

# Características de las aguas residuales

El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental de cara al proyecto y explotación de las infraestructuras tanto de recogida como de tratamiento y evacuación de las aguas residuales, así como para la gestión de la calidad medioambiental. Para facilitar este conocimiento, en este capítulo se proporciona información sobre las diferentes áreas temáticas de interés, que incluyen: (1) introducción a las características físicas, químicas y biológicas del agua residual; (2) definición y utilidad de las características físicas; (3) definición y utilidad de las características químicas; (4) definición y utilidad de las características biológicas; (5) composición de las aguas residuales; y (6) estudios de caracterización de aguas residuales.

## ***3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS y BIOLÓGICAS DEL AGUA RESIDUAL***

---

A continuación se describen brevemente los constituyentes físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales, los contaminantes importantes de cara al tratamiento de las aguas, los métodos de análisis, y las unidades que se emplean para caracterizar la presencia de cada uno de los contaminantes en el agua residual.

### Constituyentes de las aguas residuales

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica. La Tabla 3-1 muestra las principales propiedades físicas de agua residual así como sus principales constituyentes químicos y biológicos, y su procedencia. Es conveniente observar que muchos de los parámetros que aparecen en la tabla están relacionados entre ellos. Por ejemplo, una propiedad física como la temperatura afecta tanto a la actividad biológica como a la cantidad de gases disueltos en el agua residual.

#### TABLA 3-1

Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias

---

Características	Procedencia
-----------------	-------------

---

Propiedades físicas:

*Color* Aguas residuales domésticas e industriales, degradación natural de materia orgánica

*Olor* Agua residual en descomposición, residuos industriales  
*Sólidos* Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas  
*Temperatura* Aguas residuales domésticas e industriales

Constituyentes químicos:

*Orgánicos*

*Carbohidratos* Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales

*Grasas animales, aceites* Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales y grasa

*Pesticidas* Residuos agrícolas

*Fenoles* Vertidos industriales

*Proteínas* Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales

*Contaminantes prioritarios* Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales

*Agentes tensoactivos* Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales

*Compuestos orgánicos volátiles* Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales

*Otros* Degradación natural de materia orgánica

*Inorgánicos:*

*Alcalinidad* Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea

*Cloruros* Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea

*Metales pesados* Vertidos industriales

*Nitrógeno* Residuos agrícolas y aguas residuales domésticas

*PH* Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales

*Fósforo* Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales; aguas de Escorrentía

*Contaminantes prioritarios* Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales

*Azufre* Agua de suministro; aguas residuales domésticas, comerciales e industriales

*Gases:*

*Sulfuro de hidrógeno* Descomposición de residuos domésticos

*Metano* Descomposición de residuos domésticos

*Oxígeno* Agua de suministro; infiltración de agua superficial

Constituyentes biológicos:

*Animales* Cursos de agua y plantas de tratamiento

*Plantas* Cursos de agua y plantas de tratamiento

*Protistas:* Eubacterias Aguas residuales domésticas, infiltración de  
agua superficial, plantas de tratamiento  
Arqueobacterias Aguas residuales domésticas, infiltración de agua  
superficial, plantas de tratamiento  
*Virus* Aguas residuales domésticas

---

### Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual

En la Tabla 3-2 se describen los contaminantes de interés en el tratamiento del agua residual. Las normas que regulan los tratamientos secundarios están basadas en las tasas de eliminación de la materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua residual. Gran parte de las normas implantadas recientemente, más exigentes, incluyen el control de la eliminación de nutrientes y de los contaminantes prioritarios. Cuando se pretende reutilizar el agua residual, las exigencias normativas incluyen también la eliminación de compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y, en algunos casos, sólidos inorgánicos disueltos.

**TABLA 3-2**

Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual

Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual.
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.

### Métodos analíticos

Para la caracterización del agua residual se emplean tanto métodos de análisis cuantitativos, para la determinación precisa de la composición

química del agua residual, como análisis cualitativos para el conocimiento de las características físicas y biológicas. Los métodos cuantitativos pueden ser gravimétricos, volumétricos o fisicoquímicos. Estos últimos se utilizan para determinar parámetros no relacionados con las propiedades másicas o volumétricas del agua, e incluyen métodos instrumentales como la turbidimetría, colorimetría, potenciometría, polarografía, espectrometría de adsorción, fluorimetría, espectroscopia y radiación nuclear. Los detalles relativos a los diversos análisis pueden encontrarse en la publicación *Standard Methods* [18], que constituyen la referencia más ampliamente aceptada que detalla los procedimientos para llevar a cabo los análisis del agua y del agua residual.

### **Unidades de medida de los parámetros físicos y químicos**

Los resultados de los análisis de muestras de agua residual se expresan en unidades de medida tanto físicas como químicas. En la Tabla 3-3 se indican las unidades de medida más frecuentes. Las mediciones de parámetros químicos suelen expresarse en unidades físicas, miligramo por litro (mg/l) o gramo por metro cúbico ( $\text{g}/\text{m}^3$ ). Las concentraciones de trazadores se expresan normalmente en microgramos por litro ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ). Para los sistemas diluidos en los que un litro pesa aproximadamente un kilogramo, como es el caso tanto de aguas naturales como aguas residuales, se pueden sustituir las unidades mg/l o  $\text{g}/\text{m}^3$  por la unidad partes por millón (ppm), que representa la relación en peso.

**TABLA 3-3**

Unidades comúnmente empleadas para expresar los resultados de los análisis

Magnitud	Determinación	Unidades
<i>Análisis físicos:</i>		
Densidad	$\frac{\text{Masa de disolución}}{\text{Unidad de volumen}}$	kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje en volumen	$\frac{\text{Volumen de soluto} \times 100}{\text{Volumen total de disolución}}$	% (en volumen)
Porcentaje en masa	$\frac{\text{Masa de soluto} \times 100}{\text{Masa total de soluto + disolvente}}$	% (en masa)
Relación de volumen	$\frac{\text{Mililitros}}{\text{Litro}}$	ml/l
Masa por unidad de volumen	$\frac{\text{Microgramos}}{\text{Litro de disolución}}$	µg/l
	$\frac{\text{Miligramos}}{\text{Litro de disolución}}$	mg/l
	$\frac{\text{Gramos}}{\text{Metro cúbico de disolución}}$	g/m <sup>3</sup>
Relación de masa	$\frac{\text{Miligramo}}{10^6 \text{ miligramos}}$	ppm
<i>Análisis químicos:</i>		
Molalidad	$\frac{\text{Moles de soluto}}{1.000 \text{ gramos de disolvente}}$	mol/kg
Molaridad	$\frac{\text{Moles de soluto}}{\text{Litro de disolución}}$	mol/l
Normalidad	$\frac{\text{Equivalentes de soluto}}{\text{Litro de disolución}}$	equiv/l
	$\frac{\text{Miliequivalentes de soluto}}{\text{Litro de disolución}}$	meq/l

Note, mg/l = g/m<sup>3</sup>.

Los gases disueltos se consideran como constituyentes químicos, y se miden en mg/l o g/m<sup>3</sup>. Los gases desprendidos como subproducto del tratamiento de las aguas residuales, tales como el metano y el nitrógeno (descomposición anaerobia), se miden en litros o metros cúbicos. Los resultados de los ensayos, y los parámetros como temperatura, olor, ion hidrógeno y organismos biológicos, se expresan en unidades diferentes, tal como se explica en los apartados 3.2, 3.3 y 3.4.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS: DEFINICIÓN Y UTILIDAD

Las características físicas más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad.

#### Sólidos totales

Analíticamente, se define el contenido de sólidos totales como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación a entre 103 y 105 °C (Fig. 3-1).

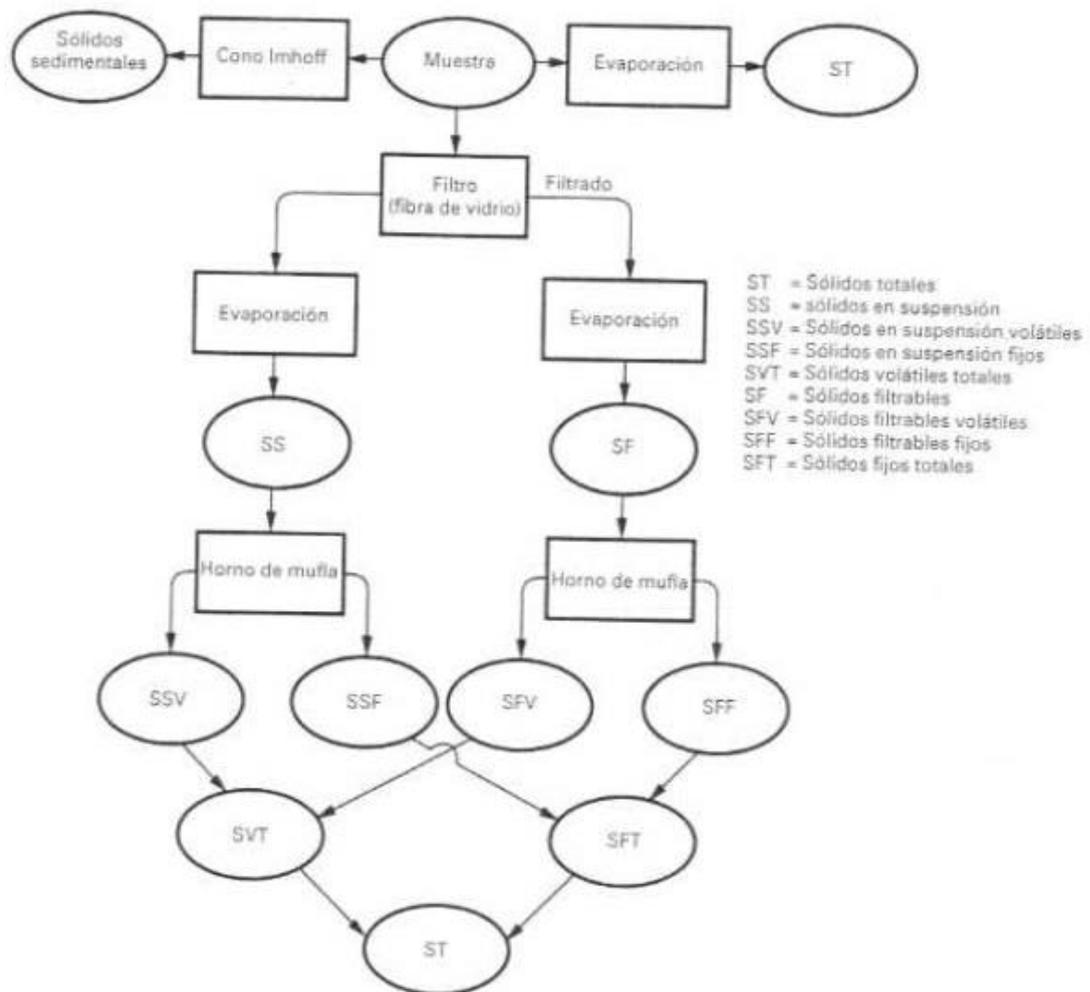
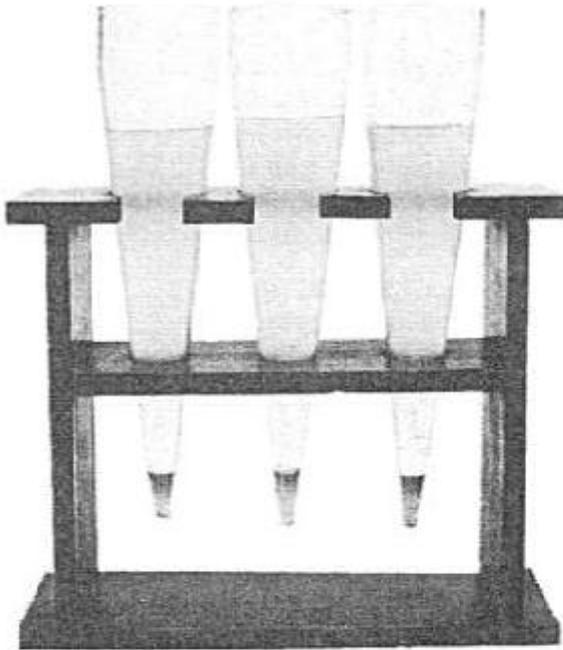


FIGURA 3-1

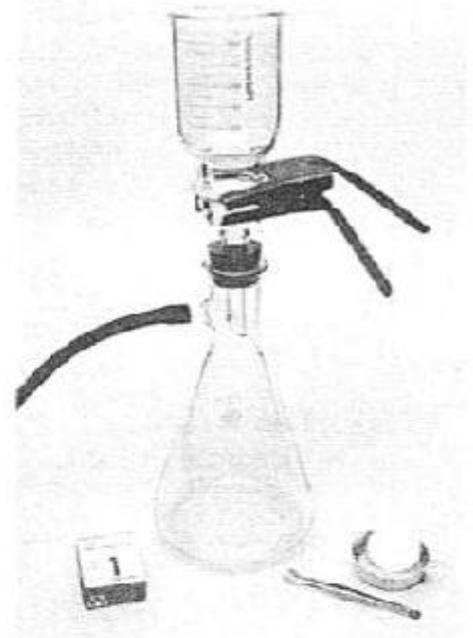
Interrelación entre los sólidos presentes en el agua y en el agua residual. En gran parte de la literatura referente a la calidad del agua, los sólidos que pasan a través de un filtro reciben el nombre de sólidos disueltos [23].

No se define como sólida aquella materia que se pierde durante la evaporación debido a su alta presión de vapor. Los sólidos sedimentables se definen como aquellos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en el transcurso de un periodo de 60 minutos (Fig. 3-2). Los sólidos sedimentables, expresados en unidades de ml/l, constituyen una medida aproximada de la cantidad de fango que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual.



**FIGURA 3-2**

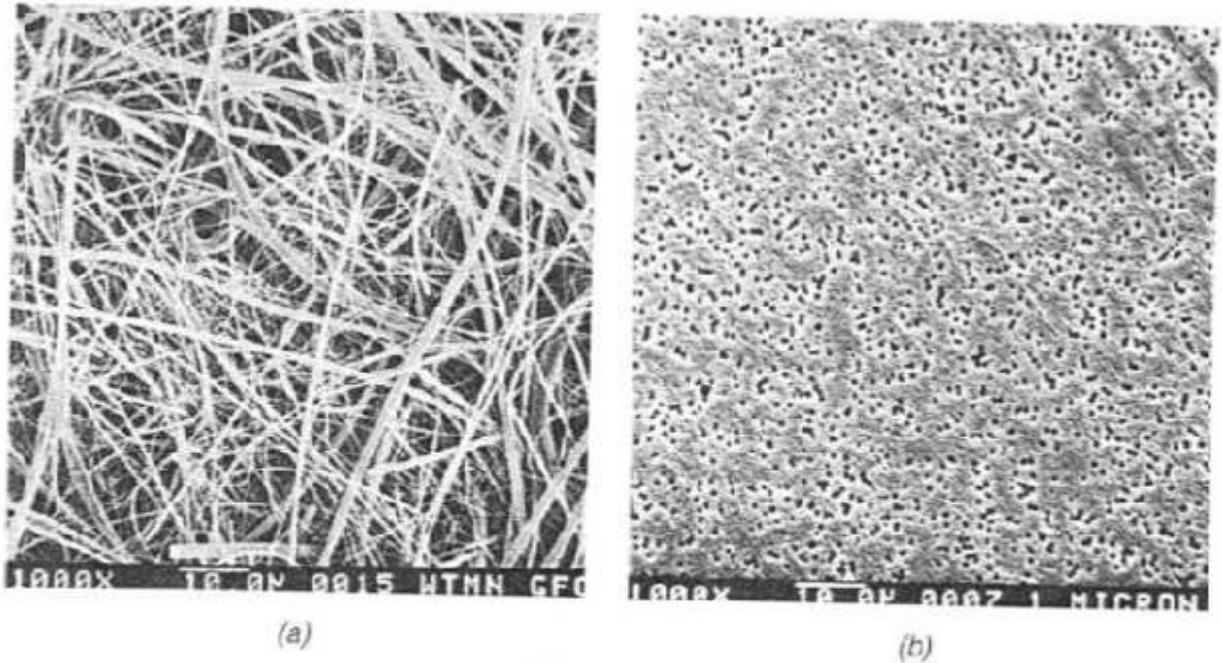
Cono Imhoff empleado para la determinación de los sólidos sedimentables presentes en el agua residual. La cantidad de sólidos acumulados en la parte inferior del cono se expresa en ml/l.



**FIGURA 3-3**

Aparato empleado para la determinación del contenido de sólidos en suspensión. Una vez filtrada la muestra de agua residual, se coloca el filtro de fibra de vidrio (tardado previamente) en un platillo de aluminio para su secado antes de pesarlo.

Los sólidos totales, o residuo de la evaporación, pueden clasificarse en filtrables o no filtrables (sólidos en suspensión) haciendo pasar un volumen conocido de líquido por un filtro (Fig. 3-3). Para este proceso de separación suele emplearse un filtro de fibra de vidrio (Whatman GF/C), con un tamaño nominal de poro de 1,2 micrómetros, aunque también suele emplearse filtro de membrana de policarbonato. Es conveniente destacar que los resultados que se obtienen empleando ambos tipos de filtro pueden presentar algunas diferencias, achacables a la diferente estructura de los filtros (Fig. 3-4).



**FIGURA 3-4**

Micrografos de dos filtros de laboratorio empleados para la medición del contenido de sólidos en suspensión del agua residual: (a) filtro de fibra de vidrio con tamaño nominal de poro de 1,2 micras, (b) filtro de membrana de policarbonato con tamaño nominal de poro de 1.0 micras [6].

La fracción filtrable de los sólidos corresponde a sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal está compuesta por las partículas de materia de tamaños entre 0,001 y 1 micrómetro. Los sólidos disueltos están compuestos de moléculas orgánicas e inorgánicas e iones en disolución en el agua. No es posible eliminar la fracción coloidal por sedimentación. Normalmente, para eliminar la fracción coloidal es necesaria la oxidación biológica o la coagulación complementadas con la sedimentación. En la Figura 3-5 se indican los principales tipos de materiales que integran los sólidos filtrables y los no filtrables, y su tamaño aproximado.

