímica de los compuestos orgánicos e inorgánicos, o de la reducción de esos compuestos. Pocas bacterias son capaces de utilizar energía de los rayos ultravioletas (luz solar). La materia puede derivarse de los compuestos orgánicos o inorgánicos. Las bacterias son frecuentemente clasificadas de acuerdo a la energía y materia que requieren. Los organismos que son derivados, ambas energía y materia, de fuentes inorgánicas son llamados *autótrofos*, mientras que las bacterias que obtienen la energía y materia de los

compuestos orgánicos son llamados *heterótrofos*. Los *fotótrofos*, son bacterias que utilizan la luz del sol como fuente de energía y sustancias inorgánicas para materia, y juegan un papel insignificante en los procesos naturales de auto-depuración del agua. Las bacterias *heterótrofas* son las especies más importantes en la degradación de la materia orgánica. Las bacterias *heterótrofas aerobias* requieren oxígeno en sus procesos metabólicos, mientras que las bacterias *heterótrofas anaerobias* utilizan materia orgánica en ausencia de oxígeno. Existe un tercer grupo, llamado *heterótrofos facultativos*, que funcionan como aerobios cuando el oxígeno está presente, pero cambian al proceso anaeróbico cuando el oxígeno se agota. La función más importante de las bacterias autótrofas es la oxidación del nitrógeno y los sulfuros para estabilizar los compuestos resultantes.

#### 4.3.4 Protozoarios

Como las bacterias, los protozoarios son organismos unicelulares que se reproducen por separación binaria. A diferencia de las bacterias, los protozoarios son una o dos categorías más grandes que las bacterias, la dieta de los protozoarios a menudo incluye bacterias, así como organismos coloidales. Existen varias especies acuáticas de protozoarios, muchas de las cuales son estrictamente aerobias. Como las bacterias heterótrofas, ellas obtienen la energía y la materia para el crecimiento y la reproducción de las mismas fuentes de alimento orgánico.

El más importante grupo de protozoarios en los sistemas acuáticos naturales es el *Ciliata* (*cilio*). Estos organismos se caracterizan por tener filamentos protoplasmáticos llamados *cilios* y estar nadando libremente o andar al acecho (dependiendo de las partículas sólidas). Los protozoarios que andan nadando usan un rápido movimiento de su cilia para propulsarse en el agua en busca de alimento. Los protozoarios que andan al acecho de cacería usan su cilia para envolver y atraer su alimento. Los protozoarios son voraces consumidores de materia orgánica y son importantes miembros de la comunidad acuática.

#### 4.3.5 Algas

Las algas son organismos autótrofos, fotosintéticos y, aunque no utilizan los compuestos orgánicos directamente, juegan un papel significativo en los procesos naturales de purificación. En presencia de luz solar, las algas asimilan los productos desechados por las bacterias heterótrofas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , etc.) mientras obtienen energía de la luz solar.

Uno de los productos de desecho (residuos, sobrantes) de esta reacción es el oxígeno. Cuando la luz solar no está presente, las algas catabolizan el alimento almacenado por energía y utilizan el oxígeno en el proceso. Este catabolismo diurno, natural de las algas, es un factor importante en el balance de oxígeno de los cuerpos de agua naturales que son ricos en nutrientes.

Existen literalmente miles de especies de algas, de varios tamaños, formas, y colores. Las células de las algas se pueden encontrar en racimos, en largos filamentos dependiendo de lo estancado o lo bajo del material, o las partículas que permanezcan suspendidas en el agua. Algunas especies de algas pueden tener efectos negativos en la calidad del agua debido a que producen sustancias aceitosas que provocan problemas de sabor, color y olor.

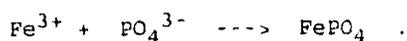
#### *OTROS ORGANISMOS.*

Otros microorganismos que también juegan papeles importantes en los procesos naturales de purificación son los *Rotíferos* y *Crustáceos*, que son especies del más bajo orden, que consumen bacterias, protozoarios y algas. Ellos ayudan a mantener un balance en la población de los productores primarios y sirven como un importante enlace en la cadena por la cual la materia orgánica pasa a la categoría animal. Las lombrices de lodo como las *tubículas* y *sanguijuelas*, como también otros helmintos (gusanos) y larvas de insectos, se alimentan en los depósitos de fango y ayudan a degradar y hacer solubles las partículas orgánicas.

#### 4.4 Respuesta de las corrientes a los desechos orgánicos biodegradables

La autodepuración de un sistema acuático natural es un complejo proceso que involucra procesos físicos, químicos y biológicos que trabajan simultáneamente. Las reacciones químicas y biológicas son transformaciones de los procesos en vez de eliminación de

procesos. La naturaleza, y tal vez las fases, de las aguas residuales pueden ser cambiadas, pero los productos (materia contaminante) permanecen en el agua hasta que un proceso físico los elimina (remueve) de suspensión por sedimentación o por transferencias a la atmósfera. Esto se muestra por la reacción en la ecuación:



Aquí el proceso químico combina fierro y fosfato en forma sólida, y el proceso físico de sedimentación los remueve de la suspensión. Otro ejemplo es el metabolismo orgánico de los microorganismos. Las reacciones bioquímicas transforman la materia orgánica a sólidos biológicos y otros productos que pueden ser reciclados varias veces (ver figura de ciclos nitrógeno, carbono y azufre) antes de empezar a incorporarse al fondo de sedimentos o liberarse como gases a la atmósfera, ambos por procesos físicos.

Los procesos de Autodepuración pueden ser modelados, siempre que las características de los desechos y el sistema de variables del cuerpo de agua sea conocido. Los procesos de modelación son complicados en lagos y estuarios por que las características para la dilución y dispersión varían con respecto al tiempo.

#### 4.5 Balance del oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es uno de los elementos más importantes de los sistemas acuáticos naturales. Los peces y otras especies acuáticas requieren oxígeno, y una corriente debe tener un mínimo de 2 mg/l de oxígeno disuelto para mantener un alto nivel en las

formas de vida. Un mínimo de 4 mg/l de oxígeno disuelto se requiere para peces grandes y algunas especies requieren más. En adición a este aspecto de sustentación de vida, el oxígeno es importante porque el resultado de las reacciones químicas y bioquímicas en un sistema anaeróbico frecuentemente producen sensaciones desagradables de color, sabor y olores en el agua.

Cuando se descarga a una corriente, que contiene oxígeno disuelto, materia orgánica biodegradable, los microorganismos empiezan el proceso metabólico que transforma la materia orgánica, junto con el oxígeno disuelto, en las nuevas células y oxidando los productos residuales. La cantidad de oxígeno que se requiere para esta transformación es la demanda bioquímica de oxígeno. La velocidad a la cual se disuelve el oxígeno dependerá de la cantidad de materia orgánica, la facilidad con la cual es biodegradada esta materia, y la capacidad de dilución de la corriente.

El oxígeno disuelto que se usa de la corriente deberá ser sustituido o se presentarán condiciones anaeróbicas. Se conocen dos mecanismos que aportan oxígeno a las aguas superficiales:

- 1) Disolución de oxígeno de la atmósfera, llamada *reaeración*.
- 2) Producción de oxígeno por la fotosíntesis de las algas.

#### 4.6 Reaeración

Los principios del equilibrio entre el agua y el gas, en contacto con cada uno, se describen en la sección *Transferencia de gas*. El

equilibrio de las concentraciones de oxígeno en el agua varia a diferentes temperaturas y valores de salinidad.

Cuando las concentraciones de oxígeno disuelto están por debajo de los valores de equilibrio, el movimiento real de oxígeno será de la atmósfera al agua. La diferencia entre la concentración del equilibrio y la concentración actual es llamado *DEFICIT DE OXIGENO* y está representado matemáticamente por :

$$D = C_s - C \quad \text{Ec.-----> (4.1)}$$

donde  $D$  es el déficit de oxígeno disuelto,  $C_s$  y  $C$  son las concentraciones de equilibrio y la concentración actual, respectivamente. Las unidades de todos los términos son en mg/l de oxígeno. Para condiciones de equilibrio constante,  $C_s$  no cambia, la velocidad de cambio en el déficit es:

$$\frac{dD}{dt} = - \frac{dc}{dt} \quad \text{Ec.-----> (4.2)}$$

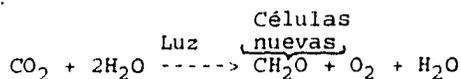
De esta manera, el déficit se incrementa a la misma velocidad que el oxígeno se consume.

El déficit de oxígeno disuelto depende de la reaeración de la ecuación anterior, la reaeración aumenta como la concentración de oxígeno disuelto disminuye.

#### 4.7 Fotosíntesis de las algas

En presencia de luz solar, las algas metabolizan los compuestos inorgánicos, con uno de los productos de desecho que contenga

oxígeno. La siguiente fórmula es una representación simplificada de esta reacción:



De este modo el oxígeno se libera inmediatamente, restaurando el oxígeno disuelto en el agua. En presencia de excesivos nutrientes y luz solar, las algas pueden producir mucho oxígeno hasta el grado de llegar a sobre saturar el agua. Esto es,  $C > C_s$  y el déficit de oxígeno disuelto tendrá un valor negativo. Por el contrario, factores asociados con la sobre población de las algas, frecuentemente excede el valor de los beneficios que el oxígeno le produce. Puesto que las algas consumen los productos de desecho del metabolismo bacterial, la mayor actividad de las algas ocurre en el fondo de las corrientes, el área de mayor actividad bacterial está donde el oxígeno es más carente. Además, en ausencia de luz, las algas obtienen la energía del catabolismo *endógeno*, representado por la siguiente reacción :



Esta reacción contribuye a la demanda de oxígeno en vez de proveer oxígeno a la corriente.

La diferencia en el catabolismo de las algas durante los períodos de luz y oscuridad resulta de las variaciones diurnas en el oxígeno disuelto de la corriente con fuerte crecimiento de algas. La mayor concentración de oxígeno disuelto a menudo se presenta alrededor de la 2 a 4 P.M., mientras que los niveles más bajos ocurren antes del amanecer. Desafortunadamente, el exceso de oxígeno generado durante el día no puede ser almacenado para

consumirse en la noche, como éste es despedido a la atmósfera, para mantener el equilibrio, en los casos en que es muy fuerte el crecimiento de las algas, el catabolismo *endógeno* puede disminuir el oxígeno disuelto hasta el punto en que se presente la muerte de los peces.

Debido a la variabilidad de la producción fotosintética de oxígeno, la reaeración es considerada la más segura fuente de oxígeno disuelto. Sería necesario, incluir oxígeno fotosintético en un modelo de oxígeno disuelto para aguas donde se advierta excesiva proliferación de algas.

## V MODELO MATEMATICO DEL OXIGENO DISUELTO

La mayoría de los modelos para determinar la concentración de oxígeno disuelto en corrientes naturales, publicados en la literatura técnica, están referidos de alguna manera al modelo desarrollado por *STREETER* y *PHELPS* en 1925. Este modelo pronostica los cambios en el déficit de oxígeno disuelto como una función de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la reaeración de la corriente.

### 5.1 Velocidad de eliminación del oxígeno.

La velocidad a la cual el oxígeno disuelto (OD) se consume en la corriente coincide con la velocidad a la cual se ejerce la DBO. Esta relación se puede expresar en forma matemática de la siguiente manera :

$$\frac{dy}{dt} = - \frac{dc}{dt}$$

Donde  $dy/dt$  es la diferencial de velocidad y  $-dc/dt$  es la diferencial de velocidad a la cual se ejerce la DBO, sustituyendo en la ecuación (4.2) :

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dD}{dt} \quad \text{-----> (5.0)}$$

confirmando que un incremento en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) resulta en un aumento de la velocidad de variación del déficit de oxígeno. Si se describe que :

$$Y = L_0 - L_t$$

Ya que  $L_0$  es la DBO última y por consiguiente arreglando los valores :

$$\frac{dy}{dt} = - dL_t \quad \text{-----> (5.1)}$$

de la ecuación :

$$\frac{dL_t}{dt} = - k L_t$$

sustituyendo en la ecuación (5.1) y (5.0), obtenemos la siguiente relación :

$$\frac{dD}{dt} = k L_t \quad \text{-----> (5.2)}$$

en la que las condiciones de la velocidad de variación del déficit de oxígeno disuelto en un tiempo  $t$  debido a la DBO es una reacción de primer orden proporcional al oxígeno equivalente de los residuos orgánicos. Una forma más conveniente de la ecuación (5.2) es :

$$r_D = k_1 L_t \quad \text{-----> (5.3)}$$

donde  $r_D$  reemplaza la diferencial de la velocidad de variación en el déficit debido al consumo de oxígeno. La constante de velocidad  $k_1$  es un parámetro que se deriva de pruebas de laboratorio realizadas con aguas residuales. La constante de velocidad está ajustada por cambios de temperatura, usualmente no se ajusta para otros efectos de la dilución en las corrientes de agua.

