

INTRODUCCIÓN

Las materias relacionadas con la ingeniería sanitaria y ambiental tienen una importante presencia en los planes de estudios de las titulaciones de Grado en Ingeniería Civil y de Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Una parte sustancial de dichas materias viene representada, en general, por las tecnologías de tratamiento de aguas y, en particular, por la depuración de las aguas residuales.

Este es, precisamente, un libro de texto sobre la depuración, regeneración y, en general, el tratamiento de las aguas residuales urbanas, cuyo único objetivo es el de servir como base de aprendizaje a los alumnos. En esta línea docente, el texto, estructurado a modo de manual, contiene un buen número de esquemas, fotografías, diagramas, gráficos, tablas, etc., que, entiendo, facilitarán la comprensión de los temas tratados.

Este libro no constituye una obra original, sino una compilación de gran parte de la mejor bibliografía especializada –relacionada al final del mismo– y a la que, en todo caso, deberá recurrir el alumno para ampliar conocimientos y profundizar en aquellas cuestiones que le merezcan mayor interés. Las citas al pie de las figuras ilustrativas sirven de guía y referencia para localizar, de entre dicha bibliografía, la fuente de información específica del tema tratado en el contexto.

Por otro lado, he considerado interesante incluir la traducción anglosajona de alguna terminología de uso habitual en el campo de la depuración, lo que puede ayudar a quienes quieran progresar en el estudio de esta disciplina con la lectura de publicaciones y artículos en inglés, en cuanto que es el idioma de difusión tecnológica y científica por excelencia.

El libro se estructura en catorce capítulos, concordantes con los tratamientos y procesos que normalmente se llevan a cabo en la mayor parte de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) y de las estaciones regeneradoras de aguas (ERA).

En el *capítulo primero* se definen y caracterizan las aguas residuales, los parámetros de contaminación y las cargas contaminantes.

En el *capítulo segundo* se hace una introducción a la depuración de las aguas residuales, se clasifican los tipos de tratamientos de las aguas residuales urbanas, se recoge la normativa que regula la depuración de las aguas residuales urbanas y las etapas o fases que conforman las líneas de agua y de fangos de una EDAR, así como una serie de consideraciones a tener en cuenta a la hora de planificar, proyectar y construir una depuradora.

En los subsiguientes capítulos se desarrollan pormenorizadamente las principales operaciones y procesos de la línea de agua de la EDAR, descritos en el capítulo anterior, detallándose las diferentes unidades y equipos donde se materializan dichos procesos. Así, en los *capítulos tercero y cuarto* se analizan, respectivamente, el pretratamiento y el tratamiento primario, y en los capítulos *quinto, sexto, séptimo y octavo* el tratamiento secundario o biológico, los procesos de biomasa en suspensión (fangos activados) y de biomasa fija (lechos bacterianos y contactores biológicos rotativos o CBR), y la decantación secundaria.

El *capítulo noveno* se dedica por entero a la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo), describiéndose no sólo los procedimientos clásicos de eliminación del nitrógeno y del fósforo sino también algunos más recientes e innovadores, como, por ejemplo, el proceso Anammox.

En el *capítulo décimo* se desarrollan los biorreactores de membrana (BRM o MBR), tecnología de uso creciente, especialmente en aquellos casos en que se requieren efluentes de alta calidad.

En el *capítulo undécimo* se introducen los sistemas aerobios combinados, entre ellos los de biomasa fija sobre lecho móvil (MBBR) y los procesos integrados de biopelícula y fangos activados (IFAS), que representan algunas de las tecnologías más avanzadas de depuración.

El *capítulo duodécimo* trata de los sistemas anaerobios, entre ellos el filtro anaerobio (AF), los reactores anaerobios de lecho expandido (AEBR) y fluidizado (FBR), el reactor de manto de fangos de flujo ascendente (UASB), sistemas híbridos, etc.

En el *capítulo decimotercero* se recogen los aspectos fundamentales del tratamiento de fangos, esto es, la serie de etapas y operaciones sucesivas que conforman la línea de fangos de una EDAR.

