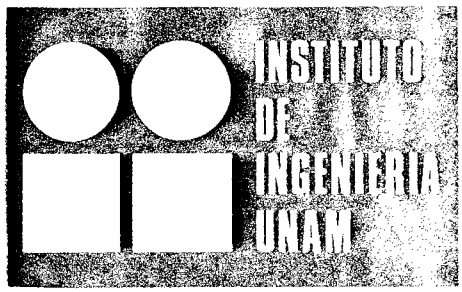
ISSN 0185-5735



DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO

CONCEPTOS Y METODOLOGIA

MIRYOUSSEF NOROUZIAN

SERIES DEL INSTITUTO DE INGENIERIA

No. D-22

SEPTIEMBRE 1984

DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO

CONCEPTOS Y METODOLOGIA

MIRYOUSSEF NOROUZIAN*

* Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM

RESUMEN

NOTACION

1. INTRODUCCION 1

2. DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO, DBO 3

3. CALCULO DE LOS VALORES DE DBO SEGUN STANDARD METHODS 13

4. METODO GRAFICO PARA EVALUAR LA DBO 21

5. ECUACION DE SEGUNDO ORDEN PARA LA DBO 31

6. ESTABILIDAD RELATIVA 43

7. SIGNIFICADO DE LA CONSTANTE DE RAPIDEZ 47

8. DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE RAPIDEZ DE LA DBO 51

9. TECNICAS EXISTENTES PARA MEDIR LA DBO 65

10. RECOMENDACIONES 77

11. RECONOCIMIENTO 81

12. REFERENCIAS 83

13. BIBLIOGRAFIA 89

RESUMEN

En el presente trabajo se ha reunido una vasta información tomada, en su mayoría,de la literatura disponible acerca de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, *DBO*. También se señalan las ventajas y desventajas de la prueba de la *DBO*, apoyados ambos aspectos en una discusión acerca de la metodología de dicha prueba. El cálculo de la *DBO* y de la determinación de las constantes cinéticas se presentan y se aclaran con ejemplos numéricos. Finalmente, se incluye una bibliografía adicional lo más completa posible, que sirva de fuente de información a los lectores interesados en el tema.

NOTACION

DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DBO_5	DBO en cinco días
DBO_t	DBO en el día t
DBO_L	DBO última
DNO	Demanda nitrogenosa de oxígeno
OD	Oxígeno disuelto
D_i	OD inicial en la muestra diluida
D_f	OD final en la muestra diluida después de incubación
D_o	OD del agua de dilución
D_{ob}	OD del testigo
D_{os}	OD disponible para la muestra
S	OD de la muestra no diluida
C	concentración
$°C$	Grado centígrado
d	Día
e	Base del logaritmo natural
f	Fracción del inóculo
k	Constante de rapidez, base 10
k'	Constante de rapidez, base e
ℓ	Litro
mg	Miligramo
$m\ell$	Mililitro
p	Fracción volumétrica de la muestra usada
q	Fracción volumétrica del agua de dilución

T Temperatura

t Tiempo

V Volumen

y DBO última

y_t DBO en el día t

1. INTRODUCCION

Este trabajo tiene como propósito brindar un auxilio a estudiantes, maestros e investigadores interesados en el tema de la demanda bioquímica de oxígeno (*DBO*). Para ello se pensó presentarlo como un medio de trasferencia de información. A fin de dar mayor claridad al texto se proporcionan ejemplos de aplicación y esclarecimiento de las ecuaciones. Casi todos los ejemplos se tomaron de fuentes adecuadas; no obstante, se hicieron algunas modificaciones y se dieron explicaciones de sus soluciones para facilitar su comprensión. Debido a razones de espacio y a que el trabajo está destinado a despertar inquietudes, la información se proporcionó de manera condensada; sin embargo, para una información más detallada, es fácil recurrir a las referencias que se citan en el texto, o bien a la bibliografía que se incluye al final, las que se trató fueran lo más completas posible. Las deficiencias del

concepto, pruebas y cálculos de la *DBO* se subrayaron con el fin de estimular a las personas interesadas, ya sea en plantear nuevos métodos para remplazar completamente a la *DBO* o para hacer aportaciones a los procedimientos existentes.

El autor agradecerá todos los comentarios y la información que se brinde acerca del tema; inclusive cualquier comentario e información aparecerán con los nombres de las personas que los hayan proporcionado en caso de que este trabajo se revise en el futuro.

2. DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO, *DBO*

La *demanda bioquímica de oxígeno*, más conocida como *DBO*, es una medida que se utiliza para conocer la fuerza contaminante de las aguas de desecho o aguas residuales domésticas e industriales. Se define como la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias para estabilizar la materia orgánica biodegradable contenida en las aguas de desecho bajo condiciones aerobias, y se expresa en mg/l de oxígeno.

La prueba de la *DBO* se inició en Inglaterra y se conoció primero como DBO_5. El subíndice significa que la prueba se lleva a cabo durante un periodo de incubación de cinco días, el cual se estableció con base en el hecho de que la mayor parte de los ríos en Inglaterra toman cinco días para llegar al océano (ref 1).

Desde que se creó la prueba de la *DBO*, su aplicación fue tan abundante que se hizo necesario estandarizarla para facilitar a los investigadores su labor y presentar sus resultados de una manera más homogénea; por tanto, se estableció una prueba *DBO* estándar, la que se publicó hacia los años veintes en revistas y libros.

La fuente principal para el procedimiento estándar de análisis de agua y aguas residuales es *Standard Methods* (ref 2), que se actualiza y se vuelve a *estandarizar* cada cinco años. La prueba DBO_5 estándar se efectúa a 20°C durante cinco días, según *Standard Methods*, y se discutirá más adelante. Dado que el material orgánico contenido en un agua de desecho se presenta principalmente en dos formas: soluble y suspendido, la *DBO* se puede considerar ocasionada por las dos fracciones del sustrato, de tal forma que existen tres tipos de *DBO*: *DBO* total, *DBO* soluble y *DBO* suspendida. Es una práctica común no intentar medir la *DBO* suspendida porque es muy difícil, si no imposible, medirla directamente. La *DBO* total y la soluble de una muestra se determinan primero y luego, por diferencia entre ellas, se determina la *DBO* suspendida, ya que

$$DBO\ total = DBO\ soluble + DBO\ suspendida \qquad (1)$$

Por tanto

$$DBO\ suspendida = DBO\ total - DBO\ soluble \qquad (2)$$

La *DBO* que está relacionada con el material carbonoso orgánico se llama *DBO* carbonosa y la *DBO* relacionada con el material nitrogenado, usualmente amoniaco, se llama *DBO* nitrogenosa o *DNO*. Algunos expertos las designan *DBO* de primera etapa y *DBO* de segunda etapa, respectivamente, ya que generalmente la nitrificación se presenta después de haberse consumido el material orgánico carbonoso.

DBO_5 no indica todo el oxígeno requerido para estabilizar la materia orgánica disponible en los desechos; sino que esta representa del 70 al 80 por ciento de la *DBO* última de aguas residuales domésticas e industriales. La *DBO* última, que aparece como DBO_L, también usada como DBO_u por algunos autores, es la cantidad total de oxígeno que se requiere para estabilizar completamente la materia orgánica biodegradable presente en los desechos.

Si se supone que la fórmula del desecho es $C_xH_yO_zN_t$, entonces puede obtenerse la *DBO* teórica de la manera siguiente:

$$C_xH_yO_zN_t + \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} - \frac{3}{4}t\right) O_2 \rightarrow xCO_2 + \left(\frac{y}{2} - \frac{3}{2}t\right) H_2O + tNH_3$$

$$DBO_L = (x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} - \frac{3}{4}t)\ O_2 \qquad (3)$$

El amoniaco resultante tendrá una *DNO* definida por:

$$tNH_3 + 2tO_2 \rightarrow t\ NO_3^- + t\ H^+ + tH_2O \ (nitrificación)$$

$$DNO = 2tO_2 \qquad (4)$$

Ya que todas estas reacciones se desarrollan en un medio acuoso, puede decirse que tiene lugar una oxidación húmeda, en la que las bacterias son el medio en el cual se efectúa la oxidación; el oxígeno, el agente oxidante o aceptor de electrones; y la materia orgánica, el agente oxidable o donador de electrones. La prueba de la *DBO* y sus resultados fueron causa de numerosas críticas; sin embargo, todavía se usa como uno de los criterios y pruebas más importantes para juzgar los diseños de plantas de tratamiento de aguas y sus resultados.

Algunas desventajas de la prueba de la *DBO* se presentan a continuación; no obstante, debe mencionarse que este análisis no intenta crear un sentimiento pesimista acerca de la prueba de la *DBO*, sino que en realidad trata de alentar a los investigadores a mejorar la prueba y a superar los problemas relacionados con ella, y hasta posiblemente desarrollar un ensayo adecuado para remplazar, algún día, la prueba de la *DBO*.

1. La prueba de la *DBO* en la botella supuestamente debe simular las condiciones que se encuentran normalmente en cuerpos de agua naturales tales como ríos; sin embargo, tal como se efectúa actualmente, no cumple con ese propósito, por la sola razón de que no hay mezclado en las botellas de *DBO* durante la incubación, en tanto que este mezclado es evidente en un cuerpo de agua natural. En la ref 3 se indica que la constante de rapidez de la *DBO* en condiciones de mezcla continua era diez veces mayor que la que se obtenía en condiciones de reposo. Además, la población microbiana que se halla en la botella de *DBO* no es similar a la diversidad de población de los sistemas naturales.

2. La prueba de la *DBO* es empírica y no mide la presencia de una sola entidad discernible, sino únicamente el consumo de oxígeno. A pesar de que en ocasiones se puede suponer correctamente que la demanda de oxígeno es proporcional a la cantidad de materia orgánica presente no es siempre el caso, tal como puede verse en la ecuación generalizada de la reacción para la oxidación de materia orgánica. En esta reaccion es evidente que la demanda de oxígeno no sólo se determina por la cantidad de materia orgánica presente, sino también por su estructura específica definida por las variables x, y, z y t (ref 4).

3. La reacción de la *DBO* se considera normalmente como de primer orden. Esto significa que depende en forma lineal de la concentración de materia orgánica. Las condiciones requeridas para llevar a cabo la prueba de la *DBO* no incluyen como limitantes al oxígeno y a los microbios; por tanto, la dilución de la muestra no debería complicar los resultados;no obstante, sucede lo contrario (ref 5), ya que también puede causar que ciertas sustancias tóxicas que se encuentran en los desechos pasen desapercibidas si no se tiene el cuidado necesario. De hecho, se han utilizado datos obtenidos de diferentes diluciones para determinar si una cantidad significativa de sustancias tóxicas se encuentra o no presente en las muestras (refs 6 y 7).

4. El orden de la reacción de la *DBO* no está bien establecido. La decimatercera edición de *Standard Methods* (ref 8), la considera como reacción de primer orden con reservas. Al respecto se ha sugerido (ref 9) que debería usarse un modelo de segundo orden, particularmente cuando la rapidez de reacción excede 0.2/día.

5. La prueba de la *DBO* no tiene validez estequiométrica después de que se ha consumido la materia orgánica presente en la solución (ref 10).

6. Para propósitos prácticos se requieren 20 días de pruebas

para determinar la *DBO* última en aguas de desecho de tipo doméstico, lo que significa un periodo demasiado largo para esperar los resultados; inclusive, el lapso de cinco días es largo, pues lo que se obtiene es una información que refleja cuál era la condición del agua hace cinco días. Además, la relación entre la *DBO* de cinco días y la *DBO* última no está bién definida, sino que sólo es una aproximación. En general, la prueba de la *DBO* estándar no da ninguna información acerca de la *DBO* última.