## 5.2 VELOCIDAD DE OXIGENACION

Como se anotó en la sección referente al balance de oxígeno disuelto, la velocidad de reareación es una reacción importante con respecto al déficit de oxígeno. Está expresado matemáticamente por :

$$r_R = - k_2 D \quad \text{-----> (5.4)}$$

donde  $r_R$  es la velocidad a la que el oxígeno de la atmósfera se disuelve en el agua,  $D$  es el déficit de oxígeno y  $k_2$  es una constante de velocidad de reareación para un sistema específico. El signo negativo refleja el hecho de que un incremento en el suministro de oxígeno debido a la reareación reduce el déficit de oxígeno. Los factores que afectan a  $k_2$  incluyen la turbulencia de la corriente (una función de la velocidad y características del canal), sección, tirante medio, y la temperatura. Existen algunos modelos para determinar los valores numéricos de  $k_2$ , el desarrollo de los cuales está más allá del alcance de este trabajo. Un rango de valores típicos aplicables a varios regímenes de flujo se da en la siguiente tabla :

### CONSTANTES DE REAERACION

Cuerpo de agua	Rangos de $k_2$ a 20° C, base e
Lagunas pequeñas y estanques	0.1 - 0.23
Corrientes lentas y grandes lagos	0.23 - 0.35
Grandes corrientes de baja velocidad	0.35 - 0.46
Grandes corrientes a velocidad moderada	0.46 - 0.69
Corrientes de gran velocidad	0.69 - 1.15
Rápidos y caídas	más de 1.15

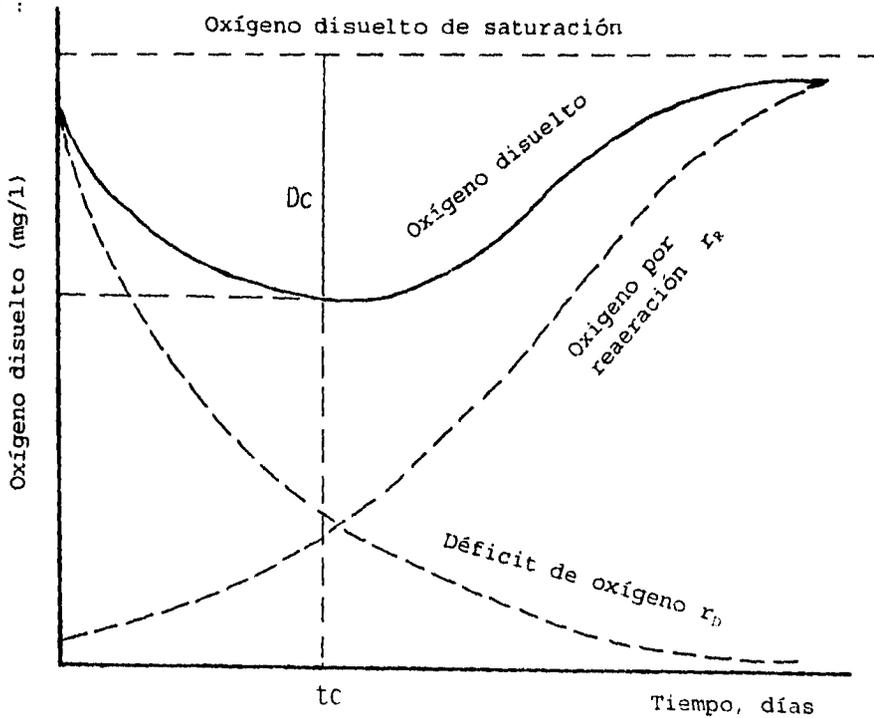
Fuente : Metcalf y Eddy (Referencia No. 14)

### 5.3 CURVA DE OXIGENACION

El déficit de oxígeno en una corriente es una función del consumo de oxígeno y la reareación. Revisando la ec. (5.3) y (5.4) se muestra que esos dos procesos tienen efectos opuestos en el déficit de oxígeno. Esto se muestra en la gráfica 5.a. La velocidad de variación en el déficit es la suma de dos reacciones:

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dt} &= r_D + r_R \\ &= k_1 L_t - k_2 D \end{aligned} \quad \text{-----> (5.5)}$$

La concentración actual de oxígeno ( $C_s - D_t$ ) tiene una caída característica, como se muestra en la figura siguiente, que resulta ser la curva de oxigenación, comúnmente usada para describir el proceso :



Características de la curva de oxigenación

El déficit de oxígeno disuelto, y por consiguiente la concentración de oxígeno, en cualquier instante después de la descarga puede ser determinado integrando la ecuación (5.5). Esto, sin embargo, no es una operación directa. Llamando a la ecuación

$$L_t = L_0 e^{-k_1 t} \quad (*) \text{nota}$$

y arreglando la ecuación (5.5), obtenemos la siguiente igualdad:

$$\frac{dD}{dt} + k_2 D = k_1 L_0 e^{-k_1 t} \quad \text{----->} \quad (5.6)$$

La cual es una diferencial de primer orden de la forma :

$$\frac{dy}{dx} + Py = Q$$

donde P y Q son funciones de x. La integración del factor ( $\int P dx$ ) es necesario para la solución de este tipo de ecuación. Para la ecuación (5.6), el factor de integración es:

$$e^{\int k_2 dt} = e^{k_2 t} \quad \text{----->} \quad (5.7)$$

Multiplicando ambos miembros de la ec. (6) por el término derecho de la ecuación (5.7) resulta:

$$e^{k_2 t} \frac{dD}{dt} + k_2 D e^{k_2 t} = k_1 L_0 e^{(k_2 - k_1)t} \quad \text{----->} \quad (5.8)$$

El término izquierdo de esta ecuación puede ser factorizado de la siguiente manera :

$$e^{k_2 t} \frac{dD}{dt} + k_2 D e^{k_2 t} = \frac{d}{dt} D e^{k_2 t}$$

Separando variables e integrando:

$$\int d D e^{k_2 t} = k_1 L_0 \int e^{(k_2 - k_1)t} dt$$

---

(\*) nota Los valores numéricos que aparecen en los exponentes K's serán tomados como subíndices de los mismos.

de la integración de los cuales resulta:

$$D e^{k_2 t} = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} (e^{(k_2 - k_1)t}) + C \quad (5.9)$$

la constante de integración  $C$  puede ser determinada conociendo las condiciones límite, esto es,  $D = D_0$  en  $t = 0$ , de esta manera:

$$D_0 = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} + C$$

y

$$C = D_0 - \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1}$$

la solución final será :

$$D e^{k_2 t} = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} (e^{(k_2 - k_1)t}) + D_0 - \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1}$$

$$\text{ó} \quad D = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} \frac{(e^{(k_2 - k_1)t})}{e^{k_2 t}} - \frac{k_1 L_0}{(k_2 - k_1) e^{k_2 t}} + \frac{D_0}{e^{k_2 t}}$$

y la forma final :

$$D = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + D_0 e^{-k_2 t} \quad (5.10)$$

En esta ecuación,  $t$  representa el tiempo de recorrido en la corriente desde el punto de descarga y es la única variable independiente en la ecuación. El tiempo de recorrido del punto de descarga a cualquier punto dado aguas abajo de la corriente es :

$$t = \frac{x}{u} \quad (5.11)$$

donde  $x$  es la distancia a lo largo de la corriente y  $u$  es la velocidad de la misma. Las unidades de  $t$  deberán estar siempre en días. Sustituyendo valores por  $t$ , o  $x/u$ , en la ecuación (5.10), resultará en un valor de  $D$  para ese punto en la

corriente. El punto más importante en la curva de oxígeno es a menudo el punto de más baja concentración de oxígeno, por que este punto representa el impacto máximo en oxígeno disuelto (OD) debido a las descargas de aguas residuales. Este punto es llamado *déficit crítico*  $D_c$ , y el tiempo correspondiente a este punto es conocido como *tiempo crítico*  $t_c$ . Admitiendo que la velocidad de variación del déficit es cero en el punto del déficit máximo,  $D_c$  se puede determinar por medio de la ecuación (5.6) :

$$\begin{aligned}
 0 + k_2 D_c &= k_1 L_0 e^{-k_1 t_c} \\
 \text{ó} \quad k_2 D_c &= k_1 L_0 e^{-k_1 t_c} \\
 \text{y} \quad D_c &= \frac{k_1 L_0 e^{-k_1 t_c}}{k_2} \quad \text{-----} > (5.12)
 \end{aligned}$$

La solución de esta ecuación depende de un valor numérico para  $t_c$ , el cual es más difícil de obtener. Primero, la ecuación (5.10) se modifica y se iguala a cero, otra vez  $D_c$  será un máximo en el punto  $t_c$ .

$$0 = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} (-k_1 e^{-k_1 t_c} + k_2 e^{-k_2 t_c}) - k_2 D_0 e^{-k_2 t_c}$$

dividiendo entre :  $e^{-k_2 t_c}$

$$0 = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} (-k_1 e^{(k_2 - k_1)t_c} + k_2) - k_2 D_0$$

ordenando términos :

$$\begin{aligned}
 \text{y} \quad k_2 D_0 \frac{k_2 - k_1}{k_1 L_0} &= k_2 - k_1 e^{(k_2 - k_1)t_c} \\
 k_1 e^{(k_2 - k_1)t_c} &= k_2 - D_0 \frac{k_2}{k_1} \frac{k_2 - k_1}{L_0}
 \end{aligned}$$

dividiendo entre  $k_1$  y tomando logaritmos en ambos miembros:

$$(k_2 - k_1) t_c = \text{Ln} \left[ \left( \frac{k_2}{k_1} - D_o \frac{k_2}{k_1^2} \frac{k_2 - k_1}{L_o} \right) \right]$$

o de una forma más convencional:

$$t_c = \frac{1}{k_2 - k_1} \text{Ln} \left[ \frac{K_2}{k_1} \left( 1 - D_o \frac{k_2 - k_1}{L_o} \right) \right] \quad \text{---> (5.13)}$$

Las ecuaciones (5.12) y (5.13) pueden usarse para determinar el nivel crítico de oxígeno en la corriente y la posición en la cual ocurrirá.

#### 5.4 LIMITACIONES DE LA CURVA DE OXIGENACION

Las limitaciones de la curva de oxigenación son aparentes. La velocidad de desoxigenación y la velocidad de reaeración están afectadas por algunas variables para las cuales el modelo no es aplicable.

##### 5.4.1 Variables de la DBO

Pueden existir descargas adicionales que se deben tomar en cuenta para subdividir una corriente en extensiones cortas, cada una para un punto representativo. Las corrientes tributarias que descargan gan en la corriente principal, deberán ser tomadas en consideración, así como el aumento del flujo que ha recibido la corriente.

Hasta cuando se ha tenido el cuidado de considerar toda la carga orgánica que está contenida en los puntos de descarga, la demanda bioquímica de oxígeno de una corriente puede estar afectada por

otros factores no considerados por la constante  $k_1$ . La respiración de las algas en ausencia de luz solar, los procesos de nitrificación que incrementan la demanda de oxígeno, y la presencia de depósitos sedimentados en zonas estancadas, pueden todos incrementar la DBO de la corriente. En corrientes superficiales o poco profundas, el crecimiento de las masas microbiales depende del lecho de la corriente, pudiendo ser más eficiente el consumo de materia orgánica, y consecuentemente el consumo de más oxígeno disuelto que el que consumen los microorganismos suspendidos utilizados en las pruebas de laboratorio para la determinación de la DBO. Este hecho, no obstante que es reconocido en la ingeniería de sistemas de tratamiento, es frecuentemente ignorado en los estudios de auto-depuración.

#### 5.4.2 Variables de Reaeración

La restitución del oxígeno está afectada también por varios factores no tomados en cuenta por las fórmulas empleadas para la determinación de la curva de oxigenación, como la oxigenación debida a la fotosíntesis de las algas. Adicionalmente se suponen condiciones constantes a todo lo largo del canal de la corriente, debido a que tales condiciones constantes rara vez se presentan, las corrientes se deben de subdividir en extensiones con características constantes y asignar un valor de  $k_2$  a cada una de ellas. Aun con la subdivisión de tramos, en la determinación de la constante  $k_2$  es probable que un área esté propensa a error en la curva de oxigenación, por la no suposición teórica de las

características del flujo - sección del canal, obstáculos, zonas estancadas, efectos por represamiento, y otras variables tales, es poco probable ajustar perfectamente una corriente particular. Se han hecho adiciones al modelo básico de "STREETER Y PHELPS" que incorporan los efectos de la fotosíntesis, los procesos de nitrificación, y la sedimentación - flotación de materia orgánica, estos modelos requieren mucha más base de datos para su empleo.

#### 5.5 CONFIRMACION DE LA CURVA DE OXIGENACION

El perfil del OD obtenido del modelo matemático debería estar confirmado con los métodos de medición de campo. Idealmente, se deberá muestrear bajo condiciones de amplio conocimiento de las descargas de aguas residuales y la hidrología de la corriente. Para realizar las mediciones de los parámetros es deseable que se hagan muestreos diarios durante un mes de clima cálido y con bajo flujo de la corriente. Una vez que el déficit de OD y el tiempo crítico para la concentración de  $O_2$  ha sido obtenido por una detallada inspección de la calidad del agua, la curva de oxigenación puede ser usada para prever condiciones de la corriente que se pueden esperar para descargas de aguas residuales y flujos de la corriente.

#### 5.6 DESCARGA ORGANICA Y LA ECOLOGIA DE LA CORRIENTE

En adición a las variaciones en las concentraciones de oxígeno, muchos otros cambio físicos, químicos y biológicos ocurren en las corrientes después de las descargas de materia orgánica biodegradable. Conjuntamente con el suministro de oxígeno, estos

procesos y sus consecuencias, influyen grandemente a la ecología (la relación entre los organismos vivos y su medio ambiente) de la corriente. Así como el balance de oxígeno, el balance ecológico de una corriente que recibe una descarga orgánica biodegradable puede ser modelado. La mayoría de los modelos suponen que los desechos orgánicos están compuestos principalmente de aguas residuales municipales y que no contienen cantidades significativas de materia que pudiera ser tóxica a la flora y la fauna de la corriente.

En los modelos ecológicos usualmente se divide la corriente en tramos, o zonas, en las cuales predominan ciertos procesos o especies. El modelo más comúnmente usado en los E.U.A. es el propuesto por Whipple, Fair y Whipple. Este modelo divide la corriente en cuatro zonas clasificadas como: de degradación, de descomposición activa, de recuperación y de aguas claras. Enseguida se presenta un resumen de las características físicas, químicas y biológicas de cada zona mencionada:

**Zona.-** Degradación (zona 2)

**Características Físicas.-**

El agua es turbia; hay depósitos de lodo y desechos flotando.

**Características Químicas.-**

El oxígeno se reduce casi al 40 % de la saturación.

**Características Biológicas.-**

Los peces y las algas verdes casi desaparecen; las formas litorales de algas verdes y azul-verde son arrastradas

frecuentemente de las piedras. Estas incluyen *Stigeoclonium*, *Oscillatoria*, y *Ulothrix*. Las formas del fondo en el lodo incluyen lombrices rojizas (Tubículas) parecidas a las lombrices de tierra, tales como *Tubifex* y *Limnodrilus*. Los hongos de agua son típicamente blancos, verde olivo, gris cemento, café mohoso. Aparecen *Sphaerotilus natans*, *Leptomitus*, y *Achlya*, así como protozoarios ciliados o ciliatas tales como *Carchesium*, *Epistylis* y *Vorticella*.

**Zona.-** Descomposición activa (zona 3)

**Características Físicas.-**

El agua es grisácea y más obscura que en la zona de degradación; se forma espuma; se pueden llegar a presentar condiciones sépticas.

**Características Químicas.-**

Los niveles de oxígeno se mueven entre el 40 % de la saturación y cero; entonces la descomposición activa disminuye y el contenido de oxígeno aumenta, y se despiden metano, hidrógeno y sulfuro.