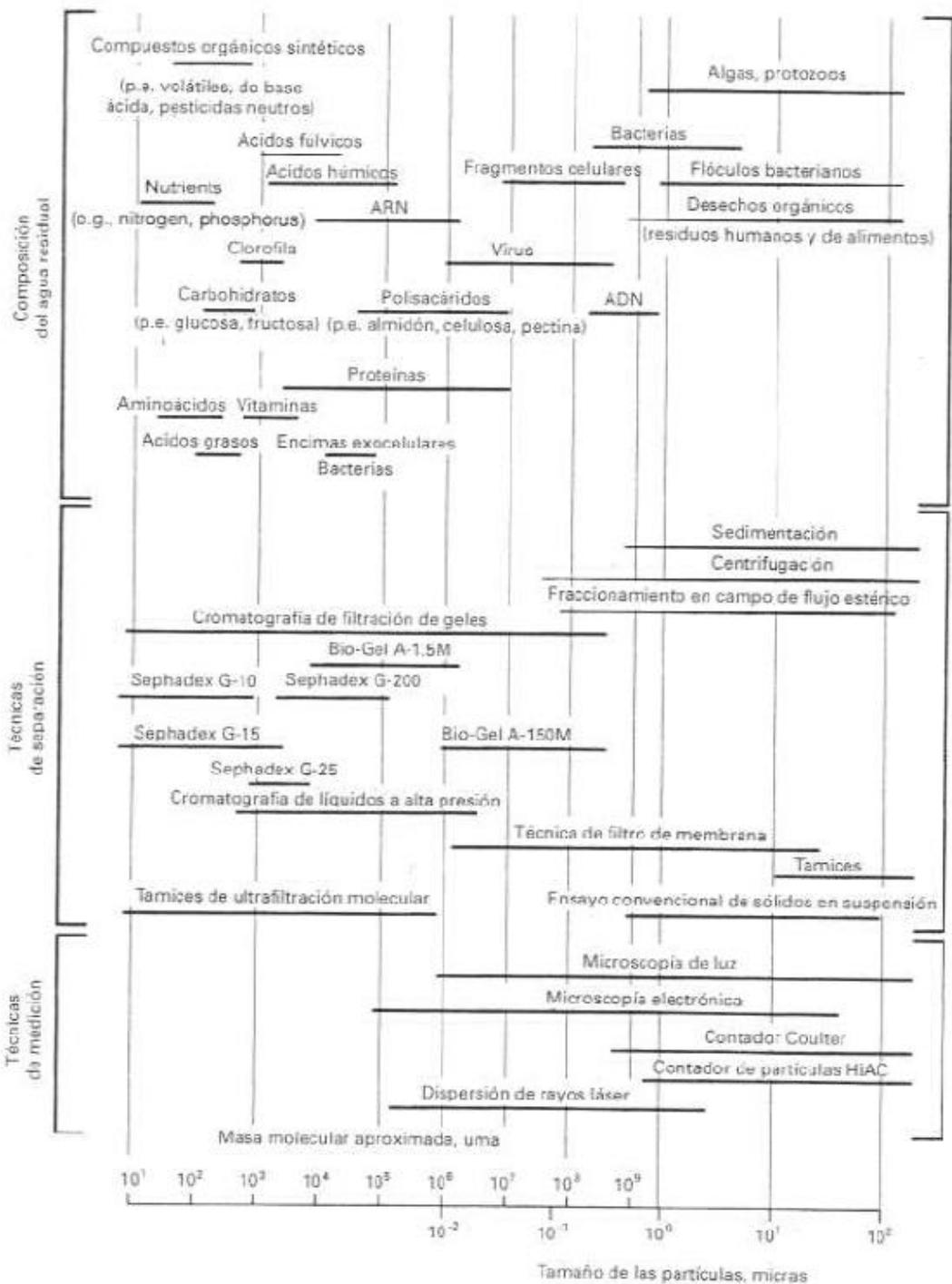
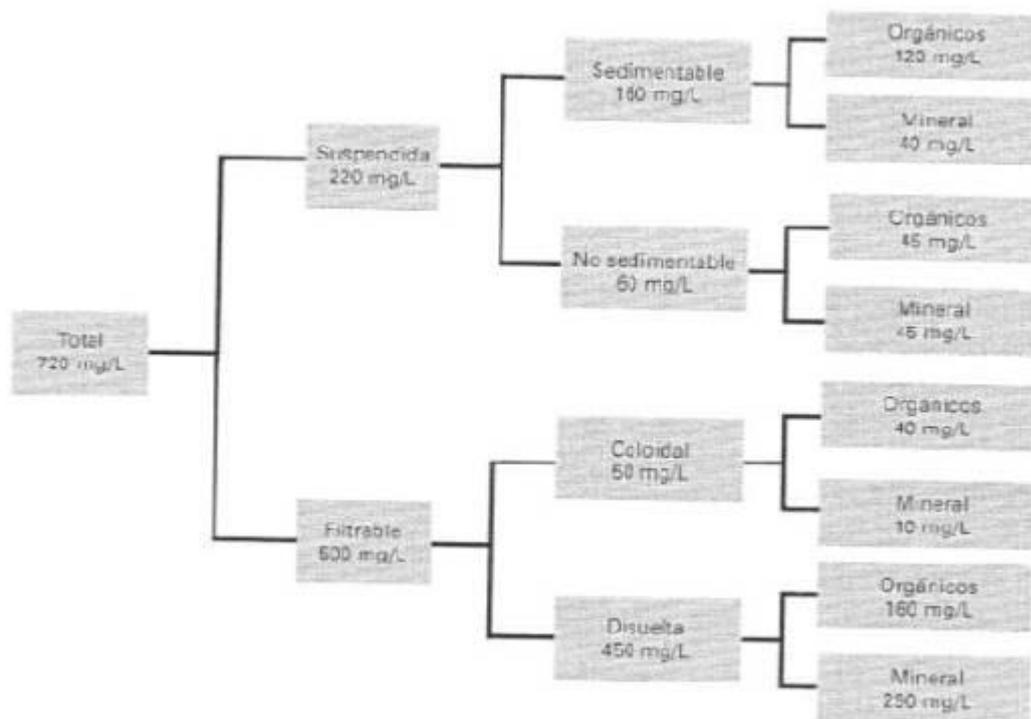


FIGURA 3-5

Intervalos de tamaños de los contaminantes orgánicos presentes en el agua residual y técnicas de separación y medida empleadas en la cuantificación de los mismos (adaptado de la bibliografía [6]).

Cada una de las categorías de sólidos comentadas hasta ahora puede ser, a su vez, dividida en función de su volatilidad a  $550 \pm 50$  °C. A esta temperatura, la fracción orgánica se oxidará y desaparecerá en forma de gas, quedando la fracción inorgánica en forma de cenizas. De ahí que se

empleen los términos «Sólidos volátiles» y «Sólidos fijos» para hacer referencia, respectivamente, a los componentes orgánicos e inorgánicos (o minerales) de los sólidos en suspensión. A la temperatura de  $500 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , la descomposición de sales inorgánicas se limita al caso del carbonato de magnesio, que se descompone en óxido de magnesio y dióxido de carbono al alcanzar la temperatura de  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ . De las sales inorgánicas, la más frecuente y preponderante es el carbonato de calcio, que se mantiene estable hasta una temperatura de  $825 \text{ }^\circ\text{C}$ . El análisis de sólidos volátiles se emplea habitualmente para determinar la estabilidad biológica de fangos de aguas residuales. En la Figura 3-6 se proporciona una tabla que permite clasificar, aproximadamente, los contenidos en sólidos de un agua residual de concentración media.



**FIGURA 3-6**

Clasificación de los sólidos presentes en aguas residuales de concentración media.

Ejemplo 3-1. Análisis de los datos de sólidos. Los resultados que se presentan a continuación corresponden a ensayos realizados con una muestra de agua residual tomada en las instalaciones de cabecera de una planta de tratamiento de aguas residuales. Todos los ensayos se llevaron a cabo empleando muestras de 50 ml. Determinar la concentración de sólidos totales, sólidos totales volátiles y de sólidos suspendidos volátiles. Todas

las muestras se sometieron a procesos de evaporación, secado o combustión hasta peso constante.

Tara del plato de evaporación = 53,5433 g

Masa del plato de evaporación + residuo tras evaporación a 105 °C = 53,5793 g

Masa del plato de evaporación + residuo tras combustión a 550 °C = 53,5772 g

Tara del filtro Whatman (FV/C) = 1,5433 g

Residuo en el filtro Whatman (FV/C) tras secado a 105 °C = 1,5553 g

Residuo en el filtro Whatman (FV/C) tras combustión a 550 °C = 1,5531 g

Solución:

1. Determinación de los sólidos totales:

$$ST = \frac{(\text{Masa del plato de evaporación} - \text{residuo.g} - \text{Masa del plato de evaporación}) \times 1.000 \text{ g}}{\text{Volumen de la muestra. l}}$$

$$ST = \frac{(53,5793 - 53,5433) \times 1.000 \text{ mg/g}}{0,050 \text{ l}} = 720 \text{ mg/l}$$

2. Determinación de los sólidos volátiles:

$$SV = \frac{(53,5793 - 53,5772) \times 1.000 \text{ mg/g}}{0,050 \text{ l}}$$

3. Determinación de los sólidos en suspensión:

$$SS = \frac{(1,5553 - 1,5433) \times 1.000 \text{ mg/g}}{0,050 \text{ l}} = 240 \text{ mg/l}$$

4. Determinación de los sólidos suspendidos volátiles:

$$SSV = \frac{(1,5553 - 1,5531) \times 1.000 \text{ mg/g}}{0,050 \text{ l}} = 44 \text{ mg/l}$$

Olores

Normalmente, los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene un olor peculiar, algo desagradable, que resulta más tolerable que el del agua residual séptica. El olor más característico del agua residual séptica es el debido a la presencia del sulfuro de hidrógeno que se produce al reducirse los sulfatos a sulfitos por acción de microorganismos

anaerobios. Las aguas residuales industriales pueden contener compuestos olorosos en sí mismos, o compuestos con tendencia a producir olores durante los diferentes procesos de tratamiento.

La problemática de los olores está considerada como la principal causa de rechazo a la implantación de instalaciones de tratamiento de aguas residuales [13]. En los últimos años, con el fin de mejorar la opinión pública respecto a la implantación de los sistemas de tratamiento, el control y la limitación de los olores han pasado a ser factores de gran importancia en el diseño y proyecto de redes de alcantarillado, plantas de tratamiento y sistemas de evacuación de aguas residuales. En muchos lugares, el temor al desarrollo potencial de olores ha sido causa del rechazo de proyectos relacionados con el tratamiento de aguas residuales. A la vista de la importancia de los olores dentro del ámbito de la gestión de las aguas residuales, resulta conveniente estudiar los efectos que producen, cómo se detectan, y cómo caracterizarlos y medirlos.

Efectos de los olores. A bajas concentraciones, la influencia de los olores sobre el normal desarrollo de la vida humana tiene más importancia por la tensión psicológica que generan que por el daño que puedan producir al organismo. Los olores molestos pueden reducir el apetito, inducir a menores consumos de agua, producir desequilibrios respiratorios, náuseas y vómitos, y crear perturbaciones mentales. En condiciones extremas, los olores desagradables pueden conducir al deterioro de la dignidad personal y comunitaria, interferir en las relaciones humanas, desanimar las inversiones de capital, hacer descender el nivel socioeconómico y reducir el crecimiento. Estos problemas pueden dar lugar al descenso de las rentas y el mercado de propiedades, los ingresos por impuestos, y las ventas.

Detección de olores. Los compuestos malolientes responsables de la tensión psicológica que se produce en los seres humanos se detectan a través del sentido del olfato, pero aún hoy en día se desconoce exactamente el mecanismo involucrado en dicha detección. Desde 1870, se han propuesto más de 30 teorías que pretenden explicar el mecanismo del olfato. Uno de los principales obstáculos a la hora de elaborar una teoría global capaz de explicar el mecanismo del olfato es la imposibilidad de explicar la razón por la cual compuestos de estructuras muy similares producen olores diferentes y compuestos de estructuras totalmente diferentes pueden producir olores parecidos. Actualmente, parece tener amplia aceptación la premisa de que el olor de una molécula está relacionada con su estructura global.

A lo largo de los años, se han hecho numerosos intentos para abordar la clasificación de los olores de forma sistemática. En la Tabla 3-5 se indican las principales clases de olores molestos y los compuestos que intervienen en su generación. Todos estos compuestos pueden estar presentes en las

aguas residuales domésticas o generarse a partir de ellas, dependiendo de las condiciones locales. En la Tabla 3-6 se indican los umbrales de detección y reconocimiento de algunos compuestos malolientes específicos relacionados con las aguas residuales.

**TABLA 3-5**  
Compuestos olorosos asociados al agua residual bruta

Compuestos olorosos	Fórmula química	Calidad del olor
Aminas	$\text{CH}_3\text{NH}_2$ , $(\text{CH}_3)_3\text{H}$	A pescado
Amoníaco	$\text{NH}_3$	Amoniacal
Diaminas	$\text{NH}_2(\text{CH}_2)_4\text{NH}_2$ , $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_5\text{NH}_2$	Carne descompuesta
Sulfuro de hidrógeno	$\text{H}_2\text{S}$	Huevos podridos
Mercaptanos (p.e. metilo y etilo)	$\text{CH}_3\text{SH}$ , $\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{SH}$	Coles descompuestas
Mercaptanos (p.e. butilo y crotilo)	$(\text{CH}_3)_3\text{CSH}$ , $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{SH}$	Mofeta
Sulfuros orgánicos	$(\text{CH}_3)_2\text{S}$ , $(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{S}$	Coles podridas
Eskatol	$\text{C}_9\text{H}_9\text{N}$	Materia fecal

**TABLA 3-6**  
Umbrales de olor de los compuestos olorosos asociados al agua residual bruta<sup>a</sup>

Compuesto oloroso	Fórmula química	Umbral de olor, ppmV	
		Detección	Identificación
Amoníaco	$\text{NH}_3$	17	37
Cloro	$\text{Cl}_2$	0,080	0,314
Sulfuro de dimetilo	$(\text{CH}_3)_2\text{S}$	0,001	0,001
Sulfuro de difenilo	$(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{S}$	0,0001	0,0021
Mercaptano de etilo	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{SH}$	0,0003	0,001
Sulfuro de hidrógeno	$\text{H}_2\text{S}$	<0,00021	0,00047
Indola	$\text{C}_8\text{H}_7\text{N}$	0,0001	—
Metil amina	$\text{CH}_3\text{NH}_2$	4,7	—
Mercaptano de metilo	$\text{CH}_3\text{SH}$	0,0005	0,001
Eskatol	$\text{C}_9\text{H}_9\text{N}$	0,001	0,019

<sup>a</sup> Adaptado parcialmente de la bibliografía [13,33].

<sup>b</sup> Partes por millón en volumen.

Caracterización y medida de olores. Para la completa caracterización de un olor, se sugieren cuatro factores independientes: la intensidad, el carácter, la sensación de desagrado y la detectabilidad (véase Tabla 3-7). No obstante, hasta hoy en día, el único factor que se ha tenido en cuenta en el desarrollo de normativas reguladoras de malos olores ha sido la detectabilidad.

**TABLA 3-7**

Factores a tener en cuenta para la caracterización completa de un olor

Factor	Descripción
Carácter	Se refiere a asociaciones mentales hechas por el sujeto al percibir el olor. La determinación puede resultar muy subjetiva.
Detectabilidad	El número de diluciones requerido para reducir un olor a su concentración de olor umbral mínimo detectable (CUOMD).
Sensación	La sensación de agrado o desagrado relativo del olor sentido por un sujeto.
Intensidad	La fuerza en la percepción de olor; se suele medir con el olfatómetro de butanol o se calcula según el número de diluciones hasta el umbral de detección cuando la relación es conocida.

Los olores pueden medirse con métodos sensoriales, mientras que las concentraciones de olores específicos pueden determinarse con métodos instrumentales. Se ha podido constatar que, en condiciones estrictamente controladas, la medida sensorial (organoléptica) de los olores, empleando el olfato humano puede proporcionar resultados fiables y significativos. Es por ello que, a menudo, se emplea el método sensorial para la medición de los olores que emanan de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales. La posibilidad de contar con aparatos de medición de sulfuro de hidrógeno de lectura directa capaces de detectar concentraciones de hasta 1 ppb ha representado un gran avance en esta materia.

En el método sensorial, se expone a un conjunto de personas a olores diluidos en aire libre, y se anota el número de diluciones necesarias para reducir un olor a su concentración umbral mínima de detección (CUOMD). La concentración de olor detectable viene dada por el número de diluciones necesarias para llegar al CUOMD. Por lo tanto, si deben añadirse 4 volúmenes de aire diluido a un volumen de la muestra de aire para reducir el olor al CUOMD, la concentración del olor vendrá dada como 4 diluciones hasta el CUOMD. Otra unidad empleada para expresar la

concentración de un olor es la ED<sub>50</sub>, cuyo valor representa el número de veces que es necesario diluir una muestra de aire para que una persona media (percentil 50) pueda detectar minimamente la presencia del olor en la muestra diluida. En la bibliografía propuesta al final de este capítulo se incluyen textos que proporcionan detalles sobre los métodos de análisis [2]. No obstante, la determinación sensorial del umbral mínimo de concentración detectable está sujeta a una serie de errores, entre los cuales cabe destacar los producidos por adaptación y adaptación cruzada, el sinergismo, la subjetividad y las modificaciones de las muestras (véase Tabla 3-8). Para evitar los errores derivados de la modificación de las muestras debido a su almacenamiento en recipientes, se han desarrollado olfatómetros de lectura directa que permiten medir olores en su fuente de generación sin necesidad de emplear recipientes para almacenar las muestras.

TABLA 3-8

Tipos de errores en la detección sensorial de olores <sup>a</sup>

Tipo de error	Descripción
Adaptación y adaptación cruzada	Cuando se está continuamente expuesto a una concentración base de un olor, el sujeto es incapaz de detectar la presencia del mismo a bajas concentraciones. Cuando se aísla al individuo de la concentración base de olor, el sistema olfativo del sujeto se recupera rápidamente. En último extremo, el sujeto con un sistema olfativo adaptado será incapaz de detectar la presencia del olor al cual ya se haya adaptado
Modificación de la muestra	Tanto la concentración como la composición de los gases y vapores pestilentes se pueden modificar en los recipientes de toma de muestras y en los dispositivos de detección de olores. Para minimizar los problemas asociados con la modificación de las muestras, debe minimizarse o suprimirse el tiempo de almacenamiento del olor, y permitirse sólo un contacto mínimo con cualquier superficie reactiva.
Subjetividad	Cuando el sujeto tiene conocimiento de la presencia de un olor pueden producirse errores aleatorios en la medida sensorial. A menudo, el conocimiento del olor puede inferirse de otras señales sensoriales tales como el sonido, el tacto o la vista.
Sinergismo	Cuando existe más de un olor presente en la muestra, se ha observado que es posible, para el sujeto, exhibir una sensibilidad creciente a un olor determinado debido a la presencia de otro olor.