7. Se ha demostrado (ref 11) que los desechos de ganado, tales como los que arrastra la lluvia contienen materia orgánica que se degrada lentamente, y que estos desechos ejercen una demanda de oxígeno significativa durante periodos de más de veinte días; es más, la curva de la demanda bioquímica de oxígeno de desechos de papel continúa aumentando aún después de 200 días (ref 12).

8. Dependiendo de la naturaleza del inóculo microbiano y de la muestra, puede ocurrir la nitrificación en la botella de *DBO* y pasar desapercibida. El cloruro de amonio en la solución amortiguadora de fosfatos favorecerá la nitrificación en la botella de *DBO* si se encuentran presentes bacterias nitrificantes en el inóculo o en la muestra.

9. A menudo es difícil conseguir un inóculo adecuado, aclima

tado y en cantidad suficiente, un inóculo no aclimatado originará un periodo de adaptación y una cantidad de inóculo inadecuada conducirá a unos resultados de DBO excesivos o por debajo de la realidad. Estas situaciones no son fáciles de detectar en la prueba de la DBO estándar; es más, aun efectuando correctamente dicha prueba, se obtiene un valor poco cercano al real.

10. Hay contradicciones en la decimacuarta edición de *Standard Methods* al calcular el valor de la DBO. Klein y Gibbs, en su trabajo mencionado en la ref 13 las han señalado y se citan a continuación.

Los estándares (solución glucosa-ácido glutámico) están inoculados; el agua de dilución testigo no lo está. El estándar diluido (alimento) es principalmente agua de dilución. Si hay bacterias para metabolizar la demanda del agua de dilución testigo, ¿por qué deben agregarse bacterias a las diluciones del estándar?

La leve disminución de oxígeno del agua de dilución testigo no puede determinarse con suficiente precisión como para usarla en la corrección de la DBO encontrada; sino que se utiliza para rechazar los datos y la DBO que se encontraron...

Esos mismos autores añaden, con respecto a los problemas del agua de dilución testigo, y plantean el problema de qué hacer con los datos cuando el agua de dilución testigo (que se corre paralelamente con las muestras) se encuentra *demasiado alta* y ya no se dispone de la muestra. *Standard Methods* no proporciona ninguna manera de corregir el agua de dilución testigo; sólo dice que si el agua de dilución no es satisfactoria... los resultados son cuestionables. Sin embargo, es posible que con motivo de un permiso de descarga se le pida al analista reportar un valor. Pero hay casos en los que el valor de *DBO* que obtiene el analista con el cálculo de *Standard Methods* puede ser tan elevado como un 100 por ciento arriba del valor real.

11. No hay ninguna manera de verificar la exactitud de la prueba de la *DBO* (ref 14). Además, no da información acerca de la tasa de consumo de oxígeno. En muchos casos, la tasa de demanda a veces es más importante que la demanda acumulativa al final de cinco días.

12. La prueba de la *DBO* estándar no logra explicar el consumo no biodegradable de oxígeno.

A pesar de todos los inconvenientes de la prueba de la *DBO* mencionados, tiene méritos importantes que la hacen una de las más

importantes en el campo del tratamiento de aguas residuales.

La mayor parte de los intentos para anular la prueba de la *DBO* han fracasado, ya que para el diseño de una unidad biológica y la evaluación de su funcionamiento, una prueba biológica es muy adecuada, y precisamente, la prueba de la *DBO* es esencialmente una prueba de calidad biológica, además es sencilla y barata, lo que la hace muy atractiva para los investigadores, diseñadores y operadores de plantas de tratamiento, quienes la han empleado durante años. Otro punto a favor de la prueba de la *DBO* es que conforme pasa el tiempo se perfecciona la prueba, con lo que gradualmente se superan los problemas relacionados con ella. Uno de los adelantos más recientes es el método gráfico (ref 13) para evaluación de la *DBO*, que se discutirá junto con otros métodos más adelante.

3. CALCULO DE LOS VALORES DE *DBO* SEGUN STANDARD METHODS

Es un método que los investigadores y operadores de plantas usan y aceptan. Como es estándar tiene valor legal en informes de funcionamiento, legalidad que obliga a que quien lo maneje se encuentre familiarizado con estos cálculos y procedimientos. Es por esa razón, así como para fines informativos, que se presenta aquí.

La ecuación que se recomienda para calcular la *DBO*, según *Standard Methods*, es

$$DBO = \frac{(D_i - D_f) - (B_i - B_f)f}{p} \qquad (5)$$

donde

D_i oxígeno disuelto (*OD*) inicial en la botella de prueba que contiene la muestra de aguas residuales inoculadas y di-

luidas, en mg/l

D_6 OD de la muestra de aguas residuales inoculadas diluidas después de la incubación, en mg/l

B_i OD inicial del agua de dilución inoculada antes de la incubación, en mg/l

B_6 OD del agua de dilución inoculada después de la incubación, en mg/l

$$6 = \frac{\text{ml de inóculo en } D_i}{\text{ml de inóculo en } B_i}$$

$$p = \frac{\text{volumen de la muestra}}{\text{volumen de la botella de DBO}}$$

Si las aguas residuales contienen suficientes poblaciones microbianas, entonces el inóculo no se necesita y la ec 5 se puede escribir

$$DBO = \frac{D_i - D_6}{p} \qquad (6)$$

Si no se diluye, la ec 6 se simplifica todavía más

$$DBO = D_i - D_6 \qquad (7)$$

Se da el ejemplo siguiente tomado de la ref 15 con fines ilustrativos.

EJEMPLO 1

Se tomaron muestras de agua río arriba y abajo de las descargas de una planta de tratamiento municipal. El agua río arriba, que se encuentra relativamente poco contaminada, se aereó y se pasó por sifón directamente a botellas de *DBO* sin dilución. Con un medidor de oxígeno y un sensor se midió el oxígeno disuelto en dos botellas incubadas.

El flujo debajo de la descarga de aguas residuales consistió en aproximadamente un tercio de efluentes y dos tercios de agua de río; por consecuencia, se estimó que la *DBO* debía estar entre 15 y 20 mg/l. Para impedir la pérdida de oxígeno disuelto en las botellas de prueba, se diluyeron las muestras contaminadas tomadas río abajo con agua captada río arriba con una proporción de 50 y 250 ml, respectivamente, en las botellas de 300 ml. Determínese el valor k y DBO_L.

(Véase también la determinación de la constante de rapidez de *DBO* en el Cap 7). Con el agua de río arriba, los valores de *DBO* se calcularon a partir de datos de oxígeno disuelto de laboratorio usando la ec 7. La curva de *DBO*-tiempo se muestra en la fig 1 con líneas interrumpidas.

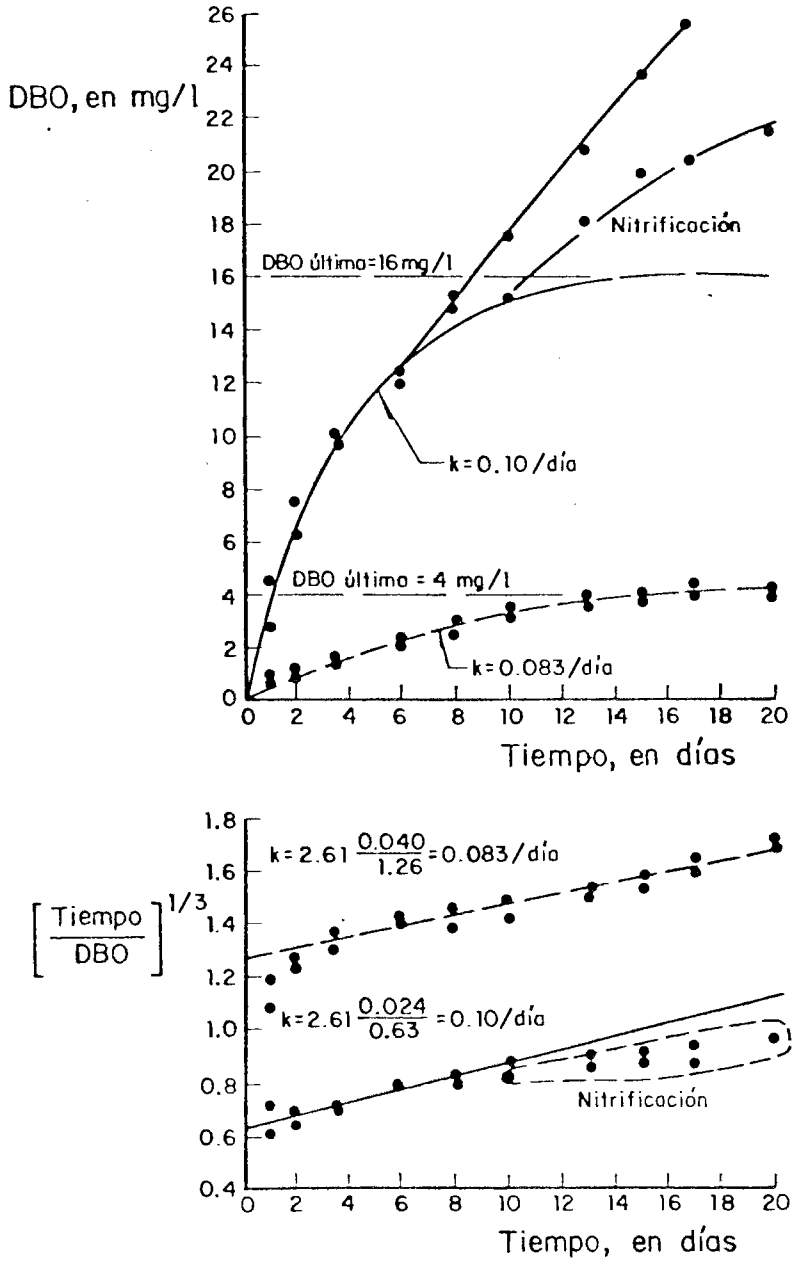


Fig 1. Curvas de DBO vs tiempo y determinación gráfica de los valores de k

SOLUCION

El valor de k se indica en la fig 1. Nótese que la rápida captación de oxígeno durante los dos primeros días se ignoró al dibujar la línea de mejor ajuste. Las DBO individuales para los análisis de agua contaminada se calcularon según la ec 5. Después de estabilizarse a 20°C y aerarse se agregaron en la botella 50 ml de la muestra contaminada tomada río abajo y 250 ml de agua de dilución captada río arriba, por tanto $p = 50/300$. El OD inicial es $D_i = 7.9$ mg/ℓ, y baja a $D_6 = 3.9$ mg/ℓ después de seis días de incubación. El valor para $B_i - B_6$ es la disminución de OD en la botella de prueba del agua tomada río arriba, lo que promedia 2.3 mg/l representado en el sexto día de la curva de DBO-tiempo de la fig 1. La 6 es 250/300. La DBO de seis días se calcula a partir de la ec 5 de la manera siguiente

$$DBO_6 = \frac{(D_i - D_6) - (B_i - B_6)6}{p} = \frac{(7.9 - 3.9) - (2.3)(250/300)}{50/300} = 12.5 \cong 13 \text{ mg/ℓ}$$

A continuación se dan algunos ejemplos que se tomaron de la ref 16.

EJEMPLO 2

Determínense los mililitros de muestra que se deben agregar a

la botella de DBO si la DBO estimada es de 400 mg/l.

SOLUCION

La disminución máxima de OD recomendable es 4 mg/l.

