



INGENIERÍA AMBIENTAL

Fundamentos • Sustentabilidad • Diseño

JAMES R. MIHELICIC - JULIE BETH ZIMMERMAN

Apoyo en la



Alfaomega

Recuadro / 5.3 Continuación

especies de acuicultura requieren 2 libras de alimento para peces. Además, el ganado es uno de los más grandes productores de metano, un potente gas de efecto invernadero.

- En Estados Unidos, 104 millones de cabezas de ganado constituyen el consumidor más grande de granos.
- Cultivar un acre de maíz para alimentar ganado toma 535 000 galones de agua. Actualmente en Estados Unidos, entre 70 y 80 por ciento del maíz y de la soya que se cultivan se destinan a la producción de carne.
- La agricultura consume la mayor cantidad de agua dulce (si se excluye la producción de electricidad). El 70% de agua dulce que se consume (no se puede recuperar) en el mundo está destinada a la agricul-

tura. En el Oeste de Estados Unidos es de 85% más o menos.

- Los cultivos que se destinan a la alimentación se cultivan en 11% del total del área de tierra fértil del planeta.
- Otro 24% de la tierra se usa para pastoreo, a fin de alimentar al ganado por sus productos lácteos y de carne.
- La mayor parte de la tierra de cultivo se ve amenazada por al menos un tipo de degradación (que incluye erosión, salinización y encharcamientos de suelos de irrigación), y 10 millones de hectáreas de tierra productiva se encuentran gravemente dañadas y abandonadas año con año. Los reemplazos de esa tierra para la agricultura son los responsables de 60% de la deforestación que ocurre actualmente en el mundo.

5.4 Demanda de oxígeno: bioquímica, química y teórica

El tema de la **demanda de oxígeno** implica una cantidad significativa de terminología y notación nuevas las cuales se compendian en la tabla 5.7.

Tabla / 5.7

Demanda de oxígeno: definición y notación Todos los términos están en unidades de mg O₂/L.

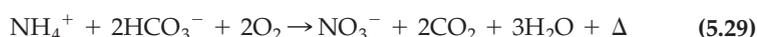
BOD	<i>Demanda bioquímica de oxígeno</i> — La cantidad de oxígeno que utilizan los microorganismos para oxidar materia orgánica de tipo carbónica y nitrogenada.
CBOD	<i>Demanda bioquímica de oxígeno carbónica</i> — BOD en el que la materia orgánica carbónica dona el electrón.
NBOD	<i>Demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada</i> — BOD en donde la materia orgánica nitrogenada es la que dona el electrón.
ThOD	<i>Demanda teórica de oxígeno</i> — Cantidad de oxígeno que utilizan los microorganismos para oxidar materia orgánica carbónica y/o nitrogenada, suponiendo que toda la materia orgánica es susceptible de una descomposición microbiana, por ejemplo, que es biodegradable.
BOD ₅	<i>Demanda bioquímica de oxígeno del día 5</i> — Cantidad de oxígeno consumida (BOD empleada) en un periodo de incubación de cinco días; el promedio estimado del laboratorio de la BOD. El día 5 de la BOD utiliza la notación y_5 para referirse a la BOD ejercida (y) por encima de 5 días de incubación.
BOD _U	<i>Demanda bioquímica de oxígeno final</i> — Cantidad de oxígeno consumida (BOD empleada) cuando se ha oxidado toda la materia orgánica biodegradable. La BOD final utiliza la notación L_0 para referirse a su potencial de consumo de oxígeno para efectuar la oxidación completa.
COD	<i>Demanda química de oxígeno</i> — Cantidad de oxidante químico, expresado en equivalente de oxígeno, que se requiere para oxidar por completo una fuente de materia orgánica, COD y ThOD deberían ser casi iguales.

5.4.1 DEFINICIÓN DE BOD, CBOD Y NBOD

Los organismos obtienen la energía que necesitan para mantener sus funciones metabólicas, crecimiento y reproducción de los procesos de fermentación y respiración. Tanto la materia orgánica como la inorgánica pueden servir como fuentes de dicha energía. Los organismos *quimioheterótrofos* son los que utilizan la materia orgánica —C(H₂O)— como fuente de carbono y de energía y, bajo condiciones aerobias, para obtener tal energía consumen oxígeno:



Los *quimioautótrofos* son los organismos que utilizan CO₂ como fuente de carbono y de energía, y por lo general consumen oxígeno al obtener esa energía. Un ejemplo de quimioautotrofismo es la nitrificación, la conversión microbiana del amoníaco en nitrato (en la que el ion del bicarbonato contribuye con el CO₂):



En estas reacciones redox con participación microbiana, los que donan los electrones son C(H₂O) y NH₄⁺ y el que acepta el electrón es el O₂.

Se consume oxígeno en ambas reacciones. Por lo tanto, se puede definir la **demanda bioquímica de oxígeno (BOD)** como la cantidad de oxígeno que usan los microorganismos para realizar la oxidación. La BOD mide la “fuerza” del agua o del agua residual: mientras mayor sea la concentración de amoníaco-nitrógeno o de carbono orgánico degradable, mayor la BOD.

Las reacciones que se describen en las ecuaciones 5.28 y 5.29 se distinguen con base en el compuesto que ha sido la fuente del electrón donado: *carbonífera* y *nitrogenada*. La fuerza química (mg C(H₂O)/L o mg NH₃-N/L) se expresa aquí en términos de su impacto en el medio ambiente (oxígeno consumido, en mg BOD/L). Esto es representación por efecto, como se expuso en el capítulo 2.

El oxígeno disuelto es un requisito clave para la integración de los organismos que se encuentran asociados en un ecosistema diverso y en equilibrio. A menudo, los desechos domésticos e industriales contienen altos niveles de BOD, que si se descargaran sin haber sido tratados, agotarían las reservas de oxígeno y reducirían la diversidad de la vida acuática de forma grave. Para prevenir la degradación de las aguas que recibirán tales descargas, se han construido sistemas en los que se controlan cuidadosamente la BOD y el oxígeno, la disponibilidad de las poblaciones microbianas que median el proceso y la tasa a la que se efectúan las oxidaciones (ecuaciones 5.28 y 5.29). La eficiencia con la que se retira BOD es uno de los requisitos más importantes para los permisos de descarga de las plantas de tratamiento de aguas.