Por último, el *capítulo decimocuarto* se centra en el tratamiento terciario, concretamente en el tratamiento de regeneración de los efluentes depurados con vistas a su reutilización, y en donde además de exponerse la problemática asociada a la reutilización se presentan los procesos más habituales de regeneración de los efluentes depurados, especialmente la filtración y la desinfección.

Como anotación final, he de enfatizar el hecho de que el alcance del presente libro se ha limitado voluntariamente a la presentación de los aspectos básicos de la depuración y de los modelos empíricos aplicados al diseño de los mismos, pero que existen herramientas mucho más potentes y precisas, como son los modelos matemáticos de simulación, que pueden dar respuestas más precisas y ricas en contenido.

Alicante, marzo de 2013

Arturo Trapote Jaime

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

1. LAS AGUAS RESIDUALES

1.1. DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN

Aguas residuales son las aguas recogidas en las aglomeraciones urbanas, procedentes de los vertidos de la actividad humana doméstica (aguas residuales domésticas) o la mezcla de éstas con las procedentes de actividades comerciales, industriales y agrarias integradas en el núcleo urbano, así como las aguas de lluvia.

Atendiendo a los aspectos cuantitativos y cualitativos, conviene hacer la siguiente clasificación de las aguas residuales:

- a) *Aguas blancas o pluviales*. Son aguas procedentes de drenajes o de escorrentía superficial. Se caracterizan por grandes aportaciones intermitentes y escasa contaminación. Sus caudales, en una superficie urbanizada, son de 50 a 200 veces superiores a los correspondientes a las medias de los vertidos domésticos, comerciales e industriales. Las cargas contaminantes se incorporan al agua al atravesar la lluvia la atmósfera, o por el lavado de superficies y terrenos (escorrentía superficial).
- b) *Aguas negras o urbanas*. Son las aguas procedentes de los vertidos de la actividad humana, doméstica, comercial, industrial, agrícola, etc. Sus caudales son menores y más continuos, y su contaminación mucho mayor.
- c) *Aguas grises*. Son aguas procedentes de las bañeras, duchas y lavabos, con escasa contaminación y que con tratamientos simples pueden reciclarse y reutilizarse fácilmente.

Todo lo que sigue se refiere a las que, en adelante, denominaremos *aguas residuales urbanas*, esto es, las aguas naturales contaminadas por las distintas sustancias (orgánicas e inorgánicas) y microorganismos aportados por los vertidos de las aglomeraciones urbanas, junto con las aguas procedentes del drenaje pluvial, en el caso de sistemas de saneamiento unitarios.

La constitución de las aguas residuales urbanas es muy variable, dependiendo de muchos factores como el propio consumo de agua, aguas industriales que vierten a la red urbana, régimen alimenticio y costumbres de la población, etc. Se componen fundamentalmente de *aguas residuales domésticas*, que tienen una contaminación predominantemente orgánica (fundamentalmente proteínas, polisacáridos y lípidos), pudiendo formularse como: $C_{10}H_{19}O_3N$ (Orhon, D. y Artan, N, 1994). Ello hace que las aguas residuales urbanas sean *biodegradables*, es decir, que pueden ser depuradas mediante tratamientos biológicos, y contienen, además, un cierto porcentaje de aguas residuales industriales, cuando estas últimas no alteran sensiblemente las características de las aguas residuales domésticas, lo que ocurre en un gran porcentaje de los núcleos urbanos. Cuando no es así, es decir, cuando las aguas residuales industriales alteran de forma sensible la composición de la mezcla, se denominan aguas residuales mixtas, que son asimilables a las aguas residuales industriales.

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS

Se entiende como características de un agua residual urbana el conjunto de parámetros que pueden ser necesarios bien para el diseño, bien para el control de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). En la Tabla 1.1 se indican los parámetros utilizados y su origen más probable, con referencia a su caracterización (física, química y biológica).

Muchos de estos parámetros están relacionados entre sí, por lo que la interpretación de los análisis debe hacerse considerando todos los parámetros simultáneamente.

En la Tabla 1.2 se recoge la composición típica de un agua residual urbana, con tres grados posibles de contaminación (fuerte, media y débil). Generalmente, concentraciones elevadas de los parámetros corresponden a consumos de agua bajos y viceversa.