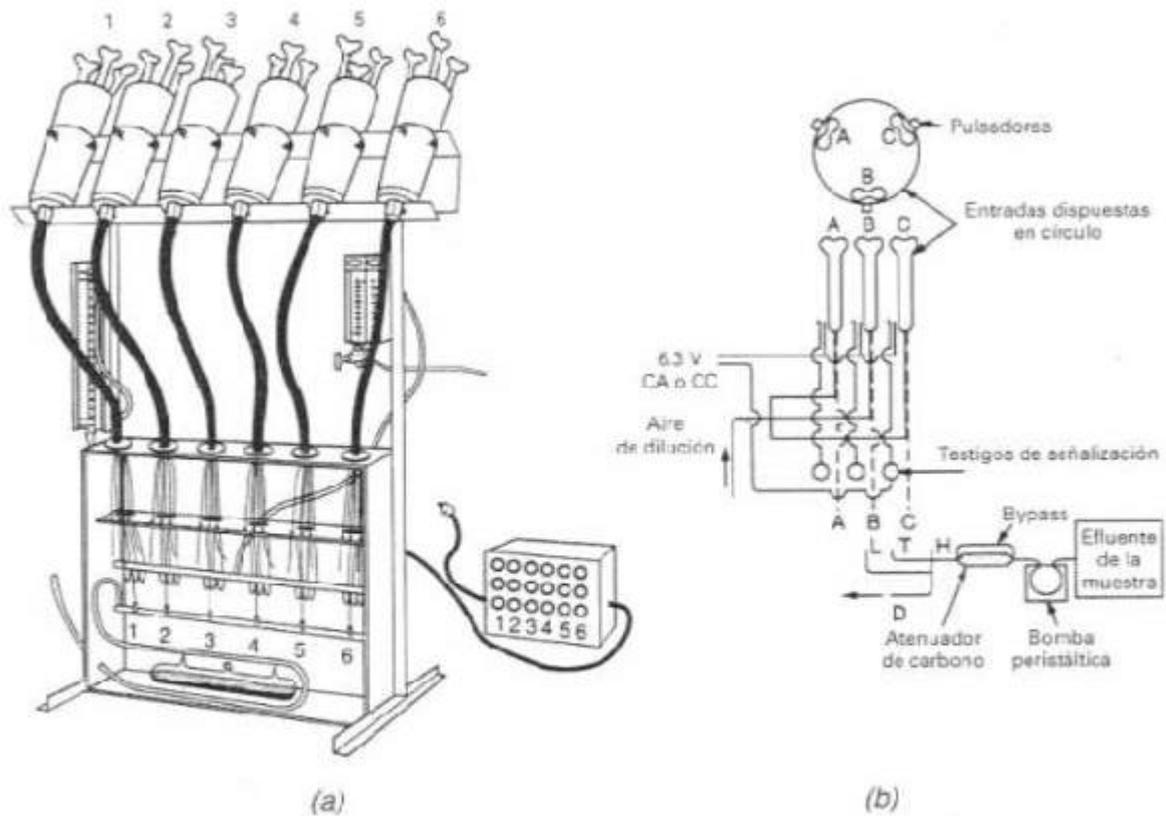
<sup>a</sup> Adaptado de la bibliografía [10].

El umbral de olor de un agua o de un agua residual se determina diluyendo la muestra de agua en agua inolora. Se define como «número umbral de olor» (TON) la mayor dilución de la muestra a la que se puede percibir, mínimamente, el olor de la misma. Para la determinación del valor de este parámetro se recomienda tomar muestras de 200 ml. El valor numérico del TON se determina con la siguiente expresión:

$$\text{TON} = \frac{A + B}{A} \quad (3.1)$$

en la que  $A$  = ml de muestra, y  $B$  = ml de agua inolora empleada para la dilución. Para determinar el olor que emana de la muestra se emplean métodos sensoriales como los anteriormente expuestos, empleando personas o grupos de personas. En la bibliografía que se propone al final del capítulo pueden encontrarse más detalles sobre este método, aprobado por el Standard Methods Committee en 1985.

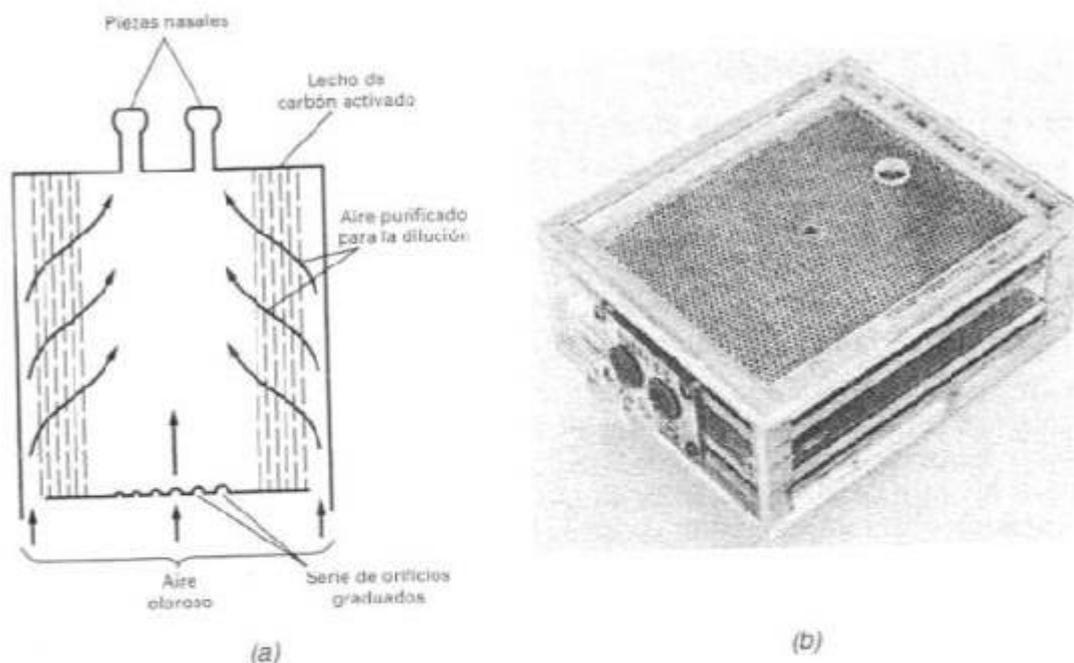
En cuanto a la medición instrumental de olores, la olfatometría basada en la dilución en aire proporciona un método análogo para la determinación de las concentraciones umbral. Los instrumentos que se emplean para el análisis de olores incluyen: (1) el olfatómetro triangular dinámico, (2) el disco de butanol y (3) el medidor de aromas. El olfatómetro triangular permite al operario introducir la muestra a diferentes concentraciones en seis recipientes separados (véase Fig. 3-8). En cada uno de ellos, dos entradas corresponden a aire puro, y la tercera corresponde a la muestra diluida. Se suelen emplear seis diluciones, distribuidas en el intervalo entre 4.500 y 15.



**FIGURA 3-8**

Olfatómetro triangular dinámico: (a) representación esquemática y (b) diagrama de flujo.

Se pueden alcanzar diluciones mayores empleando dispersores de carbono. Todas las diluciones de la muestra y las muestras neutras (aire puro) se van introduciendo de manera continua en los recipientes en los que se va a oler, a una velocidad de 500 ml/minuto. Cada uno de los miembros del grupo que lleva a cabo las pruebas de olores (grupos de seis personas normalmente) huele tres puntos de entrada, y cada uno de ellos selecciona aquella que cree que contiene el olor. El disco de butanol es un instrumento que se emplea para cuantificar la intensidad de un olor mediante la comparación con una escala de muestras que contienen diferentes concentraciones de butanol. Un medidor de aromas (véase Fig. 3-9) es un aparato de mano en el que se hace circular el aire maloliente a través de orificios graduados, y se mezcla con aire que se ha purificado haciéndolo pasar por lechos de carbón activado. Las diluciones se determinan como el cociente entre los tamaños de las entradas de aire maloliente y aire purificado. Es un aparato de gran utilidad para realizar medidas de campo de olores en grandes extensiones de terreno alrededor de las plantas de tratamiento. Con frecuencia, para tomar medidas de campo, se emplean laboratorios de olores móviles instalados en furgonetas, equipados con instrumental analítico y olfatométrico diverso.



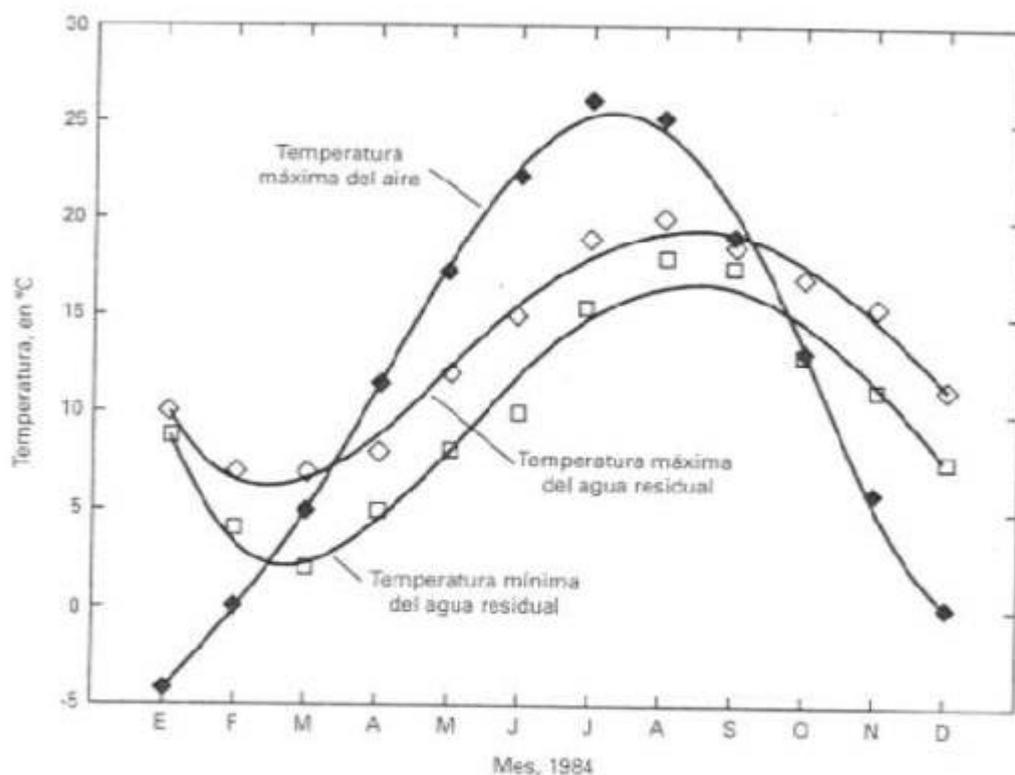
**FIGURA 3-9**

Medidor de aromas empleado para estudios de campo de olores: (a) representación esquemática, y (b) visión frontal con vista de las piezas nasales (12,5 cm × 15 cm × 6 cm, de Barnebey & Sutcliffe Corp.). *Nota:* El aire oloroso que circula a través de los orificios graduados se mezcla con aire de la misma fuente purificado mediante el paso a través de lechos de carbón activado.

Normalmente es interesante conocer los compuestos que son responsables de los diferentes olores. A pesar de que la cromatografía de gases ha proporcionado resultados satisfactorios en el estudio de estos fenómenos, su empleo no ha resultado tan exitoso en el estudio de los olores registrados en las redes de alcantarillado, plantas de tratamiento y sistemas de evacuación de aguas residuales. El espectrómetro de masa tetrapolar de tres fases ha resultado ser un instrumento de gran utilidad en el análisis químico de olores. Se trata de un espectrómetro que puede emplearse para obtener espectros de masa simples, o como tetrapolo de tres fases para obtener espectros de disociación mediante la activación por colisión. El primero de los usos proporciona las masas de las moléculas o iones presentes en las muestras, mientras que el segundo facilita la identificación de los compuestos. Los diferentes compuestos que pueden ser identificados por este método incluyen, entre otros, el amoníaco, los aminoácidos, y los compuestos orgánicos volátiles.

## Temperatura

La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, hecho principalmente debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. Dado que el calor específico del agua es mucho mayor que el del aire, las temperaturas registradas de las aguas residuales son más altas que la temperatura del aire durante la mayor parte del año, y sólo son menores que ella durante los meses más calurosos del verano. En función de la situación geográfica, la temperatura media anual del agua residual varía entre 10 y 21 °C, pudiéndose tomar 15,6 °C como valor representativo. En la Figura 3-10 se ilustran las variaciones que pueden esperarse en las aguas residuales brutas. Dependiendo de la situación y la época del año, las temperaturas del efluente pueden situarse por encima o por debajo de las del afluente.



**FIGURA 3-10**

Variaciones mensuales típicas de la temperatura del agua residual.

La temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos útiles. Por ejemplo, el aumento de la temperatura

del agua puede provocar cambios en las especies piscícolas. También es importante para industrias que emplean el agua para refrigeración, por ejemplo, donde es fundamental la temperatura de captación del agua.

Por otro lado, el oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría. El aumento en las velocidades de las reacciones químicas que produce un aumento de la temperatura, combinado con la reducción del oxígeno presente en las aguas superficiales, es causa frecuente de agotamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto durante los meses de verano. Estos efectos se ven amplificadas cuando se vierten cantidades considerables de agua caliente a las aguas naturales receptoras. Es preciso tener en cuenta que un cambio brusco de temperatura puede conducir a un fuerte aumento en la mortalidad de la vida acuática. Además, las temperaturas anormalmente elevadas pueden dar lugar a una indeseada proliferación de plantas acuáticas y hongos.

La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25 y los 35 °C. Los procesos de digestión aerobia y de nitrificación se detienen cuando se alcanzan los 50 °C. A temperaturas de alrededor de 15 °C, las bacterias productoras de metano cesan su actividad, mientras que las bacterias nitrificantes autótrofas dejan de actuar cuando la temperatura alcanza valores cercanos a los 5°C. Si se alcanzan temperaturas del orden de 2 °C, incluso las bacterias quimioheterótrofas que actúan sobre la materia carbonosa dejan de actuar. En los Capítulos 8 y 10 se hace mayor hincapié en el papel de la temperatura en el rendimiento de los procesos biológicos de tratamiento.

## **Densidad**

Se define la densidad de un agua residual como su masa por unidad de volumen, expresada en  $\text{kg/m}^3$ . Es una característica física importante del agua residual dado que de ella depende la potencial formación de corrientes de densidad en fangos de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento. La densidad de las aguas residuales domésticas que no contengan grandes cantidades de residuos industriales es prácticamente la misma que la del agua a la misma temperatura. En ocasiones, se emplea como alternativa a la densidad el peso específico del agua residual, obtenido como cociente entre la densidad del agua residual y la densidad del agua. Ambos parámetros, la densidad y el peso específico, dependen de la temperatura y varían en función de la concentración total de sólidos en el agua residual. En la Tabla 9-9 del Capítulo 9 se dan valores típicos del peso específico de diferentes fangos de aguas residuales.

## **Color**

Históricamente, para la descripción de un agua residual, se empleaba el término condición junto con la composición y la concentración. Este término se refiere a la edad del agua residual, que puede ser determinada cualitativamente en función de su color y su olor. El agua residual reciente suele tener un color grisáceo. Sin embargo, al aumentar el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado y al desarrollarse condiciones más próximas a las anaerobias, el color del agua residual cambia gradualmente de gris a gris oscuro, para finalmente adquirir color negro. Llegado este punto, suele clasificarse el agua residual como séptica. Algunas aguas residuales industriales pueden añadir color a las aguas residuales domésticas. En la mayoría de los casos, el color gris, gris oscuro o negro del agua residual es debido a la formación de sulfuros metálicos por reacción del sulfuro liberado en condiciones anaerobias con los metales presentes en el agua residual.

## **Turbiedad**

La turbiedad, como medida de las propiedades de transmisión de la luz de un agua, es otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. La medición de la turbiedad se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones [18]. La materia coloidal dispersa o absorbe la luz, impidiendo su transmisión. Aun así, no es posible afirmar que exista una relación entre la turbiedad y la concentración de sólidos en suspensión de un agua no tratada. No obstante, sí están razonablemente ligados la turbiedad y los sólidos en suspensión en el caso de efluentes procedentes de la decantación secundaria en el proceso de fangos activados.

### ***3.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS: DEFINICIÓN Y APLICACIÓN***

---

El estudio de las características químicas de las aguas residuales se aborda en los siguientes cuatro apartados: (1) la materia orgánica, (2) la medición del contenido orgánico, (3) la materia inorgánica, y (4) los gases presentes en el agua residual. El hecho de que la medición del contenido en materia orgánica se realice por separado viene justificado por su importancia en la gestión de la calidad del agua y en el diseño de las instalaciones de tratamiento de aguas.

## **Materia orgánica**

Tal y como se puede apreciar en la Figura 3-6, cerca del 75 por 100 de los sólidos en suspensión y del 40 por 100 de los sólidos filtrables de un agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica. Son sólidos que provienen de los reinos animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos están formados normalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia, en determinados casos, de nitrógeno. También pueden estar presentes otros elementos como azufre, fósforo o hierro. Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas (40-60 por 100), hidratos de carbono (25-50 por 100), y grasas y aceites (10 por 100). Otro compuesto orgánico con importante presencia en el agua residual es la urea, principal constituyente de la orina. No obstante, debido a la velocidad del proceso de descomposición de la urea, raramente está presente en aguas residuales que no sean muy recientes.

Junto con las proteínas, los hidratos de carbono, las grasas y los aceites y la urea, el agua residual también contiene pequeñas cantidades de gran número de moléculas orgánicas sintéticas cuya estructura puede ser desde muy simple a extremadamente compleja. En esta sección se tratarán ejemplos clásicos como los de los agentes tensoactivos, los contaminantes orgánicos prioritarios, los compuestos orgánicos volátiles y los pesticidas de uso agrícola. Por otro lado, dado el incremento en la síntesis de moléculas orgánicas, el número de ellas presentes en las aguas residuales va en aumento cada año. En los últimos años, este hecho ha complicado notablemente los procesos de tratamiento de aguas debido a la imposibilidad, o a la extremada lentitud de los procesos de descomposición biológica de dichos compuestos.

**Proteínas.** Las proteínas son los principales componentes del organismo animal, mientras que su presencia es menos relevante en el caso de organismos vegetales. Están presentes en todos los alimentos de origen animal o vegetal cuando éstos están crudos. El contenido en proteínas varía mucho entre los pequeños porcentajes presentes en frutas con altos contenidos en agua (como los tomates) o en los tejidos grasos de las carnes, y los porcentajes elevados que se dan en alubias o carnes magras. La composición química de las proteínas es muy compleja e inestable, pudiendo adoptar muchos mecanismos de descomposición diferentes. Algunas son solubles en agua, mientras que otras no lo son. Los procesos químicos que intervienen en la formación de las proteínas contemplan la combinación o formación de cadenas con gran número de aminoácidos.

Los pesos moleculares de las proteínas son muy grandes, desde 20.000 a 20 millones.

Todas las proteínas contienen carbono, común a todas las sustancias orgánicas, oxígeno e hidrógeno. Además, como característica distintiva, contienen una elevada cantidad de nitrógeno, en torno al 16 por 100. En muchos casos, también contienen azufre, fósforo y hierro. La urea y las proteínas son los principales responsables de la presencia de nitrógeno en las aguas residuales. La existencia de grandes cantidades de proteínas en un agua residual puede ser origen de olores fuertemente desagradables debido a los procesos de descomposición.