5.4.2 FUENTES DE BOD

Plantas y animales utilizan los carbohidratos simples que se producen mediante fotosíntesis para sintetizar químicos más complejos cuya base es el carbono como azúcares y grasas. Los organismos utilizan estos compuestos como fuente de energía y liberan **demanda de oxígeno carbónica (CBOD)**, ecuación 5.28. Además, las plantas usan el amoníaco para producir proteínas, es decir, químicos complejos de cuya base es el carbono y cuya estructura incluye grupos de aminoácido (—NH₂). Al final, las protei-



Discusión en clase

Con base en la información del recuadro 5.3, ¿qué tipo de régimen alimenticio minimizaría el impacto medioambiental provocado por el consumo de comida? ¿Qué tipo de dieta causa un mayor uso de agua y de energía basada en combustibles fósiles? Alimentar el ganado con pastos naturales o con maíz, ¿consume menos agua o causa una menor erosión del suelo? ¿Es más saludable este tipo de comida? ¿Por qué? Bajo una perspectiva de ciclo de vida, ¿cuáles son los beneficios, en cuanto a sustentabilidad, de comprar comida de fuentes locales?



Análisis de la demanda bioquímica de oxígeno

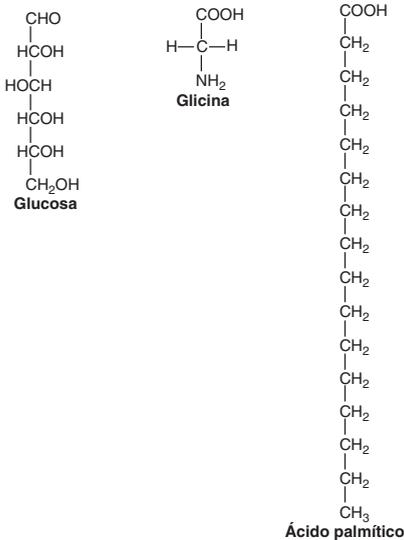


Figura 5.22 Estructura química de compuestos representativos carboníferos y nitrogenados Las aguas residuales municipales contienen un gran número de diferentes químicos orgánicos, entre los que se incluyen azúcares (20-25%), aminoácidos (40-60%) y ácidos grasos (10%).

Adaptado de Metcalf y Eddy (1989); ilustración de Mihelcic (1999). Reproducido con autorización de John Wiley & Sons, Inc.

Tabla / 5.8

Demanda bioquímica de oxígeno (BOD) de una selección de arroyos

Origen	BOD del día 5 (mg O ₂ /L)
Río	2
Agua residual doméstica	200
Manufacturera de papel y pulpa	400
Lavanderías comerciales	2 000
Fábrica de azúcar de remolacha	10 000
Peletería	15 000
Destilería	25 000
Embotelladora de latas de soda de cereza	55 000

FUENTE: Nemerow, 1971.

nas se degradarán (proteólisis) en péptidos y luego en aminoácidos. Este proceso de degradación de aminos continúa descomponiendo los aminoácidos y da lugar al esqueleto del carbono (CBOD) y de un grupo amino. El proceso de degradación se completa con la conversión del grupo amino en amoniaco (amonificación). Entonces, el amoniaco se encuentra disponible para emplear **demanda de oxígeno nitrogenado (NBOD)**, ecuación 5.29, en el caso de que sea utilizado por los microorganismos. La figura 5.22 ilustra la estructura química de algunos compuestos carboníferos y nitrogenados.

Las aguas residuales domésticas y muchos desechos industriales son sumamente ricos en materia orgánica comparados con el agua natural. En las aguas negras, las proteínas y los carbohidratos constituyen 90% de la materia orgánica. La fuente la constituyen las heces y la orina de los seres humanos; los desechos alimenticios de los fregaderos; tierra y suciedad de duchas, bañeras y lavadoras; además de varios tipos de jabón, detergente y otros productos de limpieza. Los desechos de ciertas industrias, como las destilerías, las embotelladoras de latas y los productores de pulpa y papel también tienen altos niveles de materia orgánica.

La tabla 5.8 presenta valores de BOD para algunos desechos representativos. Incluso las aguas no contaminadas contienen alguna BOD vinculada con la materia orgánica carbónica y nitrogenada derivada de los litorales y de las aguas en sí mismas (por ejemplo, de algas en descomposición y macrófagos, basura proveniente de las hojas de los árboles y materia fecal de organismos acuáticos). Los niveles de oxígeno disuelto en las aguas superficiales —excluyendo aquellos con exceso de fotosíntesis de las algas y su inherente producción de O₂— a menudo están por debajo del nivel de saturación debido a su BOD “natural”.

5.4.3 DEMANDA TEÓRICA DE OXÍGENO

La **demanda teórica de oxígeno (ThOD)**, dada en mg O₂/L, se calcula a partir de la estequiometría de las reacciones de oxidación que están implicadas. Un enfoque general para calcular la *ThOD carbonífera* (ecuación 5.28) es la que se muestra en el proceso de tres pasos de la tabla 5.9.

Su cálculo es similar al de oxidación del amoniaco (NH₄⁺ en la ecuación 5.29) en nitrato: se consumen 2 moles (o 64 g) de oxígeno por cada mol (o 14 g) de amoniaco-nitrógeno oxidado. Advierta que el amoniaco se reporta como mg N/L en 14 g/mol, no como el amoniaco (17 g/mol) ni el amonio (18 g/mol). El coeficiente estequiométrico de oxidación de los desechos nitrogenados es por lo tanto 64/14 o 4.57. Un desecho que contenga 50 mg/L de NH₃⁻N tendría un *ThOD nitrogenado* de 229 mg/L.

Para determinar la *ThOD total* de un caudal de desechos que contenga múltiples químicos (por ejemplo, amoniaco y materia orgánica), sume las contribuciones de los compuestos que lo componen (vea el ejemplo 5.6).

La estequiometría para la oxidación del amoniaco es invariable (y la ecuación 5.29 se sostiene como válida en todos los casos) porque el amoniaco-nitrógeno está presente sólo en una forma y el nitrógeno presenta una sola valencia. Éste no es el caso de los compuestos cuya base es el carbono (la ecuación 5.28 no se sostiene en todos los casos), ya que existe una amplia variedad de formas que tienen carbono con varias valencias. Por esta razón, la reacción estequiométrica de cada compuesto que tiene como base el carbón debe inspeccionarse y deben balancearse las ecuaciones de oxidación de manera individual.