Los parámetros específicos que se utilizan para comprobar la eficacia de los procesos que conforman una EDAR son:

- Temperatura
- pH
- Sólidos en Suspensión (fijos y volátiles)
- Materia Orgánica, valorada como:
 - DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días)
 - DQO (Demanda Química de Oxígeno)
 - COT (Carbono Orgánico Total)
- Nitrógeno Amoniacal

CARACTERIZACIÓN DE UN AGUA RESIDUAL URBANA	
PARÁMETRO	ORIGEN
<i>Características Físicas</i>	
<i>Sólidos</i>	Abastecimientos, residuos domésticos e industriales
<i>Temperatura</i>	Residuos industriales y domésticos
<i>Color</i>	Residuos industriales y domésticos
<i>Sabor</i>	Agua residual en descomposición, residuos industriales
<i>Características Químicas</i>	
<i>Orgánicas</i>	
<i>Proteínas</i>	Residuos industriales, comerciales y domésticos
<i>Carbohidratos</i>	Residuos comerciales y domésticos
<i>Grasas y aceites</i>	Residuos industriales, comerciales y domésticos
<i>Tensoactivos</i>	Residuos comerciales y domésticos
<i>Fenoles</i>	Residuos industriales
<i>Pesticidas</i>	Residuos agrícolas
<i>Inorgánicas</i>	
<i>pH</i>	Residuos industriales
<i>Cloruros</i>	Suministro de agua doméstica, residuos domésticos e infiltraciones de aguas subterráneas
<i>Alcalinidad</i>	Suministro de agua doméstica, residuos domésticos e infiltraciones de aguas subterráneas
<i>Nitrógeno</i>	Residuos agrícolas y domésticos
<i>Fósforo</i>	Residuos industriales y domésticos
<i>Azufre</i>	Suministro de a. doméstica y residuos industriales
<i>Tóxicos</i>	Residuos industriales e infiltraciones de aguas subterráneas
<i>Metales pesados</i>	Residuos industriales
<i>Gases</i>	
<i>Oxígeno</i>	Suministro de a. doméstica e infiltraciones de aguas superf.
<i>Sulfuro de hidrógeno (H₂S)</i>	Descomposición anaerobia del agua residual
<i>Metano (CH₄)</i>	Descomposición anaerobia del agua residual
<i>Características Biológicas</i>	
<i>Protistas</i>	Residuos domésticos
<i>Virus</i>	Residuos domésticos
<i>Plantas</i>	Aguas superficiales y plantas de tratamiento
<i>Animales</i>	Aguas superficiales y plantas de tratamiento

Tabla 1.1. Parámetros característicos de un agua residual urbana y su posible origen (Metcalf & Eddy, 2000).

- Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)
- Nitratos

Temperatura

La temperatura condiciona los procesos de depuración biológica (degradación de la materia orgánica y de nitrificación), por lo que es importante su control. A medida que desciende la temperatura se ralentizan dichos procesos.

COMPOSICIÓN TÍPICA DE UN AGUA RESIDUAL URBANA				
PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN (mg/l)			
	Fuerte	Media	Débil	
Sólidos Totales (ST)		1.200	700	350
	Fijos	600	350	175
	Volátiles	600	350	175
Sólidos en Suspensión (SS) (SS sedimentables+SS coloidales)		350	200	100
	Fijos (SSF)	75	50	30
	Volátiles (SSV)	275	150	70
SS sedimentables (SSs)		20	10	5
SS coloidales (SSc)		330	190	95
Sólidos Disueltos (SD)		850	500	250
	Fijos	525	300	145
	Volátiles	325	200	105
Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅) (*)		400	220	110
Demanda Química de Oxígeno (DQO)		1000	500	250
Carbono Orgánico Total (COT)		290	160	80
Nitrógeno total (Nt)		85	40	20
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)		85	40	20
	Nitrógeno Orgánico (N-NO)	35	15	8
	Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	50	25	12
Nitritos (NO ₂ ⁻)		0	0	0
Nitratos (NO ₃ ⁻)		0	0	0
Fósforo total (Pt)		15	8	4
Fósforo Orgánico (PO)		5	3	1
Fósforo Inorgánico (PI)		10	5	3
Cloruros		100	50	30
Alcalinidad (como CaCO₃)		200	100	50
Grasas		150	100	50

(*) La DBO₅ de un agua residual doméstica se compone, general y aproximadamente, en un 66% de materias en suspensión o coloidales y en un 34% de disueltas.