**Características Biológicas.-**

Las bacterias prosperan; las anaerobias desplazan a las aerobias, lo cual se presenta en lo más bajo de la zona. Los protozoarios siguen el curso de las bacterias aerobias, primero disminuyendo y después reapareciendo. Los hongos siguen un curso similar, desapareciendo bajo las condiciones sépticas y luego reaparecen. Los organismos son filiformes y desarrollan unos colores rosa, crema y grisáceos. se presentan pocas algas en la extensión final de la zona. Las *Tubifex* (tubículas) se presentan únicamente al

principio y al final de la zona. Las *Psychoda* (mosca de aguas fecales) larvas se encuentran en toda la zona, pero principalmente en la zona más séptica, gusanos (*Eristabis*) y larvas de mosquitos (*Culex*) son comunes. No existen peces vivos.

**Zona.-** Recuperación (zona 4)

**Características Físicas.-**

El agua se aclara.

**Características Químicas.-**

El contenido de OD oscila por encima del 40 % de saturación; se presentan los nitratos.

**Características Biológicas.-**

Los protozoarios, rotíferas, y crustáceos aparecen, se presentan los hongos, las algas aparecen en el orden siguiente: *Cyanophyceae*, *Chlorophyceae*, y *diatomeas*. Plantas (esponjas, briozoarios) aparecen. Organismos como tubifex, babosas, moluscos, y larvas de insectos. Carpas, rémoras y otras formas de peces resistentes se encuentran en esta etapa de recuperación.

**Zona.-** De aguas claras (zonas 1 y 5)

**Características Físicas.-**

Las condiciones naturales de la corriente se restauran.

**Características Químicas.-**

El OD está próximo a la saturación.

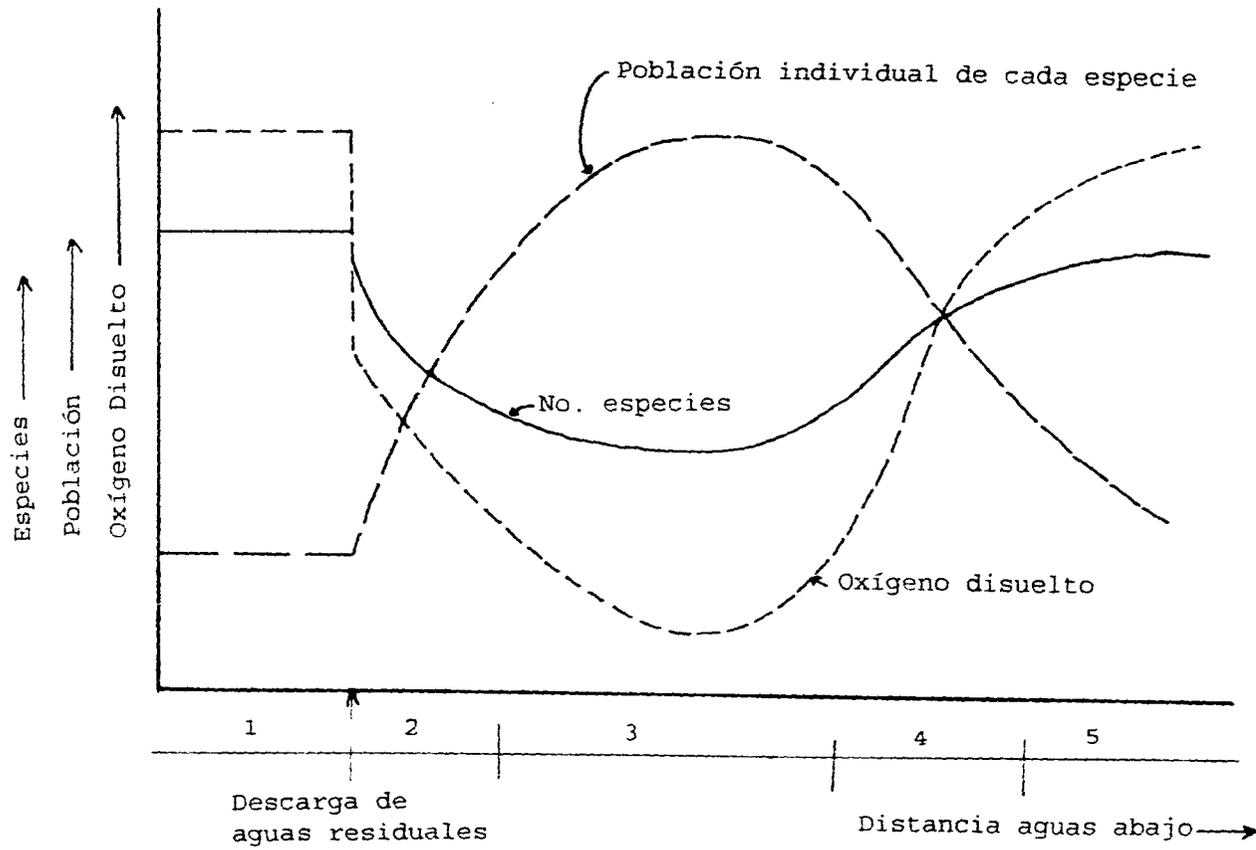
**Características Biológicas.-**

Se encuentran peces diversos, fríganos, plancton y variedades de mosquitos.

Muchas de las características físicas descritas en el resumen, pueden ser notadas a simple vista, pero las características químicas (con excepción de la presencia de olores de  $H_2S$ ) sólo se pueden determinar por medio de muestreos y pruebas de laboratorio.

Las especies biológicas y sus cantidades tienen marcada diferencia de una zona a otra, y la diversidad de especies es un medio primario para establecer los límites. La variedad de especies y el número de organismos de cada especie se ilustra en la figura 5.b.

El suministro de alimento es un factor primario en la determinación de los organismos que han de predominar. Cerca del punto de descarga, predominan las bacterias, protozoarios y humus. Las bacterias encuentran abundante suministro de alimento en forma de carbohidratos, proteínas y grasas. Como estos microorganismos descomponen los desechos orgánicos, los convierten en nutrientes, compuestos tales como nitratos, fosfatos y dióxido de carbono. La población bacterial prospera hasta que el OD y/o la provisión de alimento se agota. Debido a que las bacterias suministran alimento para los protozoarios, ciliates, rotíferos y crustáceos, estas altas formas de vida disminuyen cuando las bacterias mueren.

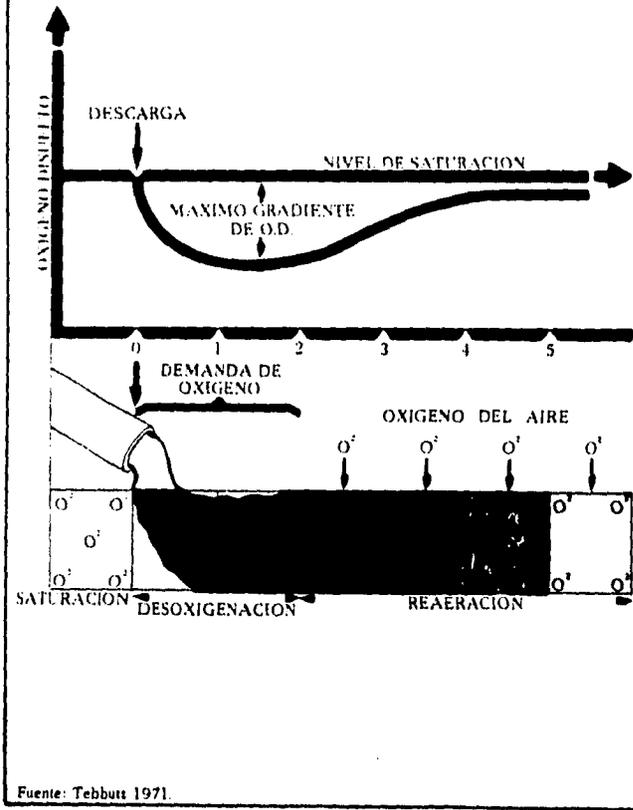


Cambios en la cantidad de macroorganismos causados por descargas en una corriente superficial.

(de Kemmerer Ref. No. 21)

Figura 5.b.

**Curva de pando de oxígeno disuelto en una corriente**



Fuente: Tebbutt 1971.

El abundante suministro de nutrientes es posible gracias a la descomposición bacteriana de materia orgánica, además de promover cambios en toda la corriente. A mitad de la zona de descomposición activa, donde los nutrientes minerales (nitratos) abundan, la población de algas empieza a incrementarse. Azul-verde (*Phormidium*, *Lyngbya*, y *oscillatoria*) y algas verdes (*Spirogyra* y *Stigeoclonium*), y diatomeas (*Gomphonema* y *Nitzschia*) pueden presentarse en esta zona.

En la zona de recuperación, las algas se desarrollan al máximo, y luego vienen a menos, con la población de algas en la zona de aguas claras se aproxima al estado de la corriente antes de la descarga. Las algas Azul-verde (*Microcystis* y *Anabaena*) pigmentas flagelos (*Euglena* y *Pandorina*), las algas verdes (*Cladophora* y *Ankistrodesmus*), y diatomeas (*Meridion* y *Cyclotella*) son especies que se encuentran en la zona de recuperación.

Cuando los nutrientes disminuyen, la DBO baja, y los niveles de OD vuelven a ser los mismos que antes del punto de descarga, la población de algas y bacterias vuelve a sus niveles de aguas claras, y la fauna de la zona de aguas claras otra vez la poblará. En este punto, el proceso natural de auto-purificación de la corriente ha sido completado, pero únicamente en lo que se refiere a los desechos orgánicos biodegradables.

Si las condiciones anaeróbicas se desarrollan en la zona de descomposición activa, un cambio drástico se observará en la flora

y la fauna de la corriente. Aparecerá la reducción de los compuestos, en vez de la oxidación, y los organismos aeróbicos darán lugar a los organismos anaerobios y facultativos que, sin competencia de los aerobios, se reproducirán en gran número.

#### 5.7 ANALISIS DE LA CURVA DE OXIGENACION EN CORRIENTES.

Una curva se puede definir a partir de la combinación de los efectos de la desoxigenación y la reaeración, pudiéndose graficar el comportamiento del oxígeno disuelto a lo largo de una corriente, desde un punto de descarga de materia orgánica biodegradable. Esta curva es, entonces, muy importante para los estudios ambientales de las corrientes.

La curva de desoxigenación será recíproca de la reacción de la DBO, la cual inicia en un máximo y disminuye continuamente hasta cero.

La curva de oxigenación inicia en cero, y se considera que la curva de desoxigenación de la corriente inicia de un punto de saturación del oxígeno disuelto, la oxigenación es siempre proporcional al déficit de saturación, y se incrementa a medida que el déficit crece.

Conforme la desoxigenación y la reaeración avanzan, resulta un punto mínimo que se conoce como *punto crítico*, después la reaeración domina y el oxígeno disuelto aumenta. Este punto

crítico del oxígeno disuelto y el tiempo para alcanzarlo son importantes para conocer la calidad y el uso que se puede dar al agua de la corriente.

#### 5.7.1 ANALISIS DE LA CURVA POR LA FORMULA DE STREETER-PHELPS.

Este modelo matemático se menciona brevemente, toda vez que ha sido desarrollado al inicio del presente capítulo y es el único que se considera para efecto del ejemplo de aplicación en el capítulo VI.

Esta ecuación establece que el incremento en el déficit es proporcional a la suma algebraica de dos términos:

$$\frac{dD}{dt} = k_1 L - k_2 D$$

El primer término ( $k_1 L$ ) representa la reacción del proceso de desoxigenación. El segundo término ( $k_2 D$ ) representa la reacción del proceso de oxigenación.

#### 5.7.2 ANALISIS DE UNA CORRIENTE POR METODOS ESTADISTICOS.

Churchill y Buckingham (1956) proponen un método de análisis basado en correlación múltiple de todos los factores que producen y controlan el comportamiento de la curva de oxigenación dentro de las características de una fuente de contaminación determinada. El tiempo de recorrido del agua en la corriente no es necesario. Las variables Distancia - Tiempo de la DBO última no se utilizan en el análisis.

Un determinado número de factores opera concurrentemente en una corriente donde existe una fuente de contaminación que genera un

déficit de oxígeno. El procedimiento básico de correlacionar esos factores estadísticamente, todo en el mismo tiempo, se realiza mediante la medición de las concentraciones de oxígeno por arriba de la curva de oxigenación. Los factores usados deben ser medidos en unidades cuantitativas. Cuando la descarga de contaminantes se realiza en un tramo de corriente aireada, los factores sujetos a observación y que afectan la curva de oxigenación son la DBO, la temperatura de la corriente y la corriente de descarga.

Churchill y Buckingham pensaban que esos factores controladores podían ser correlacionados mediante la observación de valores de las llamadas variables independientes con la correspondiente atención a las variables dependientes, la disminución del oxígeno disuelto, resulta de una ecuación que puede ser usada con reserva para conocer la cantidad de oxígeno disuelto para varios valores de las variables independientes.

La forma más simple de la correlación múltiple se expresa por la ecuación lineal :

$$Y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$$

en donde:

Y = variable dependiente, OD en ppm  
 $X_1$  = 5 - días DBO en ppm  
 $X_2$  = temperatura del agua en °C  
 $X_3$  = factor de descarga de la corriente en ft<sup>3</sup>/s  
 $a, b_1, b_2, b_3$  = constantes derivadas de los datos observados.

### 5.7.3 ANALISIS GRAFICO DE THOMAS PARA CURVAS CORTAS

Thomas (1948) da la forma más general para la ecuación de la curva de oxigenación:

$$D = \frac{k_1 L_A}{k_2 - (k_1 + k_3)} (10^{-(k_1 + k_3)t} - 10^{-k_2 t}) + D_2 10^{-k_2 t}$$

donde  $K_3$  = Es la constante de proporcionalidad que indica la composición del agua residual y la del cuerpo receptor, así como el tipo de flujo de la corriente en el punto de consideración. En regiones de turbulencia considerable,  $K_3$  puede ser negativa y anular el efecto de la acumulación de materia sedimentable. Una  $K_3$  positiva indica la sedimentación de materia orgánica suspendida.

La disminución de la DBO debida a la descomposición es proporcional a la DBO que permanece y es igual a  $2.3 K_3 L$ , de acuerdo a Thomas. Las tres constantes de reacción son afectadas por la temperatura. Según Thomas (1948), los rangos de valores de las constantes de las corrientes contaminadas en Los E.U.A., con residuos no tóxicos, durante los meses calurosos son:

$K_1$ por día	0.06 - 0.36
$K_2$ por día	0.06 - 0.96
$K_3$ por día	-0.36 - +0.36

#### 5.7.4 MODIFICACION DE HULL DEL ANALISIS DE LA CURVA.

Cecil Hale Hull (1960) desarrolló una técnica simplificada para la determinación teórica y real de coeficientes en corrientes contaminadas. Hull derivó una fórmula para  $f$  basándose en la ecuación de Streeter - Phelps. La técnica se propone para ser usada en el estudio del balance de oxígeno del agua de la corriente, tanto en laboratorio como en trabajos de campo.