Tabla / 5.9

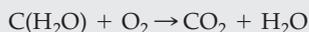
Pasos para calcular la demanda teórica de oxígeno carbonífera (ThOD)		
Paso	Descripción del paso	Ejemplo
Paso 1	Escriba la ecuación y describa la reacción para la oxidación de la química de base de carbono en bióxido de carbono y agua (ejemplo, para el benceno, C_6H_6).	$C_6H_6 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
Paso 2	Balancee la ecuación siguiendo la secuencia: (a) balancee el número de átomos de carbono, (b) balancee el número de átomos de hidrógeno y, (c) balancee el número de átomos de oxígeno.	Para el benceno, <i>a</i>) coloque un 6 junto al CO_2 para balancear el carbono; <i>b</i>) coloque un 3 junto al H_2O para balancear el hidrógeno y, <i>c</i>) coloque un 7.5 junto al oxígeno para balancear el oxígeno: $C_6H_6 + 7.5O_2 \rightarrow 6CO_2 + 3H_2O$
Paso 3	Use la estequiometría de la reacción química balanceada, aplique las unidades de conversión para determinar la DOT carbonífera.	Suponga que la concentración inicial del benceno = 156 mg/L: $\frac{156 \text{ mg de benceno}}{L} \times \frac{1 \text{ mol de benceno}}{78 \text{ g de benceno}} \times \frac{7.5 \text{ mol de } O_2}{\text{mol de benceno}} \times \frac{32 \text{ g } O_2}{\text{mol de } O_2} = \frac{480 \text{ mg de } O_2}{L}$

ejemplo/5.6 Determinación de ThOD carbonífera, nitrogenada y total

Un desecho contiene 300 mg/L de $C(H_2O)$ y 50 mg/L de $NH_3\text{-N}$. Calcule la ThOD carbonífera, la ThOD nitrogenada y la ThOD total.

solución

Si necesita revisar el proceso de escritura del balanceo de una ecuación que describa la oxidación de $C(H_2O)$ a CO_2 en agua, puede consultar la tabla 5.9.

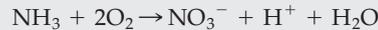


La reacción muestra que se necesita 1 mol de oxígeno para oxidar cada mol de $C(H_2O)$. La ThOD carbonífera se determina a partir de la estequiometría siguiente:

$$300 \text{ mg } C(H_2O) \times \frac{g}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ mol } C(H_2O)}{30 \text{ g } C(H_2O)} \times \frac{1 \text{ mol } O_2}{\text{mol } C(H_2O)} \\ \times \frac{32 \text{ g } O_2}{\text{mol } O_2} \times \frac{1000 \text{ mg}}{g} = 320 \text{ mg/L}$$

ejemplo/5.6 Continuación

Enseguida, escriba la ecuación balanceada que describe la oxidación de amoníaco-nitrógeno a nitrato:



Esta reacción muestra que se requieren 2 mol de oxígeno para oxidar cada mol de NH_3 . Tome en cuenta que la concentración de amoníaco se reporta como mg N/L, no mg NH_3 /L. La ThOD nitrogenada se determina con la estequiometría siguiente:

$$50 \text{ mg NH}_3 - \text{N/L} \times \frac{\text{g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ mol NH}_3 - \text{N}}{14 \text{ g NH}_3 - \text{N}} \\ \times \frac{2 \text{ mol O}_2}{\text{mol NH}_3 - \text{N}} \times \frac{32 \text{ g O}_2}{\text{mol O}_2} \times \frac{1000 \text{ mg}}{\text{g}} = 229 \text{ mg/L}$$

El total de ThOD del desecho es igual a $320 + 229 = 549 \text{ mg/L}$.

5.4.4 CINÉTICA BOD

El cálculo de ThOD define cuánto oxígeno se requiere para completar la oxidación de amoníaco-nitrógeno en nitrato-nitrógeno o de un compuesto de base carbono en bióxido de carbono y agua. Sin embargo, la ThOD no brinda ninguna información relacionada con la probabilidad de que la reacción se efectúe por completo. En el caso de la BOD nitrogenada, esto no es un problema, porque el amoníaco-nitrógeno se oxida rápidamente y la demanda teórica de oxígeno y la nitrogenada son, de hecho, idénticas.

En contraste, los microorganismos no oxidan fácil ni completamente los compuestos carboníferos (**biodegradación**), y la tasa de oxidación puede variar mucho entre las diferentes fuentes de materia orgánica. Por ejemplo, los compuestos que contienen carbono presentes en un vaso de poliestireno no son tan biodegradables como los que se encuentran en las hojas de los árboles, y ambos son menos biodegradables que los compuestos de carbono que constituyen el azúcar. Por lo tanto, aunque la masa de carbono esté presente en el azúcar o en las hojas de los árboles o en el poliestireno, no tienen la misma ThOD, su demanda de oxígeno real puede ser sustancialmente diferente. Más aún, la mayoría de los desechos son una mezcla compleja de químicos (por decir, poliestireno + hojas de los árboles + azúcar) que están presentes en cantidades variables, y cada uno de ellos tiene un nivel de biodegradabilidad diferente. La BOD cinética aborda esta característica de los desechos que demandan oxígeno.

Considere la oxidación de materia orgánica como una función del tiempo, como se muestra en la figura 5.23. En la figura 5.23a y_t es la CBOD que se emplea (oxígeno consumido en $\text{mg O}_2/\text{L}$), en cualquier momento t . En $t = 0$, no se emplea ninguna CBOD ($y_{t=0} = 0$), y todo el potencial de consumo de oxígeno permanece ($L_{t=0} = L_0$ el más reciente CBOD). A medida que comienza el proceso de oxidación, se consume oxígeno (se emplea CBOD y y_t se incrementa), y al potencial para consumir oxígeno se reduce (la CBOD que queda, L_t , disminuye). La tasa a la cual se emplea la CBOD es rápida en



iStockphoto.

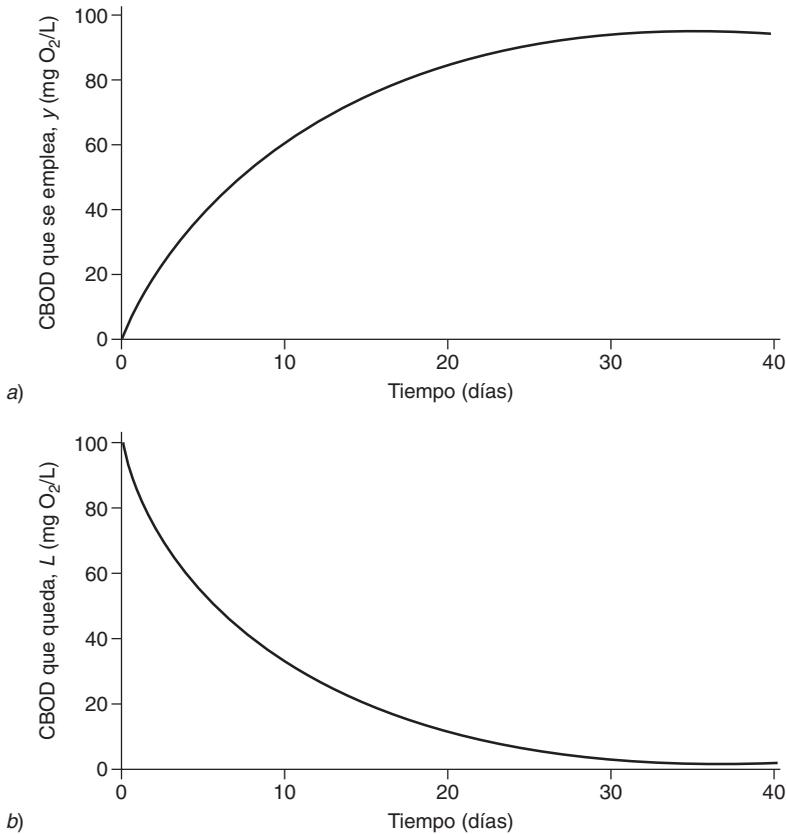


Figura 5.23 Oxidación bioquímica de materia orgánica en función de tiempo

a) CBOD que se emplea, y y b) CBOD que queda, L , en función del tiempo.