Tabla 1.2. Composición típica de un agua residual urbana según el nivel de concentración de los parámetros contaminantes (Metcalf & Eddy, 2000).

pH

Si las aguas residuales urbanas no contienen vertidos industriales, su pH oscila entre 6,5 y 8,5, valores que no plantean problemas a los procesos de depuración. Fuera de este rango se producen problemas en los procesos biológicos; por ello, en áreas en las que se acometan al saneamiento vertidos industriales, debe disponerse un *pHmetro* de control en la entrada a la planta, por si fuera necesario llevar a cabo una corrección del pH.

Sólidos en Suspensión (SS)

El valor de este parámetro define la cantidad de fangos que será preciso eliminar en la EDAR. La proporción en los fangos entre sólidos fijos y volátiles

(o, respectivamente, inorgánicos y orgánicos) determina las posibilidades de funcionamiento del proceso de estabilización para su tratamiento.

Materia Orgánica (MO)

Se entiende como materia orgánica, la de los compuestos orgánicos del carbono. El contenido en materia orgánica en las aguas residuales expresa su capacidad de absorción del oxígeno disuelto que contienen las aguas de los cauces naturales, según la reacción:



Para valorar la materia orgánica se utilizan diversos parámetros, principalmente la DBO y la DQO:

- *Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).*– Es la cantidad de oxígeno expresada en mg/l (ppm) y consumida en condiciones de ensayo (20 °C, presión atmosférica y oscuridad) en un tiempo dado, como consecuencia de la oxidación por vía biológica de las materias biodegradables presentes en el agua residual.

La DBO refleja, por tanto, la materia orgánica biodegradable que existe en el agua residual, indicando el oxígeno necesario para alimentar a los microorganismos aerobios y las reacciones químicas del metabolismo microbiano.

Puesto que la obtención de los resultados de la DBO puede tardar más de 20 días (en función de la temperatura), para el control de la autodepuración natural o de los procesos de depuración se adopta la *Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO₅)*, que da resultados suficientemente aproximados (Figura 1.1).

La expresión más utilizada para la DBO es:

$$\text{DBO}_t = \text{DBO}_u (1 - e^{-k \cdot t})$$

en donde DBO_t es la DBO al cabo de un tiempo t , DBO_u es la DBO última, esto es, el máximo consumo de oxígeno posible cuando el sustrato ha sido degradado por completo, y k la tasa de desoxigenación.

Las constantes DBO_u y k se calculan por ajuste de la evolución de los datos de la DBO por mínimos cuadrados. Concretamente, la relación entre la DBO_u y la DBO_5 , es:

$$\text{DBO}_5 = \text{DBO}_u (1 - e^{-5 \cdot k})$$



Figura 1.1. Evolución de la DBO_5 en función del tiempo ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$)
(adaptado de Bitton, G., 2005).

En un agua residual urbana típica, la relación entre la DBO_u y la DBO_5 , es:

$$DBO_u = 1,5 \cdot DBO_5$$

Para el cálculo de k a temperaturas distintas a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ puede utilizarse la ecuación de Van't Hoff-Arrhenius:

$$k_t = k \cdot \theta^{(T-20)}$$

siendo k_t la tasa de desoxigenación a la temperatura T ($^{\circ}\text{C}$) y θ un factor que vale 1,135 en el rango $4 < T < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 1,056 en el rango $20 < T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La DBO es una medida de la degradación biológica de la materia fundamentalmente carbonosa, pero puede ser engañosa si no se corrige con la demanda de oxígeno por parte de la materia nitrogenada (nitrificación). Si el ensayo no se corrige para la nitrificación, el residuo parecerá ejercer una demanda de carbono mayor que la que tiene en realidad. La corrección para la nitrificación se basa en añadir

una pequeña cantidad de cloruro de amonio (NH_4Cl) al agua de la dilución, para inhibir los nitrificantes de forma que no consuman oxígeno. En caso contrario, después de unos 5-8 días (dependiendo de la temperatura), la mayor parte del carbono se ha agotado y comienza la nitrificación, y la DBO aparente es mayor que la demanda realmente relacionada con el carbono.