La obtención del valor es simplificado, sólo se requieren tres mediciones (temperatura, OD y DBO). La necesidad de determinar  $K_1$ ,  $K_2$ , o el tiempo de recorrido  $t$  se elimina.

Hull propone simplificar una de las ecuaciones de Fair, basándose en ella para determinar el coeficiente de autopurificación.

Fair desarrolló la siguiente fórmula para el déficit máximo :

$$D_c = \frac{L_a}{f} 10^{-k_1 t_c}$$

$$D_c = 1 (L_a - x_c) \quad \text{ó} \quad D_c = \frac{L_c}{f}$$

donde :  $f = \frac{k_2}{k_1}$

$D_c$  y  $t_c$  = El déficit crítico en el punto más bajo de la curva correspondiente al tiempo de recorrido  $t_c$  del punto de referencia.

$x_c$  = primer valor de DBO obtenido en el punto crítico

$L_a$  = primer valor de DBO en referencia al punto a

y  $f = \frac{L_c}{D_c}$

#### 5.7.5 NOMOGRAMAS DE Mc BRIDE PARA FACILITAR EL USO DE LAS ECUACIONES DE STREETER - PHELPS.

Mc Bride (1982) reconoce la validez de las ecuaciones de Streeter-Phelps para calcular las reacciones de una corriente con carga de contaminantes. Sin embargo, también propone que el nomograma se aproxima con razonable exactitud a los resultados obtenidos por el método de Streeter - Phelps, pero con mayor rapidez. En el desarrollo de este modelo el autor considera que:

1. La DBO actúa en primer orden cinético
2. La desoxigenación y la disminución de la DBO son iguales
3. La oxigenación es proporcional al déficit de oxígeno disuelto
4. No hay corrientes tributarias en el tramo que se modela.

#### 5.7.6 EL METODO DE VELZ

Clarence Velz, (1970) considerado como el iniciador del uso de las matemáticas -y especialmente análisis estadísticos- en corrientes superficiales, desarrolló según sus propios términos "El sistema racional de contar". Velz se basa en las comparaciones de recursos en la corriente, anotándolos y creando un historial. Su sistema de contar depende de completar con la información necesaria dos formatos: forma A y forma B.

El mayor desacuerdo de Velz con la ecuación de la curva de oxigenación desarrollada por Streeter - Phelps se refiere a la obtención de  $K_2$ , el coeficiente de reaeración. Velz afirma que falta una base racional para determinar  $K_2$ , y se ha desarrollado una tendencia a abusar de la curva como si fuera constante a lo largo de todo el tramo de corriente en estudio, y considera que la formulación fundamental es variable para cada segmento de corriente.

En el método que propone Velz el primer paso a seguir es el ordenamiento de los datos en una tabla de desoxigenación. La forma A es usada para este propósito, donde se dividen los datos en dos fases :

1. datos específicos de la DBO
2. grado de amortización de la corriente receptora.

La segunda fase es la anotación de los datos característicos de la corriente en la tabla, y resulta un balance entre las dos formas obteniéndose un perfil a lo largo del curso de la corriente.

A continuación se presenta una tabla resumen con los diferentes métodos para calcular la curva de oxigenación en una corriente, se describen las ventajas, desventajas y bajo que condiciones se utiliza cada modelo, de forma sintetizada<sup>9</sup>.

En el desarrollo de este capítulo se describieron algunos de los modelos matemáticos más importantes para el cálculo de la curva de oxigenación de corrientes naturales, siendo el más utilizado el de Streeter-Phelps y del cual se derivan la mayoría de los otros modelos.

En la descripción del modelo de Streeter-Phelps se hace mayor hincapié por ser el método de cálculo con el que se desarrolla el ejemplo de aplicación del presente trabajo.

---

<sup>9</sup> Referencia No. 19

### CALCULOS DE LA CURVA DE OXIGENACION

Método de cálculo de la curva de oxigenación	Ventajas	Desventajas
1. Streeter - Phelps	Buenos resultados en la práctica bajo ciertas condiciones.	1. Requiere valores de $K_1$ 2. No es confiable cuando contaminantes orgánicos. 3. Requiere reevaluar $K_1$ condiciones -especialmente críticas.
2. Churchill	1. No se requieren las constantes de reacción ni el tiempo de recorrido 2. Muy usado cuando existe una variedad de contaminantes 3. No se necesita evaluar la fotosíntesis ni las condiciones bentaes	1. Requiere numerosos muestreos 2. Dificultad para la obtención de la ecuación.
3. Nomogramas de Thomas	Está sujeto a las ecuaciones de Streeter Phelps, con un manejo más fácil.	Requiere el uso de $K_1$ , $K_2$
4. Modificación de Hull	No necesita calcular los valores exactos para $K_2$ ó $K_1$ para obtener $D_c$ .	Se debe localizar exactamente de la curva crítica.
5. Método Velz	1. El método racional es menos complicado y más flexible, se basa en mediciones por tramo, y presenta un balance de ventajas-desventajas. 2. No requiere del tiempo, o las constantes de reacción.	1. Se requieren muchos muestreos e información. 2. En todos los tramos se requieren las constantes físicas, químicas y biológicas.

	Desventajas	Cuando se usa
bajo	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Requiere valores de <math>K_1</math> y <math>K_2</math></li> <li>2. No es confiable cuando existen múltiples contaminantes orgánicos.</li> <li>3. Requiere reevaluar <math>K_1</math> y <math>K_2</math> bajo algunas condiciones -especialmente condiciones críticas.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cuando sólo existe una fuente de contaminación y el tiempo de recorrido es relativamente fácil de obtener.</li> <li>2. Cuando las condiciones críticas están probadas o son fáciles de obtener.</li> </ol>
s de a recorrido una variedad	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Requiere numerosos muestreos</li> <li>2. Dificultad para la obtención de datos para la ecuación.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cuando existe una variedad de contaminantes y los valores de <math>K_1</math> y <math>K_2</math> no son conocidos.</li> <li>2. Cuando el tiempo no es un factor limitante.</li> </ol>
de fotosíntesis tales	Requiere el uso de $K_1$ , $K_2$ y $t$ .	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cuando el <math>t</math> es muy importante</li> <li>2. Cuando los valores de <math>K_2</math>, <math>t</math> y <math>K_2/K_1</math> están incluidos en el nomograma.</li> </ol>
Streeter	Se debe localizar exactamente el punto de la curva crítica.	Cuando $K_1$ y $K_2$ no son conocidos.
exactos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se requieren muchas estaciones de muestreo e información.</li> <li>2. En todos los tramos se consideran constantes las características físicas, químicas y biológicas.</li> </ol>	Cuando se dispone de todos los datos exactos y cuando los coeficientes de reacción son variables o no se tienen.
complejado aciones ne de constantes		

VI EJEMPLO DE APLICACION  
( CANALES DE XOCHIMILCO )

El presente capítulo, no pretende ser un documento de amplia investigación, pero sí es un análisis preliminar de la calidad del agua del lago y los canales de la delegación Xochimilco a manera de ejemplo, para conocer sus características predominantes, y así obtener el grado de contaminación; con esto, verificar la calidad del agua en tres puntos de la zona de canales existente en dicha localidad, y poder hacer una comparación entre los parámetros reales y los teóricos, para tener un agua con la calidad adecuada para las necesidades de la región.

Los muestreos en campo, los análisis de laboratorio, así como los resultados de los mismos forman parte de un trabajo realizado como proyecto final de la materia *Contaminación de Aguas*, por lo cual se hacen algunas simplificaciones y suposiciones de datos de calidad del agua tratada proveniente de la planta Cerro de la Estrella, así como el gasto medio en el sistema de canales de Xochimilco, para la aplicación del modelo del Oxígeno Disuelto.

Al término de este análisis, se sugieren los posibles usos que se pueden dar al agua dependiendo del grado de contaminación, y el tiempo esperado para la recuperación de la corriente; por medio de la autopurificación, según el modelo del oxígeno disuelto propuesto por Streeter y Phelps.

### 6.1 ANTECEDENTES HISTORICOS

"La mar" que vieron los primeros españoles que llegaron al valle de México era el lago de Texcoco, cuyas aguas eran saladas por el contenido de salitre de su lecho, y el lago de Chalco. En aquella época, estos lagos formaban parte de una gran planicie rodeada de montañas cubiertas de pinos, encinos, robles y numerosos ríos pequeños. Como los lagos estaban a diferente altura, el lago de Chalco se desbordaba con frecuencia sobre Texcoco.

Desde entonces comenzó la lucha de los habitantes del valle con el agua, ya que aunque no ocurrieran tormentas extraordinarias, bastaba con que varios años se presentaran veranos lluviosos para que el nivel de los lagos se elevara peligrosamente, ya que no existían desagües.

Los primeros asentamientos indígenas se localizaron entre los islotes y riberas de los lagos, pero como se acentuó el predominio de los aztecas, Tenochtitlán se extendió hacia las superficies que ganaban al agua. Entonces el aumento en los niveles de los lagos, comenzó a ocasionar daños cuantiosos. Ante este problema se construyeron bordos y diques de contención. En 1450 Netzahualcōyotl, rey de Texcoco, por encargo del rey Azteca Moctezuma, diseñó y dirigió la construcción de un albarradón de más de 12 Km de longitud y 4 m de ancho para proteger a la gran Tenochtitlán del azote de las inundaciones. El dique dividió desde entonces el lago de Texcoco y a la parte occidental se le dio el nombre de Laguna de México.

Esta obra contribuyó a disminuir la salinidad del agua que rodeaba a la ciudad, beneficiando a los cultivos. Tenochtitlán era una ciudad lacustre cuyos habitantes aceptaban esas circunstancias naturales, por lo que solo pensaron en contener las aguas, sin crear ningún sistema para desalojarlas del valle.

Los Xochimilcas fueron una de las siete tribus de origen Nahuatl que salieron de Aztlán y fueron de los primeros en llegar a la cuenca de México.

Fueron los primeros constructores de chinampas. Al ser derrotados por los Aztecas, los Xochimilcas en señal de sometimiento construyeron la calzada Quíuacan - Tenochtitlán, perdiendo sus tierras y chinampas que por tres siglos habían habitado. El sistema de chinampas impuso gradualmente un esquema urbano de las líneas regulares, con lo que aparece la chinampería, que definía las tierras de cultivo y determinaban la casa habitación unifamiliar, además de las construcciones correspondientes como templo de Gens o Calpulli, la escuela, así como las tierras comunales y las tierras dedicadas al cultivo para uso y disfrute del sacerdocio, la nobleza y los guerreros que configuraban su contexto.

Por ser una ciudad lacustre, Xochimilco sufría de repentinas inundaciones que acababan con sus sementeras; la más grave ocurrió en 1609.

La primera etapa del drenaje se hizo de 1937 a 1940; y la segunda de 1966 a 1975, la cual contribuyó a la contaminación de los canales. El agua potable se introdujo en 1913 y la red de distribución se ha ido extendiendo hasta la fecha.

## **6.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El agua de las corrientes superficiales constituye uno de los componentes más importantes del ambiente. Es profusamente utilizada como abastecimiento de agua potable, en procesos industriales, riego agrícola, recreación, pesca, generación de energía eléctrica, navegación y como transporte de desechos líquidos y sólidos. Es este último uso el que en ocasiones impide o limita los anteriores, ya que altera la calidad del agua en el cuerpo receptor.

A consecuencia del crecimiento demográfico y del desarrollo industrial de México, se ha suscitado un aumento de volúmenes de aguas residuales que al ser vertidas sin previo tratamiento a los cuerpos receptores han ocasionado problemas ecológicos en distintos grados.

Los recursos hidráulicos en México están constituidos por ríos, lagos, lagunas, yacimientos subterráneos y las lluvias. El agua sufre un proceso conocido como *ciclo hidrológico* que comprende las fases de evaporación - condensación - lluvia - escurrimiento - evaporación; de ahí que se le considere como un recurso permanente, ya que, gracias al ciclo mencionado, su volumen es más

o menos constante (descrito en el capítulo I). Cabe mencionar que la distribución de los recursos hidráulicos en México no guarda una relación directa con la localización de los asentamientos humanos y de las actividades económicas, así, el suroeste con sólo el 15 % del área del país y el 12 % de la población, cuenta con el 42 % de los escurrimientos fluviales; mientras que la Altiplanicie del centro y del Norte, que ocupan el 36 % de la población cuenta únicamente con el 4 % de los escurrimientos<sup>10</sup>.

#### 6.2.1 DIAGNOSTICO

El crecimiento desmesurado de la Ciudad de México en los últimos cuarenta años, provocó el avance de la mancha urbana sobre el área rural, con el consiguiente desplazamiento de áreas agrícolas hacia zonas forestales. La proliferación de asentamientos irregulares y la especulación con la tierra, propició un intenso cambio de uso del suelo de agrícola a urbano.

Durante los últimos años, la zona de estudio (Xochimilco) ha resentido la paulatina reducción en la cantidad y calidad del agua, ya que el lago se alimentaba con manantiales que se secaron ante la creciente explotación del acuífero para dotar de agua potable a la Ciudad, cambiándose la función principal de la zona, de productora de básicos, hortalizas y flores, a abastecedora de agua potable para la Ciudad de México. El Departamento del Distrito Federal restituyó los volúmenes extraídos, con agua residual tratada de la Planta del Cerro de la Estrella, que tiene

---

<sup>10</sup> Referencia No. 17

una calidad adecuada para riego, pero que además de ser insuficiente, se contamina fuertemente por el vertido directo de aproximadamente 1,500 descargas de desechos líquidos y sólidos en las márgenes de los canales (1991)<sup>11</sup>.

Como consecuencia de la sobreexplotación del acuífero, se han provocado hundimientos regionales del terreno en las partes planas, así como diferenciales en las inmediaciones de las zonas cerriles, este fenómeno ha propiciado que la zona lacustre tenga niveles bajos en la parte Norte de Xochimilco, provocando inundaciones progresivas durante la temporada de lluvias y provocando niveles altos de terreno en la zona turística, lo que ha requerido de la construcción de estructuras de control para mantener niveles de agua adecuados para la navegación de los canales, de igual forma, la parte oriente de la zona lacustre ha sido afectada por los hundimientos, lo que ha provocado limitaciones para la explotación de las chinampas.

El deterioro físico del sistema lacustre, ha ocasionado una gradual falta de interés en los productores agrícolas, factor que se ha visto reforzado por las alternativas de ocupación que ofrecía la Ciudad.