Por tanto

Mililitros de muestra agregados por botella de DBO =

$$= \frac{4 \times 300}{\text{valor estimado de DBO}} = \frac{1\ 200}{400} = 3\ m\ell$$

EJEMPLO 3

Volumen de la muestra = 15 ml

OD inicial de la muestra diluida = 8.0 mg/l

OD de la muestra diluida después de cinco días de incubación = 4.0 mg/l

No se necesitó inóculo

Determínese el valor de DBO_5

SOLUCION

$$DBO_5 = \frac{(D_i - D_f)}{p} = \frac{8.0 - 4.0}{15/300} = 80\ mg/\ell$$

Para llegar a resultados aceptables, el porcentaje de disminución de oxígeno en la prueba de la DBO debe oscilar entre 30 y 80 por ciento.

$$\text{Porcentaje de disminución} = \frac{8.0 - 4.0}{8.0} = 0.50 \text{ ó } 50\%, \text{ que es aceptable}$$

EJEMPLO 4

Cuando en la prueba de la DBO se necesite un gran volumen de muestra y una pequeña cantidad de agua de dilución, o si una muestra del efluente de una planta o del efluente de un estanque tiene un OD alto, el OD inicial de la mezcla puede determinarse como sigue

Volumen de la muestra = 60 ml

OD de la muestra = 2.0 mg/l

OD del agua de dilución = 8.0 mg/l

OD de la muestra diluida después de cinco días de incubación= 4.0 mg/l

SOLUCION

$$\Sigma C_i V_i = C \Sigma V_i \qquad (8)$$

$$C = \frac{\Sigma C_i V_i}{\Sigma V_i} = \frac{2.0 \times 60 + 8.0 \times 240}{300} = 6.8 \text{ mg/l}$$

$$DBO = \frac{D_i - D_f}{p} = \frac{6.8 - 4.0}{60/300} = 14 \text{ mg/l}$$

4. METODO GRAFICO PARA EVALUAR LA DBO

En este método, primero se modifica el modelo estándar y luego se desarrolla un procedimiento gráfico. En general, los métodos gráficos son más sencillos y es más fácil observar la tendencia que siguen los datos.

La fórmula siguiente se tomó de *Standard Methods* (ref 8), y fue adaptada por Klein y Gibss (ref 13)

$$DBO = \frac{D_i - D_f}{p} \qquad (9)$$

donde

D_i OD inicial en la muestra diluida, en mg/l

D_f OD final en la muestra diluida después de la incubación, en mg/l

p fracción volumétrica de la muestra que se utilizó

$$D_i = D_o\, q + Sp \qquad (10)^*$$

donde

D_o OD del agua de dilución, en mg/l

q fracción volumétrica del agua de dilución

S OD de la muestra no diluida, en mg/l

$$q = \frac{300 - V}{300} \qquad (11)$$

$$p = \frac{V}{300} \qquad (12)$$

donde

300 volumen de la botella de DBO, en ml

V volumen de la muestra, en ml

De la sustitución de las ecuaciones 10,11 y 12 en la ec 9 resultará:

$$DBO = \frac{\frac{(300 - V)D_o}{300} + \frac{VS}{300} - D_6}{\frac{V}{300}}$$

$$DBO \cdot V = (300 - V)\, D_o + VS - 300\, D_6$$

$$DBO \cdot V = 300\, D_o - VD_o + VS - 300\, D_6$$

---

* Esta ecuación es la misma que $\Sigma C_i V_i = C\Sigma V_i$, donde C y V representan concentraciones y volúmenes

Suponga que de una misma fuente se tomaron las muestras V_1 y V_2, entonces

$$DBO \cdot V_1 = 300\ D_o - V_1 D_o + V_1 S - 300\ D_{\delta_1}$$

$$DBO \cdot V_2 = 300\ D_o - V_2 D_o + V_2 S - 300\ D_{\delta_2}$$

Por sustracción se obtiene

$$(V_2 - V_1) \cdot DBO = V_1 D_o - V_2 D_o + V_2 S - V_1 S + 300\ D_{\delta_1} - 300\ D_{\delta_2}$$

$$DBO = \frac{300\ (D_{\delta_1} - D_{\delta_2})}{V_2 - V_1} - D_o + S \qquad (13)$$

El término $\frac{D_{\delta_1} - D_{\delta_2}}{V_2 - V_1}$ es la pendiente de la línea en una curva del volumen de muestra vs el OD remanente (fig 2). El punto A en la gráfica señala el OD cuando el volumen de muestra es cero, que es el OD del agua de dilución o D_o. Por tanto

$$DBO = 300\ (pendiente) - Y_{intersección} + OD_{de\ la\ muestra} \qquad (14)$$

En realidad, D_o es el oxígeno que se tomó del agua de dilución y del cual se dispone para la muestra; en consecuencia, se define de la manera siguiente:

$$D_o = D_{os} + D_{ob} \qquad (15)$$

donde

D_{os} OD disponible para la muestra, en mg/l

D_{ob} demanda de OD del testigo, en mg/l

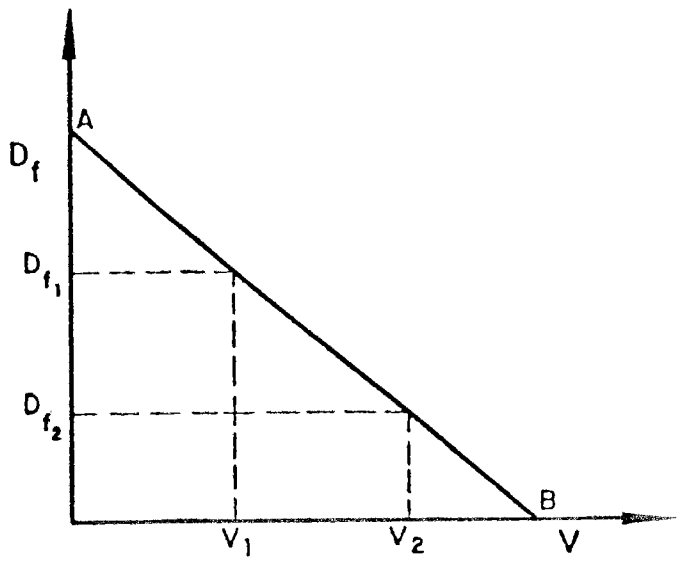


Fig 2. Gráfica del volumen de la muestra vs OD final

Por tanto, debe considerarse D_{os} en lugar de D_o

$$D_{os} = D_o - D_{ob}$$

o

$$DBO = 300 \frac{D_{f_1} - D_{f_2}}{V_2 - V_1} - (D_o - D_{ob}) + S \qquad (16)$$

A partir de esta ecuación se entiende que el método gráfico toma automáticamente en cuenta el efecto de la solución testigo. Además, el término $-(D_o - D_{ob}) + S$ puede escribirse a partir de la ec 15 como

$$-(D_o - D_{ob}) + S = -(D_{os} - S)$$

Eso significa que este método corrige por la mezcla de dos líquidos con diferentes OD. Parte de esta corrección se incluye en la pendiente. Con el fin de aclarar el problema en vista de futuras discusiones se proporcionan las siguientes definiciones.

$$D_6 = OD \text{ disponible} - OD \text{ consumido por una muestra no diluida}$$

$$D_6 = (D_{os}q + Sp) - DBO \text{ de la muestra}$$

o sea

$$D_6 = D_{os} - \frac{V}{300} \cdot (D_{os} - S + DBO \text{ de la muestra})$$

Suponga dos volúmenes de muestra provenientes de la misma fuente, entonces

$$D_{6_1} - D_{6_2} = \frac{V_2 - V_1}{300} (D_{os} - S + DBO \text{ de la muestra})$$

Dividiendo ambos lados entre $\frac{V_2 - V_1}{300}$

$$300 \frac{D_{6_1} - D_{6_2}}{V_2 - V_1} = D_{os} - S + DBO \text{ de la muestra}$$

o

$$DBO \text{ de la muestra} = 300 \frac{D_{b_1} - D_{b_2}}{V_2 - V_1} - D_{os} + S \qquad (17)$$

Como se puede ver, la ecuación anterior es idéntica a la ec 16. Al compararse en la ecuación ambos métodos de derivaciones se entiende mejor la razón de la sustracción de $(y_{intersección} - S)$ del término 300 (pendiente). También indica que la pendiente incluye la demanda de oxígeno debida a la mezcla y que no se considera como *DBO*. Conforme el volumen de la muestra se reduce, esta demanda se vuelve insignificante. El examen del método gráfico revelará que dos líneas con pendientes diferentes pueden presentar la misma *DBO*, o que dos líneas de la misma pendiente resultan en dos *DBO* diferentes (fig 3).

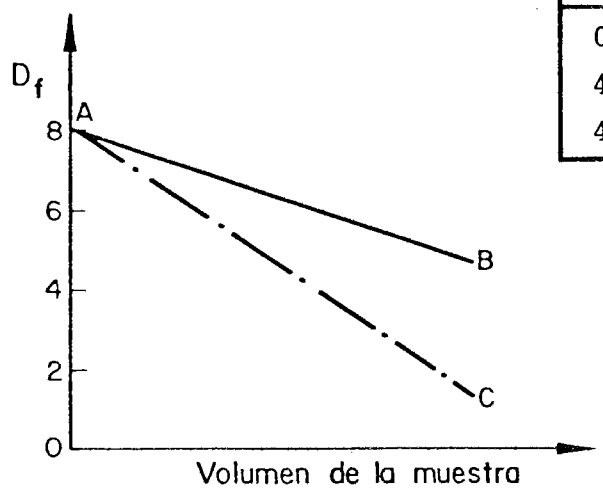
El método gráfico, comparado con el estándar, ofrece al usuario las siguientes ventajas:

1. El método gráfico da como resultado una *DBO* que es propia de la muestra
2. No se necesitan los valores de *OD* iniciales de las diluciones
3. No se requiere correr un testigo de agua de dilución
4. La *DBO* del inóculo no es necesaria
5. Los únicos datos necesarios son:

a) *OD* de la muestra

b) Volumen de la muestra

c) *OD* final de las diluciones de muestras incubadas



DBO	Testigo	*S*	*y*	Pendiente	Línea
0	0	4	8	0.0133	AB
4	0	8	8	0.133	AB
4	0	4	8	0.0267	AC

Fig 3. Gráfica del volumen de la muestra vs *OD final*

EJEMPLO 5

Dado que:

DBO de la muestra = 100 mg/l = *DBO*

Volumen de la muestra = 6 ml = *V*

OD de la muestra = 0 mg/l = *S*

DBO de la solución testigo = 0.2 mg/l

OD del agua de dilución = 8 mg/l = D_o

Se requiere: *OD* final de la muestra diluida después de la incubación = D_6 = ?

SOLUCION

$$D_i = D_o q + Sp = 8\left(\frac{300 - 6}{300}\right) + 0 \times (6/300) = 7.84 \text{ mg/}\ell$$

Reducción de OD debida a la muestra = $p \cdot DBO = (6/300)(100) = 2 \text{ mg/}\ell$

Reducción de OD debida al agua de dilución = $q \cdot DBO = ((300-6)/300)(0.2) =$
$= 0.196 \text{ mg/}\ell$

Por tanto

$$7.84 - 2 - 0.196 = 5.644 \text{ mg/}\ell = D_6$$

Ahora se calcula la *DBO* usando el valor de D_6 que se obtuvo anteriormente con la ayuda de la fórmula que se da en *Standard Methods*

$$DBO = \frac{D_i - D_6}{p} = \frac{7.84 - 5.644}{6/300} = 109.8 \text{ mg/}\ell$$

Pero como la muestra tenía una *DBO* de 100 mg/l, entonces el error relativo es

$$\frac{109.8 - 100}{100} = 0.098 \quad \delta \quad 9.8\%$$

$$\frac{109.8 - 100}{109.8} = 0.089 \quad \delta \quad 8.9\%$$

5. ECUACION DE SEGUNDO ORDEN PARA LA *DBO*

Como ya se estipuló, algunas personas prefieren una ecuación de segundo orden como modelo matemático para la *DBO* en vez de una de primer orden. Al respecto, Young y Clark (ref 17) sugieren la siguiente ecuación de segundo orden para el cálculo de *DBO*

$$DBO_t = \frac{t}{1/(k \cdot DBO_L^2) + t/(DBO_L)} \qquad (18)$$

O, de una manera más cómoda, como se mostró originalmente

$$y = \frac{t}{a + bt} \qquad (19)$$

Esta ecuación puede convertirse en lineal de la manera siguiente

$$t/y = a + bt$$

Los parámetros a y b pueden determinarse mediante un análisis de mínimos cuadrados. Usando cinco puntos de datos $t = 5$, $\Sigma t = 15$, y $\Sigma t^2 = 55$ resultará

$$a = 1.10\ (\Sigma(t/y)) - 0.30\ (\Sigma(t^2/y)) \qquad (20)$$

$$b = 0.10\ (\Sigma(t^2/y) - 3\Sigma(t/y)) \qquad (21)$$

A continuación se da un ejemplo tomado de la misma fuente.