Hidratos de carbono. Ampliamente distribuidos por la naturaleza, los hidratos de carbono incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera, compuestos todos ellos presentes en el agua residual. Los hidratos de carbono contienen carbono, oxígeno e hidrógeno. Los hidratos de carbono comunes contienen seis átomos de carbono por molécula (o un múltiplo de seis), y oxígeno e hidrógeno en las mismas proporciones en las que ambos elementos se hallan presentes en el agua. Algunos hidratos de carbono son solubles en agua, principalmente los azúcares, mientras que otros, como los almidones, son insolubles. Los azúcares tienen tendencia a descomponerse; las enzimas de determinadas bacterias y fermentos dan lugar a un proceso de fermentación que incluye la producción de alcohol y dióxido de carbono. Los almidones, por otro lado, son más estables, pero se convierten en azúcares por la actividad bacteriana así como por la acción de ácidos minerales diluidos. Desde el punto de vista del volumen y la resistencia a la descomposición, la celulosa es el hidrato de carbono cuya presencia en el agua residual es más importante. La destrucción de la celulosa es un proceso que se desarrolla sin dificultad en el terreno, principalmente gracias a la actividad de diversos hongos, cuya acción es especialmente notable en condiciones ácidas.

Grasas, grasas animales y aceites. Las grasas animales y los aceites son el tercer componente, en importancia, de los alimentos. El término grasa, de uso extendido, engloba las grasas animales, aceites, ceras y otros constituyentes presentes en las aguas residuales. El contenido de grasa se determina por extracción de la muestra con triclorotrifluoroetano, debido a que la grasa es soluble en él. También es posible la extracción de otras sustancias, principalmente aceites minerales como el keroseno, aceites lubricantes y aceites de materiales bituminosos empleados en la construcción de firmes de carreteras.

Las grasas animales y los aceites son compuestos de alcohol (ésteres) o glicerol (glicerina) y ácidos grasos. Los glicéridos de ácidos grasos que se presentan en estado líquido a temperaturas normales se denominan aceites,

mientras que 105 que se presentan en estado sólido reciben el nombre de grasas. Químicamente son muy parecidos, y están compuestos por carbono, oxígeno e hidrógeno en diferentes proporciones.

Las grasas y aceites animales alcanzan las aguas residuales en forma de mantquilla, manteca de cerdo, margarina y aceites y grasas vegetales. Las grasas provienen habitualmente de carnes, gérmenes de cereales, semillas, nueces y ciertas frutas.

Las grasas se hallan entre los compuestos orgánicos de mayor estabilidad, y su descomposición por acción bacteriana no resulta sencilla. No obstante, sufren el ataque de ácidos minerales, lo cual conduce a la formación de glicerina y ácidos grasos. En presencia de determinadas sustancias alcalinas, como el hidróxido de sodio, se libera la glicerina dando paso a la formación de sales alcalinas y ácidos grasos. Las sales alcalinas que se producen se conocen como jabones, sustancias que, como las grasas; son estables. Los jabones comunes se obtienen mediante la saponificación de grasas con hidróxido de sodio. Son solubles en agua, pero en presencia de constituyentes de dureza, las sales sódicas se transforman en sales cálcicas y magnésicas de ácidos grasos, compuestos también conocidos como jabones minerales que son insolubles y precipitan.

El keroseno, los aceites lubricantes y los procedentes de materiales bituminosos son derivados del petróleo y del alquitrán, y sus componentes principales son carbono e hidrógeno. En ocasiones pueden alcanzar la red de alcantarillado en grandes cantidades procedentes de tiendas, garajes, talleres y calles. La mayor parte de estos aceites flotan en el agua residual, aunque una fracción de ellos se incorpora al fango por los sólidos sedimentables. Los aceites minerales tienden a recubrir las superficies en mayor medida que las grasas, los aceites y los jabones. Las partículas de estos compuestos interfieren en el normal desarrollo de la actividad biológica y son causa de problemas de mantenimiento.

Como se acaba de comentar, la presencia de grasas y aceites en el agua residual puede provocar problemas tanto en la red de alcantarillado como en las plantas de tratamiento. Si no se elimina el contenido en grasa antes del vertido del agua residual, puede interferir con la vida biológica en aguas superficiales y crear películas y acumulaciones de materia flotante desagradables.

Agentes tensoactivos. Los agentes tensoactivos están formados por moléculas de gran tamaño, ligeramente solubles en agua, y que son responsables de la aparición de espumas en las plantas de tratamiento y en la superficie de los cuerpos de agua receptores de los vertidos de agua residual. Tienden a concentrarse en la interfase aire-agua. Durante el proceso de aireación del agua residual se concentran en la superficie de las burbujas de aire creando una espuma muy estable. La determinación de la presencia de elementos tensoactivos se realiza analizando el cambio de

color de una muestra normalizada de azul de metileno. Los agentes tensoactivos también reciben el nombre de sustancias activas al azul de metileno (MBAS).

Antes de 1965, los agentes tensoactivos presentes en detergentes sintéticos (ABS, sulfatos de alquilbenceno), eran fuente de muchos problemas debido a su resistencia a la descomposición por medios biológicos. Tras la entrada en vigor de la legislación de 1965, los ABS fueron sustituidos por sulfatos de alquilo lineales (LAS), que son sustancias biodegradables. Debido a que la mayoría de los agentes tensoactivos provenía de los detergentes sintéticos, esta medida ha reducido notablemente el problema de las espumas.

Contaminantes prioritarios. La EPA ha establecido limitaciones para el vertido de los 129, aproximadamente, contaminantes prioritarios identificados, agrupados en 65 clases [4]. La elección de qué contaminantes deben ser considerados como prioritarios se ha hecho en función de su relación o potencial relación con procesos carcinógenos, mutaciones, teratomas o su alta toxicidad. Muchos de los contaminantes prioritarios de origen orgánico corresponden a compuestos orgánicos volátiles (COV). En la Tabla 3-9 se indican ejemplos representativos de contaminantes prioritarios.

En las redes de alcantarillado y las plantas de tratamiento se puede eliminar, transformar, generar, o simplemente transportar, sin cambio alguno, los contaminantes prioritarios de origen orgánico. En estos procesos intervienen cinco mecanismos básicos: (1) volatilización junto con liberación de gases); (2) degradación; (3) adsorción en partículas o en el fango; (4) circulación (p.e. transporte a través de todo el sistema); y (5) generación como consecuencia de la cloración o de la degradación de otros compuestos. Es importante señalar que estos mecanismos no son mutuamente excluyentes, puesto que puede ser importante la acción simultánea de varios de ellos [1].

Para controlar los vertidos de contaminantes a las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) se emplean dos tipos de medidas. Las primeras, que limitan los 'vertidos prohibidos', se aplican a todos los establecimientos comerciales e industrias que vierten sus aguas a las EDAR. Estas medidas limitan los vertidos de contaminantes que puedan producir riesgos de incendio o explosión en el sistema, sean corrosivos ( $\text{pH} < 5$ ), puedan obturar las conducciones, reducir la eficacia de los procesos de tratamiento, o elevar la temperatura del agua residual al entrar en las plantas de tratamiento a más de  $40^{\circ}\text{C}$ . Las segundas, 'limitaciones por categorías', se aplican a los vertidos industriales y comerciales clasificados en 25 categorías, y pretenden restringir el vertido de los 129 contaminantes prioritarios. Es de prever que la lista de contaminantes prioritarios se vaya ampliando en el futuro.

Compuestos orgánicos volátiles (COV). Normalmente se consideran como compuestos orgánicos volátiles aquellos compuestos orgánicos que tienen su punto de ebullición por debajo de los 100°C, y/o una presión de vapor mayor que 1 mm Hg a 25°C. El cloruro de vinilo, con un punto de ebullición de -13,9°C y una presión de vapor de 2.548 mm Hg a 20°C, es un ejemplo de compuesto orgánico extremadamente volátil. Los compuestos orgánicos volátiles son de gran importancia por una serie de razones: (1) una vez dichos compuestos se hallan en estado gaseoso, su movilidad es mucho mayor, con lo que aumenta la posibilidad de su liberación al medio ambiente; (2) la presencia de algunos de estos compuestos en la atmósfera puede conllevar riesgos para la salud pública; y (3) contribuyen al aumento de hidrocarburos reactivos en la atmósfera, lo cual puede conducir a la formación de oxidantes fotoquímicos. El vertido de estos compuestos a la red de alcantarillado y a las plantas de tratamiento, especialmente a las obras de cabecera de planta, tiene especial importancia por cuanto puede afectar directamente a la salud de los trabajadores tanto de la red de alcantarillado como de las plantas de tratamiento. En los Capítulos 6 y 9 se analiza con más detalle el control y vertido de COVs. En cuanto a los fenómenos físicos involucrados en la emisión de COV, pueden encontrarse más detalles en la bibliografía incluida al final de este capítulo [24].

Pesticidas y productos químicos de uso agrícola. Los compuestos orgánicos que se hallan a nivel de traza, tales como pesticidas, herbicidas y otros productos químicos de uso agrícola, son tóxicos para la mayor parte de las formas de vida y, por lo tanto, pueden constituir peligrosos contaminantes de las aguas superficiales. Estos productos no son constituyentes comunes de las aguas residuales, sino que suelen incorporarse a las mismas, fundamentalmente, como consecuencia de la escorrentía de parques, campos agrícolas y tierras abandonadas. Las concentraciones de estos productos químicos pueden dar como resultado la muerte de peces, contaminación de la carne del pescado (con lo que reduce su valor nutritivo), y el empeoramiento de la calidad del agua suministrada. Muchos de estos compuestos químicos están catalogados como contaminantes prioritarios.

#### Medida del Contenido orgánico

A lo largo de los años, se han ido desarrollando diferentes ensayos para la determinación del contenido orgánico de las aguas residuales. En general, los diferentes métodos pueden clasificarse en dos grupos, los empleados para determinar altas concentraciones de contenido orgánico, mayores de 1 mg/l, y los empleados para determinar las concentraciones a nivel de traza,

para concentraciones en el intervalo de los 0,001 mg/l a 1 mg/l. El primer grupo incluye los siguientes ensayos de laboratorio: (1) demanda bioquímica de oxígeno (DBO), (2) demanda química de oxígeno (DQO), y (3) carbono orgánico total (COT). Como complemento a estos ensayos de laboratorio se emplea la demanda teórica de oxígeno (DTeO), parámetro que se determina a partir de la fórmula química de la materia orgánica.

En el pasado, también se habían empleado otros ensayos, entre los que cabe destacar: (1) nitrógeno total y albuminoide, y nitrógeno orgánico y amoniacal, y (2) oxígeno consumido. Estas determinaciones aún figuran en los análisis completos de aguas residuales, excepción hecha de las determinaciones relativas al nitrógeno albuminoide y al oxígeno consumido. Sin embargo, su importancia ya no es la misma. Mientras que antes se empleaban casi exclusivamente como indicadores de la materia orgánica, actualmente se emplean para determinar la disponibilidad de nitrógeno para mantener la actividad biológica en los procesos de tratamiento de aguas residuales industriales y para evitar indeseables proliferaciones de algas en las aguas receptoras.

En el segundo grupo de ensayos, los empleados para determinar concentraciones a nivel de traza, por debajo de 1 mg/l, se emplean métodos instrumentales que incluyen la cromatografía de gases y la espectroscopia de masa. A lo largo de los últimos 10 años se ha mejorado notablemente la sensibilidad de los métodos empleados para la determinación de concentraciones de este nivel, por lo que la detección de concentraciones del orden de 0,01 mg/l ha pasado a ser una cuestión rutinaria.

La determinación de las concentraciones de pesticidas suele llevarse a cabo mediante el método de extracción con carbono-cloroformo, que consiste en la separación de los contaminantes del agua haciendo pasar una muestra de agua por una columna de carbón activado, para luego separar los contaminantes del carbono empleando cloroformo. A continuación, se hace evaporar el cloroformo, con lo cual se puede pesar los contaminantes. Es posible determinar con precisión concentraciones de pesticidas y herbicidas del orden de una parte por billón (ppb) o inferiores empleando determinados métodos tales como la cromatografía de gases y de captura electrónica, o mediante detectores colorimétricos [18].

**Demanda bioquímica de oxígeno.** El parámetro de contaminación orgánica más ampliamente empleado, aplicable tanto a aguas residuales como a aguas superficiales, es la DBO a 5 días (DBO<sub>5</sub>). La determinación del mismo está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica. A pesar de lo extendido del uso del ensayo de la DBO, está sujeto a ciertas limitaciones, que se comentarán más adelante en este mismo capítulo. Se espera que, gracias al continuado esfuerzo de los

especialistas en este campo, su uso pueda ser sustituido por alguno de los demás métodos de medición del contenido orgánico o que, incluso, se desarrolle algún método nuevo que pueda sustituirlo. Sin embargo, ¿por qué, si el análisis está sujeto a serias limitaciones, se le dedica tanto espacio en este texto? La explicación se basa en que los resultados de los ensayos de DBO se emplean para: (1) determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente; (2) dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales; (3) medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento, y (4) controlar el cumplimiento de las limitaciones a que están sujetos los vertidos. Debido a que se supone que es un ensayo que todavía estará vigente durante algún tiempo, es importante conocerlo a fondo, tanto en su desarrollo como en sus limitaciones.

Con el fin de asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos, es preciso diluir convenientemente la muestra con una solución especialmente preparada de modo que se asegure la disponibilidad de nutrientes y oxígeno durante el periodo de incubación. Normalmente se suelen preparar diversas diluciones para cubrir todo el intervalo de posibles valores de la DBO. En la Tabla 3-10 se indican los intervalos de valores de la DBO que pueden ser medidos con varias diluciones, basadas en mezclas porcentuales y pipeteo directo. En la Figura 3-11 se ilustra el procedimiento general para la preparación de las botellas de incubación que se emplean en el ensayo.

TABLA 3-10

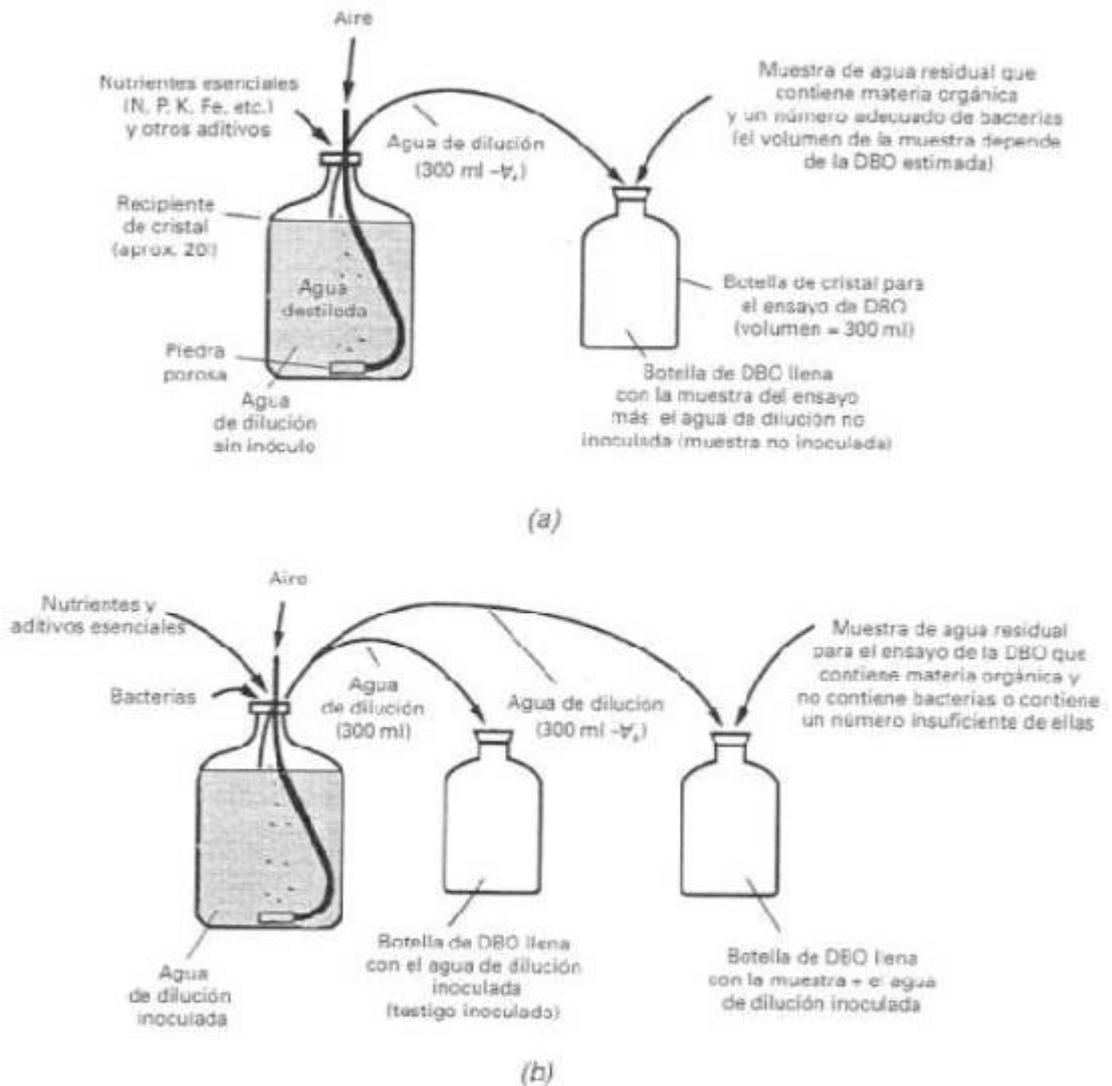
DBO medible con diferentes diluciones de la muestra<sup>a</sup>

Empleando mezclas porcentuales		Por pipeteo directo a botellas de 300 ml	
% mezcla	Intervalo de valores de la DBO	ml	Intervalo de valores de la DBO
0,01	20.000-70.000	0,02	30.000-105.000
0,02	10.000-35.000	0,05	12.000-42.000
0,05	4.000-14.000	0,10	6.000-21.000
0,1	2.000-7.000	0,20	3.000-10.500
0,2	1.000-3.500	0,50	1.200-4.200
0,5	400-1.400	1,0	600-2.100
1,0	200-700	2,0	300-1.050
2,0	100-350	5,0	120-420
5,0	40-140	10,0	60-210
10,0	20-70	20,0	30-105
20,0	10-35	50,0	12-42
50,0	4-14	100,0	6-21
100,0	0-7	300,0	0-7

<sup>a</sup> Bibliografía [32].