#### **6.2.2 DRENAJE**

La cobertura del servicio de drenaje en la zona cubre al 85 % de la población. La mayor parte del drenaje existente es de tipo combinado, es decir maneja tanto aguas pluviales como residuales.

---

<sup>11</sup> Referencia No. 17

La región no cuenta con salidas naturales, por lo que durante muchos años ha estado sujeta a inundaciones estacionales. Las zonas donde se presentan estas, se ubican al norte de los canales de Xochimilco y al extremo oriente de la delegación de Tláhuac, en el área colindante con el Estado de México, así como en una parte de la zona de Chalco.

La carencia de infraestructura primaria y secundaria, así como la proliferación de asentamientos irregulares han ocasionado una degradación sistemática de las zonas lacustres y chinamperas por el vertido de las aguas residuales hacia los canales. Este problema se presenta en particular en la vecindad de la cabecera de Xochimilco.

Los pueblos localizados en las partes altas de Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta en general carecen de infraestructura de saneamiento básico y descargan sus aguas residuales directamente a cauces, grietas y barrancas. Dada la alta permeabilidad de la zona no se generan escurrimientos lo que representa un riesgo de contaminación del acuífero.

En la parte baja de la zona, la infraestructura existente es escasa, se caracteriza por contar con pendientes mínimas y sufrir hundimientos diferenciales, que propician su azolvamiento. Cabe destacar que de manera particular el drenaje de la cabecera de Xochimilco ha ido perdiendo su capacidad original, debido a los asentamientos del subsuelo, por lo que se ha requerido la

reestructuración del sistema de drenaje, que incluye redes y rebombes de traspaleo.

Durante la época de estiaje, el nivel del agua de los canales de Xochimilco se mantiene mediante la aportación de agua residual tratada proveniente de la planta Cerro de la Estrella. La alimentación de esta agua hacia los canales tiene lugar a través del canal de Caltongo, muy cerca de su confluencia con el canal de Chalco, los volúmenes aportados y la ubicación de la alimentación no permiten un movimiento significativo en los canales, por lo que la calidad del agua de los mismos se ha ido deteriorando paulatinamente.

Actualmente los canales de Chalco, Nacional y los ubicados en la delegación de Tláhuac, se utilizan como drenes principales para el manejo de las aguas pluviales y residuales. Estos a su vez ordenan sus aguas mediante bombeo a través del sistema canal Nacional y Río Churubusco.

Cabe destacar que la zona chinampera de Xochimilco no recibe descargas de aguas residuales provenientes del sur de la delegación de Iztapalapa ni de la de Tláhuac, debido a que el canal de Chalco funciona como dren sanitario, manteniendo niveles de operación por debajo de los correspondientes a los canales de Xochimilco. Esto es posible mediante la operación de la planta de bombeo localizada en la confluencia de canal de Chalco y canal Nacional.

### **6.2.3 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

En la delegación de Iztapalapa a un costado del panteón Civil se localiza la planta de tratamiento Cerro de la Estrella. Actualmente cuenta con dos módulos de tratamiento secundario mediante el proceso biológico de 4.000 l/s.

La calidad del agua producida en esta planta es apta para su uso en el riego de áreas verdes y llenado de lagos y canales recreativos, así como para algunos procesos industriales, tales como enfriamiento y lavado industrial. El proceso de tratamiento utilizado no permite remover detergentes ni nutrientes, lo que propicia el crecimiento de vegetación acuática.

La delegación de Xochimilco y Tláhuac cuenta con cierta infraestructura de distribución y conducción de agua tratada, que beneficia en paralelo a una parte de la zona industrial de la delegación de Iztapalapa, así como también para riego de áreas verdes, la zona canales de Xochimilco y la zona lacustre y agrícola de Tláhuac.

### **6.2.4 ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE**

Para el abastecimiento de agua potable a la región se utilizan las fuentes propias existentes; es decir, los pozos profundos ubicados en toda el área, y los excedentes se envían al resto de la ciudad de México. Para el caso particular de los poblados en las partes altas de las delegaciones de Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta, el abastecimiento de agua potable se realiza mediante rebombeos.

Estos rebombes se abastecen de los acueductos localizados en la partes bajas.

### **6.3 MEDIO FISICO**

La Delegación de Xochimilco, se localiza al sur del Distrito Federal; ocupa el tercer lugar entre las 16 delegaciones, dada su extensión territorial de 128.1 km<sup>2</sup> que representan 8.9 % del total del Distrito Federal. Colinda al norte con las delegaciones de Coyoacán, Iztapalapa y Tláhuac; al sur con Milpa Alta; al oriente con Tláhuac y Milpa Alta y al poniente con Tlalpan.

#### **6.3.1 EDAFOLOGIA**

Los cuatro principales tipos de suelo que conforman la Delegación Xochimilco son: Feozem, Andosol, Litosol y Solonchak.

Pertenecen al tipo feozem, los suelos de la parte norte y sur de la delegación, ocupando aproximadamente un 59 %. Se caracterizan por su aspecto oscuro y por ser ricos en nutrientes y materia orgánica. Son además, muy susceptibles a ser erosionados, sobre todo cuando la pendiente del suelo es mayor al 10 %, así como cuando la capa vegetal es débil.

Los andosoles representan un 16 %, y se ubican principalmente al suroeste de Xochimilco y en menor proporción en el centro sur. Su composición fundamental es de cenizas volcánicas arrastradas desde las altas montañas y depositadas en llanos ubicados en la parte media y baja. Contienen además, elevados niveles de fósforo, lo que reduce el rendimiento de la producción agrícola.

Los litosoles ocupan un 5 % en una distribución dispersa en el poniente y centro sur de la delegación. Son suelos jóvenes y poco profundos que se encuentran en regiones selváticas o montañosas de reciente actividad volcánica. Por esta razón, son muy sensibles a la erosión, que depende en gran medida, del tipo de vegetación, de la pendiente del terreno y de los coeficientes de escurrimiento del subsuelo.

Finalmente, los suelos tipo solonchak, ocupan un 2 % de la superficie de la delegación, aproximadamente.

#### **6.3.2 OROGRAFIA**

El sistema orográfico de la Delegación Xochimilco se ha dividido en tres zonas principales:

- Zona Media Boreal de la sierra del Ajusco, que está comprendida por los cerros Tehutli, Tlamacaxco, Teoca, Tochuca y Tzompoli, que se elevan al rededor de los 2,300 m sobre el nivel del mar.
- Zona Tlalpan - Xochimilco, formada por los cerros Tehuapaltepec, La Cantera, El Teteonico, de Santiago y de Xochitepec, que alcanzan hasta los 2,500 m sobre el nivel del mar.
- Zona del valle, que está constituido por capas aluvionarias y un llano ligeramente inclinado de sur a norte. Su elevación es de 2,000 m sobre el nivel del mar. Al norte se encuentra la zona de canales, cuyas tierras tienen además un gran valor como tierras de cultivo, dada la calidad del suelo. El problema principal que enfrenta esta zona, es la sobreexplotación hidráulica, la cual a la vez que agotó los manantiales, provoca también hundimientos diferenciales, reducción del volumen de agua en los canales, así

como el desnivel de los terrenos. Esto último, contribuye a un mayor deterioro de la calidad del agua, ya que al formarse una cuenca cerrada, impide su recirculación natural; y que a su vez, al inundarse, inutiliza y reduce sustancialmente la superficie agrícola.

### **6.3.3 HIDROGRAFIA**

Todos los afluentes naturales del lago de Xochimilco que existieron hasta fines del siglo XVII se fueron agotando o desviando a otros rumbos. Actualmente no existe ninguno, por lo que se busca mantener artificialmente los niveles apropiados en los canales, con el agua tratada de la planta de tratamiento de aguas negras ubicada en el Cerro de la Estrella.

### **6.3.4 ESCURRIMIENTOS**

En la delegación Xochimilco, los escurrimientos provienen de los cerros y volcanes que abrazan la mancha urbana por el sur.

- Cerros de Xochitepec y Santiago. Sus escurrimientos inundan el valle que se forma entre ellos. Las aguas son captadas por el río San Buenaventura, el cual al desbordarse inunda las ciénegas. En su curso, este río recibe también descargas domiciliarias que lo contaminan e inutilizan.

- Volcanes Teoca y Tzompoli. Sus escurrimientos se captan en la presa El Pato ubicada en San Lucas Xochimanca, la cual tiene un bajo nivel de captación.

- Los escurrimientos del volcán Teoca también se desvían hacia los poblados de Santa María Nativitas, San Lorenzo Atemoaya y Santa

Cruz Acalpixca, y que al filtrarse en el subsuelo, recargan los mantos acuíferos.

- Por su parte, los escurrimientos del volcán Tehutli, se dirigen hacia los poblados de San Gregorio Atlapulco, San Luis Tlaxialtemalco y Santiago Tulyehualco, recargando así mismo, los mantos acuíferos.

Es necesario tener presente que los escurrimientos, en sus diferentes cursos, atraviesan por zonas habitadas que no cuentan con sistemas de drenaje, y terminan contaminados por las descargas que hacen en ellos.

#### 6.3.5 CLIMA

Las características topográficas de la delegación, provocan dos climas predominantes : templado - húmedo en el valle y frío en la zona montañosa. Los cambios estacionales de temperatura son de poca consideración: en la parte baja, la temperatura media anual es de 16° C, con extremos de 33° y 7°; siendo enero el mes más frío y mayo el más caliente. En la parte alta, la media anual es de 11°, con máxima de 26° y mínima de 9° C.

La temperatura máxima a la sombra es de 31.6° C, la media anual de 15°; y las medias mensuales, las siguientes : 12° en enero, 16° en febrero, 21° en marzo, 17° en abril, 19° en mayo, 18° en junio, 16° en julio y agosto, 15° en septiembre, 14° en octubre, 13° en noviembre y 12° en diciembre.

Por otra parte , se afirma que a causa del crecimiento poblacional, al aumento de la superficie pavimentada, la instalación de fábricas y la contaminación atmosférica en el valle de México, la temperatura media anual ha aumentado 2° en los últimos 90 años y 1.1° en los 50 más recientes<sup>12</sup>.

#### **6.3.6 VIENTOS DOMINANTES**

Los vientos dominantes son del noroeste en la estación seca que va de noviembre a mayo, con una velocidad media de 10 km/hr. En la estación cálida - húmeda que abarca de junio a octubre, provienen del noreste, con la misma velocidad.

#### **6.3.7 PRECIPITACION PLUVIAL**

Se concentra el 75 % de la precipitación anual entre los meses de junio a octubre. la precipitación media es de 747 mm. El número de días despejados en promedio es de 105; y los de lluvia entre 139 y 179. La humedad relativa en la parte baja oscila de 45 % en marzo a 76 % en septiembre; la media anual es de 61 %.

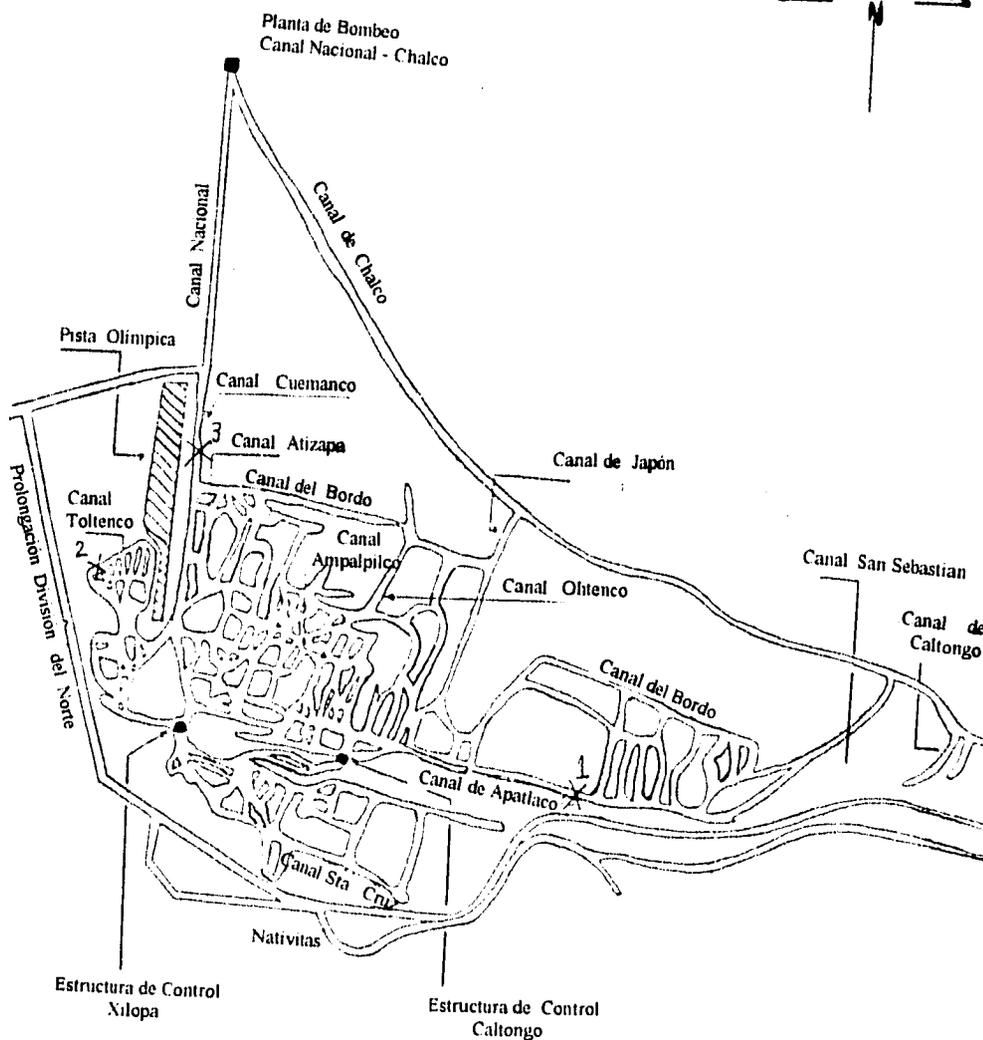
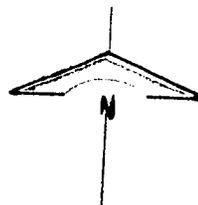
#### **6.4 UBICACION DE LA CORRIENTE EN ESTUDIO Y DATOS HIDROLOGICOS**

Las tres estaciones elegidas para este estudio, se suponen aceptables, pues se encuentran en lugares a donde se tiene relativamente un fácil acceso y cerca de asentamientos humanos, que en un momento determinado pueden requerir de esta agua para diversos usos.