EJEMPLO 6

A partir de los datos de la tabla 1, calcúlense a, b, k y DBO_L

TABLA 1. DATOS DE LA DBO

t, en días	y, en mg/l*	t/y	t^2/y
1	132.8	0.00753	0.00753
2	156.5	0.01278	0.02556
3	218.0	0.01376	0.04129
4	237.7	0.01683	0.06731
5	250.9	0.01993	0.09964
		0.07083	0.24133
		$= \Sigma \frac{t}{y}$	$= \Sigma \frac{t^2}{y}$

* Cuando se considera la precisión y exactitud de la prueba de la DBO no es adecuado escribir 132.8 sería mejor 132 ó 133. Consúltese la ref 8 para cifras significativas

SOLUCION

A partir de ec 20 y de la tabla 1

$$a = 1.1\ (0.07083) - 0.30\ (0.24133) = 0.005514\ dl^2/mg^2$$

A partir de ec 21 y de la tabla 1

$$b = 0.10\ (0.24133 - 3 \times 0.07083) = 0.002885\ \ell/mg$$

De la comparación entre las ecs 18 y 19

$$DBO_L = 1/b = 1/0.002885 = 347\ mg/\ell$$

$$k = b^2/a = 0.002\ días^{-1}$$

o sea

$$k = 1/(a \cdot DBO_L^2) = 1/((0.005514)(347)^2) = 0.002\ días^{-1}$$

Young y Clark (ref 17) concluyeron que su modelo se aproxima en la primera etapa de los datos de la DBO, con la misma precisión con la que se aproxima el modelo de primer orden, y que tiene la ventaja adicional de resolverse más rápidamente con el análisis de mínimos cuadrados que el modelo de primer orden. Además subrayan que al aumentar la temperatura de la

prueba de 20 a 35 °C se incrementa de manera significativa la precisión del cálculo de las constantes de *DBO* cuando se usa cualquiera de los modelos, ya sea de primer o segundo orden (para mayor información acerca del modelo de Young, consúltense las refs 18, 19 y 20).

Nótese que la gráfica de t/y vs t deberá dar como resultado una línea recta cuya pendiente dará el valor de b y su intersección en la escala de t/y determinará el valor de a. La ref 21 ofrece mayor información acerca del potencial de las ecuaciones de primero y segundo órdenes de los modelos de la reacción de *DBO*.

A continuación se dan más ejemplos de la ref 10 con relación a la discusión anterior.

EJEMPLO 7

Determínese la *DBO* de un día y la *DBO* última de la primera etapa para un residuo cuya *DBO* de cinco días a 20 °C es 200 mg/l. Suponga una constante de rapidez de 0.1 por día.

SOLUCION

$$DBO_t = DBO_L (1 - 10^{-kt})$$

$$200 = DBO_L\ (1 - 10^{-0.1x5})$$

$$DBO_L = 293\ mg/\ell$$

$$DBO_1 = 293\ (1-10^{-0.1x1}) = 60\ mg/\ell$$

EJEMPLO 8

Calcular la DBO_L y k con el método de mínimos cuadrados para los siguientes datos de DBO:

t, en días	2	4	6	8	10
DBO, en mg/l	11	18	22	24	26

SOLUCION

TABLA 2. METODO DE MINIMOS CUADRADOS

t, en días	DBO, en mg/l	DBO^2	Pendiente	DBOx(pendiente)
2	11	121	4.50	49.5
4	18	324	2.75	49.5
6	22	484	1.50	33.0
8	24	576	1.00	24.0
TOTAL	75	1505	9.75	156.0

La columna 4 de la tabla 2 se calculó de la manera siguiente:

$$pendiente = \frac{DBO_{n+1} - DBO_{n-1}}{2\Delta t} \qquad (22)$$

donde

n número de puntos de datos

Δt diferencia de tiempo entre dos valores de DBO adyacentes

Cuando $t = 0$, se sabe que $DBO = 0$

$$\frac{18 - 0}{2(2 - 0)} = 4.50$$

$$\frac{22 - 11}{2(4 - 2)} = 2.75$$

$$\frac{24 - 18}{2(6 - 4)} = 1.50$$

$$\frac{26 - 22}{2(8 - 6)} = 1.00$$

Las dos ecuaciones básicas para el método de mínimos cuadrados se escriben

$$na + b\ DBO_t - pendiente = 0 \qquad (23)$$

$$a\ DBO_t + b\ (DBO_t)^2 - (DBO_t\ (pendiente)) = 0 \qquad (24)$$

donde

n número de puntos de datos

$b = -2.3\ k$

$-a/b = DBO_L$

Según la tabla 2, $n = 4$ (nótese que fueron cinco puntos de datos pero debido a la ec 22, el último dato no se incluyó en la tabla 2.

De las ecuaciones 23 y 24

$$4a + 75b - 9.75 = 0$$

$$75a + 1\ 505b - 156.0 = 0$$

Al resolver estas dos ecuaciones simultáneas se obtiene

$$a = -7.5$$

$$b = -0.271$$

$$k = -b/2.3 = 0.271/2.3 = 0.1 \text{ por día}$$

$$DBO_L = -a/b = 7.5/0.271 = 28 \text{ mg/}\ell$$

EJEMPLO 9

Calcular la DBO_L y k con el método de Thomas (véase el ejemplo 16) para los datos que se dan en el ejemplo 8.

Respuesta: $K = 0.1$ *por día,* $DBO_L = 30$ mg/ℓ

EJEMPLOS de la referencia 29

EJEMPLO 10

Los valores de *DBO* de tres y de cinco días son 6.17 y 7.30 mg/l, respectivamente. Determinar *k* con una regla de cálculo de *DBO* como la de la fig 4.

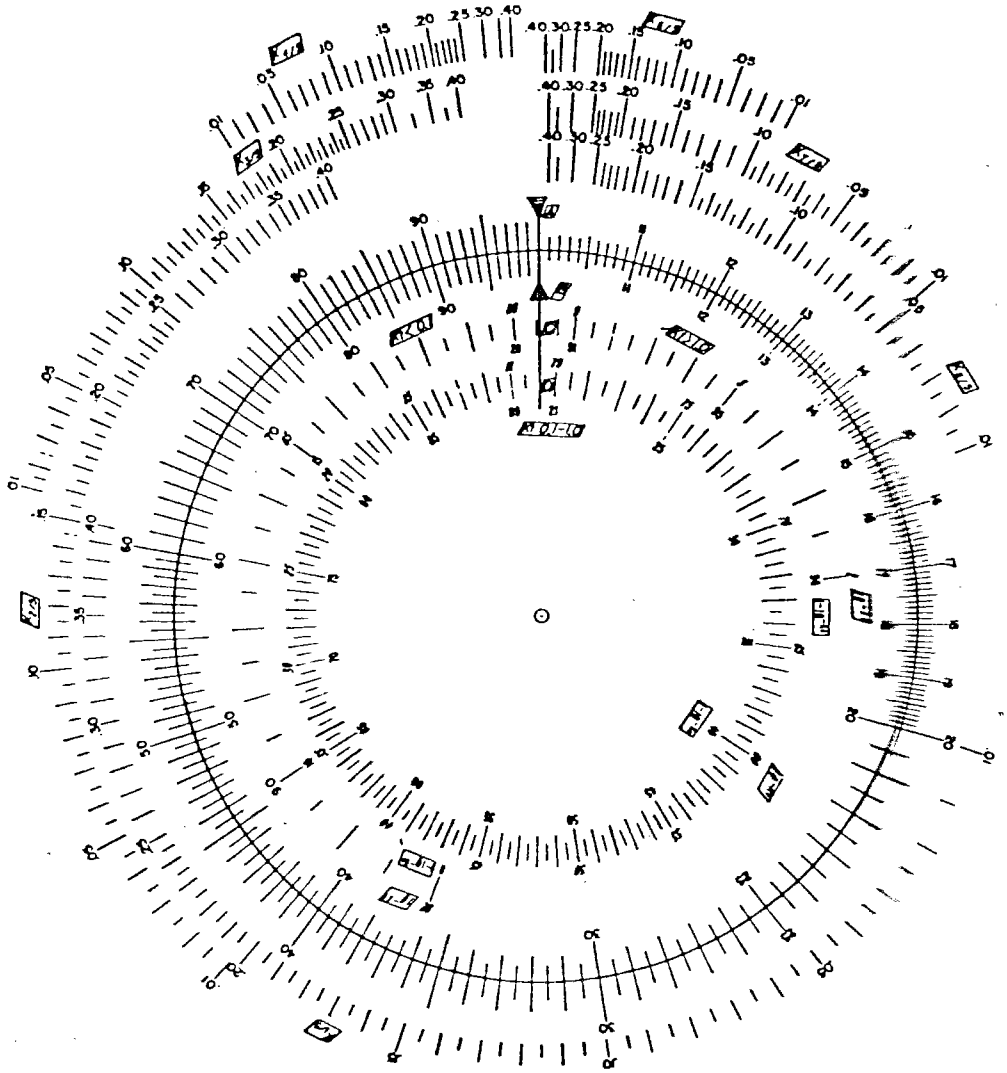


Fig 4. Regla de cálculo para encontrar la solución de la ecuación de primer orden

SOLUCION

Se ajusta el índice A sobre la *DBO* de cinco días de 7.30 en la escala B. Al mover el cursor sobre la *DBO* de tres días de 6.17 en la escala B puede leerse directamente el valor de k en la escala $k_3/5$. En este caso, $k = 0.217$ por día ($k_3/5$ se escogió por las *DBO* de tres y cinco días).

EJEMPLO 11

Las *DBO* de tres, cinco y siete días de un desecho son 1.38, 1.71 y 1.87 mg/l, respectivamente. Determinar k mediante los cálculos de las figs 5a y 5b.

SOLUCION

La relación de la *DBO* de tres días con la *DBO* de cinco días es $1.38/1.71 = 0.808$. Se establece la escala de relación DBO_t/DBO_5 en 0.808 y la escala de tiempo a tres días en la fig 5a. Puede apreciarse que las líneas se cortan en $k=0.17$ por día. El mismo valor resultará si se usaran $1.87/1.71 = 1.092$. En este último caso debe utilizarse la fig 5b.