Mihelcic (1999). Reproducido con autorización de John Wiley & Sons, Inc.

un principio, pero más tarde disminuye su velocidad y finalmente se aproxima a cero a medida que toda la materia orgánica biodegradable se ha oxidado. La cantidad total de oxígeno que se consume al oxidar los desechos es la **CBOD final** (L_0).

El declive exponencial de la CBOD que queda (L , el potencial para consumir oxígeno), que se ilustra en la figura 5.23b, puede modelarse como un decaimiento de primer orden.

$$\frac{dL}{dt} = -k_L L \quad (5.30)$$

en donde k_L es el coeficiente de reacción de CBOD (día^{-1}). Se integra la ecuación 5.30 para dar lugar a la expresión analítica que se muestra en la figura 5.23b:

$$L_t = L_0 e^{-k_L t} \quad (5.31)$$

Advierta que y_t , la CBOD que se emplea en un momento dado t (vea la figura 5.23a), está dada por la diferencia entre la CBOD final y la CBOD que queda:

$$y_t = L_0 - L_t \tag{5.32}$$

Al sustituir la ecuación 5.31 por la ecuación 5.32 da lugar a:

$$y_t = L_0(1 - e^{-k_L t}) \tag{5.33}$$

Se arregla para dar lugar a la expresión para la CBOD final:

$$L_0 = \frac{y_t}{(1 - e^{-k_L t})} \tag{5.34}$$

Tanto en los sistemas naturales como en los de ingeniería se utiliza la ecuación 5.31 para pronosticar el cambio de CBOD con el tiempo. La ecuación 5.32 se puede utilizar para convertir medidas de laboratorio de CBOD ($CBOD_{5T}$, que se abordará después) a la CBOD final.

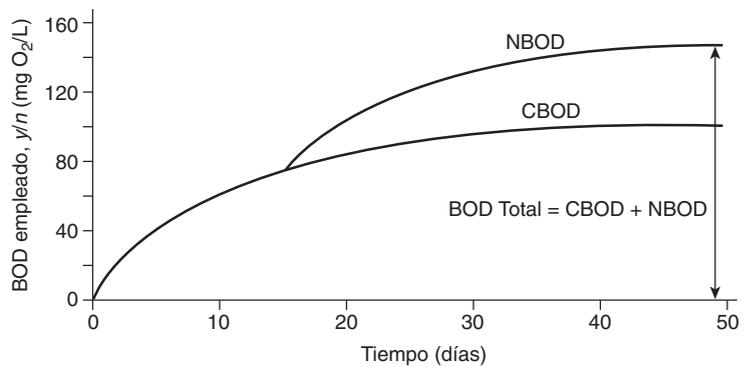
La NBOD se comporta de manera casi idéntica. El empleo de NBOD sigue la cinética de primer orden, y aplican las ecuaciones 5.30 a la 5.34, si se sustituye n , N y k_N por y , L y k_L respectivamente. Se puede calcular la NBOD final (N_0) a partir del contenido de amoníaco-nitrógeno de la muestra, con base en la estequiometría de la ecuación 5.28 (4.57 mg O_2 consumido por mg NH_3 -N oxidado). Como se muestra en la figura 5.24, el empleo de la NBOD comienza mucho después que la CBOD debido a las diferencias en la tasa de crecimiento de los organismos implicados.

5.4.5 COEFICIENTE CBOD

La velocidad de reacción o coeficiente, k_L , utilizada en los cálculos de CBOD, es una medida de biodegradabilidad de un desecho. En las figuras 5.25a y 5.25b se ilustra la relación entre k_L y la velocidad a la que se emplea la CBOD (dy/dt) y el consumo (dL/dt), respectivamente. La tabla 5.10 muestra los rangos típicos para este coeficiente. La reducción en la magnitud de k_L que se presenta al comparar aguas negras sin tratar con aguas negras tratadas y agua de río sin contaminar refleja las reducciones progresivas de la inestabilidad (biodegradación) del carbono orgánico. Al igual que con otros procesos en los que hay participación microbiana, los valores de la velocidad de reacción de CBOD y la NBOD varían con la temperatura.

Figura 5.24 Primera etapa (CBOD) y segunda etapa (NBOD) de la demanda bioquímica de oxígeno El empleo que se hace de la demanda nitrogenada se retrasa con respecto a la carbonífera porque los organismos que nitrifican crecen más lentamente que los que derivan su energía del carbono orgánico.

Mihelcic (1999). Reproducido con autorización de John Wiley & Sons, Inc.