---

<sup>12</sup> Referencia No. 17

# SITIO DE ESTUDIO UBICACION DE LA CORRIENTE



La estación número uno está localizada en el Canal Apatlaco, cerca de los pequeños canales que unen el Canal del Bordo con el punto de estudio, y con aportes del canal San Sebastián.

La segunda estación se encuentra en el Canal de Toltenco, al noreste de la Avenida Prolongación División del Norte, este canal recibe sus aportaciones de la serie de canales de Xochimilco, y por ser parcialmente cerrado, su flujo no tiene un movimiento intenso.

La tercera estación, se encuentra al este de la Pista Olímpica de canotaje "Virgilio Uribe", próxima a la parte alta del canal del Bordo, esta zona es de importancia, pues se construyó un embarcadero turístico, este canal recibe aportaciones principalmente del Canal de Santa Cruz.

Todas las estaciones se encuentran en la zona basáltica, y por tanto tienen un suelo muy permeable, así mismo, por encontrarse en zonas altas, se permite al agua fluir hacia las partes bajas de los canales.

#### **6.4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO**

Estación No. 1.- Puente de Urrutia. Canal de Apatlaco.

Alrededor del lugar se observó la existencia de árboles, presencia de aves, así como invernaderos y sembradíos; es un lugar agradable y tranquilo, con respecto al agua, ésta tiene un color verdoso y sin olor, conteniendo una cantidad considerable de lirio; es

propicia para la fauna acuática como se pudo comprobar al ver peces de mediano tamaño, aunque ya en ésta estación se apreció basura circundando el lugar, y un poco en el agua. La turbiedad es alta, y al hacer un recorrido por el sitio no se encontraron descargas de aguas residuales, en tanto a la temperatura, es similar a la del medio ambiente. Cabe mencionar que la visita se realizó en un día soleado, de temperatura media, con cielo despejado, y el ambiente un tanto húmedo.

Estación No. 2.- Canal de la Noria.

Las condiciones son muy parecidas a las de la estación 1, tampoco se encontraron descargas de aguas residuales cercanas, se observaron variedades de árboles, por ende pajarillos silvestres, en esta estación, el agua no tenía olor alguno, aunque tenía una presencia mucho mayor de flora acuática (lirio), y en lo que respecta a la fauna acuática, al igual que en la estación anterior, se vieron peces de mediano tamaño. El color del agua es verdoso claro (menos intenso que en la estación 1) y con poca turbiedad.

Estación No. 3.- Canal de Cuemanco, Virgilio Uribe.

Lugar tranquilo, es apreciable la fauna nociva, como perros callejeros y mosquitos, es un sitio más sucio que los anteriores (zona turística), el agua se nota con un color verdoso muy intenso casi grisáceo, aunque no tiene olor, aparentemente no existen descargas cercanas, sin embargo es muy poca la flora acuática y

la fauna acuática se ve disminuida. La temperatura del agua es un poco más baja que la del medio ambiente.

#### **6.5 MUESTREO Y ANALISIS REALIZADOS**

Los muestreos fueron hechos en las tres estaciones elegidas de la zona de canales de Xochimilco, se hicieron con vasos especiales para poder hacer análisis en el momento, así como en garrafones especialmente limpiados para poder llevar el agua al laboratorio; las muestras fueron tomadas el mismo día, en la estación 1 (9:10 hrs.), en la estación 2 (10:10 hrs.) y por último en la estación 3 (10:54 hrs.), así mismo, los análisis se hicieron ese mismo día.

Los análisis realizados fueron la medición de la temperatura del agua en el lugar del muestreo, la temperatura ambiente, la medición del pH en campo, y posteriormente la misma medición realizada en el laboratorio.

Se realizaron los análisis de turbiedad, conductividad eléctrica, Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno, determinación de cloruros, Nitrógeno amoniacal,  $\text{CO}_2$ , Coliformes totales, coliformes fecales y sólidos totales.

Cabe mencionar que en los sitios de estudio se observó el color del agua, y en base a una visión general del lugar se pudo suponer la calidad del agua y los posibles contaminantes contenidos, y dar algunos parámetros de utilización de estas corrientes.

#### 6.5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS EN CAMPO

Los análisis se realizaron en los tres puntos de muestreo que se eligieron y que fueron descritos anteriormente.

##### DETERMINACION DE CLORUROS:

Para la determinación de los cloruros se utilizó un estuche de reactivos de Milton Roy Company, el método es conocido como de titulación con nitrato mercurio y la sensibilidad del método es de 1 gota igual a 20 mg/l de cloruros. El procedimiento es el siguiente: llenar el tubo de medida con la muestra, vertir el contenido del tubo de medida al frasco de mezclado, agregar el contenido de una almohadilla de indicador Pillow de Dicromato de potasio al frasco de mezclado y agitar para disolver, usando el gotero se agrega reactivo de Nitrato de plata gota a gota, contando el número de gotas hasta que la solución adquiere un color anaranjado, se multiplica el número de gotas usadas por 20 para obtener el contenido de cloruros, en mg/l.

##### DETERMINACION DE DIOXIDO DE CARBONO:

Se realizó con un estuche de campo de la marca La Motte, el principio del método es volumétrico. Se llena el tubo titulador hasta la línea de 20 ml, se añaden dos gotas de indicador de fenoftaleína, si la muestra toma un color rojo, no existe dióxido de carbono; si se torna incolora, se llena el lector directo de dióxido de carbono, se añade el reactivo anterior, agitando suavemente la muestra hasta que tome un color rosado y éste persista por 30 segundos, el contenido de dióxido de carbono es la lectura del titulador en ppm.

**DETERMINACION DEL NITROGENO AMONIACAL:**

Se realizó con un estuche de campo de la marca La Motte, mediante un método colorimétrico visual, el procedimiento es el siguiente: se llena el tubo lector con 5 ml, se agregan 4 gotas del reactivo 1 y se mezcla, agregando 8 gotas del reactivo 2 y se mezcla, el contenido de nitrógeno amoniacal es el obtenido con el comparador.

**DETERMINACION DE NITRATOS:**

Se lleva a cabo mediante un método volumétrico, con un estuche de la marca La Motte, y a continuación se describe el procedimiento: se utilizan 6.5 ml, añadiendo 0.5 ml del reactivo nitrato 1 y 1 ml del reactivo 2, se agita varias veces, se pone 0.1 gr del reactivo de nitrato 3, se tapa el tubo y se invierte de 20 a 25 veces y se deja reposar 2 minutos, se agrega 0.15 gr del reactivo de nitrato 4R, se mezcla; si la muestra no toma un color rosa en 5 minutos, si tiene nitratos, si no lo hace no están presentes los nitratos.

**FIJACION DE OXIGENO DISUELTO:**

Este procedimiento se conoce como la modificación ácida del método de Winkler, y se describe a continuación: se toma una muestra bajo la superficie del agua, se tapa el frasco bajo el agua y se verifica que no tenga burbujas de aire, si la muestra es satisfactoria, se agregan 2 ml de sulfato manganoso y 2 ml de álcali-yoduro-nitruro, tratando que la pipeta penetre el seno del agua, una vez hecho esto, se agita la muestra y se permite sedimentar el precipitado, por último se agregan 2 ml de ácido sulfúrico y se agita por inversión.

### 6.5.2 PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

#### OXIGENO DISUELTO:

Se toman 200 ml del frasco de muestra y se titulan con una solución valorada de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  (0.025N) usando almidón como indicador; como el Tiosulfato de sodio es exactamente 0.025N, los mililitros gastados de éste último son los mg/l de Oxígeno Disuelto.

#### DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO:

Se utiliza agua destilada, airearla hasta la saturación y se agrega 1 ml de solución amortiguadora, 1 ml de sulfato de magnesio, 1 ml de cloruro de calcio y 1 ml de cloruro férrico por cada litro de agua de dilución, o en su caso el porcentaje correspondiente; acto seguido se sifonea el agua de dilución a una probeta sin arrastrar aire, se agrega la muestra que se acaba de diluir hasta el nivel apropiado. Se sifonea la dilución mezclada a dos frascos para DBO, uno para incubadora y otro para determinar el O.D. inicial; el de incubadora se mantiene durante 5 días a 20° C. Al quinto día se mide el O.D. en la muestra incubada. La DBO es la diferencia entre el OD inicial y el final, dividida entre el porcentaje de dilución expresado en decimales.

**COLIFORMES:**

La prueba se realiza mediante el Método Filtros de Membrana, y el desarrollo es el siguiente: una vez limpio el lugar de trabajo, y con cajas petri rotuladas, se coloca el cojín absorbente, todo ello con pinzas esterilizadas, se vacía el medio de cultivo, se utilizan 100 ml para filtración y si se requiere, se hacen diluciones. Se coloca un filtro con la retícula hacia arriba en la unidad de filtración, se vierte la muestra y se aplica el vacío, se retira el filtro, se coloca con la retícula hacia arriba dentro de la caja de petri sobre el cojín absorbente, se invierten las cajas de petri y se incuban a 35° C, y se cuentan las colonias coliformes que son rojas o rosas. Se utiliza medio Endo para la determinación de coliformes totales, y medio MFC para coliformes fecales.

**TURBIEDAD:**

Se realiza con el método Turbidímetro Jackson, se coloca el turbidímetro en un lugar sin corrientes de aire, se mezcla la muestra y se colocan de 1 a 5 ml en el turbidímetro, se enciende la vela y se agrega agua hasta perder de vista la imagen de la llama, por último se hace la lectura en el turbidímetro. Este procedimiento debe hacerse varias veces, para luego promediar los valores.

**pH :**

Se calibra el aparato con la solución de pH = 4.0 y pH = 7.0 para la temperatura del agua, se enjuagan los electrodos antes de

sumergirlos en las diferentes soluciones de agua, y una vez calibrado el aparato, se hacen las mediciones sumergiendo el electrodo en la muestra.

#### CONDUCTIVIDAD ELECTRICA :

Se realiza por el Método de electrodos, se mide en umhos/cm, con escala de 0-10,000, se realiza una lectura, se calibra tres veces llenando la copa del aparato, y la tercera lectura es la conductividad eléctrica.

#### **6.6 COMPARACION DE LOS VALORES OBTENIDOS**

##### pH:

Los valores obtenidos en campo y laboratorio no difieren mucho entre sí en cada una de las estaciones.

##### SOLIDOS SEDIMENTABLES :

No se registraron lecturas, pero esto no quiere decir que no existieran sólidos suspendidos, sino que eran cantidades mínimas que no se alcanzaban a registrar en los conos de imhoff.

##### CONDUCTIVIDAD ELECTRICA :

Se observa que la conductividad eléctrica y los sólidos totales concuerdan en los valores, ya que a mayor cantidad de sólidos totales se da una mayor conductividad eléctrica.

##### OXIGENO DISUELTO Y DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO :

Los valores obtenidos concuerdan con el agua analizada.

**CLORUROS :**

La presencia de cloruros en el muestreo realizado indica que existen descargas de aguas domésticas, ya que este parámetro confirma la presencia de orina del hombre o de origen animal.

**NITROGENO AMONIACAL :**

La presencia de nitrógeno amoniacal indica que el agua ha sido contaminada recientemente, ya que éste elemento rápidamente se oxida.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas para calidad del agua, podemos concluir que los valores obtenidos para la estación # 2 son los más desfavorables.

**6.7 INDICE DE CALIDAD**

El índice de calidad del agua de cada una de las estaciones fue obtenido por medio del método presentado por el Ing. Murguía<sup>13</sup>, que aunque él señala que son 18 parámetros, en este caso se utilizaron los que resultaron de las pruebas realizadas.

Siendo la formulación para obtener el Índice de Calidad la siguiente:

$$I = \frac{\sum I_i W_i}{\sum W_i}$$

donde :  
 I = índice de calidad general  
 I<sub>i</sub> = índice de calidad del parámetro seleccionado  
 W<sub>i</sub> = valor de la importancia relativa del parámetro considerado

---

<sup>13</sup> Referencia No. 5

PARAMETRO	ESTACION 1		ESTACION 2		ESTACION 3	
	I <sub>i</sub>	I <sub>i</sub> W <sub>i</sub>	I <sub>i</sub>	I <sub>i</sub> W <sub>i</sub>	I <sub>i</sub>	I <sub>i</sub> W <sub>i</sub>
pH	65.67	65.67	86.02	86.02	43.81	43.81
C.E.	32.76	73.52	37.36	74.72	38.67	77.34
ALC.	33.96	33.96	35.10	35.10	36.81	36.81
N. Amoniacal	45.80	91.60	45.80	91.60	45.80	91.60
Cloruros	55.11	27.56	55.86	27.93	43.83	21.92
O.D.	83.55	417.75	26.28	131.40	91.98	459.90
D.B.O.	20.08	100.40	20.32	101.60	18.77	93.85
COL. TOT.	-	-	2.25	6.75	2.46	7.38
COL. FEC.	36.01	144.05	-	-	-	-
<b>SUMATORIA</b>		<b>954.51</b>		<b>555.12</b>		<b>832.61</b>

$$\text{EST. 1} \quad I_1 = \frac{\sum I_i W_i}{\sum W_i} = \frac{954.51}{20.50} = 46.56$$

$$\text{EST. 2} \quad I_2 = \frac{\sum I_i W_i}{\sum W_i} = \frac{555.12}{19.50} = 28.47$$

$$\text{EST. 3} \quad I_3 = \frac{\sum I_i W_i}{\sum W_i} = \frac{832.61}{19.50} = 42.70$$

USOS DEL AGUA SEGUN INDICE DE CALIDAD

100	NO REQUIERE PURIFICACION	ACEPTABLE PARA CUALQUIER DEPORTE ACUATICO	ACEPTABLE PARA TODOS LOS ORGANISMOS	NO REQUIERE PURIFICACION	ACEPTABLE	ACEPTABLE		
90	LIGERA PURIFICACION			LIGERA PURIFICACION PARA ALGUNOS PROCESOS				
80	MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO			ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE			SIN TRATAMIENTO PARA INDUSTRIA NORMAL	
70		EXCEPTO ESPECIES MUY SENSIBLES						
60		DUDOSO PARA CONTACTO DIRECTO	SOLO ORGANISMOS MUY RESISTENTES	CON TRATAMIENTO EN LA MAYOR PARTE DE LA INDUSTRIA				
50	DUDOSO	SIN CONTACTO CON EL AGUA	USO MUY RESTRINGIDO	RESTRINGIDO				
40							INACEPTABLE	INACEPTABLE
30	INACEPTABLE	INACEPTABLE	INACEPTABLE	INACEPTABLE				
20							INACEPTABLE	INACEPTABLE
10								
0	ABASTECIMIENTO PUBLICO	RECREACION	PESCA Y UDA ACUATICA	INDUSTRIAL Y AGRICOLA			NAVEGACION	TRANSPORTE DE DESECHOS TRATADOS