En el caso de muestras con gran población de microorganismos (como el agua residual no tratada, por ejemplo), no es necesario inocular las muestras. Caso de ser necesario, se puede inocular el agua de dilución con un cultivo bacteriano ya aclimatado a la materia orgánica y otros compuestos presentes en el agua residual. El inóculo que se emplea para preparar el agua de dilución es un cultivo mixto. Dichos cultivos contienen gran número de bacterias saprófitas y otros organismos que oxidan la materia orgánica. Contienen también determinadas bacterias autótrofas que oxidan la materia no carbonosa. Varios de estos inóculos han sido comercializados.

El periodo de incubación es, normalmente, de 5 días a 20 °C, aunque también se pueden adoptar diferentes periodos de tiempo y temperaturas. También se suelen emplear periodos más largos (normalmente siete días), para acomodarse a los turnos de trabajo de la planta. Esto es especialmente cierto en el caso de pequeñas plantas de tratamiento, en las que el personal de laboratorio no suele trabajar los fines de semana. De todos modos, y con independencia de la duración del ensayo, es importante asegurar que la temperatura se mantenga constante a lo largo del mismo. La medición del oxígeno disuelto se hace antes y después del periodo de incubación (Fig. 3-12), y la DBO se calcula empleando las Ecuaciones 3.2 o 3.3.



**FIGURA 3-11**

Procedimiento de preparación de botellas para el ensayo de la DBO: (a) agua de dilución sin inóculo, y (b) agua de dilución inoculada [23].

Cuando el agua de dilución no ha sido inoculada,

$$\text{DBO, mg/l} = \frac{D_1 - D_2}{P} \quad (3.2)$$

Cuando el agua de dilución ha sido inoculada, Ecuación 3.3

$$\text{DBO, mg/l} = \frac{(D_1 - D_2) - (B_1 - B_2) f}{P} \quad (3.3)$$

donde:

$D_1$  = oxígeno disuelto de la muestra diluida inmediatamente después de la preparación de la misma, en mg/l.

$D_2$  = oxígeno disuelto de la muestra diluida tras 5 días de incubación a  $20^{\circ}\text{C}$ , en mg/l.

$P$  = fracción volumétrica de muestra empleada.

$B_1$  = concentración de oxígeno disuelto en el testigo (conteniendo sólo agua de dilución), antes de la incubación, en mg/l.

$B_2$  = concentración de oxígeno disuelto en el testigo (conteniendo sólo agua de dilución), después de la incubación, en mg/l.

$f$  = relación entre inóculo en la muestra e inóculo en el testigo (por 100 inóculo en  $D_1$ )/(por 100 inóculo en  $B_1$ ).

La oxidación bioquímica es un proceso lento, cuya duración es, en teoría, infinita. En un periodo de 20 días se completa la oxidación del 95 a 99 por 100 de la materia carbonosa, y en los 5 días que dura el ensayo de la DBO se llega a oxidar entre el 60 y el 70 por 100. Se asume la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  como un valor medio representativo de temperatura que se da en los cursos de agua que circulan a baja velocidad en climas suaves, y es fácilmente duplicada en un incubador. Los resultados obtenidos a diferentes temperaturas serán distintos, debido a que las velocidades de las reacciones bioquímicas son función de la temperatura.

Por razones de tipo práctico, la cinética de la reacción de la DBO se formula de acuerdo con una reacción de primer orden, y puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{dL_t}{dt} = -kL_t \quad (3.4)$$

donde  $L_t$  es la cantidad de DBO de la primera fase que queda en el agua en el instante  $t$ , y  $k$  es la constante de la reacción. Esta ecuación puede integrarse del siguiente modo:

$$\ln L_t \Big|_0^t = -kt \quad (3.5)$$

$$\frac{L_t}{L} = e^{-kt} = 10^{-Kt} \quad (3.6)$$

donde  $L$  o  $\text{DBO}_L$  es la DBO que queda en el instante  $t = 0$  (es decir, la DBO total o última de la primera fase inicialmente presente). La relación entre  $k$  (en base  $e$ ) y  $K$  (en base decimal), es la siguiente:

$$K \text{ (base10)} = \frac{k \text{ (base e)}}{2,303} \quad (3.7)$$

La cantidad de DBO presente en el instante  $t$  es:

$$L_t = L(e^{-kt}) \quad (3.8)$$

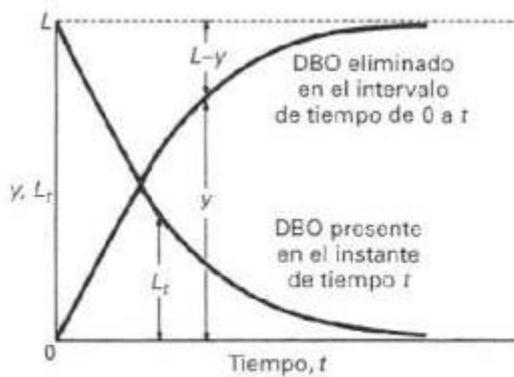
en tanto que  $y$ , la cantidad de DBO eliminada en el instante  $t$  es:

$$y_t = L - L_t = L(1 - e^{-kt}) \quad (3.9)$$

La DBO a los 5 días es:

$$y_5 = L - L_5 = L(1 - e^{-5t}) \quad (3.10)$$

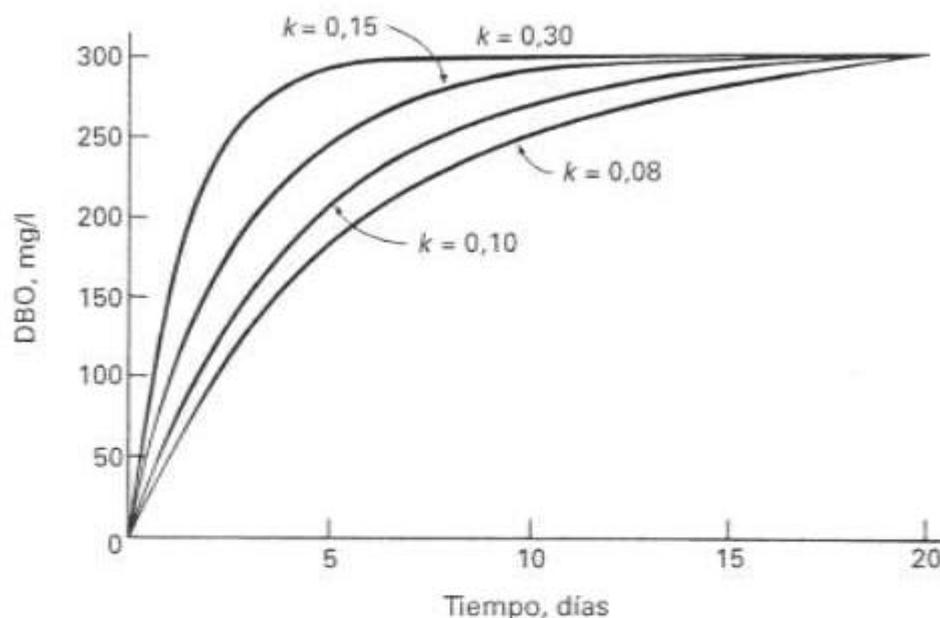
Esta relación se ilustra en la Figura 3-13. El empleo de las ecuaciones de la DBO se ilustra en el ejemplo 3-2.



**FIGURA 3-13**

Construcción de la curva de la DBO de la primera fase.

Para el caso de aguas contaminadas o aguas residuales, un valor típico para  $k$  (en base  $e$ , a  $20^\circ\text{C}$ ) puede ser  $0,23 \text{ d}^{-1}$  ( $=0,10 \text{ k/día}$  en base decimal). No obstante, el valor de la constante de reacción varía bastante, dependiendo del tipo de agua residual. Puede variar entre  $0,05$  y  $0,3 \text{ d}^{-1}$  (en base  $e$ ), o alcanzar valores incluso superiores a estos. Para la misma DBO última, la absorción de oxígeno variará con el tiempo y los diferentes valores de  $k$  (véase Fig. 3-14).



**FIGURA 3-14**

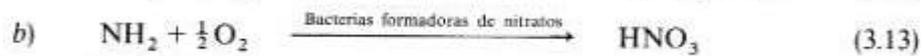
Efecto de la constante de reacción  $k$  sobre la DBO (para un valor de  $L$  determinado).

Como ya se ha comentado, el análisis de la DBO de un agua residual suele hacerse a  $20^{\circ}\text{C}$ . No obstante, también es posible determinar el valor de la constante de reacción a otras temperaturas. Para ello se puede emplear la siguiente ecuación aproximada, que se deriva de la relación de Van't Hoff-Arrhenius:

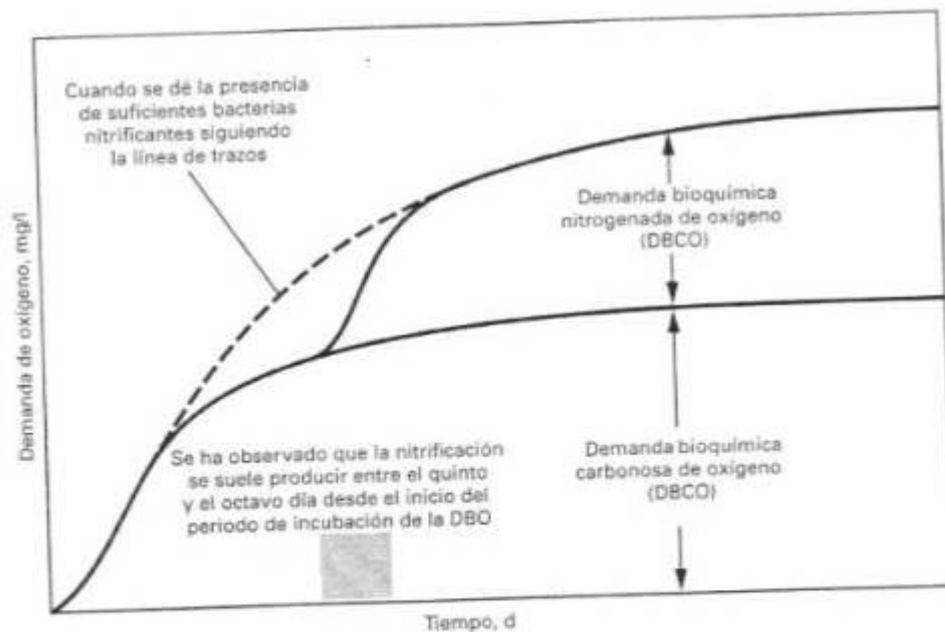
$$k_T = k_{20} \theta^{(T-20)} \quad (3.11)$$

Se ha podido comprobar que los valores de  $\theta$  varían entre 1,056 cuando la temperatura se halla entre  $20$  y  $30^{\circ}\text{C}$  y 1,135 cuando la temperatura se sitúa entre  $4$  y  $20^{\circ}\text{C}$  [15].

Nitrificación en el ensayo de la DBQ. Durante el proceso de hidrólisis de proteínas se produce materia no carbonosa, como el amoníaco por ejemplo. Hay dos grupos de bacterias autótrofas capaces de oxidar el amoníaco a nitrito y, a continuación, a nitrato. Las reacciones generalizadas son las siguientes:



Se conoce con el nombre de demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada (DBON) la demanda de oxígeno asociada al proceso de oxidación de amoníaco a nitrato. En la Figura 3-15 se muestra la evolución y origen de la demanda de oxígeno normal en un ensayo de DBO con aguas residuales domésticas. Normalmente, es necesario un periodo de entre 6 y 10 días para que las bacterias nitrificantes ejerzan una demanda de oxígeno medible, debido a la lentitud del proceso de reproducción de las mismas y al tiempo necesario para alcanzar una población suficiente. Sin embargo, si la población es suficientemente grande desde el principio, las interferencias con los procesos que se dan durante los 5 días de duración del ensayo de la DBO pueden ser significativas.



**FIGURA 3-15**

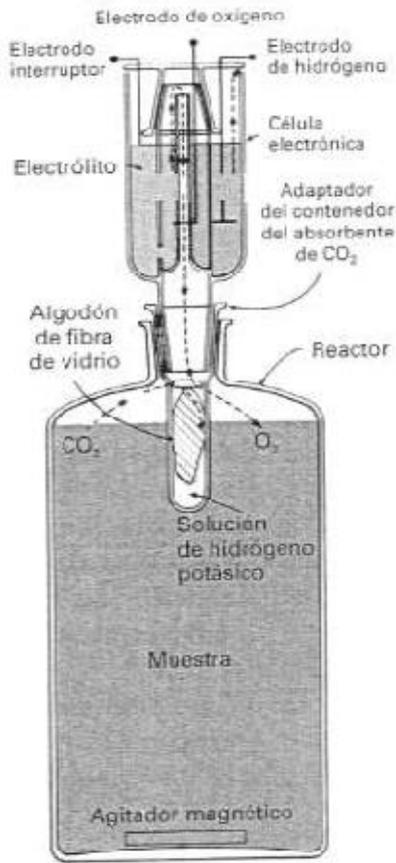
Esquema de definición de las demandas bioquímica de oxígeno carbonosa y nitrogenada ejercidas por una muestra de agua residual.

Ello conduce a la posibilidad de interpretaciones erróneas de los datos de funcionamiento de las instalaciones de tratamiento en aquellos casos en los que la nitrificación se produce durante el periodo de ejecución de los ensayos de DBO. Supongamos que la DBO registrada en el efluente de un tratamiento biológico toma los valores 20 mg/l sin nitrificación, y 40 mg/l

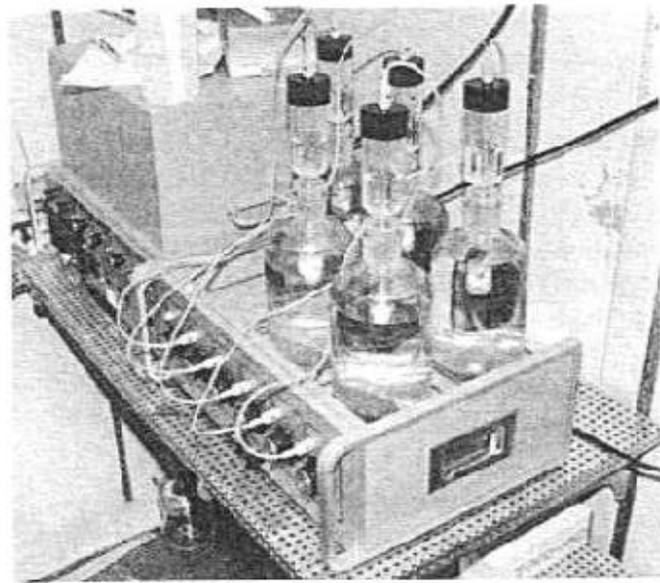
con nitrificación. Si la DBO del afluente es de 200 mg/l, las eficacias en la eliminación de la DBO serían, respectivamente, el 90 y el 80 por 100. Por lo tanto, a la hora de estudiar los resultados, si el cálculo se realiza suponiendo que no se produce una nitrificación que si está teniendo lugar en la realidad, se puede cometer el error de creer que la eficacia del proceso de tratamiento no es buena, cuando en realidad es bastante efectivo.

Demanda bioquímica carbonosa de oxígeno (DBOC). Es posible evitar las interferencias debidas a la presencia de bacterias nitrificantes mediante el pretratamiento de las muestras o el uso de inhibidores. Los procesos de pretratamiento incluyen la pasteurización, la cloración y el tratamiento de las muestras con ácidos. Los agentes inhibidores suelen ser de naturaleza, e incluyen compuestos tales como el azul de metileno, la tiourea y la alitiourea, el 2-cloro-6 (triclorometil) piridina y otros productos [37]. En la última edición del libro *Standard Methods* [18], se considera como parte del proceso de ensayo la eliminación de la reacción de nitrificación en los ensayos de DBO. Los resultados obtenidos en ensayos de DBO en los que se ha suprimido la nitrificación se conocen como DBOC (demanda bioquímica de oxígeno carbonosa). Actualmente, para los permisos de vertido, se está reemplazando la DBO por la DBOC, especialmente en aquellos casos en los que se sabe que se produce nitrificación.

Determinación respirométrica de la DBO. La determinación tanto de la DBO como de la constante de reacción  $k$ , se puede llevar a cabo de manera más efectiva en un laboratorio empleando una celda electrolítica de gran volumen (1,0 l) o un respirómetro de laboratorio. También se puede emplear la celda electrolítica (véase Fig. 3-16a) para la determinación continua de la DBO [38,39]. En la celda, la presión de oxígeno sobre la muestra se mantiene constante al ir sustituyendo continuamente el oxígeno consumido por los microorganismos. Ello se consigue produciendo más oxígeno por medio de una reacción de electrólisis en respuesta a los cambios de presión. Las lecturas de los valores de la DBO se realizan anotando el periodo de tiempo durante el que el oxígeno fue generado y correlacionándolos con la cantidad de oxígeno generado con la reacción de electrólisis. Las ventajas que presenta la celda electrolítica frente al respirómetro convencional son (1) el uso de una muestra de gran tamaño (1 l) minimiza los errores producidos por la toma de muestras instantáneas y pipeteo en diluciones, y (2) obtención directa del valor de la DBO. En la Fig. 3-16b se ilustra también un respirómetro electrolítico de múltiples celdas, disponible en el mercado.