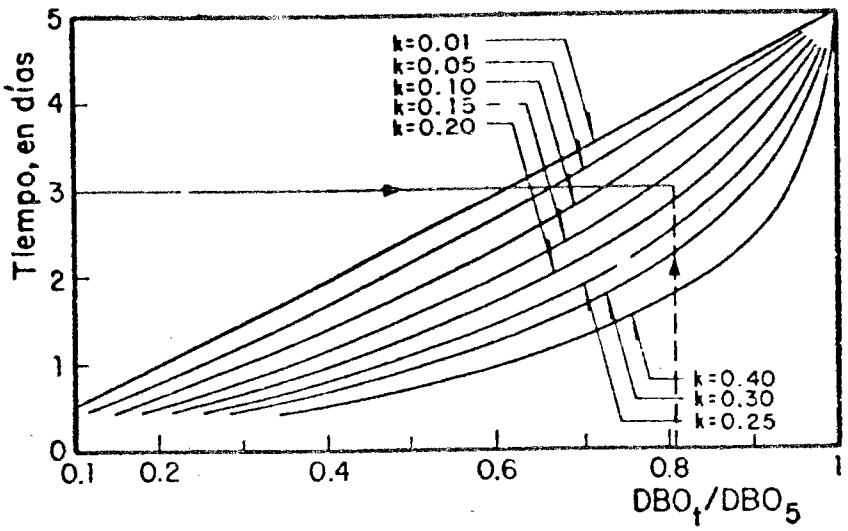


Fig 5a. Valores de k para la relación DBO_t/DBO_5 para tiempos menores a cinco días

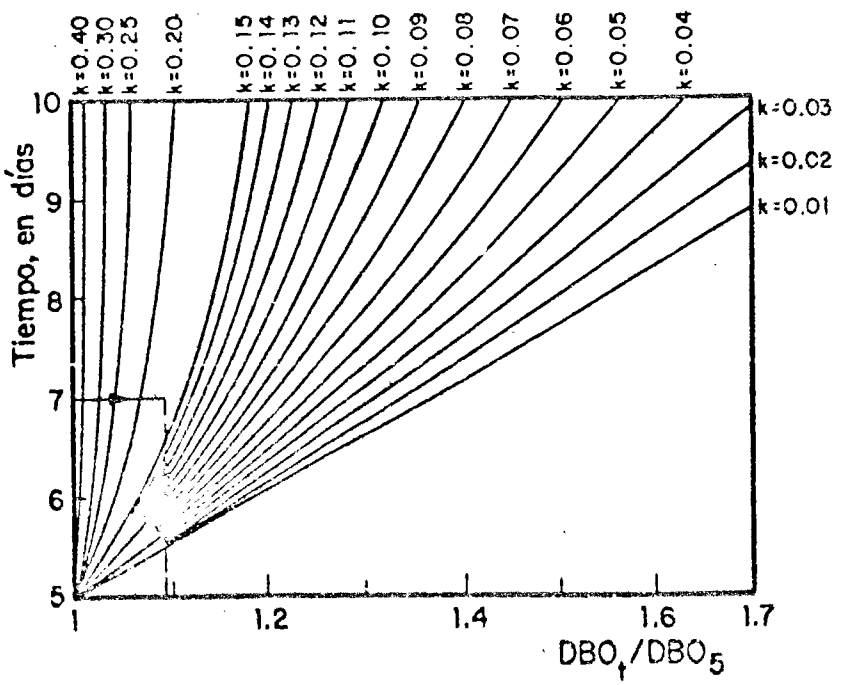


Fig 5b. Valores de k para la relación DBO_t/DBO_5 para tiempos mayores a cinco días

EJEMPLO 12

¿Cuál es el porcentaje oxidado después de cuatro días si el desecho tiene un valor de k de 0.15 por día? Úsese la fig 6.

SOLUCION

Se busca en la escala kt de la fig 6 el valor $kt = 0.15 \times 4 = 0.60$; esto corta la recta en 75 por ciento como se indicó. (Para mayor información acerca de estas gráficas consúltese la ref 22).

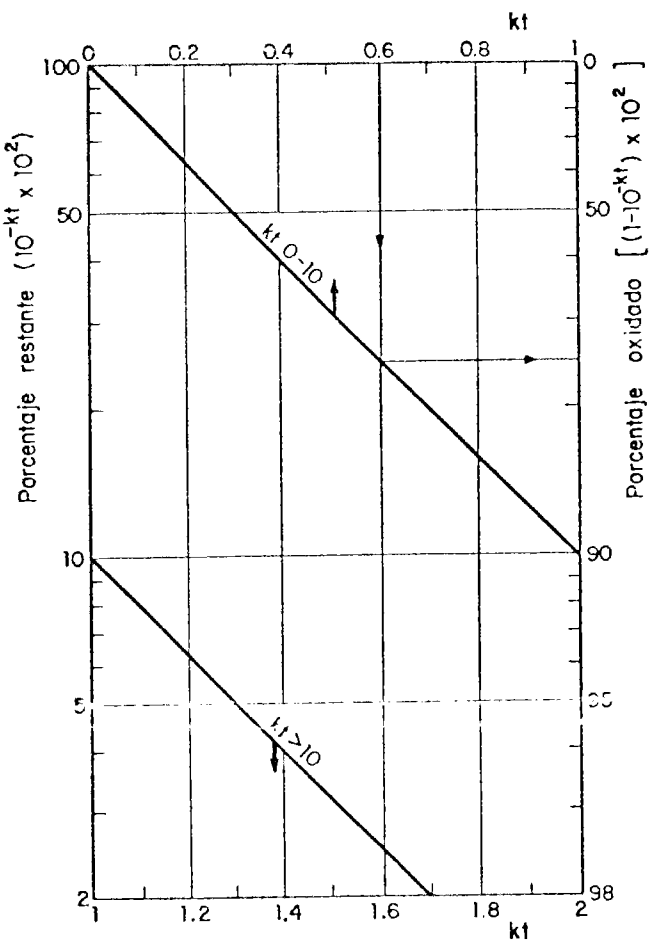


Fig 6. Cantidad remanente de DBO última de la primera etapa y cantidad que se oxidó para diferentes valores de kt

6. ESTABILIDAD RELATIVA

Esta prueba ya no se usa; sin embargo, puede emplearse para verificar rápidamente, por ejemplo, la DBO última de una muestra cuya DBO_5 se conoce.

La estabilidad relativa se define mediante las fórmulas

$$\frac{DBO_t}{DBO_L} = \frac{\text{materia orgánica que se usó durante el tiempo } t}{\text{total de la materia orgánica biodegradable presente}} \qquad (25)$$

$$\frac{\text{oxígeno disponible}}{\text{demanda de oxígeno total}} = 1 - 10^{-kt} = R \qquad (26)$$

o sea

$$\frac{DBO_t}{DBO_{t'}} = \frac{R_t}{R_{t'}} \qquad (27)$$

La prueba para la estabilidad relativa se lleva a cabo normalmente con azul de metileno; por esta razón se llama a veces prueba de azul de metileno. En esta se llena una botella de DBO con la muestra y 0.5 ml de azul de metileno. Luego se sella la botella y se incuba a 20°C. Se examina la botella por lo menos una vez al día hasta que el color haya desaparecido. Con base en la tabla 3 se determina la estabilidad relativa como el porcentaje de la demanda de oxígeno total.

TABLA 3. VALORES DE ESTABILIDAD RELATIVA (ref 23)

Estabilidad relativa	11	21	37	50	60	68	75	80	84	87	90	95
Días que se requieren para que desaparezca el color	0.4	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	12.0

EJEMPLO 13

Una muestra de agua de desecho de tipo doméstico tiene una DBO_5 de 200 mg/l. Determinar la DBO_{10} de la muestra.

SOLUCION

De la tabla 3:

$$R_5 = 68 \quad y \quad R_{10} = 90$$

De la ec 27:

$$\frac{DBO_{10}}{DBO_5} = \frac{90}{68}$$

o sea

$$DBO_{10} = 265 \text{ mg/}\ell$$

7. SIGNIFICADO DE LA CONSTANTE DE RAPIDEZ

Para fines de simplicidad, se considerará la constante de rapidez k, contenida en la ecuación 28. Es común que esta constante se exprese en términos de hora o día, lo que hace que se oscurezca el significado de k. De este modo es difícil, si no imposible, para un lego entender cuando lee, por ejemplo, $k = 0.2\ día^{-1}$. La dificultad empieza cuando las dimensiones se simplifican y se anulan términos idénticos. Con el propósito de ilustrar esto se utiliza la siguiente ecuación

$$dc/dt = - kc$$

o sea

$$-dc/(cdt) = k$$

Cambiando esta ecuación a la relación de dimensiones resulta

$$\frac{M/L^3}{TM/L^3} = k$$

donde

M masa

L longitud

T tiempo

Por tanto, sin simplificar esta ecuación dimensional, la unidad para k es, por ejemplo, mg/l/mg/l/día. Ahora, en lugar de decir 0.2 día^{-1}, lo que únicamente significa que 0.2 mg/l de cada mg/l de concentración disponible se agotarán cada día de acuerdo con la ecuación respectiva.

EJEMPLO 14

Se considera la ec 28 y se supone que $k = 0.2$ mg/ℓ/mg/ℓ/día y $DBO_L = 100$. Con base en el concepto anterior calcúlese el valor de DBO_5.

SOLUCION

$DBO_1 = 100\ (1 - 10^{-0.2 \times 1}) = 36.9^*$ mg/ℓ

DBO disponible o restante $= 100 - 36.9 = 63.1$ mg/ℓ

$DBO_1 = 63.1\ (1 - 10^{-0.2 \times 1}) = 23.3$ mg/ℓ

* Cuando se considera la precisión y exactitud de la prueba de la DBO no es adecuado escribir 36.9, sería mejor 36 o 37. Consúltese la ref 8 para cifras significativas

DBO disponible $= 63.1 - 23.3 = 39.8$ mg/ℓ

$DBO_1 = 39.8\ (1 - 10^{-0.2x1}) = 14.7$ mg/ℓ

DBO disponible $= 39.8 - 14.7 = 25.1$ mg/ℓ

$DBO_1 = 25.1\ (1 - 10^{-0.2x1}) = 9.3$ mg/ℓ

DBO disponible $= 25.1 - 9.3 = 15.8$ mg/ℓ

$DBO_1 = 15.8\ (1 - 10^{-0.2x1}) = 5.8$ mg/ℓ

La DBO ejercida después de cinco días será la suma de las DBO calculadas arriba

$$DBO_5 = 36.9 + 23.3 + 14.7 + 9.3 + 5.8 = 90 \text{ mg/ℓ}$$

Eso es igual a lo que podría calcularse en un momento dado con la fórmula

$$DBO_5 = 100\ (1 - 10^{-0.2x5}) = 90 \text{ mg/ℓ}$$

Otra manera de apreciar el significado de k sería

$$\frac{dX}{dt} = -k' X$$

o sea

$$X = X_o\ e^{-k't}$$

donde

X DBO disponible en el tiempo t

X_o DBO disponible en el tiempo $t = 0$

k' constante de rapidez con base e

t tiempo

Si se supone que $X = \frac{X_o}{2}$ después de t días, entonces

$$0.55 = e^{-k't}$$

o sea

$$t = \frac{0.693}{k'}$$

Como $k' \doteq 2.3\ k$, por tanto

$$t = \frac{0.3}{k}$$

Esta ecuación indica que 0.3 veces la recíproca de k dará el tiempo necesario para ejercer 50 por ciento de la *DBO* disponible originalmente. Según el ejemplo 14, se requerirían $0.3/0.2 = 1.5$ días para disminuir la *DBO* original de 100 mg/l a 50 mg/l. De la ec 28:

$$DBO_{1.5} = 100(1 - 10^{-0.2 \times 1.5}) = 50\ mg/\ell$$

$$DBO_3 = 100\ (1 - 10^{-0.2 \times 3}) = 75\ mg/\ell$$

8. DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE RAPIDEZ DE LA DBO

El éxito de los modelos matemáticos para el cálculo de la DBO depende principalmente de la determinación de las constantes incluidas en el modelo. Generalmente, la DBO se considera una reacción de primer orden; el modelo que se usa con mayor frecuencia es

$$DBO_t = DBO_L \ (1 - 10^{-kt}) \qquad (28)$$

donde

DBO_t demanda bioquímica de oxígeno en el tiempo t, en mg/l

DBO_L DBO última, en mg/l

k constante de rapidez de desoxigenación, en $día^{-1}$

t tiempo, en días

Debe hacerse notar que en esta presentación todas las DBO

son carbonosas, a menos de que se diga lo contrario.