### 6.8 POSIBLES USOS DEL AGUA EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MUESTREO.

Según el índice de calidad y utilizando la tabla USOS DEL AGUA SEGUN INDICE DE CALIDAD, del libro - Contaminación del Agua -, del

Ing. Murguía :

Estación No. 1

$$I_1 = 46.56$$

Abastecimiento Público.....	Dudoso
Recreación.....	Dudoso para contacto directo
Pesca y vida acuática.....	Sólo organismos muy resistentes
Industria y Agrícola.....	Con tratamiento en la mayor parte de la industria
Navegación.....	Aceptable
Transporte de desechos tratados.....	Aceptable

Estación No. 2

$$I_2 = 28.47$$

Abastecimiento Público.....	Inaceptable
Recreación.....	Uso muy res- tringido
Pesca y vida acuática.....	Inaceptable
Industria y Agrícola.....	Uso muy res- tringido
Navegación.....	Restringido
Transporte de desechos tratados.....	Aceptable

Estación No. 3

$$I_3 = 42.70$$

Abastecimiento Público.....	Dudoso
Recreación.....	Dudoso para contacto directo
Pesca y vida acuática.....	Sólo organismos muy resistentes
Industria y Agrícola.....	Con tratamiento en la mayor parte de la industria
Navegación.....	Aceptable
Transporte de desechos tratados.....	Aceptable

## 6.9 PARAMETROS OBTENIDOS EN CAMPO Y LABORATORIO

PARAMETRO	ESTACION 1	ESTACION 2	ESTACION 3
Hora	9:10	10:10	10:54
Temp. Agua °C	15.5	15.0	15.0
Temp. Amb. °C	16.0	17.0	18.0
pH	7.5	8.0	8.5
pH Lab.	8.2	7.8	8.8
Turbiedad UTN	15.0	2.2	17.0
Sol. Suspds.	-	-	-
C.E. micro	1200	1150	1050
Alc. CaCO <sub>3</sub>	432	362	280
O.D. mg/l	6.3	2.0	7.0
D.B.O. <sub>5</sub> mg/l	14.25	14.0	14.75
Cloruros mg/l	34.0	32.0	95.0
N. Amoniacal mg/l	< 1	< 1	< 1
CO <sub>2</sub> mg/l	55.0	185.0	-
Coliformes Tot.	Incont.	1159500	828500
Coliformes Fec.	8.0	Incont.	Incont.
Sol. Totales g/l	1.052	0.936	0.728

### 6.10 EJEMPLO : Aplicación de la curva de la DBO.

La planta de tratamiento "Cerro de la Estrella", contribuye con una descarga de calidad secundaria y un gasto de aprox. 700 l/s en la zona de estudio de uno de los puntos en los canales de Xochimilco. Las condiciones más desfavorables se presentan en el punto # 2 y ocurren en los meses de primavera, cuando la corriente es baja. Bajo estas condiciones, y con las mediciones hechas en campo y laboratorio se determinan las características del agua tratada y los canales. La aportación de la planta de tratamiento tiene un gasto máximo de 60,000 m<sup>3</sup>/día, un DBO<sub>5</sub> de 40 mg/l, una concentración de OD de 2 mg/l, y una temperatura de 25 °C. La corriente (en el punto de medición cercano a la descarga de agua tratada) se encontró un gasto de 10 m<sup>3</sup>/s, una DBO<sub>5</sub> de 14 mg/l, una concentración de OD de 7 mg/l, y una temperatura de 15 °C. Se realiza la mezcla del agua tratada con la corriente de manera casi instantánea, siendo la velocidad de la mezcla estimada de 0.25 m/s. Se determinará la situación crítica de la corriente, considerando que la distancia máxima del sistema de canales de Xochimilco tiene una longitud aproximada de 200 Km, y que es uniforme es su sección y demás características hidráulicas.

#### Solución.-

1.- Determinación de las características de la mezcla-corriente.

$$a) Q_{\text{Aport}} = 60,000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 0.694 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{Mezcla}} = 0.694 + 10 = 10.694 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

b) DBO

$$Y_{\text{Mez}} = \frac{Y_{\text{corr}} Q_{\text{corr}} + Y_{\text{aport}} Q_{\text{aport}}}{Q_{\text{corr}} + Q_{\text{aport}}}$$

$$= \frac{(14 \times 10) + (40 \times 0.694)}{10.694} = 15.7 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

convirtiendo a DBO última (considerando  $k_1 = 0.23$  para la mezcla)

$$Y_u = L_a = \frac{y}{1 - e^{-k_1 t}}$$

$$= \frac{15.7}{1 - e^{-0.23 \times 5}} = 22.97 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

c) Oxígeno Disuelto:

$$OD_{Mez} = \frac{(7 \times 10) + (2 \times 0.694)}{10.694} = 6.67 \frac{mg}{l}$$

d) Temperatura

$$T_{Mez} = \frac{(15 \times 10) + (25 \times 0.694)}{10.694} = 15.65^{\circ}C$$

2.- Corrección de las constantes de oxigenación y desoxigenación, por temperatura; considerando la corriente como de velocidad lenta.<sup>14</sup>

$f_o = 1.25$   
 corrigiendo el valor de  $f$

$$f = \frac{r}{k} \quad \begin{array}{l} r = \text{cte. de oxigenación (1/día)} \\ k = \text{cte. de desoxigenación (1/día)} \end{array} \quad \begin{array}{l} C_r = 0.018 \\ C_k = 0.046 \end{array}$$

$$f = f_o e^{(C_r - C_k)(T - T_o)}$$

$$f = 1.25 e^{(0.018 - 0.046)(15 - 25)} = 1.65$$

3.- Determinación del Déficit de Oxígeno inicial, consideramos para la Cd. de México un  $OD_{sat} = 7 \text{ mg/l}$

$$D_a = 7.0 - 6.67 = 0.33 \text{ mg/l}$$

4.- Determinación del Déficit Crítico y su localización:

$$a) t_c = \frac{1}{k(f-1)} \ln \left[ f(1 - (f-1) \frac{D_a}{L_a}) \right]$$

$$t_c = \frac{1}{0.23(1.65-1)} \ln \left[ 1.65(1 - (1.65-1) \frac{0.33}{22.97}) \right] = 3.29 \text{ d}$$

$$b) D_c = L_a \frac{e^{-kt_c}}{f} = \frac{22.97 e^{-0.23(3.29)}}{1.65} = 6.53 \text{ mg/l}$$

c) Estas condiciones se presentarán a una distancia de :

$$x = 0.25 \frac{m}{s} \times 86.400 \frac{s}{d} \times 3.29 d = 71.06 \text{ Km}$$

<sup>14</sup> Referencia No. 5 , pg. 132.

5.- Determinación del déficit en los puntos 10,20,30,40,50,60,71, 80,90,100,110,150

$$a) \quad t = \frac{x}{V} \text{ Km} \quad ; \quad V = \frac{(m/s)}{3.6} \times \frac{(s/d)}{86.400} \times \frac{(Km/m)}{1000} = 21.6 \text{ Km}$$

b) Los déficits en estos tiempos son:

$$D_i = \frac{L_a}{f-1} e^{-kti} \left[ 1 - e^{-(f-1)kti} \left[ 1 - (f-1) \frac{D_a}{L_a} \right] \right]$$

c) Las concentraciones de OD en cada punto son :

$$C_{OD} = OD_{sat} - O_{Di}$$

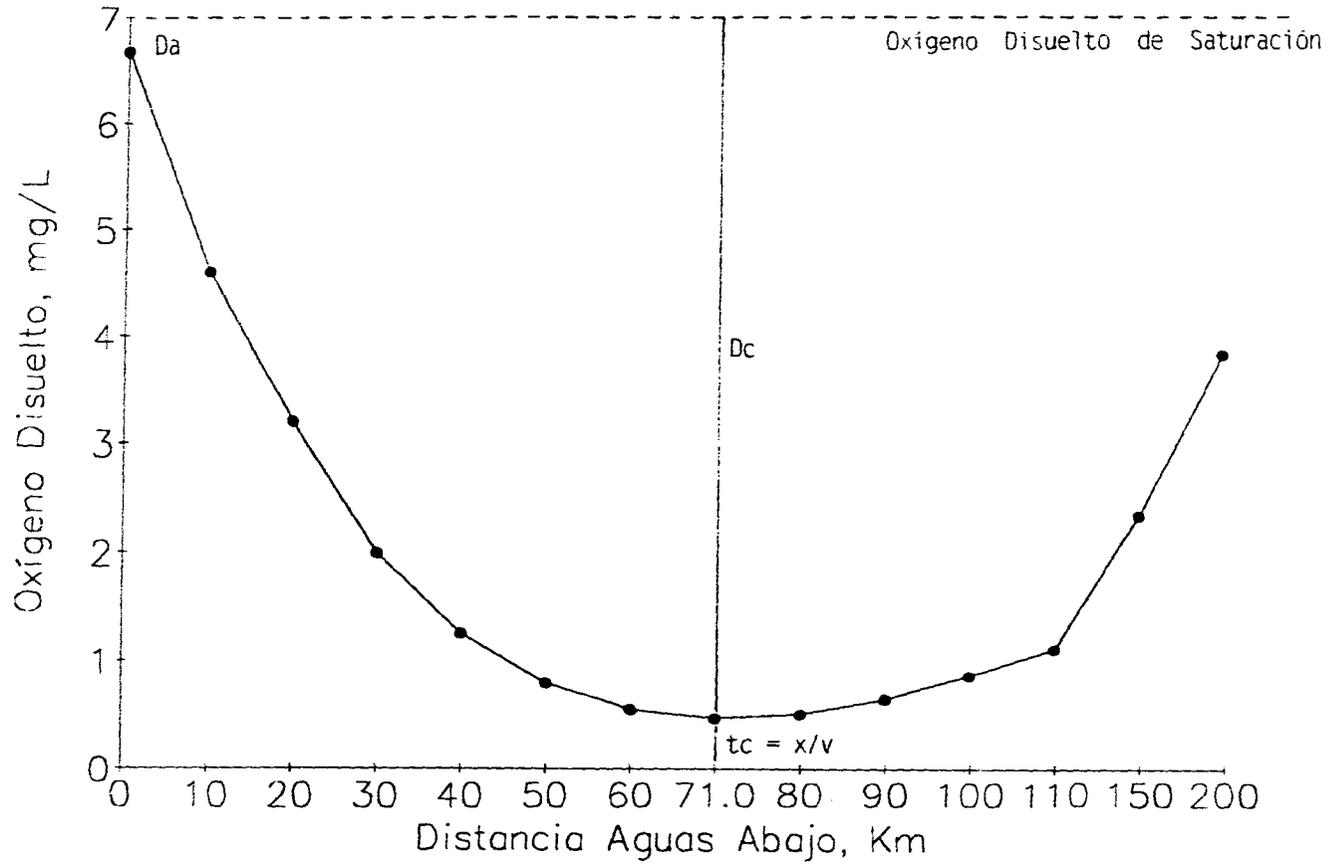
TABULACION

		Dfs.	C <sub>OD</sub>
t <sub>10</sub>	= 0.4629	2.40	4.6
t <sub>20</sub>	0.9259	3.92	3.08
t <sub>30</sub>	1.3888	5.00	2.00
t <sub>40</sub>	1.8518	5.74	1.26
t <sub>50</sub>	2.3148	6.20	0.8
t <sub>60</sub>	2.7777	6.45	0.55
t <sub>71.06</sub>	3.2898	6.53	0.47
t <sub>80</sub>	3.7037	6.49	0.51
t <sub>90</sub>	4.1666	6.35	0.65
t <sub>100</sub>	4.6296	6.14	0.86
t <sub>110</sub>	5.0926	5.88	1.12
t <sub>150</sub>	6.9444	4.64	2.36
t <sub>200</sub>	9.2592	3.16	3.84

Estos puntos están unidos en una curva que indica el déficit de oxígeno en la corriente, y muestra el comportamiento del déficit de oxígeno en la corriente, enseguida se presenta la gráfica.

Los valores de la posición y magnitud del  $D_c$  están relacionados al sistema de variables (  $k$ ,  $r$ ,  $L_a$ ,  $D_a$  y la velocidad ). El tiempo de recorrido para el déficit crítico ( $t_c$ ) está influenciado fuertemente por los valores de  $k$  y  $r$ , mientras que la magnitud del déficit está afectada mayormente por el valor de  $L_a$ . No solamente las cargas orgánicas fuertes resultan en déficits mayores, sino que también se extiende su influencia más allá, aguas abajo, provocando el desarrollo de condiciones anaerobias. Bajo estas condiciones, el oxígeno es consumido rápidamente, siendo usado por los organismos facultativos que también utilizan la materia orgánica producida por los organismos anaerobios. En una corriente profunda, los organismos anaerobios pueden reproducirse cerca del fondo. Solamente después de que la fuerza de la descarga ha sido suficientemente reducida, las condiciones aerobias se restablecerán. El metabolismo anaerobio es un proceso lento, y la recuperación de una corriente con mucha carga orgánica resulta lenta y con una curva de oxigenación que se extenderá lejos aguas abajo, como es el caso de este ejemplo, en el cual no son suficientes los 200 Km del sistema de canales para restaurar las condiciones originales del agua antes de la descarga.

### Déficit de Oxígeno en la corriente



## VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

Después de haber analizado en forma breve el problema de la contaminación del agua que ocurre en los cuerpos y corrientes naturales, así como los principales procesos de autodepuración, enseguida se presentan las conclusiones más relevantes que se obtuvieron en el desarrollo del presente trabajo:

#### 7.1.1 CONTAMINACION

. Se ha modificado sensiblemente la presencia del agua en la atmósfera de muchas zonas, al afectarse el microclima debido a la tala inmoderada y a la reducción del volumen de los cuerpos de agua o su desecación. Este tipo de prácticas produce, además erosión, azolvamiento de cuerpos de agua y alienta la desertificación.

. Las corrientes superficiales, al estar íntimamente ligadas a la precipitación, presentan un patrón similar al de aquélla. La distribución inequitativa del escurrimiento superficial hace que en algunas ciudades y en comarcas completas la demanda de agua haya rebasado la disponibilidad, situación que presenta cada vez conflictos más graves por el aprovechamiento del líquido.

. Los almacenamientos naturales se han deteriorado en general por deficiencias en el balance de agua, debido a extracciones excesivas en las corrientes que los alimentan; tala inmoderada de

sus cuencas, con el consiguiente arrastre de sedimentos; descargas de aguas residuales y sobreexplotación del recurso pesquero.