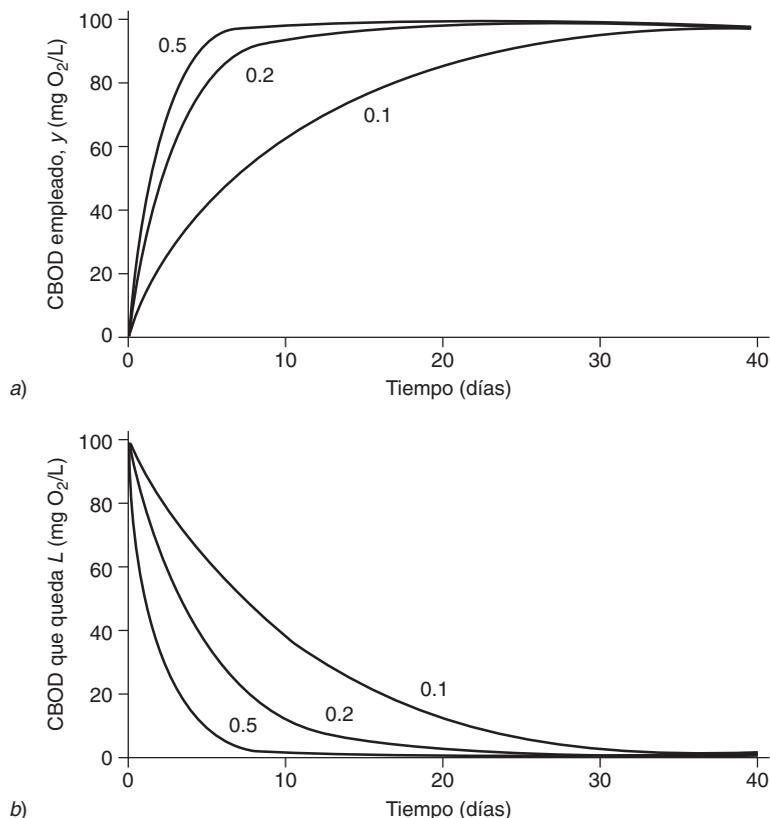


Figura 5.25 Variaciones en la velocidad a la cual se estabiliza la materia orgánica, reflejadas en la constante de velocidad de reacción, k_L . a) CBOD empleado, y ($\text{mg O}_2/\text{L}$), que muestra efectos en la variación de k_L . b) CBOD que queda L ($\text{mg O}_2/\text{L}$), que muestra efecto en la variación de k_L .

Mihelcic (1999). Reproducido con autorización de John Wiley & Sons, Inc.

Valores de la CBOD para el coeficiente de reacción que puede determinarse experimentalmente en el laboratorio mediante el *método de la pendiente Thomas*. Las mediciones de la CBOD que se emplean (y_t) se llevan a cabo diariamente durante 7 a 10 días. Se calculan los valores para el parámetro $(t/y)^{1/3}$ respecto a t , de acuerdo con la ecuación 5.35:

$$k_L = 6.01 \frac{\text{pendiente}}{\text{intersección}} \quad (5.35)$$

5.4.6 BOD: MEDICIONES, APLICACIÓN Y LIMITANTES

No hay ningún método de análisis disponible para medir la BOD directamente. Es necesario apelar a los propios organismos que por naturaleza emplean la demanda de oxígeno para efectuar un bioensayo. En él, se incuban durante varios días las muestras de agua en un medio ambiente contro-

Tabla / 5.10

Rango de valores de la velocidad de reacción de la CBOD

Tipo de muestra	k_L (día^{-1})
Aguas negras municipales sin tratar	0.35–0.70
Aguas negras municipales tratadas	0.10–0.35
Agua de río sin contaminar	<0.05

FUENTE: Valores de Davis y Cornwell, 1991; Chapra, 1997.

Tabla / 5.11

Condiciones favorables para la prueba de demanda bioquímica de oxígeno (BOD)

Condición	Descripción
Presencia de microorganismos adecuados	Típicamente, las abundantes aguas negras domésticas tratadas y la gran mayoría de las aguas naturales, las poblaciones microbianas están ausentes en muchos desechos industriales o desinfectados y en algunas aguas naturales. En tal caso, se pueden comprar microbios o se pueden obtener de las plantas de tratamiento de aguas y agregarlos a la muestra como "semilla".
Condiciones de incubación favorables y consistentes	Se incuban las muestras a 20° C para impulsar la actividad microbiana (la respiración depende de la temperatura) y para facilitar la comparación de resultados entre los lugares de donde se toma la muestra y los laboratorios que realizan los ensayos. Se agrega una dilución de agua aireada para asegurarse de que el oxígeno no se agote por completo antes de terminar el periodo de incubación. La dilución de agua puede contener nutrientes inorgánicos (Fe, N y P) que requieren los microbios. Algunos desechos pueden ser tóxicos para los microorganismos debido a pH extremos o a la presencia de químicos como metales pesados. Se puede ajustar el pH y se puede agregar agua diluida para reducir o eliminar la toxicidad. El bioensayo de BOD se debe efectuar en la oscuridad para inhibir la producción de oxígeno mediante fotosíntesis en caso de que haya algas, como ocurre con muchas muestras provenientes de aguas naturales.
Separación de CBOD y NBOD	La prueba estándar de BOD mide la CBOD y la NBOD. Algunas veces es necesario separar los dos procesos debido al diseño de la planta o para apoyar la operación. Se puede agregar algún químico a la muestra de agua para inhibir la nitrificación, lo que da lugar a la CBOD como único resultado de ensayo. La NBOD puede determinarse entonces a partir de un análisis en el que no se haya agregado ningún inhibidor. En un ensayo inhibido se reportan los resultados como CBOD; sin inhibidor adicional, los resultados se reportan como BOD.

lado y se monitorea el consumo de oxígeno. Se han de establecer las condiciones para la prueba de manera que los microorganismos vivan en un medio ambiente favorable para la oxidación de amoníaco y de carbono orgánico (empleo de BOD) como se describe en la tabla 5.11.

El empleo acumulativo de BOD durante el transcurso del ensayo se describe claramente en la curva de la figura 5.24. La tasa a la que se emplea BOD disminuye con el tiempo (a medida que la materia orgánica se consume), y el consumo acumulativo se aproxima en forma de asíntota al valor máximo (la BOD última, en mg O₂/L) después de varios días. Como se muestra en la figura 5.24, toma aproximadamente 30 días alcanzar 95% de la BOD final (en donde $k_L = 0.1/\text{día}$). Tal periodo de espera es impráctico si se trata de resultados que se necesitan para la operación de una planta de tratamiento de aguas, así que un ensayo más corto, de 5 días, se ha convertido en estándar. Aquí, sólo se emplea 60% aproximadamente de la BOD total, pero se puede obtener una estimación precisa de la BOD final si se aplica la ecuación 5.33 y un valor de la medida de los 5 días para k_L .

ejemplo/5.7 Determinación de laboratorio de CBOD

Se colocan 15 mL de una muestra de aguas residuales en una botella estándar de 300 mL BOD, y se llena la botella con una dilución de agua. La botella tenía una concentración de oxígeno disuelto inicial de 8 mg/L y una concentración de oxígeno disuelto final de 2 mg/L. Una botella llena con

ejemplo/5.7 Continuación

una dilución de agua que se prueba en paralelo no muestra ningún cambio en el oxígeno disuelto durante el periodo de incubación de 5 días. El coeficiente de velocidad de reacción BOD del desecho es 0.4/día. Calcule la BOD de 5 días (y_5) y la final (L_0) del agua residual.

solución

La BOD de 5 días (y_5) es la cantidad de oxígeno que se consume en un periodo de 5 días corregida por la dilución de la muestra original. Esto se puede escribir de la siguiente manera:

$$y_5 = \frac{[\text{DO}_{\text{inicial}} - \text{DO}_{\text{final}}]}{\left[\frac{\text{muestra en mL}}{\text{volumen total de la prueba}} \right]} = \frac{\left[\frac{8 \text{ mg O}_2}{\text{L}} - \frac{2 \text{ mg O}_2}{\text{L}} \right]}{\left[\frac{15 \text{ mL}}{300 \text{ mL}} \right]} = \frac{120 \text{ mg O}_2}{\text{L}}$$