La constante de rapidez k puede determinarse de las pruebas de laboratorio, como se muestra en la fig 7. Si se observa un tiempo de retraso (Lag time) debe establecerse el origen aproximado cual si se tratara de la curva de una cinética de primer orden, al delinear una proyección a través de los puntos calculados para intersectar el eje del tiempo. Entonces, los valores de la raíz cúbica del tiempo, en días, sobre la *DBO*, que se calcula a partir de datos de laboratorio, se dibujan contra los tiempos correspondientes. Se traza la línea que mejor se ajuste entre estos puntos relacionados con la *DBO* carbonosa. El valor de k se determina con la siguiente ecuación (ref 17)

$$k = 2.61 \frac{B}{A} \qquad (29)$$

donde

A intersección de la línea en el eje ordinario

B pendiente de la línea de mejor ajuste

A fin de aclarar el procedimiento se ejemplifica un cálculo tomado de la ref 15.

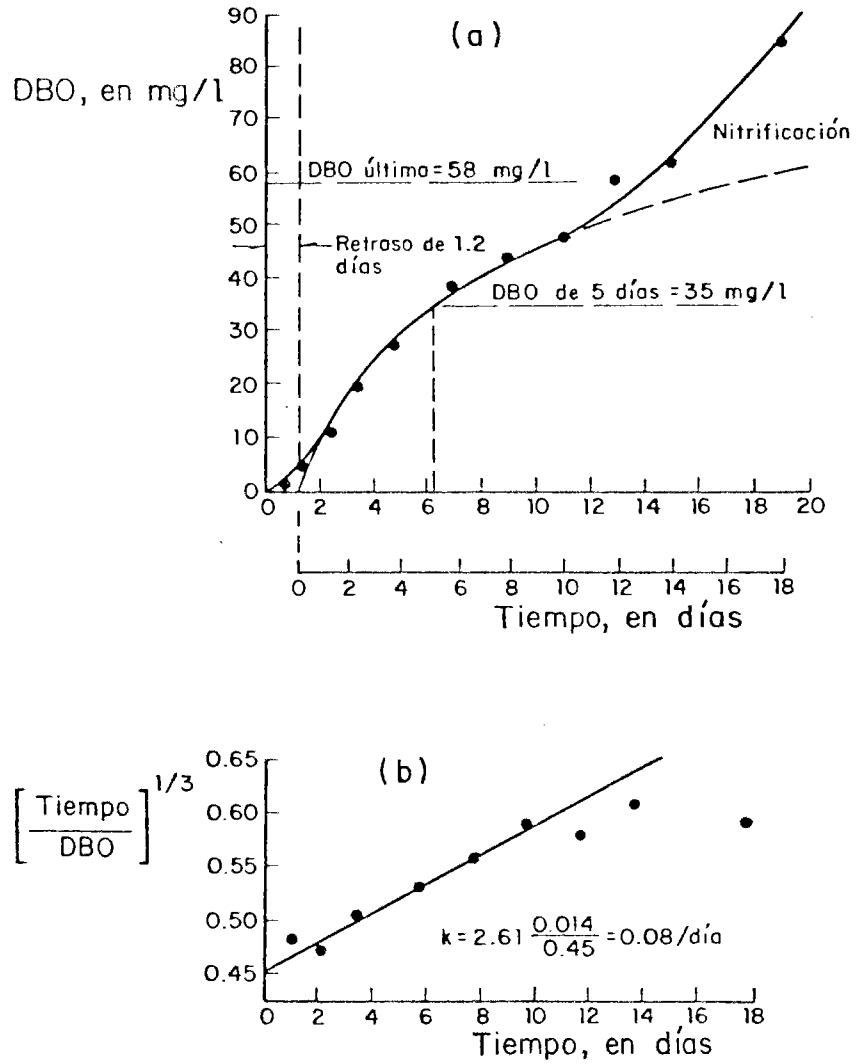


Fig 7. Gráfica de DBO vs tiempo y determinación gráfica del valor de k

EJEMPLO 15

Se efectuó un análisis de la *DBO* del efluente no clorado, de una planta municipal de tratamiento de agua. Se prepararon varias pruebas idénticas, con 30 ml de agua residual agregados a cada botella de *DBO* de 300 ml y se hizo químicamente la prueba de *OD* después de varios intervalos de tiempo. Tras efectuar inmediatamente la titulación de tres muestras se determinó el *OD* inicial como 8.7 mg/l. En las columnas 1 y 2 de la tabla 4 se presentan los datos del *OD* residual y del tiem-

TABLA 4. DATOS DE *DBO*-TIEMPO

1 Incubación, en días	2 D_i, en mg/l	3 $D_i - D_f$, en mg/l	4 DBO, en mg/l	5 Retraso de tiempo, en días	6 t, en días	7 $(t/DBO)^{1/3}$
0	8.7		0	1.2		
0.5	8.5	0.2	2	1.2		
1.3	8.2	0.5	5	1.2	0.1	0.27
2.4	7.6	1.1	11	1.2	1.2	0.48
3.3	6.7	2.0	20	1.2	2.1	0.47
4.8	5.9	2.8	28	1.2	3.6	0.50
7.0	4.9	3.8	38	1.2	5.8	0.53
9.0	4.3	4.4	44	1.2	7.8	0.56
11.0	3.9	4.8	48	1.2	9.8	0.59
13.0	2.8	5.9	59	1.2	11.8	0.58
15.0	2.5	6.2	62	1.2	13.8	0.61
19.0	0.7	8.0	80	1.2	17.8	0.59

NOTA: Columna 3 = 8.7 - col 2 col 4 = $\frac{300}{3}$ x col 3 col 5 (fig 7b)

col 6 = col 1 - col 5 col 7 = $\left(\frac{\text{col 6}}{\text{col 4}}\right)^{1/3}$

po para las botellas incubadas. Tabular una curva DBO-tiempo, determinar la constante de rapidez carbonosa k, DBO_5 y calcular DBO_L.

SOLUCION

En las columnas 3 y 7 de la tabla 4 se muestran los cálculos necesarios y los valores que se obtuvieron. El valor k y DBO_5 se incluyen en la fig 7. La DBO_L estimada es

$$DBO_L = \frac{DBO_5}{1 - 10^{-5k}} = \frac{35}{1 - 10^{-5x0.08}} = 58 \text{ mg/}\ell$$

Debe notarse que los tres últimos puntos de la fig 7a están relacionados con la DBO nitrogenosa; por esa razón se excluyeron.

A continuación se da otro ejemplo tomado de la ref 24.

EJEMPLO 16

Con los datos siguientes determinar el valor de k y de DBO_L para el desecho bajo prueba

Tiempo en días	0.5	1	2	3	4	5	7	10	15
DBO, en mg/l	5	20	90	160	200	220	260	285	320

SOLUCION

La ec 28 puede escribirse

$$DBO_t = DBO_L \ (1 - e^{-k't}) \qquad (30)$$

donde

e base del log natural, 2.718

$k' = 2.3\ k$

Thomas (ref 25) utilizó la similitud de la expansión de la serie de $(1 - e^{-k't})$ y de $k't(1 + (k't/6))^{-3}$, y desarrolló una fórmula aproximada

$$DBO_t = DBO_L \cdot k't \ (1 + k't/6)^{-3} \qquad (31)$$

Esta ecuación puede ponerse en forma lineal como

$$(t/DBO_t)^{1/3} = (k' \cdot DBO_L)^{-1/3} + k'^{2/3} t/(6DBO_L^{1/3})$$

Una gráfica de $(t/DBO_t)^{-1/3}$ vs t, debería resultar en una línea recta con una pendiente de $k'^{2/3}/(6DBO_L^{1/3})$ y una intersección de $(k' \cdot DBO_L)^{-1/3}$ en $t = 0$. De esta manera, primero se dibujan los datos como se muestra en la fig 8a, de di-

cha figura se obtiene un periodo de adaptación (lag time) de 0.8 días y se elabora la tabla 5.

TABLA 5. DATOS DE LA DBO-TIEMPO

Tiempo, en días	Tiempo corregido, en días	DBO, en mg/l	$(t/DBO)^{1/3}$
0.5	...	5	
1.0	0.2	20	0.22
2.0	1.2	90	0.24
3.0	2.2	160	0.24
4.0	3.2	200	0.25
5.0	4.2	220	0.27
7.0	6.2	260	0.29
10.0	9.2	285	0.32
15.0	14.2	320	0.35

A partir de la tabla 5 puede hacerse una gráfica, como la que se muestra en la fig 8b, que resulta en:

$$Pendiente = k'^{2/3}/(6DBO_L^{1/3}) = 0.0108$$

$$(k'DBO_L)^{-1/3} = 0.22$$

El resolver estas dos ecuaciones simultáneas conduce a:

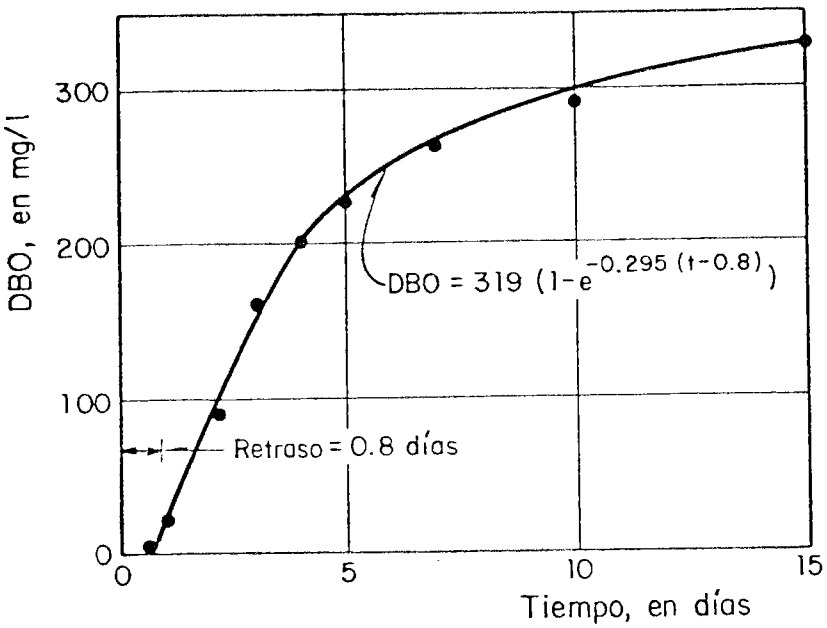


Fig 8a. DBO ejercida vs tiempo

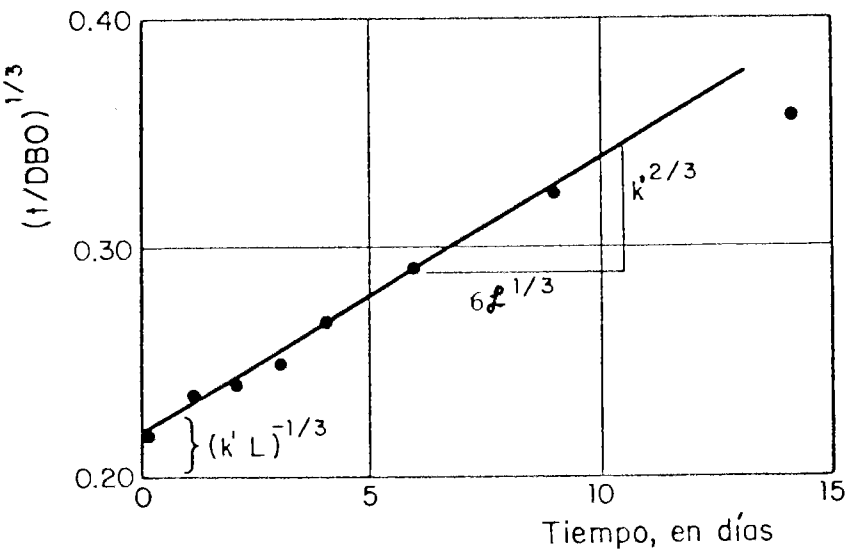


Fig 8b. Determinación gráfica de k' y L.
(L = DBO$_L$)

$$k' = 0.295/día$$

$$k = k'/2.3 = 0.295/2.3 = 0.128/día$$

$$DBO_L = 319\ mg/\ell$$

Por tanto, la ecuación de DBO para este desecho será:

$$DBO_t = 319\ (1 - 10^{-0.128(t-0.8)})$$

Esta es la ecuación que corresponde a la fig 8a. No todos los datos experimentales se ajustan a la ecuación teórica, pero los que mejor se ajustan generalmente caen entre dos y diez días.