- *Demanda Química de Oxígeno (DQO).*– Es la cantidad de oxígeno consumida por los cuerpos reductores presentes en el agua residual, sin intervención de los organismos vivos.

Como sustancia oxidante se utilizan reactivos como pueden ser el dicromato o el permanganato potásico.

La DQO de un agua residual es, generalmente, mayor que la DBO_5 ya que es mayor el número de compuestos que pueden oxidarse por vía química que por vía biológica. Para un agua residual urbana típica:

$$\text{DQO} = 2,1 \cdot \text{DBO}_5$$

La caracterización de cada uno de los fraccionamientos de la DQO es muy importante para valorar la calidad del agua residual afluente a la EDAR. En la Figura 1.2 se recogen los porcentajes aproximados de cada una de las fracciones en que se divide la DQO.

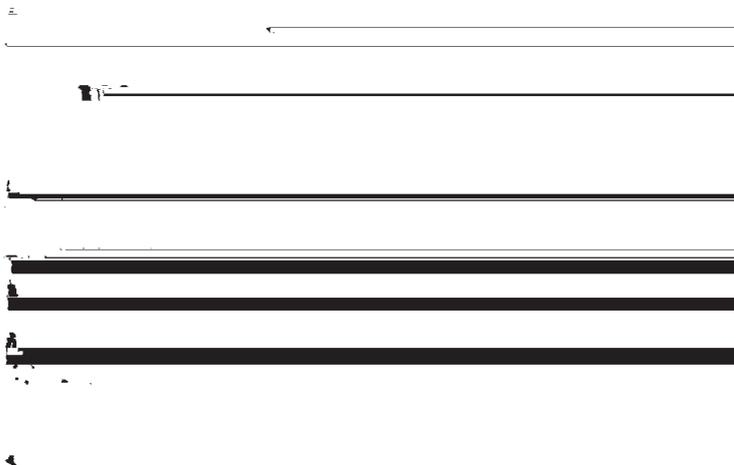


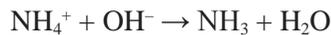
Figura 1.2. Fraccionamiento de la DQO afluente al reactor biológico (Metcalf & Eddy, 2004; Serrano, 2010).

Inicialmente, la DQO (total) se divide en biodegradable (DQOb) y biodegradable o inerte (DQOi). La biodegradable se divide a su vez en dos fracciones: rápidamente biodegradable (DQOrb) y lentamente biodegradable (DQOl). La parte lentamente biodegradable debe sufrir un proceso de hidrólisis enzimática antes de ser absorbida, mientras que la fracción rápidamente biodegradable, compuesta por la materia orgánica disuelta, es absorbida y metabolizada rápidamente por los microorganismos.

Teniendo en cuenta que la DBO₅ es un parámetro poco operativo para la gestión diaria de la EDAR, es conveniente conocer el ratio DQO/DBO₅ y trabajar el día a día con los valores de la DQO. Por otro lado, la relación entre la DBO₅ y la DQO indicará la importancia de los vertidos industriales en el agua residual.

Nitrógeno Amoniacal (NH₄⁺ o NH₃)

Expresa el contenido de nitrógeno en forma de ión amonio. En función de la temperatura y del pH, se tiene la siguiente reacción química entre el ión amonio (NH₄⁺) y el amoníaco (NH₃) o amonio gas:



O, de otra forma:

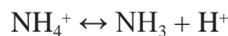


Figura 1.3. Distribución del ión amonio (NH₄⁺) y del amoníaco (NH₃) en función del pH (MWH, 2005).

En la Figura 1.3 se muestra la distribución del ión amonio y del amoníaco en función del pH. Con niveles del pH por encima de 9,25 predomina la forma amoniacal, que es volátil, y por debajo de dicho valor es el ión amonio el predominante (en la Figura 1.3 K_a es la constante de ionización ácida = $10^{-9,25}$).

Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)

Define el nitrógeno amoniacal potencial de un agua. Incluye el nitrógeno en forma de ión amonio y el nitrógeno orgánico, que a través de los procesos de biodegradación de las plantas depuradoras pueden transformarse también en ión amonio, según la ecuación:



Fósforo

Este elemento, que se encuentra en las aguas residuales en forma de *ortofosfatos* (PO_4^{-3}) o *polifosfatos* (P_2O_7), actúa como nutriente, siendo un factor importante de la *eutrofización*.

De todos los parámetros vistos, los básicos para el diseño de una EDAR urbana son la DBO_5 y los SS. En la Tabla 1.3 se relacionan los aportes de estos contaminantes con el tipo de red de saneamiento y de población. Como se puede observar, los valores normales de estos parámetros oscilan:

- DBO_5 : 50-75 g/hab·día
- SS: 50-90 g/hab·día

APORTES UNITARIOS DE DBO_5 Y DE SS			
Tipo de red de saneamiento		Cargas unitarias (g/hab·día)	
		DBO_5	SS
Separativa	Zona residencial	50	50
	Núcleo de población	60	75
Unitaria	Núcleo de población	75	90

Tabla 1.3. Aportes de DBO_5 y de SS según el tipo de saneamiento y de población (Tejero et al., 2001).

Asimismo, en ocasiones, es obligado conocer también los valores de otros parámetros, tales como la DQO (la mayoría de los modelos matemáticos de los programas de simulación utilizan este parámetro en lugar de la DBO_5 , o ambos en combinación, y es imprescindible en la depuración industrial), el N

y el P (ambos a efectos, por ejemplo, de tratamientos terciarios o avanzados, depuración de aguas residuales industriales, etc.). En la Tabla 1.4 se recogen los valores unitarios de estos parámetros en un agua residual tipo.

APORTES UNITARIOS DE UN AGUA RESIDUAL URBANA TIPO		
Parámetro	Carga (g/hab·día)	% Soluble
DBO ₅	70	40
DQO	140	40
NTK	10	65
P _i	2,5	65
SS ⁽¹⁾	80	–

(1) Fracción volátil de los SS: 80%

Tabla 1.4. Aportes unitarios de un agua residual urbana tipo (Ferrer, J. y Seco, A., 2007).

Además de los anteriores, existen otros parámetros que deben situarse dentro de ciertos límites para conseguir que el proceso de depuración biológica se desarrolle adecuadamente. Así, son necesarias ciertas concentraciones de metales como calcio, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso y zinc. La presencia de H₂S es un índice de insuficiencia de oxígeno disuelto, lo que provoca una mala sedimentabilidad de los fangos biológicos, con la aparición de organismos filamentosos y problemas de corrosión y precipitación de metales. Los sulfatos deben limitarse si la digestión de fangos es anaerobia.

Como anteriormente hemos señalado, una de las características principales de las aguas residuales urbanas es su biodegradabilidad, lo que implica:

- 1) Que un porcentaje importante de la materia orgánica contenida en el agua es biodegradable.
- 2) Que las cantidades de N y P (nutrientes) contenidas en el agua permiten un crecimiento equilibrado de los microorganismos.
- 3) Que están ausentes los productos tóxicos en concentraciones suficientes para provocar la muerte e inhibición de los microorganismos.

Los dos primeros puntos se resumen en las siguientes condiciones, que se cumplen con bastante aproximación en las aguas residuales domésticas:

$$\frac{\text{DBO}_5}{\text{DQO}} \approx 0,5 - 0,65 \qquad \frac{\text{DBO}_5}{\text{N}} \approx 20 \qquad \frac{\text{DBO}_5}{\text{P}} \approx 100$$