Entonces, se aplica la ecuación 5.33, en donde $t = 5$ y $k_L = 0.4/\text{día}$ para determinar la BOD final:

$$L_0 = \frac{y_5}{(1 - e^{(-k_L t)})} = \frac{120}{(1 - e^{(-0.4/\text{día} \times 5 \text{ día})})} = \frac{138 \text{ mg O}_2}{\text{L}}$$

ejemplo/5.8 Investigación en la escena del crimen (CSI) para ingenieros medioambientales: la ciencia forense del agua residual

Un camión de desperdicios descargó desechos industriales en un hoyo de grava hacia la medianoche. Se le divisó tres días antes y ahora queda un charco de puros desechos. Un técnico de laboratorio determinó que los desperdicios tienen una BOD de 5 días de 80 mg/L y una velocidad de reacción de 0.1/día. Hay tres fábricas aledañas que generan desperdicios orgánicos: de vino (BOD final = 275 mg/L), de vinagre (BOD final = 80 mg/L) y una compañía farmacéutica (BOD final = 200 mg/L). Determine la fuente del desperdicio.

solución

Se puede calcular la BOD final de los desechos de la siguiente manera:

$$L_0 = \frac{y_5}{1 - e^{(-k_L t)}} = \frac{80 \text{ mg/L}}{1 - e^{(-0.1/\text{día} \times 5 \text{ día})}} = 203 \frac{\text{mg O}_2}{\text{L}}$$

El valor más cercano coincide con el de la compañía farmacéutica, pero no es congruente porque no toma en cuenta el hecho de que el desperdicio ha estado lejos de su fuente (y ha estado decayendo) durante 3 días. La BOD final original se puede calcular así

$$L_t = L_0 \times e^{-k_L t}$$

ejemplo/5.8 Continuación

Arreglar y resolver:

$$L_0 = \frac{L_t}{e^{-k_d t}} = \frac{203 \text{ mg/L}}{e^{-(0.1/\text{día} \times 3 \text{ día})}} = 274 \frac{\text{mg O}_2}{\text{L}}$$

El camión de la medianoche resultó ser de la fábrica de vino.

5.4.7 PRUEBA BOD: LIMITANTES Y ALTERNATIVAS

Aunque la prueba de BOD de los 5 días sigue siendo una herramienta fundamental en el tratamiento de desechos y en la evaluación de la calidad del agua, existen preocupaciones en torno a su logística y precisión que han conducido a propuestas para reemplazarla por otras medidas. Si bien su realización es relativamente simple, tiene tres desventajas importantes: 1) el tiempo que se necesita para obtener resultados (5 días es casi inconcebible en el mundo de hoy que recaba datos en tiempo real); 2) el hecho de que no pueda medir de manera precisa caudales de desechos que se degraden por periodos de más de 5 días y, 3) la imprecisión inherente del procedimiento, que se debe en gran parte a la variabilidad de la semilla (bacteria).

Otros analitos, como el carbono orgánico total (TOC), son más atinados y brindan mejor precisión pero fallan en distinguir efectivamente el carbono orgánico biodegradable del no biodegradable —que es precisamente el objetivo inicial de la prueba de BOD—. Más aún, no puede utilizarse la prueba de BOD para evaluar la eficacia de un tratamiento de desechos que no se han degradado de manera eficaz o que son tóxicos. Aquí, se aplica una prueba diferente, una para la **demanda química de oxígeno (COD)**.

En esta prueba se pone en un matraz de 250 mL una muestra que contiene una cantidad desconocida de materia orgánica. Se añaden AgSO_4 (un catalizador para asegurar la completa oxidación de la materia orgánica); un ácido fuerte (H_2SO_4), dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, que es un fuerte agente oxidante); y, HgCl_2 (para proveer el ion Hg^{2+} que hace complejo al ion cloruro, Cl^-). El ion cloruro interfiere con la prueba y está presente en grandes cantidades en numerosas muestras de aguas residuales. La razón es que se puede oxidar en Cl^0 con bicromato así como con materia orgánica. Sin embargo, la forma compleja de Cl^- no se oxida. Por lo tanto, si se permite Cl^- no complejo que se oxide en Cl^0 , se puede tener como resultado un falso positivo del valor de COD.

Se combina la muestra con todos los agentes y se somete a reflujo durante 3 horas. La materia orgánica se oxida (dona electrones) y el cromo se reduce (acepta electrones) de la forma hexavalente (Cr^{6+}) a la forma trivalente (Cr^{3+}). Por lo tanto, la prueba de COD determina cuánto cromo hexavalente se reduce durante la prueba. Una vez que la mezcla se ha enfriado a temperatura ambiente, se determina el bicromato que permanece en el sistema por titulación con sulfato ferroso de amonio. Se relaciona entonces la cantidad de cromo hexavalente con la cantidad de materia orgánica que se oxidó.

Los resultados se expresan en equivalentes de oxígeno ($\text{mg O}_2/\text{L}$), esto es, la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar por completo el desecho. La prueba es relativamente rápida (3 horas), y la correlación con la BOD_5 es

fácil de establecer de un caudal de aguas negras en particular. Por ejemplo, las aguas residuales municipales tienen una proporción de 0.4 a 0.6.

Comparar los resultados de la BOD y de la COD ayuda a identificar si existen condiciones tóxicas en un caudal de aguas negras o indicar la presencia de desperdicios que sean biológicamente resistentes (refractarios). Por ejemplo, una proporción BOD_5/COD que se aproxime a 1 puede indicar un material altamente biodegradable, mientras que una proporción que se acerque a 0 indica un material difícilmente biodegradable.

5.5 Flujo de material en los ecosistemas

El paso natural de químicos mediante los organismos ocurre en el seno de **ciclos biogeoquímicos**. Cinco químicos son de particular importancia en la ingeniería medioambiental: C, O, N, P y S. Además, interesa el **ciclo hidrológico** (vea el capítulo 9) porque juega un importante papel en el movimiento de los elementos químicos a través de la ecosfera. Esta sección considera cada uno de estos ciclos clave.

Advierta que los seres humanos usan y reciclan un número mucho más grande de elementos químicos en aplicaciones industriales que los que existen en los organismos vivos. Esto puede afectar el medio ambiente por la extracción de elementos exóticos, por la concentración de estos químicos que antes se encontraban dispersos y porque la exposición a elevadas concentraciones a menudo pueden dañar las funciones normales de seres humanos y sistemas naturales.