La constante de rapidez k varía con la temperatura; la ecuación siguiente se utiliza para corregir dicha variación (ref 26)

$$k_{(T)} = k_{(20)}(1.047^{T-20}) \qquad (32)$$

donde

$k_{(T)}$ constante de rapidez a T °C

$k_{(20)}$ constante de rapidez a 20 °C

T temperatura, en °C

Owen (ref 27) sugirió los siguientes procedimientos para de-

terminar los parámetros de la curva de la DBO

Supóngase, por ejemplo, tres valores de la DBO observados: 62, 94 y 110 en 1.3, 2.2 y 3.4 días, respectivamente. Siga la figura 9 a medida que avance en el procedimiento.

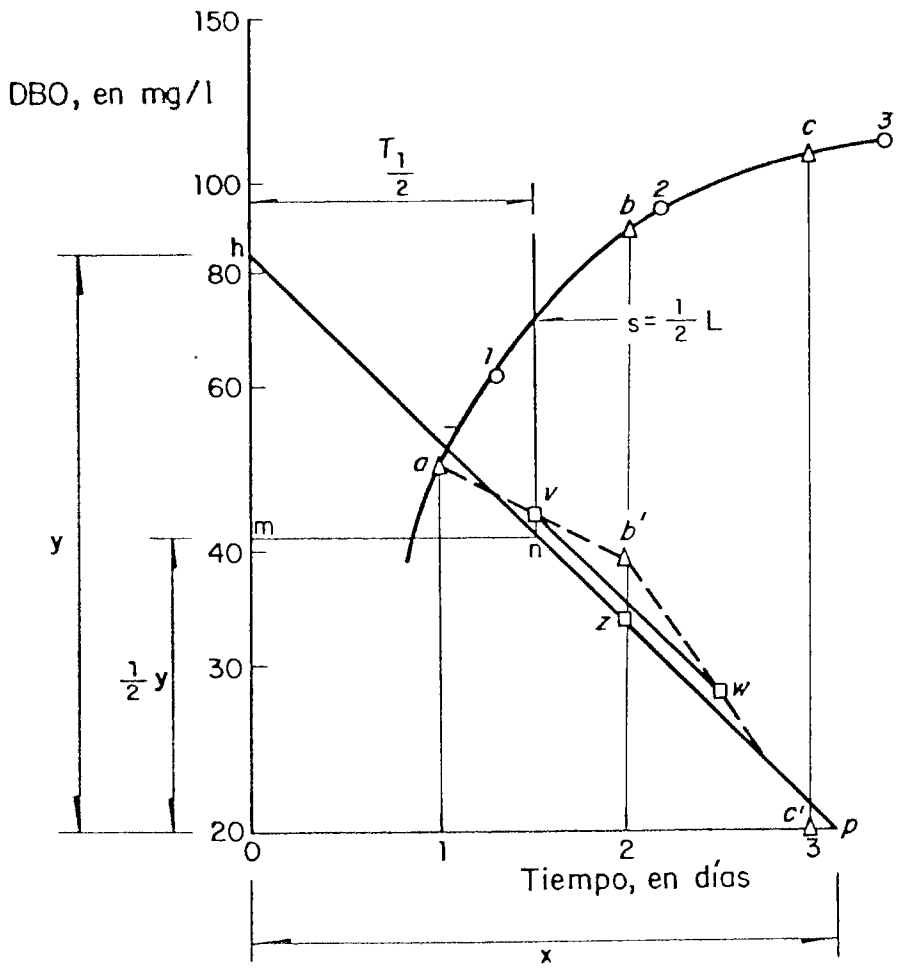


Fig 9. Gráfica de parámetros de la DBO

1. Dibújense los tres valores de *DBO* sobre un papel semilogarítmico, en el cual la escala de los logaritmos representará la *DBO* y la escala aritmética el tiempo.

2. Con la ayuda de un curvígrafo dibújese la curva que mejor se ajuste.

3. Localícense en la curva los puntos relacionados con los días 1, 2 y 3. Aplicando los valores supuestos, los valores de *DBO* para los días 1, 2 y 3 serán 49, 88 y 108, respectivamente.

4. Hagánse dos sustracciones sucesivas. En el caso del ejemplo, estas dos sustracciones serán 88 - 49 = 39, y 108 - 88 = 20.

5. Tabúlense el valor de la *DBO* de un día y los dos números que se obtuvieron a partir de los dos últimos puntos. En el ejemplo; los puntos serán (1,49), (2,39) y (3,20).

6. Dibújese la línea recta que mejor se ajuste entre estos tres puntos.

7. Tabúlese el intervalo de vida media, $T_{1/2}$. Fíjese un valor m en la ordenada; esto es $h/2$, que es 84/2 = 42

en el ejemplo. La longitud de la línea m-n, paralela a la abscisa, es igual a $T_{1/2}$ o sea 1.5 días en el ejemplo.

8. De n, proyéctese una línea recta normal a la abscisa. El punto s, la intersección de esta línea y la curva de DBO, indica el 50 por ciento de la DBO_L, que es 72 en este ejemplo; por tanto, DBO_L será 2 x 72 = 144 mg/l.

9. El valor de k se determina mediante

$$k = \frac{y}{xd} \qquad (33)$$

donde

y longitud de h, por ejemplo, en mm

x longitud de p, en la misma unidad que y

d longitud de un ciclo logarítmico del papel dividido por la longitud de un día; ambas en la misma unidad de longitud

Para este ejemplo:

$$y = 79 \text{ mm}$$

$$x = 79 \text{ mm}$$

Longitud de un ciclo de papel utilizado = 5 pulg

Longitud de un día en la escala aritmética = 1 pulg

$$d = 5/1 = 5$$

$$k = 79/(79 \times 5) = 0.2/día$$

Con la ec 30, el valor para DBO_5 se vuelve

$$DBO_5 = 144\ (1 - 10^{-0.2x5}) = 130\ mg/\ell$$

Nótese que 130/144 = 0.90 contra los valores generalmente aceptados de 0.60 a 0.70 para las aguas de desecho domésticas normales. Otros métodos para evaluar gráficamente las constantes de la curva de *DBO* pueden encontrarse en las refs 28 y 29.

9. TECNICAS EXISTENTES PARA MEDIR LA *DBO*

Hasta este punto se han tratado ecuaciones que pueden usarse para calcular la *DBO*. Un modelo es simplemente una ecuación que necesita datos de entrada para poder producir una respuesta. Dónde y cómo se obtienen datos de entrada es, para todo propósito práctico, una cuestión técnica que implica un análisis de laboratorio. En este capítulo se presentan dichas técnicas; una buena técnica y un procedimiento confiable son extremadamente importantes, ya que de otro modo la utilización de basura resultará en la producción otro tipo de basura.

Las técnicas disponibles para medir la *DBO* son:

1. Método de dilución

    a) Pipetear directamente

b) Porcentaje de mezcla

2. Método directo

3. Métodos manométricos

4. Método por electrólisis

5. Método del cilindro (la ref 30 tiene una descripción del método).

A continuación se presentarán estos métodos con más o menos detalle según su popularidad y uso potencial.

METODOS DE DILUCION

Hay dos tipos de métodos de dilución: dilución estándar y dilución en jarra.

Aquí se explica el de dilución estándar; para el método de dilución en jarra consúltese la ref 30.

El método de dilución estándar se ha analizado en *Standard Methods* (ref 8). Cuando se hace mediante pipeteo directo en una botella de *DBO* de 300 ml, su procedimiento es bastante sencillo.

A. Equipo

1. Botellas de *DBO* de 300 ml completas con tapones de vidrio esmerilado

2. Tapas para botella de *DBO*, similares a los Hach Cat No 2419-06 (ref 31)

3. Incubadora, 20 °C

4. Pipetas graduadas de 10 ml, con un diámetro en la punta de 1/32 a 1/6 pulg

5. Medidor de oxígeno y sensor, similares a los YSI, Hach Cat 16381-100 (ref 31)

6. Garrafón de agua de dilución equipado con sifón y dispositivos de aeración.

B. Reactivos

1. Agua destilada de alta pureza

2. Solución amortiguadora de fosfato. Se disuelven 8.5 g de KH_2PO_4, 21.75 g de K_2HPO_4, 33.4 g de $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$, y 1.7 g de NH_4Cl en agua destilada; completar a un litro.

Esta solución debe tener un pH de 7.2 sin ajustarla

3. Solución de sulfato de magnesio. Se disuelven 22.5 g de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ en agua destilada; completar a un litro

4. Solución de cloruro de calcio. Se disuelven 27.5 g de $CaCl_2$ en agua destilada; completar a un litro

5. Solución de cloruro férrico, disuelva 0.25 g de $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ en agua destilada y afore a 1 l

6. Agua de dilución. Adicione un mililitro de cada una de las soluciones 2, 3, 4 y 5 por cada litro de agua destilada. Guárdela en la incubadora durante por lo menos 24 h. Esta agua no debe tener una disminución de *OD* de más de 0.2 mg/l, después de incubarla 5 días a 20 °C

C. Procedimiento

1. Llenar completamente por lo menos tres botellas, pasando por sifón el agua de dilución. Colocar los tapones, aplicar el sello de agua y colocar las tapas a las botellas de *DBO*

2. Hacer por lo menos tres diluciones de muestra usando la tabla 6 o los procedimientos que se describen en la ref

32. Pipetear las muestras en las botellas de *DBO* (un tamaño de muestra por botella) y pasar con cuidado por sifón agua de dilución de la jarra a la botella de *DBO* cerca de la superficie del agua. Detener el paso del agua cuando el nivel sea adecuado en la botella de *DBO*. Colocar el tapón; aplicar el sello de agua y la tapa. Evitar que queden atrapadas burbujas de aire en las botellas.

3. Incubar las botellas de *DBO* durante cinco días ± 2 h. Medir el *OD* de cada botella al final del tiempo de incubación y seguir el método gráfico que ya se mencionó.

Si la muestra no tiene poblaciones microbianas adecuadas, el agua de dilución debe inocularse según *Standard Methods* (ref 8). Conviene consultar la misma fuente para el tratamiento de muestras de desperdicios tóxicos y/o cloradas.

En la técnica de mezcla por porcentaje, se preparan varias diluciones de la muestra. Puede usarse la tabla 6 como guía. El agua de dilución, inoculada si es necesario, se pasa por sifón a una probeta graduada de 1 000 ml hasta aproximadamente la marca de 500 ml, sin arrastre de aire. Luego se agrega una cantidad adecuada de la muestra mezclada a la probeta, la cual se llena con agua de dilución hasta obtener un litro. El contenido de la probeta graduada se mezcla correctamente y

luego se pasa por sifón a las botellas de DBO. Las botellas se incuban durante cinco días, después de los cuales se mide el oxígeno disuelto.

TABLA 6. DBO MEDIBLE CON VARIAS DILUCIONES DE MUESTRAS (REF 33)

Usando porcentajes de mezclas		Pipeteando directamente en botellas de 300 ml	
Mezcla, en porcentaje	Intervalo de la DBO	ml	Intervalo 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

Ejemplo: Supóngase que la DBO_5 estimada para una muestra es 150 mg/l. Este número cabe en la variación de 100-350 mg/l; por tanto, selecciónense tres tamaños de muestra, de 1, 2 y 5% de mezcla.

METODO DIRECTO

Este método usualmente se limita a una muestra cuya DBO_5 no excede 7 mg/l. La muestra se aerea para llevar el nivel de *OD* casi a la saturación a 20 °C. Por lo menos tres botellas de *DBO* se llenan con la muestra y al menos dos se incuban durante un mínimo de cinco días. Se analiza inmediatamente el *OD* de por lo menos una botella. Después de cinco días, se mide el *OD* de las botellas sobrantes. La DBO_5 se calcula restando los resultados de cinco días del resultado del día 0.