(a)



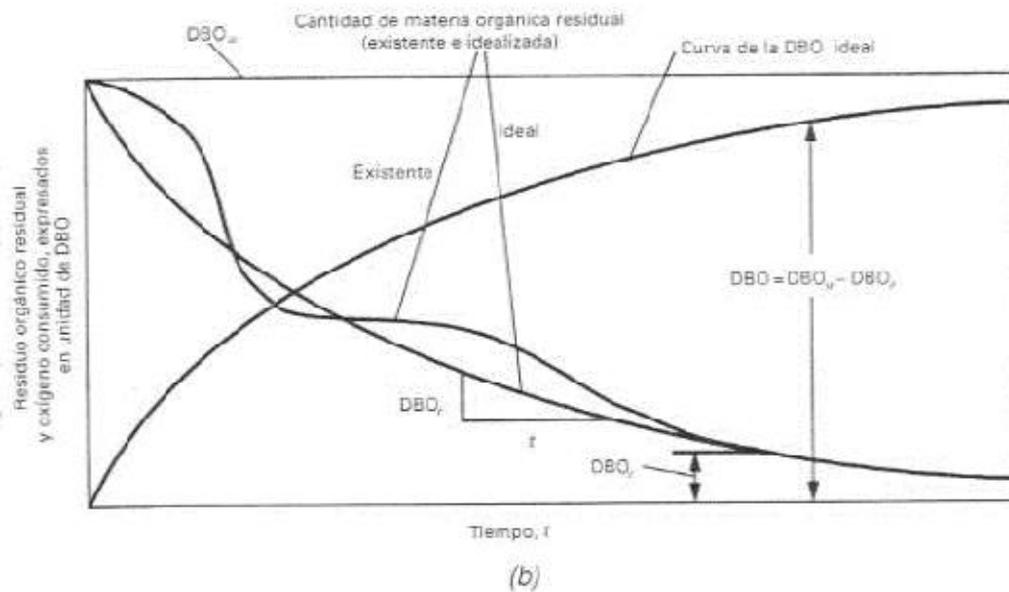
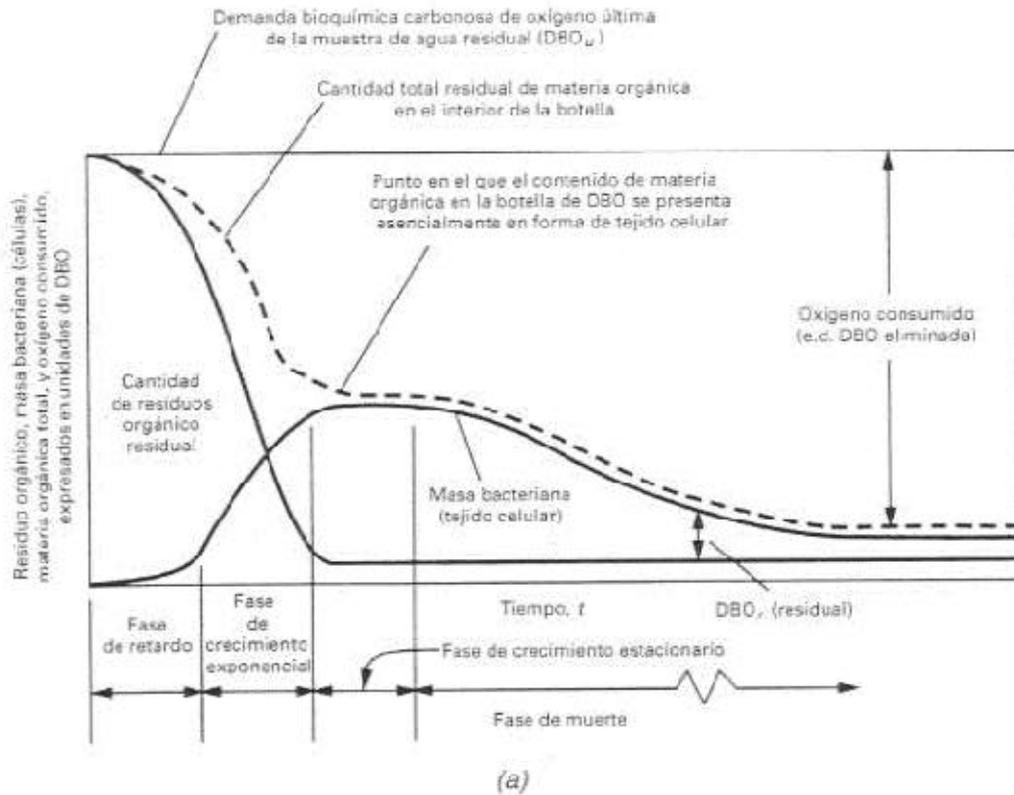
(b)

FIGURA 3-16

Respirómetro electrolítico para la determinación de la DBO: (a) representación esquemática [37, 38], y (b) respirómetro comercial con múltiples células electrolíticas.

Limitaciones del ensayo de la DBO. Las limitaciones de la determinación de la DBO incluyen la necesidad de disponer de una elevada concentración de bacterias activas y aclimatadas que desarrollen el papel de inóculo, la necesidad de un pretratamiento cuando haya residuos tóxicos y la necesidad de reducir el efecto de los organismos nitrificantes, el arbitrario y prolongado periodo de tiempo requerido para la obtención de resultados, el hecho de que sólo se midan los productos orgánicos biodegradables y, por último, que el ensayo no tenga validez estequiométrica una vez haya sido utilizada la materia orgánica soluble presente en la muestra (véase Fig. 3-17).

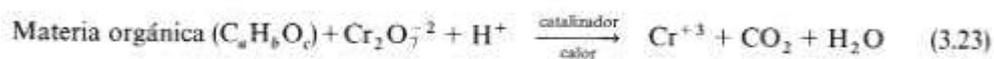
Posiblemente, la mayor limitación la constituya el hecho de que el periodo de 5 días puede no corresponderse con el momento en el que ya se haya usado toda la materia orgánica soluble. La falta de validez estequiométrica reduce la utilidad de los resultados del ensayo.



**FIGURA 3-17**

Análisis funcional del ensayo de la DBO: (a) interrelación entre el residuo orgánico, la masa bacteriana (tejido celular), residuo orgánico total y oxígeno consumido en el ensayo, y (b) representación idealizada del ensayo de la DBO [23].

Demanda química de oxígeno (DQO). El ensayo de la DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales. En el ensayo, se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse. El dicromato potásico proporciona excelentes resultados en este sentido. El ensayo debe hacerse a elevadas temperaturas. Para facilitar la oxidación de determinados tipos de compuestos orgánicos es preciso emplear un catalizador (sulfato de plata). Puesto que algunos compuestos orgánicos interfieren con el normal desarrollo del ensayo, deben tomarse medidas adecuadas para eliminarlos antes del ensayo. En el caso de emplear dicromato como agente oxidante, la principal reacción química que tiene lugar puede expresarse, de manera esquemática, del siguiente modo:



El ensayo de la DQO también se emplea para la medición de la materia orgánica presente en aguas residuales tanto industriales como municipales que contengan compuestos tóxicos para la vida biológica. La DQO de un agua residual suele ser mayor que su correspondiente DBO, siendo esto debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por vía química frente a los que se oxidan por vía biológica. En muchos tipos de aguas residuales es posible establecer una relación entre los valores de la DBO y la DQO. Ello puede resultar de gran utilidad dado que es posible determinar la DQO en un tiempo de 3 horas, frente a los 5 días necesarios para determinar la DBO. Una vez establecida la correlación entre ambos parámetros, pueden emplearse las medida de la DQO para el funcionamiento y control de las plantas de tratamiento.

Carbono orgánico total (COT). Otro método para medir la materia orgánica presente en el agua es el método COT, especialmente indicado para pequeñas concentraciones de materia orgánica. El ensayo se lleva a cabo inyectando una cantidad conocida de la muestra en un horno a alta temperatura o en un medio químicamente oxidante. En presencia de un catalizador, el carbono orgánico se oxida a anhídrido carbónico, la producción del cual se mide cuantitativamente con un analizador de infrarrojos. La aireación y la acidificación de la muestra antes del análisis elimina los posibles errores debidos a la presencia de carbono inorgánico. Si se conoce la presencia de compuestos orgánicos volátiles en la muestra, se suprime la aireación para evitar su separación. El ensayo puede realizarse en muy poco tiempo, y su uso se está extendiendo muy rápidamente. No obstante, algunos compuestos orgánicos presentes pueden

no oxidarse, lo cual conducirá a valores medidos del COT ligeramente inferiores a las cantidades realmente presentes en la muestra. En la Tabla 3-16 del apartado 3-5 de este capítulo se dan valores típicos del COT de aguas residuales.

Demanda teórica de oxígeno (DTeO). Normalmente, la materia orgánica de origen animal o vegetal presente en las aguas residuales, proviene de combinaciones de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Los principales grupos de compuestos de este tipo presentes en las aguas residuales son, como ya se ha comentado, los hidratos de carbono, las proteínas, los aceites y las grasas, y los productos de la descomposición de los mismos. En el capítulo 8 se estudia la descomposición biológica de estas sustancias. Tal y como se ilustra en el Ejemplo 3-4, es posible calcular la demanda teórica de oxígeno si se dispone de la fórmula química de la materia orgánica.

Correlación entre las diferentes medidas del contenido de materia orgánica. La posibilidad de establecer relaciones constantes entre los diferentes parámetros de medida del contenido en materia orgánica depende principalmente del tipo de agua residual y de su origen. De todos ellos, el más complicado de interrelacionar resulta ser la DBO<sub>5</sub>, debido a los diferentes problemas e inconvenientes que presenta su análisis (Véase el apartado dedicado al estudio de la DBO). No obstante, para aguas domésticas brutas típicas, el cociente DBO<sub>5</sub>/DQO se halla en el intervalo 0,4-0,8, mientras que la relación DBO<sub>5</sub>/COT varía entre 1,0 y 1,6. Es importante hacer mención del hecho que estas relaciones presentan importantes variaciones en función del nivel de tratamiento a que se ha sometido a las aguas residuales antes de hacer los análisis. Dada la diferencia en el tiempo necesario para la realización de los ensayos de DQO, COT y otros ensayos relacionados con éstos frente a la duración del ensayo de la DBO, es de esperar que su uso aumente considerablemente en el futuro.

### Materia inorgánica

Son varios los componentes inorgánicos de las aguas residuales y naturales que tienen importancia para la determinación y control de la calidad del agua. Las concentraciones de las sustancias inorgánicas en el agua aumentan tanto por el contacto del agua con las diferentes formaciones geológicas, como por las aguas residuales, tratadas o sin tratar, que a ella se descargan. Las aguas naturales disuelven parte de las rocas y minerales con los que entran en contacto. Las aguas residuales, salvo el caso de

determinados residuos industriales, no se suelen tratar con el objetivo específico de eliminar los constituyentes inorgánicos que se incorporan durante el ciclo de uso. Las concentraciones de constituyentes inorgánicos aumentan, igualmente, debido al proceso natural de evaporación que elimina parte del agua superficial y deja las sustancias inorgánicas en el agua. Puesto que las concentraciones de los diferentes constituyentes inorgánicos pueden afectar mucho a los usos del agua, conviene examinar la naturaleza de algunos de ellos, especialmente aquellos que han sido incorporados al agua superficial durante su ciclo de uso.

pH. La concentración de ion hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo de concentraciones adecuado para la adecuada proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico. El agua residual con concentraciones de ion hidrógeno inadecuadas presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar la concentración de ion hidrógeno en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de la evacuación de las aguas.

La concentración de ion hidrógeno presente en el agua está muy estrechamente relacionada con la cuantía en que se disocian las moléculas de agua. El agua se disocia en iones hidroxilo e hidrógeno del siguiente modo:



Aplicando la ley de acción de masas a esta ecuación,

$$\frac{[\text{H}^+][\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]} = K \quad (3.25)$$

expresión en la que los corchetes representan las concentraciones de los diferentes constituyentes en moles por litro. Puesto que la concentración del agua en un sistema acuoso es esencialmente constante, se puede incorporar el valor de ésta a la constante de equilibrio  $K$  para obtener:

$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = K_w \quad (3.26)$$

$K_w$  se conoce con el nombre de constante de ionización o producto de ionización del agua, y su valor es, aproximadamente,  $1 \cdot 10^{-14}$  a la temperatura de  $25^\circ \text{C}$ . La Ecuación 3.26 puede utilizarse para el cálculo de la concentración de ion hidroxilo una vez conocida la concentración de ion hidrógeno, y viceversa.

La forma habitual de expresar la concentración de ion hidrógeno es como pH, que se define como el logaritmo decimal cambiado de signo de la concentración de ion hidrógeno.

$$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+] \quad (3.27)$$

Si empleamos una notación análoga para el pOH (logaritmo cambiado de signo de la concentración de ion hidroxilo), es fácil comprobar que , a partir de la Ecuación 3.26 y para agua a 25 °C , se obtiene:

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14 \quad (3.28)$$

El pH de los sistemas acuosos puede medirse convenientemente con un pH-metro. Para el mismo procedimiento de medición también se emplean soluciones indicadoras y papeles de pH que cambian de color a determinados valores de pH. El color de la solución o del papel se compara entonces con el color de series normalizadas.

Cloruros. Otro parámetro de calidad importante es la concentración de cloruros. Los cloruros que se encuentran en el agua natural proceden de la disolución de suelos y rocas que los contengan y que están en contacto con el agua. En el caso de aguas costeras, su presencia también es debida a la intrusión de aguas saladas. Otra fuente de cloruros es la descarga de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales a aguas superficiales.

Las heces humanas, por ejemplo, suponen unos 6g de cloruros por persona y día. En lugares donde la dureza del agua sea elevada, los compuestos que reducen la dureza del aguas también son una importante fuente de aportación de cloruros. Puesto que los métodos convencionales de tratamiento de las aguas no contemplan la eliminación de cloruros en cantidades significativas, concentraciones de cloruros superiores a las normales pueden constituir indicadores de que la masa de agua receptora está siendo utilizada para el vertido de aguas residuales. La infiltración de agua subterránea en las alcantarillas contiguas a aguas saladas constituye también una potencial fuente de cloruros y sulfatos.

Alcalinidad. La alcalinidad de un agua residual está provocada por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoníaco. De entre todos ellos, los más comunes son el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio. La alcalinidad ayuda a regular los cambios del pH producidos por la adición de ácidos. Normalmente, el agua residual es alcalina, propiedad que adquiere de las aguas de tratamiento, el agua subterránea, y los materiales añadidos en los usos domésticos. La alcalinidad se determina por titulación con un ácido normalizado, expresándose los resultados en carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ . La concentración de alcalinidad en un agua residual es importante en aquellos casos en los que empleen tratamientos

químicos, en la eliminación biológica de nutrientes, y cuando haya que eliminar el amoníaco mediante arrastre por aire.

**Nitrógeno.** Los elementos nitrógeno y fósforo son esenciales para el crecimiento de protistas y plantas, razón por la cual reciben el nombre de nutrientes o bioestimuladores. Trazas de otros elementos, tales como el hierro, son necesarios para el crecimiento biológico. No obstante, el nitrógeno y el fósforo son, en la mayoría de los casos, los principales elementos nutritivos. Puesto que el nitrógeno es absolutamente básico para la síntesis de proteínas, será preciso conocer datos sobre la presencia del mismo en las aguas, y en qué cantidades, para valorar la posibilidad de tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales mediante procesos biológicos. Cuando el contenido de nitrógeno sea insuficiente, será preciso añadirlo para hacer tratable el agua residual. En aquellos casos en los que sea necesario el control del crecimiento de algas en la masa de agua receptora para preservar los usos a que se destina, puede ser necesaria la eliminación o reducción del nitrógeno en las aguas residuales antes del vertido.

**Formas del nitrógeno.** El contenido total en nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. El contenido en nitrógeno orgánico se determina con el método Kjeldahl. Se hierve la muestra acuosa con el objeto de eliminar el amoníaco, para dar paso al proceso de digestión en el que el nitrógeno orgánico se convierte en amoníaco. El nitrógeno Kjeldahl total se determina del mismo modo que el nitrógeno orgánico, con la diferencia de que no se elimina el amoníaco presente antes del proceso de digestión. Por lo tanto, el nitrógeno Kjeldahl total incluye ambas formas de nitrógeno, el orgánico y el amoniacal.

El nitrógeno amoniacal se encuentra en solución acuosa, bien en forma de ion amonio o como amoníaco, en función del pH de la solución, de acuerdo con la siguiente ecuación de equilibrio:



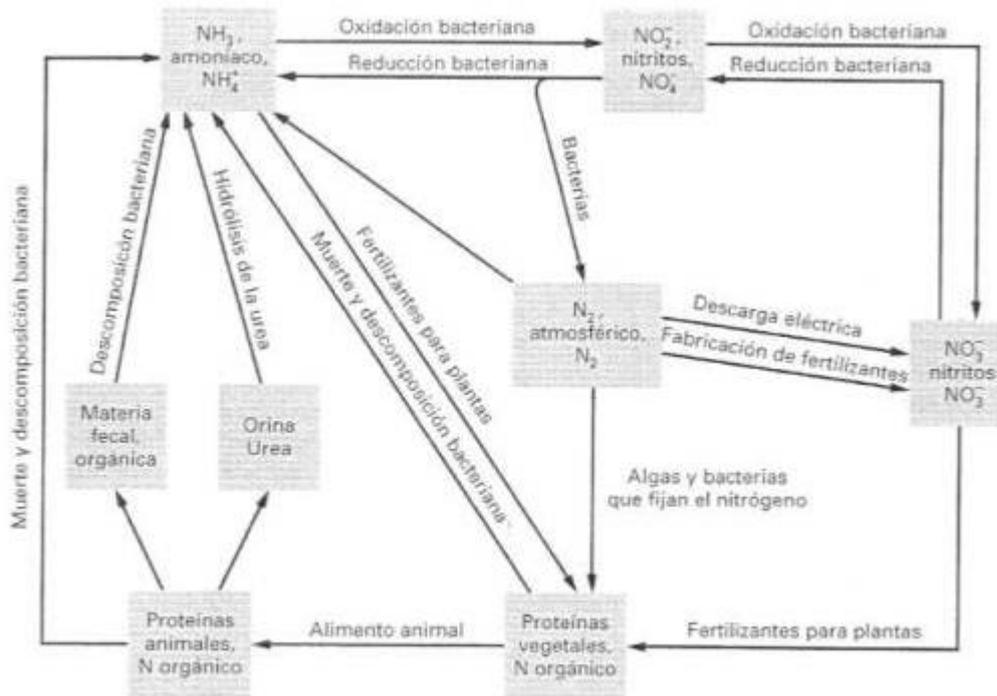
A niveles de pH superiores a 7, el equilibrio se desplaza hacia la izquierda, mientras que el ion amonio es predominante a valores del pH menores que 7. El amoníaco se determina elevando el pH, destilando el amoníaco con el vapor producido cuando se hierve la muestra y condensando el vapor que absorbe el amoníaco gaseoso. La medida se lleva a cabo colorimétricamente, titrimétricamente, o mediante conjuntos ion-electrodo específicos.

El nitrógeno del nitrito, cuya determinación se realiza colorimétricamente, es relativamente inestable y fácilmente oxidable a la forma de nitrato. Es un indicador de la contaminación anterior al proceso de estabilización y raramente excede la cantidad de 1 mg/l en el agua residual, y 0,1 mg/l en el

caso de aguas subterráneas y superficiales. A pesar de que su presencia suele darse en concentraciones pequeñas, los nitritos tienen gran importancia en el estudio de aguas residuales y contaminación de aguas, dada su gran toxicidad para gran parte de la fauna piscícola y demás especies acuáticas. Los nitritos presentes en los efluentes de aguas residuales se oxidan por adición de cloro, lo cual aumenta la cantidad de cloro a dosificar y por lo tanto el coste de la desinfección.

El nitrógeno del nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en las aguas residuales. Cuando un efluente secundario deba ser recuperado para la recarga de agua subterránea, la concentración del nitrato es importante. Ello es debido a las limitaciones que impone la EPA relativas a las aguas potables, en las que el contenido en nitratos no puede superar 45 mg/l como  $\text{NO}_3^-$ , dadas sus graves y, ocasionalmente, fatales consecuencias sobre los niños [28]. La concentración de nitratos en efluentes de aguas residuales puede variar entre 0 y 20 mg/l en forma de nitrógeno (N), con valores típicos entre 15 y 20 mg/l. La concentración de nitratos también suele determinarse vía métodos colorimétricos.