5.5.1 CICLOS DE OXÍGENO Y DE CARBONO

El **ciclo de oxígeno** y el **ciclo del carbono** se encuentran estrechamente ligados por los procesos de fotosíntesis (ecuación 5.19) y de respiración (ecuación 5.20). La fotosíntesis es la fuente primaria en el ciclo del oxígeno y el origen del carbono orgánico que se ha transformado en bióxido de carbono en el ciclo del carbono. La respiración es el pozo principal en el ciclo del oxígeno y es el responsable de la conversión de carbono orgánico a bióxido de carbono en el ciclo del carbono. Las plantas y algunas bacterias llevan a cabo la fotosíntesis, y todos los organismos, incluso aquellos que realizan fotosíntesis, llevan a cabo la respiración. La interrelación entre la fotosíntesis y la respiración juega un papel clave en la regulación de los equilibrios de energía en un ecosistema y en el mantenimiento de los niveles de oxígeno necesarios para la vida en medio ambientes acuáticos. La figura 5.26 describe cómo los seres humanos han alterado el ciclo de carbono natural.

5.5.2 CICLO DEL NITRÓGENO

Las transformaciones biogeoquímicas que personifica el ciclo del nitrógeno (figura 5.27) son importantes en los sistemas naturales y en los de ingeniería. Como resultado de su colaboración con bacterias y plantas, muchas de las características del ciclo del nitrógeno están relacionadas con los ciclos de oxígeno y carbono. Las plantas toman y utilizan nitrógeno en forma de amoníaco o nitrato, químicos que típicamente se encuentran en escasas cantidades en los suelos de cultivo, por lo que requieren fertilización. Algunas bacterias y algunas especies de plantas (como las legumbres y el clavo) pueden también usar nitrógeno atmosférico (N_2) para convertir el amoníaco mediante el proceso de **fijación de nitrógeno**. Las plantas incorporan amoníaco y nitrato

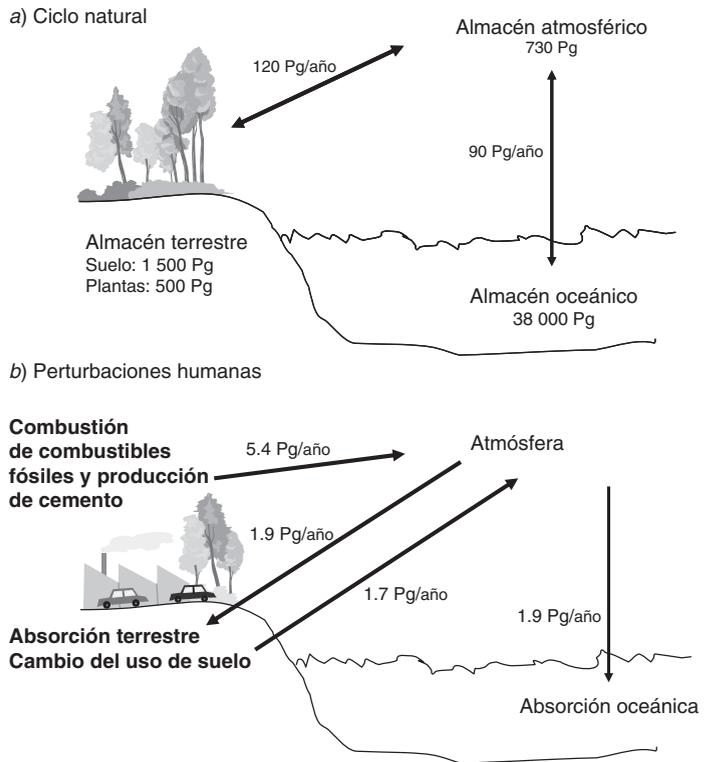


Figura 5.26 Ciclo del carbono bajo condiciones naturales y bajo las modificaciones que causan las perturbaciones de origen humano a) Ciclo natural del carbono, que mantiene una reserva relativamente constante de carbono en el aire y presenta transferencias equilibradas entre los compartimientos. b) Emisiones antropogénicas de carbono que se agregan a la reserva de la atmósfera a tasas que no se equilibran por la absorción terrestre ni oceánica. El resultado es un incremento en las concentraciones atmosféricas de CO₂.

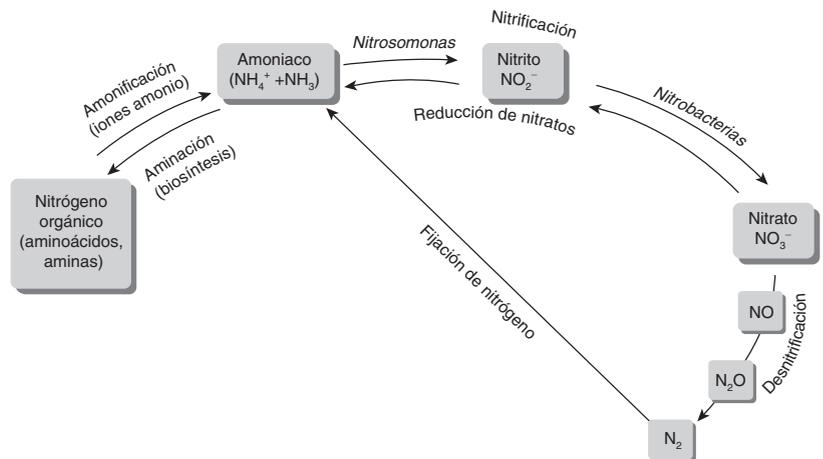


Figura 5.27 El ciclo del nitrógeno

Snoeyink y Jenkins, Water Chemistry, 1980. Reproducido con autorización de John Wiley & Sons, Inc. (De Mihelcic (1999). Reproducido con autorización de John Wiley & Sons, Inc.)

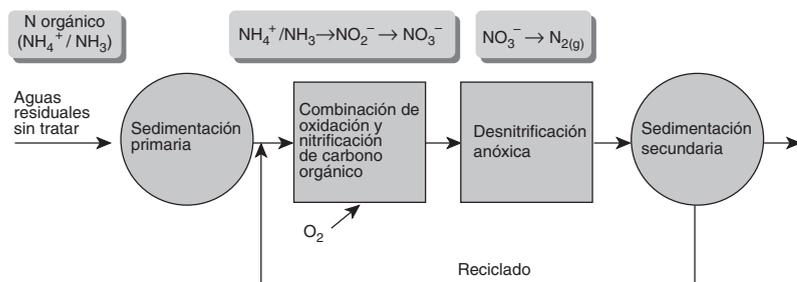


Figura 5.28 Configuración de una planta municipal de tratamiento de aguas negras convencional para retirar nitrógeno

De Mihelcic (1999). Reproducido con autorización de John Wiley & Sons, Inc.

a una variedad de compuestos orgánicos, como las proteínas y los ácidos nucleicos, críticos para las funciones metabólicas.