Existe una fuerte tendencia de muchos lagos y lagunas a presentar cambios en sus características originales, lo que provoca modificaciones negativas en los ecosistemas que dificultan la utilización de estos cuerpos de agua para las distintas actividades, e inclusive existe el peligro de su desaparición, por lo que urge que se lleven a cabo acciones para un manejo adecuado de las cuencas, preservación de los cuerpos de agua con una alta calidad estética o natural, y control de las descargas de aguas residuales.

A nivel nacional, cerca del 80 %<sup>15</sup> de la contaminación del agua, medida con base en la demanda bioquímica de oxígeno y sólidos totales, proviene de la industria manufacturera.

#### 7.1.2 SALUD

Para los humanos, que somos los generadores de la contaminación, existen graves riesgos de salud: casi el 80 %<sup>16</sup> de las enfermedades que padece el hombre se ligan con el agua contaminada, la insalubridad y la falta de higiene. Hay una relación directa entre la existencia de infraestructura para el abastecimiento de agua potable a la población y la mortandad infantil. En México, la segunda causa de mortalidad es debida a

---

<sup>15</sup> Referencia No. 10

<sup>16</sup> Referencia No. 13

padecimientos gastrointestinales en los que el agua tiene un papel muy importante, no sólo por consumo, sino también por su uso en la elaboración y venta de alimentos. La gran diversidad de contaminantes que hay en el agua causan serias enfermedades que pueden provocar endemias y epidemias. El agua contaminada por microorganismos produce cólera, ceguera por tracoma, elefantiasis, amebiasis, diarreas y disentería, fiebre tifoidea, etcétera.

. Algunos contaminantes químicos, como los fluoruros y el mercurio, suelen causar alteraciones de huesos, dientes y esqueleto, mientras que otros como el plomo, el hierro, el cadmio y el arsénico, afectan el desarrollo físico y mental del ser humano.

### 7.1.3 AUTOLEPURACION

. Los procesos de Autodepuración de las corrientes o cuerpos de agua pueden ser modelados, siempre que sean conocidas las características de los desechos y el sistema de variables establecidas para esos sitios.

. Dentro de los modelos matemáticos para determinar la concentración de oxígeno disuelto en corrientes naturales, publicados, el de mayor aplicación es el desarrollado por Streeter y Phelps (1925), también es el trabajo del que más información se puede encontrar, su forma de aplicación es sencilla y muy general, siendo también poco preciso cuando la corriente en estudio varía significativamente (en sus características hidráulicas) en el

tramo de estudio, y en la base de datos del modelo se consideran valores constantes.

. Las constantes de reaeración y desoxigenación se han determinado experimentalmente en diferentes corrientes con diversas características físicas e hidráulicas y se presentan en tablas, existe también una serie de modelos matemáticos para la obtención de las constantes, los cuales no se tratan por no ser del alcance de este trabajo. En teoría, para el estudio de cada corriente se deberían obtener sus propias constantes, pero en muchas ocasiones se toman los valores de las tablas publicadas en la literatura técnica, y en base a las apreciaciones de la corriente en estudio, pudiendo variar notablemente los resultados dependiendo de la elección hecha de las constantes. El hecho de no realizar los estudios para la determinación de las constantes es debido generalmente a la restricción de tiempo o de los recursos económicos.

. La autodepuración de las corrientes naturales es en estos tiempos un proceso al cual no se puede dejar toda la iniciativa de recuperación de los cauces, toda vez que el poder de autopurificación es mucho menor que la capacidad de generación de compuestos nocivos para la salud de las corrientes.

#### 7.1.4 GOBIERNO Y EDUCACION

. Los esfuerzos por controlar la contaminación a nivel nacional se intensificaron a mediados de la década de 1970, y los

resultados obtenidos en los últimos 20 años han sido escasos; principalmente por que las acciones se han enfocado más a restituir la calidad del agua que a controlar la contaminación.

. Existe poca conciencia de la población acerca de la importancia de utilizar eficientemente el agua.

#### 7.1.5 KOCHIMILCO

. De acuerdo a los resultados experimentales obtenidos en las pruebas realizadas tanto en campo como en laboratorio y con las formulaciones aplicadas, se indica que el agua que se tiene en los canales de Xochimilco es de calidad pobre y no apta para el disfrute estético.

### 7.2 RECOMENDACIONES

Enseguida se presentan las recomendaciones que se consideran más relevantes relativas al tema tratado, con el propósito de que en lo posible sean tomados en cuenta por aquellos profesionistas y estudiantes a quienes fundamentalmente se dirigió el presente trabajo:

. El control de la eutroficación de los ecosistemas acuáticos y la conservación de la calidad del cuerpo de agua se podría corregir en buena medida no vertiendo fosfatos en los cuerpos receptores, eliminando los fosfatos de los detergentes industriales y de uso doméstico, depurando las aguas residuales antes de ser vertidas,

instalando sistemas de desfosfatación en las plantas de tratamiento, control de los efluentes agrícolas e inyectando oxígeno puro en los lagos eutroficados.

. El cumplimiento de los reglamentos relativos a la disposición de las aguas residuales que se dictan en la normatividad y la obligación - concientización de las industrias debe ser prioridad para que las aguas que se viertan a los cauces tengan una calidad razonablemente adecuada para que los procesos naturales de autopurificación se puedan llevar a cabo de una manera completa.

. Se deben adoptar y respetar las medidas y métodos para la prevención y control de la contaminación del agua de los cuerpos receptores, ya que de lo contrario, en poco tiempo, las aguas que son transportadas por estos cuerpos no podrán ser utilizadas para los usos que requiere el desarrollo de México.

. Realizar estudios para la evaluación del impacto ambiental. La predicción de los efectos negativos que puede ocasionar la construcción de las obras de abastecimiento de agua, irrigación, control de avenidas y generación de energía eléctrica, así como el establecimiento de las medidas de mitigación correspondientes permitiría un aprovechamiento racional y sostenido del agua, y resolvería otros conflictos de orden ambiental.

. Promover la aplicación de tecnologías apropiadas para la disposición de residuos sólidos y aguas residuales en zonas donde

no es posible hacer llegar el servicio convencional de agua potable y alcantarillado.

. Concientizar a la sociedad en general de la necesidad de tratar las aguas residuales antes de su disposición a cuerpos acuáticos receptores, para evitar la reducción de la calidad del agua en los mismos, de modo que no se comprometan los usos del recurso aguas abajo. Continuar con el programa de rehabilitación de plantas de tratamiento municipales existentes y promover la construcción de instalaciones nuevas.

. Promover distritos de control de la contaminación del agua, por medio de alicientes financieros, cobro justo de cuotas por servicio y reglamentación de las descargas que recibe el sistema.

. Promoción del reuso de agua en la industria, el riego agrícola y de jardines y en caso que llegue a requerirse, para abastecimiento de la población, previos estudios y para uso no potable.

. La aplicación de una o más de las opciones planteadas permitirá mitigar uno de los conflictos más graves a los que se enfrenta el desarrollo del país: la disponibilidad de agua, en cantidades suficientes y con la calidad adecuada para sostener el crecimiento de la población, el desarrollo industrial, la ampliación de la frontera agrícola, el desarrollo del sector pecuario y la generación de energía eléctrica.

. Es imperativa una mejor educación en materia ecológica para proteger los recursos naturales y las fuentes, mantener limpia el agua que bebemos y que utilizamos para todo el ciclo de vida : humana, vegetal y animal.

. Es necesario hacer conciencia en la importancia de llevar a cabo una explotación más racional del agua. Desde el momento de la captación, pasando por su consumo en las ciudades, la industria y el campo, hasta la adecuada y rigurosa purificación de los efluentes residuales.

## FACULTAD DE INGENIERÍA

Programa de Ingeniería

ING. CIVIL, TOP. Y GEODÉSICA

INGENIERÍA SANITARIA

División

Departamento

PROGRAMA DE LA ASIGNATURA: CONTAMINACION DE AGUASClave: 0198 Núm. de créditos: 6 Carrera: Ingeniero CivilDuración del curso: semanas: 16 horas: 48 Horas a la semana: Teoría: 3 Prácticas:       

OBJETIVO DEL CURSO: El alumno enunciará, generalizará y aplicará principios, métodos y técnicas de Ingeniería sanitaria, para relacionar datos de calidad del agua y estimar en forma general el grado de su contaminación. Asimismo describirá de manera general el proceso de autopurificación natural de las corrientes de agua superficial y los métodos y procesos de tratamiento más usuales para el control de la contaminación del agua.

TEMAS

Núm:	Nombre:	Horas:
I.	ORIGEN DE LA CONTAMINACION,	3.0
II.	PLANEACION PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION.	21.0
III.	EFFECTOS DE LA CONTAMINACION,	6.0
IV.	PROCESOS DE AUTODEPURACION,	6.0
V.	ACCIONES PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA,	12.0

OBJETIVOS Y ANTECEDENTES DE LOS TEMAS

	Horas:
TEMA I. "ORIGEN DE LA CONTAMINACION"	3.0
Explicará las causas principales que originan la contaminación del agua.	
TEMA II. "PLANEACION PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION"	21.0
Enunciará las tareas, procedimientos y elementos humanos y materiales que son necesarios en la planeación del control de la contaminación del agua. Explicará en qué consisten los trabajos de campo, de laboratorio y de gabinete encaminados a evaluar la calidad del agua.	
TEMA III. "EFECTOS DE LA CONTAMINACION"	6.0
Analizará los efectos que pueden producirse debido a la contaminación de cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, relacionando tales efectos con aspectos económicos y sociales.	
TEMA IV. "PROCESOS DE AUTODEPURACION"	6.0
Explicará los fenómenos que ocurren en una corriente al ser contaminada y los procesos naturales que ocurren para regenerar su calidad.	
TEMA V. "ACCIONES PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA"	12.0
Explicará qué aspectos de carácter técnico, económico y legal son necesarios para llevar a cabo medidas tendientes a prevenir y controlar la contaminación de los cuerpos de agua.	

CONTENIDO DE LOS TEMASHoras:

TEMA I.	"ORIGEN DE LA CONTAMINACION"	3.0
1.1	El agua como elemento esencial de desarrollo. Usos de importancia socioeconómica.	
1.2	Panorama de la contaminación del agua. Recursos hidráulicos. Fuentes de contaminación. Caso de México.	
TEMA II.	"PLANEACION PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION"	21.0
11.1	Personal y equipo. Nivel de preparación.	
11.2	Factores humanos y materiales. Parámetros de calidad.	
11.3	Trabajos de gabinete. Planeación del trabajo.	
11.4	Trabajos de campo. Aforos, muestreos, análisis esenciales.	
11.5	Trabajos de laboratorio. Descripción general y demostraciones de laboratorio.	
TEMA III.	"EFECTOS DE LA CONTAMINACION"	6.0
111.1	Cuerpos receptores. Clasificación. Características generales. Aspectos legales.	
111.2	Aguas superficiales. Difusión de efluentes -- contaminados. Repercusiones sociales y económicas de su degradación.	
111.3	Aguas subterráneas. Formas de contaminarse. -- Repercusiones sociales y económicas de su degradación.	
111.4	Aguas estuarinas y marinas. Causas de contaminación. Repercusiones sociales y económicas -- de su degradación.	
TEMA IV.	"PROCESOS DE AUTODEPURACION"	6.0
IV.1	Etapas de degradación y recuperación.	
IV.2	Reoxigenación.	
IV.3	Balance del oxígeno disuelto.	
TEMA V.	"ACCIONES PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA"	12.0
V.1	Control de las fuentes de contaminación.	
V.2	Tratamiento de aguas residuales. Características generales de los procesos.	
V.3	Métodos de control a nivel de cuencas. Aspectos legales. Aspectos técnicos y económicos.	

## BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- 1.- "Abastecimiento de Agua y Alcantarillado". Ernest W. Steel  
2a. Edición Norteamericana
- 2.- "Agua y Salud Humana". F. Eugene Mc Junkin  
OPS Limusa 1985
- 3.- "Applied Stream Sanitation". Velz J. Clarence  
Wiley-Interscience
- 4.- "Calidad y Cantidad del Agua en México". M. Athié Lambarri  
Universo Veintiuno 1a Edición 1987.
- 5.- "Contaminación de Aguas". Ernesto Murguía Vaca  
Facultad de Ingeniería, UNAM, 1981.
- 6.- "Control de la Calidad del Agua Potable en Sistemas de Abas-  
tecimiento para Pequeñas Comunidades". Organización Paname-  
ricana de la Salud. 1988.
- 7.- "Diario Oficial de la Federación". Enero 28, 1988.  
Septiembre 20, 1991.  
Octubre 18, 1993.  
Enero 12, 1994.  
Agosto 15, 1994.
- 8.- "Environmental Engineering". Peavy/Rowe/Tchobanoglous  
Mc. Graw-Hill series in Water Resources and Environmental  
Engineering. 1985
- 9.- "Epoca-Semanario de México". Abril 20, 1992. #46  
Fernando Patiño Armenta  
Artículo: -El Agua se Acaba, -Los Centros Turísticos  
Degradados-.
- 10.- "Estadísticas de Salud en México". Secretaría de Salud. 1990

- 11.- "Gaceta Ecológica". Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Junio 1989.
- 12.- "Glosario de Términos". SEDUE. Subsecretaría de Ecología.
- 13.- "Informe de la Situación General en Materia de equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente". SEDESOL 1991-1992.
- 14.- "Instructivo Sanitario". Comisión Constructora e Ingeniería Sanitaria. SSA.
- 15.- "La Ingeniería y el Medio Ambiente".  
Leyva/Paniagua/Ramírez/vega  
División de Ciencias Básicas. F.I. UNAM. 1985
- 16.- "Muy Interesante - Especial Ecología #3"  
-GAIA, Planeta Vivo, Eutrofización, El agua potable.
- 17.- "Plan de Rescate Ecológico de Xochimilco"  
Ciudad de México. DDF-1990
- 18.- "Purificación de Aguas y Tratamiento y remoción de Aguas Residuales". Fair/Geyer/Okun Vol. II  
Limusa Wiley, S.A. México 1973
- 19.- "Stream, Lake, Estuary, and Ocean Pollution".  
Nemow, Nelson Leonard. 2d. Ed. New York, Nostrand Reinhold  
1991.
- 20.- "Wastewater Engineering Treatment/Disposal/Reuse".  
G. Tchobanoglous.  
Metcalf and Eddy, inc. 1979
- 21.- "Water and Wastewater Engineering Systems". D. Barnes, D.J.  
Bliss, B.W. Gould, H.R. Vallentine.