1.3. CARGAS CONTAMINANTES Y SU VARIACIÓN

Las *cargas contaminantes* originadas por los constituyentes del agua residual se expresan, normalmente, en kilogramos por día (kg/d) y pueden calcularse mediante las siguientes ecuaciones, en función de la concentración [C] del parámetro de que se trate (DBO₅ ó SS), según se exprese el caudal (Q) en metros cúbicos por segundo (m³/s), en litros por segundo (l/s) o en metros cúbicos por día (m³/d), respectivamente:

$$CC \text{ (kg/d)} = \frac{[C](\text{g/m}^3) \cdot Q(\text{m}^3/\text{s}) \cdot 86.400 \text{ (s/d)}}{10^3 \text{ (g/kg)}} \quad (1.1)$$

$$CC \text{ (kg/d)} = \frac{[C](\text{mg/l}) \cdot Q(\text{l/s}) \cdot 86.400 \text{ (s/d)}}{10^6 \text{ (mg/kg)}} \quad (1.2)$$

$$CC \text{ (kg/d)} = \frac{[C](\text{mg/l}) \cdot Q(\text{m}^3/\text{d})}{10^3} \quad (1.3)$$

La concentración expresada en miligramos por litro (mg/l) es equivalente a gramos por metro cúbico (g/m³) y a partes por millón (ppm).

Por otro lado, a lo largo del día, tanto el caudal como las cargas contaminantes del agua residual experimentan una serie de variaciones. El mismo fenómeno tiene lugar durante la semana y los meses del año. Los gráficos de la Figura 1.4 muestran las variaciones diarias típicas de caudal, DBO₅ y SS en el caso de aguas residuales domésticas. De dicho gráfico se deduce que:

- 1) La variación de la DBO sigue la misma punta que la de caudal.
- 2) La concentración punta de DBO (materia orgánica) ocurre, normalmente, a última hora de la tarde.

Además:

- El agua residual procedente de redes de alcantarillado unitarias contiene habitualmente más materia inorgánica que las de redes separativas, a causa de las mayores cantidades de desagües pluviales que penetran en las primeras.
- Los caudales medio y punta son mayores en alcantarillados unitarios que en sistemas separativos.

Tanto para una correcta planificación y proyecto de la EDAR, como para su adecuado funcionamiento y explotación cuando entre en servicio, es preciso

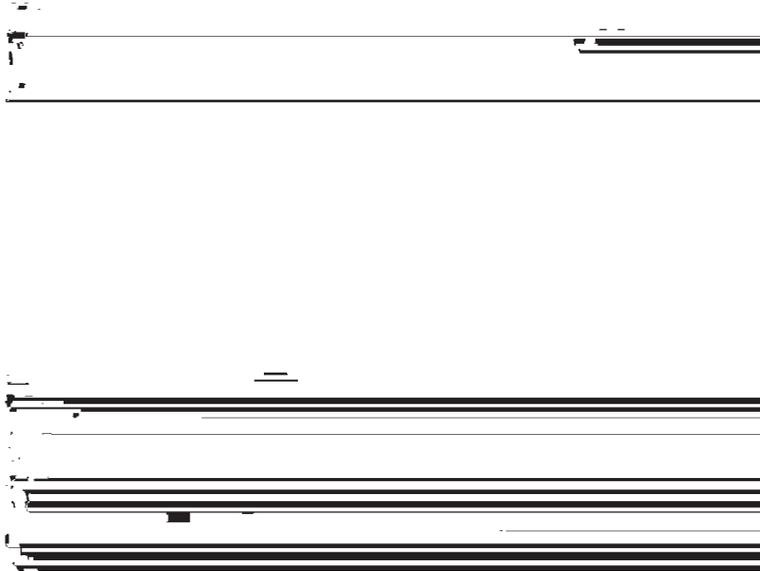


Figura 1.4. Variación típica horaria del caudal y concentración del agua residual doméstica (Metcalf & Eddy, 2000).

disponer de los datos no sólo de variación horaria, sino también mensual, semanal y diaria, con los que se elaboran los gráficos correspondientes.

La Figura 1.5 ilustra un ejemplo de estos gráficos, para un caso de estudio del caudal influente a una depuradora.