Presencia del nitrógeno en la naturaleza. En la Figura 3-18 se ilustran las diferentes formas en las que el nitrógeno está presente en la naturaleza, junto con los diferentes mecanismos según los cuales van cambiando sus formas. En el agua residual reciente, el nitrógeno se halla primariamente combinado en forma de materia proteínica y urea, aunque su paso a la forma amoniacal se produce enseguida. La edad de un agua residual puede medirse en función de la proporción de amoníaco presente. En medio aerobio, la acción de las bacterias puede oxidar el nitrógeno amoniacal a nitratos y nitritos. La preponderancia de nitrógeno en forma de nitratos en un agua residual es un fiel indicador de que el residuo se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno. No obstante, los animales pueden emplear los nitratos para sintetizar proteínas animales. La muerte y descomposición de proteínas vegetales y animales vuelve a generar más amoníaco. Por lo tanto, si la presencia de nitratos puede ser aprovechada por algas y otras plantas para la síntesis de proteínas, puede ser necesario adoptar medidas para la reducción del nitrógeno presente para prevenir la proliferación de estas plantas.



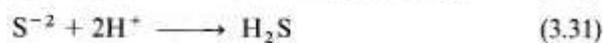
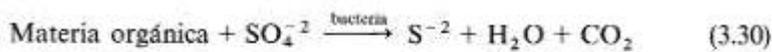
**FIGURA 3-18**  
Ciclo del nitrógeno.

Fósforo. El fósforo también es esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. Debido a que en aguas superficiales tienen lugar nocivas proliferaciones incontroladas de algas, actualmente existe mucho interés en limitar la cantidad de compuestos de fósforo que alcanzan las aguas superficiales por medio de vertidos de aguas residuales domésticas, industriales, y a través de las escorrentías naturales. Como ejemplo podemos citar el caso de las aguas residuales municipales, cuyo contenido en fósforo como  $P$  puede variar entre 4 y 15 mg/l.

Las formas más frecuentes en las que se presenta el fósforo en soluciones acuosas incluyen el ortofosfato, el polifosfato y los fosfatos orgánicos. Los ortofosfatos como el  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , por ejemplo, se hallan disponibles para el metabolismo biológico sin que sea precisa una ruptura posterior. Los ortofosfatos incluyen las moléculas con dos o más átomos de fósforo, átomos de oxígeno y, en determinados casos, átomos de hidrógeno combinados en moléculas complejas. La hidrólisis de los polifosfatos, proceso en el que recuperan sus formas como ortofosfatos, tiene lugar en soluciones acuosas. No obstante, esta hidrólisis suele ser un proceso bastante lento. El fósforo orgánico es de poca importancia en la mayor parte de los residuos domésticos, pero puede ser un constituyente importante en los vertidos industriales y fangos de aguas residuales domésticas.

La determinación del ortofosfato puede llevarse a cabo añadiendo directamente alguna sustancia que origine un complejo coloreado con el fosfato, como pueda ser el caso del molibdato amónico. Antes de determinar la cantidad de polifosfatos y fosfatos orgánicos siguiendo un método parecido, es preciso convertirlos a polifosfatos, operación que se lleva a cabo con un proceso de digestión en medio ácido.

**Azufre.** El ion sulfato se encuentra, de forma natural, tanto en la mayoría de las aguas de abastecimiento como en el agua residual. Para la síntesis de proteínas, es necesario disponer de azufre, elemento que posteriormente será liberado en el proceso de degradación de las mismas. Los sulfatos se reducen químicamente a sulfuros y a sulfuros de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) bajo la acción bacteriana en condiciones anaerobias. A continuación se explicitan las reacciones generales típicas que rigen estos procesos:



El sulfuro de hidrógeno liberado a la atmósfera en redes de alcantarillado que no circulan en presión, tiende a acumularse en la clave de las tuberías. El H<sub>2</sub>S acumulado puede sufrir entonces oxidación biológica para pasar a formar ácido sulfúrico, corrosivo para las tuberías de alcantarillado, y responsable del efecto corona.

Los sulfatos se reducen a sulfuros en los digestores de fangos, y pueden alterar el normal desarrollo de los procesos de tratamiento biológicos si la concentración de sulfuro excede los 200 mg/l. Afortunadamente, estas concentraciones raramente se alcanzan. La mezcla de gases entre el gas de las alcantarillas (CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub>) y el H<sub>2</sub>S que se desprende, es corrosiva para las conducciones de gas. Si posteriormente se quema en motores de gas, los productos de la combustión pueden causar daños en el motor, provocando graves corrosiones en el circuito de recuperación térmica de los gases de escape, especialmente si se permitiese su enfriamiento por debajo del punto de condensación.

**Compuestos tóxicos inorgánicos.** Algunos cationes son de gran importancia de cara al tratamiento y evacuación de aguas residuales. Muchos de dichos compuestos están clasificados como contaminantes prioritarios (véase Tabla 3-9). El cobre, el plomo, la plata, el cromo, el arsénico y el boro son tóxicos en mayor o menor grado para los microorganismos, razón por la cual deben ser considerados en el proyecto de plantas de tratamiento biológico. El funcionamiento de muchas de ellas se ha visto alterado por la presencias de estos iones, hasta el extremo de provocar la muerte de los microorganismos, obligando a detener el tratamiento. Por ejemplo, en los

digestores de fango, el cobre es tóxico a concentraciones de 100 mg/l, el níquel y el cromo lo son al alcanzar valores de 500 mg/l y el sodio también lo es a concentraciones elevadas. El potasio y el amoníaco se encuentran también dentro del grupo de cationes tóxicos, para concentraciones de 4.000 mg/l. La alcalinidad presente en el fango de digestión puede combinarse con los iones calcio y precipitar con ellos antes de que la concentración de calcio alcance el nivel tóxico.

Algunos aniones tóxicos, entre los que se incluyen los cianuros y los cromatos, están asimismo presentes en vertidos industriales. Se encuentran principalmente en los efluentes de fábricas de recubrimientos metálicos, y deben ser eliminados en la propia fábrica mediante pretratamientos adecuados antes de verter a las aguas residuales municipales. El ion fluoruro, también tóxico, aparece frecuentemente en las aguas residuales de fábricas de componentes electrónicos. También son tóxicos ciertos compuestos orgánicos presentes en algunos vertidos industriales.

Metales pesados. Como constituyentes importantes de muchas aguas, también se encuentran cantidades, a nivel de traza, de muchos metales. Entre ellos podemos destacar el níquel (Ni), el manganeso (Mn), el plomo (Pb), el cromo (Cr), el cadmio (Cd), el cinc (Zn), el cobre (Cu), el hierro (Fe) y el mercurio (Hg). Muchos de estos metales también están catalogados como contaminantes prioritarios (véase Tabla 3-9). Algunos de ellos son imprescindibles para el normal desarrollo de la vida biológica, y la ausencia de cantidades suficientes de ellos podría limitar el crecimiento de las algas, por ejemplo. Debido a su toxicidad, la presencia de cualquiera de ellos en cantidades excesivas interferirá con gran número de los usos del agua. Es por ello que, a menudo, resulta conveniente medir y controlar las concentraciones de dichas sustancias. Los métodos para la determinación de las concentraciones de estas sustancias varían en complejidad en función de las sustancias causantes de interferencias potencialmente presentes. Además, las cantidades de muchos de estos metales pueden determinarse, a concentraciones muy bajas, empleando métodos instrumentales entre los que cabe destacar la polarografía y la espectroscopía de absorción atómica.

### Gases

Los gases que con mayor frecuencia se encuentran en aguas residuales brutas son el nitrógeno ( $N_2$ ), el oxígeno ( $O_2$ ), el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), el amoníaco ( $NH_3$ ), y el metano ( $CH_4$ ). Los tres primeros son gases de común presencia en la atmósfera, y se encuentran en todas las aguas en contacto con la misma. Los tres últimos proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales. Si bien no se encuentran en el agua residual sin tratar, existen

otros gases con los cuales debe estar familiarizado un ingeniero sanitario. Tal es el caso, por ejemplo, del cloro ( $\text{Cl}_2$ ) y el ozono ( $\text{O}_3$ ) (desinfección y control de olores), y los óxidos de azufre y nitrógeno (procesos de combustión). Los apartados siguientes sólo hacen referencia a aquellos de interés para el agua residual bruta. En estas aguas, el amoníaco se encontrará como ion amonio en la mayoría de los casos.

**Oxígeno disuelto.** El oxígeno disuelto es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, así como para otras formas de vida. Sin embargo, el oxígeno es sólo ligeramente soluble en agua. La cantidad real de oxígeno y otros gases que puede estar presente en la solución, viene condicionada por los siguientes aspectos: (1) solubilidad del gas; (2) presión parcial del gas en la atmósfera; (3) temperatura, y (4) pureza del agua (salinidad, sólidos en suspensión, etc.).

Debido a que la velocidad de las reacciones bioquímicas que consumen oxígeno aumenta con la temperatura, los niveles de oxígeno disuelto tienden a ser más críticos en las épocas estivales. El problema se agrava en los meses de verano, debido a que el caudal de los cursos de agua es generalmente menor, razón por la cual la cantidad total de oxígeno disponible es también menor. Dado que evita la formación de olores desagradables en las aguas residuales, es deseable y conveniente disponer de cantidades suficientes de oxígeno disuelto.

**Sulfuro de hidrógeno.** Como ya se ha comentado anteriormente, el sulfuro de hidrógeno se forma durante el proceso de descomposición de la materia orgánica que contiene azufre, o en la reducción de sulfitos y sulfatos minerales, mientras que su formación queda inhibida en presencia de grandes cantidades de oxígeno. Es un gas incoloro, inflamable, con un olor típicamente característico que recuerda al de huevos podridos. El ennegrecimiento del agua residual y del fango se debe, generalmente, a la formación de sulfuro de hidrógeno que se combina con el hierro presente para formar sulfuro ferroso ( $\text{FeS}$ ) u otros sulfuros metálicos. Desde el punto de vista de la generación de olores, y aunque el sulfuro de hidrógeno es el gas generado de mayor importancia, pueden formarse durante la descomposición anaerobia otros compuestos volátiles, como el indol, el escatol y los mercaptanos, que pueden ser responsables de olores más desagradables que los producidos por el sulfuro de hidrógeno.

**Metano.** El principal subproducto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica del agua residual es el gas metano. El metano es un hidrocarburo combustible de alto valor energético, incoloro e inodoro.

Normalmente, no se encuentra en grandes cantidades en el agua residual, puesto que incluso pequeñas cantidades de oxígeno tienden a ser tóxicas

para los organismos responsables de la producción del metano. No obstante, en ocasiones, se produce metano como resultado de un proceso de descomposición anaerobia que puede darse en depósitos acumulados en el fondo. Debido a que el metano es sumamente combustible y a que el riesgo de explosión es elevado, los pozos de registro y empalmes de alcantarillas o cámaras de conexión en los que exista el riesgo de acumulaciones de gas deberán ser aireados con un ventilador portátil antes y durante los lapsos de tiempo en los que los operarios trabajen en ellos. En las plantas de tratamiento, el metano se genera en los procesos de tratamiento anaeróbicos empleados para la estabilización de los fangos de aguas residuales. Además, deberán disponerse carteles de aviso sobre el peligro de explosión existente, y los operarios deberán ser instruidos acerca de las medidas de seguridad que hay que respetar durante los horarios de trabajo en las estructuras en las que pueda aparecer el gas.

### ***3.4 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS: DEFINICIÓN Y APLICACIÓN***

---

El ingeniero ambiental debe tener un conocimiento exhaustivo de las características biológicas de las aguas residuales. Debe estar familiarizado con los siguientes temas: (1) principales grupos de microorganismos biológicos presentes, tanto en aguas superficiales como residuales, así como aquellos que intervienen en los tratamientos biológicos; (2) organismos patógenos presentes en las aguas residuales; (3) organismos utilizados como indicadores de contaminación y su importancia; (4) métodos empleados para determinar los organismos indicadores, y (5) métodos empleados para determinar la toxicidad de las aguas tratadas. Todos estos temas son objeto de estudio en el presente apartado.

#### **Microorganismos**

Los principales grupos de organismos presentes tanto en aguas residuales como superficiales se clasifican en organismos eucariotas, eubacterias y arqueobacterias (véase Tabla 3-11). Tal y como se muestra en la Tabla 3-11, la mayoría de los organismos pertenecen al grupo de las eubacterias. La categoría protista, dentro de los organismos eucariotas, incluye las algas, los hongos y los protozoos. Las plantas tales como los helechos, los musgos, las plantas hepáticas y las plantas de semilla están clasificadas como eucariotas multicelulares. Los vertebrados y los invertebrados están clasificados como animales eucariotas multicelulares. Los virus, también presentes en el agua residual, se clasifican en función del sujeto infectado. Debido a que en capítulos posteriores se estudia detalladamente cada uno de los grupos de microorganismos, los apartados que siguen pretenden servir únicamente como introducción general a los distintos grupos y su

importancia en el campo del tratamiento de las aguas residuales y la gestión de la calidad del agua.

**TABLA 3-11**  
Clasificación de los microorganismos<sup>a</sup>

Grupo	Estructura celular	Caracterización	Miembros representativos
Eucariotas	Eucariota <sup>b</sup>	Multicelular, con gran diferenciación de las células y el tejido.	Plantas (plantas de semilla, musgos, helechos). Animales (vertebrados e invertebrados).
		Unicelular o coenocítica o micelial; con escasa o nula diferenciación de tejidos.	Protistas (algas, hongos, protozoos).
Eubacterias	Procariota <sup>c</sup>	Química celular parecida a las eucariotas.	La mayoría de las bacterias.
Arqueobacterias	Procariota <sup>c</sup>	Química celular distintiva.	Metanógenos, halófilos, termacidófilos.

<sup>a</sup> Adaptado de la bibliografía [19].  
<sup>b</sup> Contienen un núcleo definido.  
<sup>c</sup> No contienen membrana nuclear.

Bacterias. Las bacterias se pueden clasificar como eubacterias procariotas unicelulares. En función de su forma, las bacterias pueden clasificarse en cuatro grandes grupos: esferoidales, bastón, bastón curvado y filamentosas. Las bacterias esferoidales, que reciben el nombre de cocos, tienen un diámetro aproximado de entre 1 y 3 micras. Las bacterias de forma de bastón, conocidas como bacilos, tienen tamaños muy variables, entre 0,5 y 2 micras de ancho por entre 1 y 10 micras de largo. Los *Eseherichia coli*, organismo común en heces humanas, miden del orden de 0,5 micras de ancho por 2 micras de largo. Las bacterias del tipo de bastón curvado tienen dimensiones que pueden variar entre 0,6 y 1,0 micras de ancho por entre 2 y 6 micras de longitud. Las bacterias con forma de espiral pueden alcanzar longitudes del orden de las 50 micras, mientras que las filamentosas pueden llegar a superar las 100 micras.

El papel que desempeñan las bacterias en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica, tanto en el marco natural como en las plantas de tratamiento, es amplio y de gran importancia. Por ello resulta imprescindible conocer sus características, funciones, metabolismos y proceso de síntesis, temas que serán objeto de un estudio minucioso en el Capítulo 8. Los coliformes también se emplean como indicadores de la contaminación por desechos humanos. En los siguientes apartados se discuten tanto su importancia y significado como los diferentes métodos existentes para determinar su presencia.

Hongos. Los hongos son protistas eucariotas aerobios, multicelulares, no fotosintéticos y quimioheterótrofos. Muchos de los hongos son saprófitos; basan su alimentación en materia orgánica muerta. Juntos con las bacterias, los hongos son los principales responsables de la descomposición del carbono en la biosfera. Desde el punto de vista ecológico, los hongos presentan ciertas ventajas sobre las bacterias: pueden crecer y desarrollarse en zonas de baja humedad y en ámbitos con pH bajos. Sin la colaboración de los hongos en los procesos de degradación de la materia orgánica el ciclo del carbono se interrumpiría en poco tiempo, y la materia orgánica empezaría a acumularse.

Algas. Las algas pueden presentar serios inconvenientes en las aguas superficiales, puesto que pueden reproducirse rápidamente cuando las condiciones son favorables. Este fenómeno, que se conoce con el nombre de crecimiento explosivo, puede conducir a que ríos, lagos y embalses sean cubiertos por grandes colonias flotantes de algas. Los crecimientos explosivos son característicos de los llamados lagos eutróficos, que son lagos con gran contenido en compuestos necesarios para el crecimiento biológico. Puesto que el efluente de las plantas de tratamiento del agua residual suele ser rico en nutrientes biológicos, la descarga del efluente en los lagos provoca su enriquecimiento y aumenta su tasa de eutrofización. En los ríos pueden producirse efectos análogos.

La presencia de algas afecta al valor del agua de abastecimiento, ya que puede originar problemas de olor y de sabor. En cuanto a los usos del agua relacionados con el ocio, las algas también pueden alterar el valor de las aguas superficiales debido al crecimiento de ciertas especies de peces y formas de vida acuáticas. La determinación de la concentración de algas en aguas superficiales se realiza tomando muestras por alguno de los métodos conocidos y haciendo un recuento al microscopio. Los procedimientos detallados para el recuento de algas se describen en el *Standard Methods* L18].

Uno de los problemas más importantes al que se enfrenta la ingeniería sanitaria en el campo de la gestión de la calidad del agua es el de encontrar el proceso de tratamiento que hay que aplicar a las aguas residuales de diferentes orígenes de modo que los efluentes no favorezcan el crecimiento de algas y demás plantas acuáticas. La solución puede implicar la eliminación del carbono, así como de las diferentes formas de nitrógeno y fósforo y alguno de los elementos que se hallan presentes a nivel de traza, como el hierro y el cobalto.

Protozoos. Los protozoos son microorganismos eucariotas cuya estructura está formada por una sola célula abierta. La mayoría de los protozoos son

aerobios o facultativamente quimioheterótrofos anaeróbios, aunque se conocen algunos anaerobios. Los protozoos de importancia para el ingeniero sanitario son las amebas, los flagelados y los ciliados libres y fijos. Los protozoos se alimentan de bacterias y otros microorganismos microscópicos. Tienen una importancia capital, tanto en el funcionamiento de los tratamientos biológicos como en la purificación de cursos de agua ya que son capaces de mantener el equilibrio natural entre los diferentes tipos de microorganismos. Ciertos protozoos son también patógenos. En el agua de suministro es importante controlar la presencia de la *Giardia lamblia* (responsable de la giardiasis o enfermedad de Hikers) y de *Cryptosporidium*, como agente causante de infecciones potencialmente mortales para pacientes con síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA).

Plantas y animales. Las diferentes plantas y animales que tienen importancia para el ingeniero sanitario tienen tamaños muy variados: desde los gusanos y rotíferos microscópicos hasta crustáceos macroscópicos. El conocimiento de estos organismos resulta útil a la hora de valorar el estado de lagos y corrientes, al determinar la toxicidad de las aguas residuales evacuadas al medio ambiente, y a la hora de determinar la efectividad de la vida biológica en los tratamientos secundarios empleados para destruir los residuos orgánicos.