Los compuestos nitrogenados que están presentes en los organismos se liberan hacia el medio ambiente a través de la excreción y la muerte, ya sea en la naturaleza o en forma de desechos humanos. El nitrato es un importante nutriente que contribuye al crecimiento de las plantas y puede ser el nutriente limitante en algunos sistemas, especialmente en el medio ambiente marino en las costas. Las descargas a las aguas superficiales pueden provocar un crecimiento dañino de las algas y llegar a crear problemas de calidad del agua como el agotamiento del oxígeno.

La figura 5.28 describe el ciclo del oxígeno que comúnmente se observa en una planta municipal de tratamiento de aguas residuales. En un primer paso, el **aumento de amoníaco**, el N orgánico (por ejemplo, las proteínas) se convierten en amoníaco ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$). El siguiente paso implica la transformación del amoníaco en nitrito (NO_2^-) (mediante la bacteria del género *Nitrosomonas*) y luego a nitrato (NO_3^-) (mediante la bacteria del género *Nitrobacter*), proceso denominado **nitrificación**. Este paso requiere de la presencia de oxígeno. El nitrato puede transformarse en gas nitrógeno mediante el proceso de **desnitrificación**, en el que se convierte en gas nitrógeno con su consecuente liberación a la atmósfera. Esta transformación microbiana se realiza bajo condiciones anóxicas.

5.5.3 CICLO DEL FÓSFORO

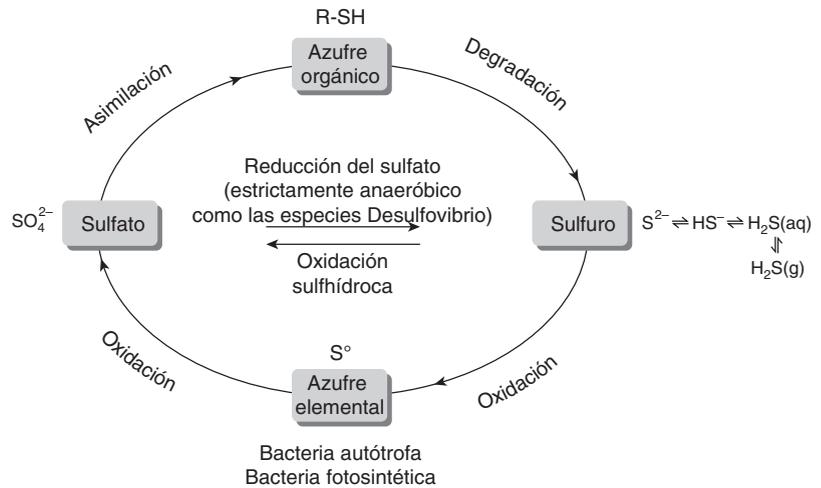
Los minerales que contienen fósforo son poco solubles, por lo que la mayor parte de las aguas superficiales contienen muy poco de este importante nutriente para las plantas de manera natural. Cuando se extrae fósforo y se incorpora con agentes limpiadores y fertilizantes, el ciclo biogeoquímico (la conducción del elemento a través del medio ambiente) se acelera sobremanera. Su consecuente descarga en lagos y ríos, en donde el fósforo es el nutriente limitante, puede estimular un dañino crecimiento de algas y **eutrofización** (que se abordará en el capítulo 8), lo que provoca lagos desagradables y no disponibles para varios usos. Por lo tanto, retirar el **ciclo del fósforo** es una característica importante del proceso de tratamiento de aguas de un cauce.

5.5.4 CICLO DEL AZUFRE

Tal como el ciclo del oxígeno y del nitrógeno, el **ciclo del azufre** (figura 5.29) es en gran parte mediado de manera microbiana y por lo tanto está asociado al ciclo del carbono. El azufre llega a lagos y ríos como S orgánico, incorporado a materiales como proteínas, y como S inorgánico, principalmente como sulfato (SO_4^{2-}).

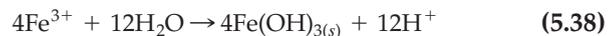
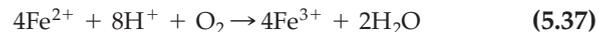
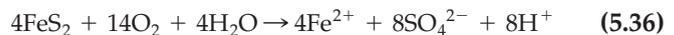
Figura 5.29 Ciclo del azufre La reducción del sulfato (SO_4^{2-}) en ácido sulfhídrico (H_2S) puede provocar problemas de olor en los sistemas de recolección de aguas residuales y de plantas de tratamiento. La oxidación del azufre reducido puede conducir a la acidificación y decoloración de las aguas superficiales.

De Mihelcic (1999). Reproducido con autorización de John Wiley & Sons, Inc.



Ciclos biogeoquímicos:
carbono, nitrógeno,
mercurio, tóxicos

El ácido sulfhídrico (H_2S) es maloliente y tóxico para la vida acuática a muy bajas concentraciones. A menudo se encuentra piritita (FeS_2) en formaciones geológicas de extracción comercial, como en el caso del carbón o de metales como la plata y el zinc. Cuando la piritita se expone a la atmósfera comienza un proceso de oxidación de tres pasos en los que participan bacterias como *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus ferrooxidans* y *Ferrobacillus ferrooxidans*:



Este proceso provoca que la mina drene ácidos ricos en sulfato, acidez e hidróxidos férricos (un precipitado de color anaranjado amarillento llamado "niño amarillo"). Aunque el sulfato es inocuo, la acidez provoca que el pH de las aguas superficiales descienda (a niveles que con frecuencia dañan gravemente la calidad del agua), y que el producto cubra el fondo de los arroyos, lo que elimina el hábitat de los macroinvertebrados. Además, el bajo nivel de pH del agua disuelve rocas y minerales, que libera sólidos totales disueltos y dureza.

Drenaje del ácido de las minas

http://www.epa.gov/nps/acid_mine.html

Servicios para ecosistemas de la bahía de Tampa, la costa de California y el valle del río Willamette en Oregon

<http://www.epa.gov/ord/esrp/index.htm>

5.6 Salud del ecosistema y bienestar público

Todos los proyectos de ingeniería deberían diseñarse, construirse y operarse de una manera que sea benigna para el medio ambiente y que tenga como fin último servir a la sociedad equitativamente y proteger la salud de los seres humanos y de los ecosistemas para las generaciones futuras. Esta sección introduce dos temas que, desde esta perspectiva, son importantes: sustancias tóxicas y biodiversidad.

5.6.1 SUSTANCIAS TÓXICAS Y ECOSISTEMAS Y SALUD HUMANA

Las sustancias tóxicas pueden influir en la salud del ecosistema dañando directamente la población o en las comunidades, o creando indirectamente