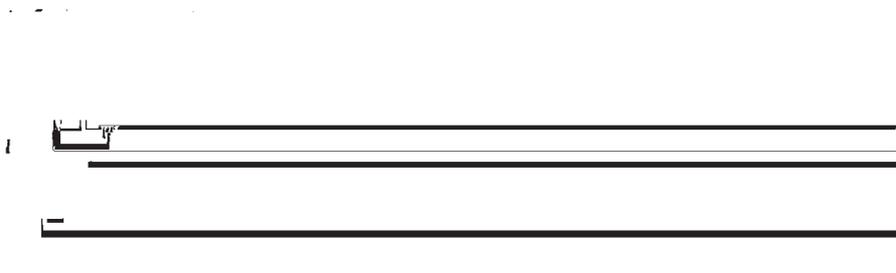


Figura 1.5. Ejemplo de gráficos de curvas de variación de caudales; de izquierda a derecha: mensual, semanal, diaria y horaria (Metcalf & Eddy, 2000).

1.4. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA

Como ya se indicó al principio de este capítulo, las aguas de escorrentía superficial se caracterizan por su intermitencia y escasa contaminación.

La composición típica de estas aguas residuales, referida a los parámetros más significativos, y sus respectivos valores se indican en la Tabla 1.5.

VALORES PARAMÉTRICOS DEL AGUA DE ESCORRENTÍA URBANA		
PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN (mg/l)	
	Rango	Valor medio
DBO ₅	9-38	20
DQO	60-200	105
SS	100-450	195
N total	1,2-6,0	2,7
P total	0,1-1,7	0,5
Coliformes Fecales, CF (Nº/100 ml)	10 ⁴ -10 ⁶	10 ⁵

Tabla 1.5. Parámetros de contaminación de la escorrentía urbana (Temprado et al., 1996).

En zonas industriales, estos parámetros toman los valores de la Tabla 1.6.

VALORES PARAMÉTRICOS DEL AGUA DE ESCORRENTÍA EN ZONAS INDUSTRIALES	
PARÁMETRO	Rango (mg/l)
DBO ₅	8-12
SS	45-375
N total	0,2-1,1
P total	0,02-1,1
Coliformes Totales, CT (Nº/100 ml)	10

Tabla 1.6. Parámetros de contaminación de la escorrentía en zonas industriales (Ellis, 1986; tomada de Novotny, 1991).

En cuanto a la contaminación aportada, en la Tabla 1.7 se recogen los valores de las cargas de contaminación anual movilizadas por la escorrentía urbana.

En la Tabla 1.7 se puede observar, entre otras cosas, la relación existente entre las cargas anuales con el uso de la cuenca. Concretamente, en el residencial, a medida que aumenta el grado de impermeabilización, la contaminación presente en la escorrentía es mayor (lógicamente, en correlación con los hidrogramas de respuesta de las cuencas).

CARGAS CONTAMINANTES DE LA ESCORRENTÍA URBANA									
PARÁM.	VALORES SEGÚN EL USO DEL SUELO (kg/ha·año)								
	Comercial	Centro comerc.	Aparca- mientos	Residencial (densidad)			Auto- pistas	Indus- trial	Parques
				Alta	Media*	Baja			
ST	2.100	720	1.300	670	450	65	1.700	670	N/D
SS	1.000	440	400	420	250	10	800	500	3
P total	1,5	0,5	0,7	1	0,3	0	0,9	1,3	0,03
NTK	6,7	3,1	5,1	4,2	2,5	0,3	7,9	3,4	N/D
NH ₃	1,9	0,5	2	0,8	0,5	0	1,5	0,2	1,5
NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	3,1	0,5	2,9	2	1,4	0,1	4,2	1,3	N/D
DBO ₅	62	N/D	47	27	13	1	N/D	N/D	N/D
DQO	420	N/D	270	170	50	7	N/D	200	N/D
Pb	2,7	1,1	0,8	0,8	0,1	0	4,5	0,2	2
Zn	2,1	0,6	0,08	0,7	0,1	0	2,1	0,4	0
Zr	0,15	0,04	N/D	N/D	0	0	0,06	0,6	N/D
Cd	0,03	0,01	0,01	0	0	0	0,02	0	N/D
As	0,02	0,02	N/D	N/D	0	0	0,02	0	N/D

(*) Cuencas con drenaje realizado con cunetas vegetales (*swales*).

Tabla 1.7. Cargas de contaminación de la escorrentía urbana (Burton y Pitt, 2002).