Desde el punto de vista de la salud pública, existen ciertos gusanos que merecen especial atención y preocupación. Los platelmintos (comúnmente llamados gusanos planos) y los asquelmintos son importantes familias de gusanos. Platelmintos como la Tubelaria están presentes en lagos y cursos de agua de todo el mundo, y la Trematoda y la Cestoda son formas parasíticas de gran importancia para la salud pública. Dentro de los asquelmintos destaca la familia de los nemátodos, que cuenta con más de 10.000 especies. Las formas parasíticas de mayor importancia son la Triquinela, causante de triquinosis; Necator, que origina anquilostomiasis; Ascaris, causante de infecciones por ascárides; y la Filaria, que provoca filariosis [3].

Virus. Los virus son partículas parasíticas formadas por un cordón de material genético ácido desoxirribonucleico (ADN) o ácido ribonucleico (RNA) con una capa de recubrimiento proteínico. No tienen capacidad para sintetizar compuestos nuevos. En lugar de ello, invaden las células del cuerpo vivo que los acoge y reconducen la actividad celular hacia la producción de nuevas partículas virales a costa de las células originales. Cuando muere la célula original, se liberan gran cantidad de virus que infectarán células próximas.

Los virus excretados por los seres humanos pueden representar un importante peligro para la salud pública. Por ejemplo, a partir de datos experimentales, se ha podido comprobar que cada gramo de heces de un paciente con hepatitis contiene entre 10.000 y 100.000 dosis de virus hepático. Se sabe con certeza que algunos virus pueden sobrevivir hasta 41 días, tanto en aguas limpias como residuales a la temperatura de 20<sup>0</sup>C, y hasta 6 días en un río normal. Se ha atribuido al agua de abastecimiento ciertos brotes de hepatitis infecciosa. Para determinar los mecanismos de transporte y eliminación de virus en suelos, aguas superficiales y residuales, es necesario un esfuerzo aún mayor por parte tanto de biólogos como de ingenieros.

### **Organismos Patógenos**

Los organismos patógenos que se encuentran en las aguas residuales pueden proceder de desechos humanos que estén infectados o que sean portadores de una determinada enfermedad. Las principales clases de organismos patógenos presentes en las aguas residuales son, como muestra la Tabla 3-12, las bacterias, los virus, los protozoos y el grupo de los helmintos. Los organismos bacterianos patógenos que pueden ser excretados por el hombre causan enfermedades del aparato intestinal como la fiebre tifoidea y paratifoidea, la disentería, diarreas y cólera. Debido a la alta infecciosidad de estos organismos, cada año son responsables de gran número de muertes en países con escasos recursos sanitarios, especialmente en zonas tropicales.

**TABLA 3-12**

Agentes infecciosos potencialmente presentes en el agua residual doméstica bruta<sup>a</sup>

Organismo	Enfermedad	Comentario
<b>Bacteria</b>		
<i>Escherichia coli</i> (enteropatógena)	Gastroenteritis	Diarrea
<i>Legionella pneumophila</i>	Legionelosis	Enfermedades respiratorias agudas
<i>Leptospira</i> (150 esp.)	Leptospirosis	Leptospirosis, fiebre (enfermedad de Weil)
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea	Fiebre alta, diarrea, úlceras en el intestino delgado
<i>Salmonella</i> (~ 1.700 esp.)	Salmonelosis	Envenenamiento de alimentos
<i>Shigella</i> (4 esp.)	Shigelosis	Disentería bacilar
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	Diarreas extremadamente fuertes, deshidratación
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersinosis	Diarrea
<b>Virus</b>		
Adenovirus (31 tipos)	Enfermedades respiratorias	
Enterovirus (67 tipos, p.e. polio, eco y virus Cocksakie)	Gastroenteritis, anomalías cardíacas, meningitis	
Hepatitis A	Hepatitis infecciosas	Leptospirosis, fiebre
Agente Norwalk	Gastroenteritis	Vómitos
Reovirus	Gastroenteritis	
Rotavirus	Gastroenteritis	
<b>Protozoos</b>		
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiasis	Diarrea, disentería
<i>Cryptosporidium</i>	Criptosporidiosis	Diarrea
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebiasis (disentería amebica)	Diarreas prolongadas con sangre, abscesos en el hígado y en el intestino delgado
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis	Diarrea, náuseas, indigestión
<b>Helmintos<sup>b</sup></b>		
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis	Infestación de gusanos
<i>Enterobius vericularis</i>	Enterobiasis	Gusanos
<i>Fasciola hepatica</i>	Fascioliasis	Gusanos (tercera)
<i>Hymenolepis nana</i>	Hymenlepiasis	Tenia enana
<i>Taenia saginata</i>	Teniasis	Tenia (buey)
<i>T. solium</i>	Teniasis	Tenia (cerdo)
<i>Trichuris trichiura</i>	Trichuriasis	Gusanos

<sup>a</sup> Adaptado parcialmente de la bibliografía [3, 19].

<sup>b</sup> Los helmintos citados son aquellos de implantación a nivel mundial.

### Uso de organismos indicadores

Los organismos patógenos se presentan en las aguas residuales y contaminadas en cantidades muy pequeñas y, además, resultan difíciles de aislar y de identificar. Por ello se emplea el organismo coliforme como organismo indicador, puesto que su presencia es más numerosa y fácil de

comprobar. El tracto intestinal humano contiene innumerables bacterias con forma de bastoncillos, conocidas como organismos coliformes. Aparte de otras clases de bacterias, cada ser humano evacua de 100.000 a 400.000 millones de organismos coliformes cada día. Por ello, se considera que la presencia de coliformes puede ser un indicador de la posible presencia de organismos patógenos, y que la ausencia de aquéllos es un indicador de que las aguas están libres de organismos que puedan causar enfermedades.

Las bacterias coliformes incluyen los géneros *Escherichia* y *Aerobacter*. El uso de 105 coliformes como organismos indicadores es problemático debido a que la *Aerobacter* y ciertas clases de *Escherichia* pueden crecer en el suelo. Por lo tanto, la presencia de coliformes no siempre es sinónima de contaminación con residuos humanos. No obstante, aunque parece ser que las *Escherichia coli* si son de origen exclusivamente fecal, la dificultad de determinar la *E. coli* sin incluir los coliformes del suelo hace que se use todo el grupo de los coliformes como indicador de la contaminación fecal.

En la Tabla 3-13 se indican otros organismos que han sido propuestos como indicadores de la contaminación de un agua. En los últimos años, se han desarrollado ensayos capaces de distinguir entre coliformes totales, coliformes fecales, y estreptococos fecales; todos ellos están contemplados en la literatura técnica que aborda este tema. Más adelante en este capítulo se estudiará la relación entre los coliformes fecales y los estreptococos fecales. En la Tabla 3-14 aparecen los organismos que han sido empleados para establecer criterios de calidad y aptitud de las aguas para usos determinados de las mismas.

**TABLA 3-13**

Organismos específicos que han sido empleados o propuestos como indicadores de la contaminación humana<sup>a</sup>

Organismo indicador	Características
Bacterias coliformes	Especies de organismos que pueden fermentar lactosa con generación de gases (o producen una colonia diferenciable en un periodo de incubación en un medio adecuado de $24 \pm 2$ h a $48 \pm 3$ h) a $35 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . Existen algunas variedades que no se ajustan a la definición. El grupo de coliformes incluye cuatro géneros de la familia Enterobacteriácea. Estos son el <i>Escherichia</i> , <i>Klebisella</i> , <i>Citrobacter</i> y <i>Enterobacter</i> . Del grupo de organismos, el género <i>Escherichia</i> (especie <i>E. coli</i> ) parece ser el más representativo de la contaminación fecal.
Bacterias coliformes fecales	Se estableció un grupo de bacterias coliformes fecales en función de la capacidad de generar gas (o colonias) a una temperatura de incubación de elevada ( $44,5 \pm 0,2^\circ\text{C}$ durante $24 \pm 2$ h).
<i>Klebisella</i>	La población total de coliformes incluye el género <i>Klebisella</i> . La <i>Klebisella</i> termotolerante también se incluye en el grupo de coliformes fecales. Este grupo se cultiva a $35 \pm 0,5^\circ\text{C}$ durante $24 \pm 2$ h.
<i>Escherichia coli</i>	El <i>E. coli</i> es parte de la población bacteriana y es el género de coliformes más representativos de las fuentes de contaminación fecal.
Estreptococos fecales	Este grupo se ha empleado, junto con los coliformes fecales, para determinar las fuentes de contaminación fecal reciente (humana o de animales de granja). Con los procedimientos analíticos habituales no es posible diferenciar los verdaderos estreptococos fecales de algunas de las variedades que se parecen a este grupo, lo cual representa un impedimento para su uso como organismo indicador.
Enterococos	Dos familias de estreptococos fecales — <i>S. faecalis</i> y <i>s. faecium</i> — son los miembros del grupo de los estreptococos más específicos de la contaminación humana. Las dos familias conocidas como enterococos se pueden aislar y cuantificar mediante la eliminación de las demás familias mediante métodos analíticos.  Los enterococos suelen estar presentes en número inferior al resto de los organismos indicadores; no obstante, sobreviven mejor en agua salada.
<i>Clostridium perfringens</i>	Es una bacteria persistente anaerobia formadora de esporas, y sus características la convierten en un indicador útil en los casos en los que se realiza la desinfección del agua, en los que es posible la existencia pasada de contaminación, en los que el tiempo que se tarda antes de realizar los análisis es dilatado.
<i>P. aeruginosa</i> y <i>A. hydrophila</i>	Estos organismos pueden estar presentes en grandes cantidades en el agua residual. Ambos se pueden considerar como organismos acuáticos y se pueden encontrar en el agua en ausencia de fuentes de contaminación fecal inmediatas.

<sup>a</sup> Adaptado parcialmente de la bibliografía [3, 7].

**TABLA 3-14**

Organismos indicadores empleados para la determinación de los criterios de rendimiento para diferentes usos del agua

Usos del agua	Organismo indicador
Agua potable	Coliformes totales
Actividades lúdicas en agua dulce	Coliformes fecales <i>E. coli</i> Enterococos
Actividades lúdicas en agua salada	Coliformes fecales Coliformes totales Enterococos
Zonas de crecimiento de moluscos	Coliformes totales Coliformes fecales
Irrigación agrícola	Coliformes totales (agua reutilizada)
Desinfección de efluentes de aguas residuales	Coliformes totales Coliformes fecales

#### Relación entre los coliformes fecales y los estreptococos fecales

Se ha observado que las cantidades de coliformes y estreptococos fecales descargados por los seres humanos son significativamente diferentes de las cantidades descargadas por los animales. Por consiguiente, se ha propuesto que la relación entre los coliformes fecales (CF) y los estreptococos fecales (EF) contenidos en una muestra puedan emplearse para determinar el origen de la contaminación humana o animal de un agua. En la Tabla 3-16 se muestran los valores típicos de la relación FC/FS tanto para los desechos humanos como para los de diferentes animales. Para el caso de animales domésticos, esta relación se mantiene por debajo de 1,0 mientras que para el caso de los seres humanos se halla por encima de 4,0.

Si los datos obtenidos se sitúan en valores cercanos al intervalo entre 1,0 y 2,0, la interpretación de los mismos es incierta. Si la muestra se ha tomado cerca de la teórica fuente de contaminación, la interpretación más verosímil es que se trate de contaminación debida tanto al hombre como a los animales. Las interpretaciones anteriores están sujetas a las siguientes restricciones:

1. El pH de la muestra deberá estar comprendido entre 4 y 9 para poder considerar despreciable cualquier efecto adverso del pH sobre cualquier grupo de microorganismos.
2. Deberá hacerse un mínimo de 2 recuentos para cada muestra.
3. Con el fin de minimizar los errores debidos a las diferentes tasas de mortalidad, las muestras no deberán tomarse en lugares aguas abajo más allá de la distancia correspondiente a 24 horas de tiempo de flujo desde la teórica fuente de contaminación.

4. Únicamente pueden considerarse como útiles para la determinación de la relación CF/EF los recuentos de coliformes fecales obtenidos a 44 °C.

El empleo de la relación CF/EF puede ser de gran utilidad para la determinación del origen de la contaminación en estudios de escorrentía y en los estudios de contaminación llevados a cabo en zonas rurales, especialmente en aquellas zonas en las que esté extendido el uso de fosas sépticas. En muchas situaciones en las que tras realizar el ensayo se sospecha que la contaminación es de origen humano, ésta puede de hecho ser debida a los animales. El correcto establecimiento del origen de la contaminación puede ser muy importante, especialmente en aquellos casos en los que se propone o presupone que la ejecución de instalaciones convencionales de tratamiento conseguirá la eliminación de los contenidos de coliformes medidos.

### **3.5 COMPOSICION DE LAS AGUAS RESIDUALES**

La composición de las aguas residuales se refiere a las cantidades de constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en las aguas residuales. En este apartado se presentan datos sobre los diferentes constituyentes de las aguas residuales y de los fangos de las fosas sépticas. También se incluyen comentarios acerca de la necesidad de profundizar en la caracterización de las aguas residuales y sobre la incorporación de minerales que se produce durante los diversos usos del agua.

#### Constituyentes del agua residual y del líquido séptico

La Tabla 3-16 presenta datos típicos de los constituyentes encontrados en el agua residual doméstica. En función de las concentraciones de estos constituyentes, podemos clasificar el agua residual como concentrada, media o débil. Tanto los constituyentes como sus concentraciones presentan variaciones en función de la hora del día, el día de la semana, el mes del año y otras condiciones locales. Por ello, los datos de la Tabla 3-16 pretenden solamente servir de guía, y no como base de proyecto. El líquido séptico es el fango producido en los sistemas de evacuación de aguas residuales individuales, principalmente fosas sépticas y pozos negros. Las cantidades y constituyentes del fango séptico varían ampliamente. Las mayores variaciones se producen en comunidades en las que no existe un control adecuado sobre la recogida y evacuación de los residuos. En la Tabla 3-17 se proporcionan algunos datos sobre los constituyentes del líquido séptico.

**TABLA 3-16**

Composición típica del agua residual doméstica bruta

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1.200
Disueltos, totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	ml/l	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno, mg/l: 5 días, 20 °C (DBO <sub>5</sub> , 20 °C)	mg/l	110	220	400
Carbono orgánico total (COT)	mg/l	80	160	290
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	250	500	1.000
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoníaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros <sup>a</sup>	mg/l	30	50	100
Sulfato <sup>a</sup>	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	50	100	200
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales <sup>b</sup>	n.º/100 ml	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	µg/l	<100	100-400	>400

<sup>a</sup> Los valores se deben aumentar en la cantidad en que estos compuestos se hallen presentes en las aguas de suministro.

<sup>b</sup> Consultar la Tabla 3-18 para obtener los valores típicos correspondientes a otros microorganismos.

**TABLA 3-17**

Características típicas del líquido de las fosas sépticas

Constituyente	Concentración, mg/l	
	Intervalo	Valor típico
Sólidos totales (ST)	5.000-100.000	40.000
Sólidos en suspensión (SS)	4.000-100.000	15.000
Sólidos en suspensión volátiles (SSV)	1.200-14.000	7.000
DBO <sub>5</sub> , 20 °C	2.000-30.000	6.000
Demanda química de oxígeno	5.000-80.000	30.000
Nitrógeno Kjeldhal total (NKT como N)	100-1.600	700
Amoníaco, NH <sub>3</sub> como N	100-800	400
Fósforo total, como P	50-800	250
Metales pesados <sup>a</sup>	100-1.000	300

<sup>a</sup> Principalmente hierro (Fe), cinc (Zn) y aluminio (Al).

### Microorganismos en las aguas residuales

En la Tabla 3-18 se facilitan datos acerca del tipo y número de microorganismos cuya presencia es habitual en las aguas residuales. La amplia variación en los intervalos de valores propuestos es característica de los ensayos con aguas residuales. Se estima que cerca de un 3 o un 4 por 100 del total de los coliformes son *E. coli* patógenos.

**TABLA 3-18**

Tipos y número de microorganismos típicamente presentes en las aguas residuales domésticas brutas <sup>a</sup>

Organismo	Concentración, número/ml
Coliformes totales	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>
Coliformes fecales	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>
Estreptococos fecales	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>
Enterococos	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>
<i>Shigella</i>	Presentes <sup>b</sup>
<i>Salmonella</i>	10 <sup>0</sup> -10 <sup>2</sup>
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10 <sup>1</sup> -10 <sup>2</sup>
<i>Clostridium perfringens</i>	10 <sup>1</sup> -10 <sup>3</sup>
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Presentes <sup>b</sup>
Cistos de protozoos	10 <sup>1</sup> -10 <sup>3</sup>
Cistos de giarda	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>2</sup>
Cistos de cryptosporidium	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>1</sup>
Huevos de helmintos	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>1</sup>
Virus entéricos	10 <sup>1</sup> -10 <sup>2</sup>

<sup>a</sup> Adaptado parcialmente de la bibliografía [3, 7].

<sup>b</sup> Los resultados de estos ensayos se suelen clasificar como positivos o negativos en lugar de ser ensayos cuantitativos.

Casi nunca se determina la presencia de determinados organismos como los cistos de protozoos o los huevos de elmintos. La revisión de datos publicados sobre la presencia de virus debe realizarse con mucho cuidado, puesto que las nuevas técnicas en detección e identificación de los mismos pueden haberlos tornado obsoletos. Por lo tanto, la fecha de los ensayos pasa a tener casi la misma importancia que los resultados obtenidos.

#### Necesidad de análisis especializados

En general, los constituyentes citados en la Tabla 3-16 son aquellos cuyo análisis se suele hacer de forma más o menos rutinaria. En el pasado, se creía que estos constituyentes eran suficientes para caracterizar el agua residual con vistas a su tratamiento biológico, pero a medida que fueron avanzando los conocimientos de química y de la microbiología del tratamiento de las aguas residuales, se ha puesto de manifiesto la importancia de analizar la presencia de constituyentes adicionales.

Estos constituyentes adicionales, que ahora se analizan, incluyen muchos de los metales necesarios para el crecimiento de microorganismos, como pueden ser calcio, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, y cinc. Es

importante determinar la presencia o ausencia de sulfuro de hidrógeno, para poder determinar si se pueden desarrollar condiciones corrosivas y si puede precipitar alguno de los metales de traza, necesarios para el crecimiento de los microorganismos. La determinación de la concentración de sulfatos es necesaria para evaluar la posibilidad de utilización de tratamientos anaerobios. La presencia de organismos filamentosos en el agua residual también debería determinarse, especialmente en aquellos casos en los que se valore la posibilidad de desarrollar tratamientos biológicos. También es necesario analizar la presencia de contaminantes prioritarios para comprobar la necesidad de adoptar tratamientos especiales y medidas de control especiales para minimizar la descarga de estos compuestos al medio ambiente.