METODOS MANOMETRICOS

Hay diferentes versiones de métodos manométricos, pero todos siguen los mismos principios básicos. Como su nombre lo indica, existe en ellos un cambio físico, que no es otro que el cambio de presión en el sistema. El aparato básico es el respirómetro de Warburg. Algunas versiones de este son los aparatos de Sierp (ref 34), de *DBO* de Hach (ref 35), de Barcroft (ref 36) y de Clark (ref 37). Como el aparato de *DBO* de Hach es fácil de operar y no es costoso, se explica brevemente aquí.

El aparato de *DBO* de Hach combina principios de funcionamiento del respirómetro de Warburg y del aparato de Sierp, con

algunas modificaciones que simplifican el sistema. Se usa un manómetro cerrado en un extremo para impedir el efecto de la presión atmosférica y cambios de temperatura. La muestra se mezcla mediante un agitador magnético. La parte del reactor consiste en una botella de una pinta, de color café, y un pabilo humedecido con cuatro gotas de KOH al 45% para la absorción de CO_2. El manómetro da una lectura directa del consumo de oxígeno. Una gráfica sencilla de la cantidad de oxígeno consumido contra el tiempo dará tanto la DBO como la tasa de reacción. La fig 10 muestra el aparato en detalle (ref 35). El método manométrico en general ofrece las ventajas siguientes:

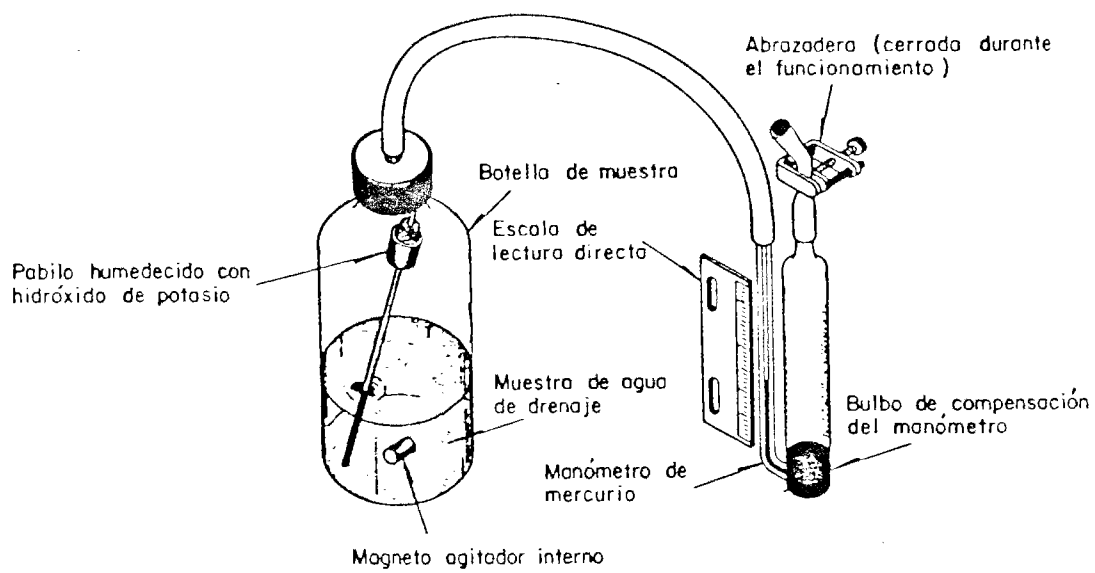


Fig 10. Diagrama de una celda del aparato de Hach

1. La muestra no se diluye

2. No se agrega ningún nutriente o amortiguador

3. Tiene una capacidad de demanda de oxígeno que es varias veces la de la técnica de la botella de dilución

4. Toma menos tiempo obtener los resultados

5. La muestra se mezcla continuamente

6. Puede usarse una muestra de mayor tamaño

7. Es más preciso que el método de dilución

8. Mide tanto la rapidez como la demanda total de oxígeno

9. Proporciona suficientes datos para tabularse e inspeccionarse para tiempo de retraso (lag time), nitrificación y demás

10. No necesita una determinación de *OD*

Entre las desventajas están:

1. La mayor parte de los aparatos manométricos son relativa

mente costosos

2. En la mayoría de los casos, se necesita un operador bien preparado para las mediciones manométricas.

Las refs 38 a 40 contienen mayor información acerca de mediciones manométricas.

METODO POR ELECTROLISIS

Clark (ref 37) desarrolló este método, que combina los principios del manométrico con el de electrólisis. Por esto, el aparato se considera a veces como manométrico y en ocasiones como un aparato de electrólisis. Básicamente, es un dispositivo manométrico en el cual la caída de presión en el sistema acciona un interruptor eléctrico para compensar el oxígeno consumido por el proceso de electrólisis. La corriente para producir el oxígeno se mide de acuerdo con la ley de Faraday y luego se relaciona con la *DBO* de la muestra. En la fig 11 se presenta el aparato (ref 41). Tiene la ventaja de ser fácil de accionar y de poderse conectar a una grabadora. Sin embargo, es costoso y únicamente puede efectuarse una determinación de *DBO* a la vez.

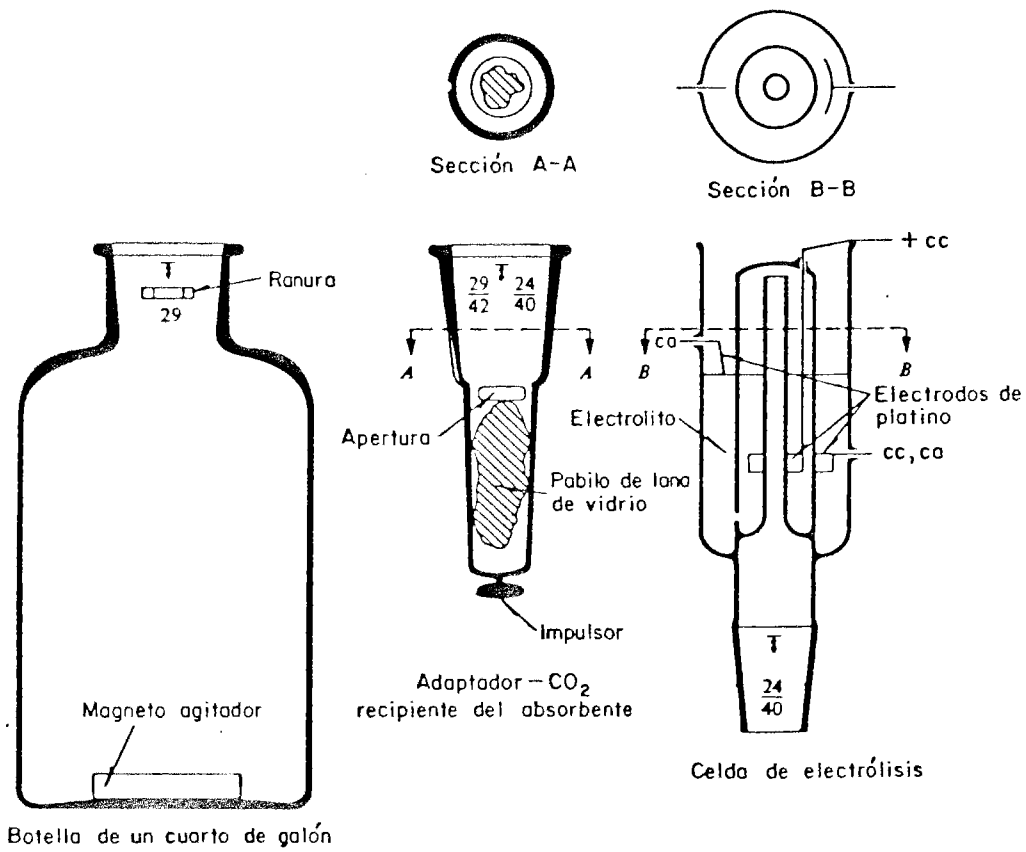


Fig 11. Aparato para demanda bioquímica de oxígeno

10. RECOMENDACIONES

En los capítulos anteriores se presentaron diferentes métodos para calcular y medir la *DBO*. Con ello se dejó al lector frente al problema de cómo escoger una técnica adecuada y el aparato que concuerde con ella. Lo que sigue se dedica a este problema de manera breve.

A. Selección de la técnica

Al escoger una técnica, la primera pregunta que se debe contestar es qué tan precisa y exacta es la técnica. No hay que confundir exactitud con precisión. Exactitud significa qué tan cerca se encuentran los resultados de una medición del valor real, y la precisión, la *reproducibilidad* de una medición. Una buena técnica debe ser tanto exacta como precisa.

Una manera de contestar a la pregunta es hacer pruebas con muestras estandarizadas. Otra es indagar en la literatura y documentos disponibles; y una tercera opción es consultar a los profesionales relacionados con el área de interés. Si ninguna de dichas sugerencias resultan satisfactorias, entonces o se mejora la técnica o se recurre a métodos estadísticos, por ejemplo, obtener tantos resultados como sea posible con cualquier técnica disponible y analizar los resultados estadísticamente.

B. Selección del aparato

Esta es la parte difícil del problema. El autor adquirió mucha experiencia en la selección de equipo para diferentes propósitos y lugares. El mejor consejo que se puede dar al respecto, se presenta a continuación:

1. Asegurarse de que realmente se necesita el aparato

2. Reunir catálogos, literatura y documentos técnicos acerca del aparato fabricado por diferentes compañías de diversos países

3. Tratar de localizar algunos de los aparatos que están funcionando. En caso positivo, visitar el lugar y hacer preguntas acerca de la edad, disponibilidad de refacciones

y servicios, mantenimiento y funcionamiento del sistema.

4. Clasificar el aparato en una tabla de información tal como: ¿Hay alguna agencia local *responsable?* ¿Se encuentra el país de origen cerca? ¿Cuáles son los precios? ¿Características? ¿El fabricante es confiable? ¿Cuánto cuesta? información sobre el análisis de costos se encuentra en la ref 42.

5. Tener mucho cuidado al asegurar la disponibilidad de refacciones. Esto es muy importante, ya que con ello se garantiza la continuidad de uso del aparato.

6. No ser demasiado crédulo cuando el vendedor promete un buen servicio.

7. Antes de comprar, solicitar el diagrama técnico del sistema y estudiarlo cuidadosamente. Puede obtenerse mucha información de él. En caso contrario, consultar a otras personas que pueden estar más familiarizados con el aparato. Normalmente, es factible obtener con facilidad la siguiente información a partir del diagrama y manual de servicio:

   a) ¿Qué tan específicas son las partes?

b) ¿Qué tan fácilmente pueden alcanzarse, desmontarse o remplazarse las partes?

c) ¿El diagrama del circuito incluye accesorios para modificación futura?

d) Comparar la variación de potencia de su área con la tolerancia esperada del circuito

e) ¿Cómo se protegen los circuitos?

8. Con base en esa información hacer la selección e incluir todas las refacciones necesarias en la lista de compras.

9. Después de adquirir el equipo, leer inmediatamente y con cuidado todos los documentos que se proporcionaron y accionar el sistema de acuerdo con estos. Finalmente, hacer unas cuantas pruebas y luego permitir que un asistente lo maneje.

10. Asegurarse que el vendedor firme los papeles de garantía. Utilizar el aparato tanto como se pueda durante el periodo de garantía.

11. RECONOCIMIENTO

El autor desea expresar su agradecimiento a Jose Luis Fernández Zayas por su estímulo durante la elaboración de este escrito; a Simón González Martínez y Ana Victoria Alcántara por su gran contribución y correcciones a la versión en español y a Roberto Llanas y Maximino Reséndiz por su atinada labor editorial.

12. REFERENCIAS

1. Frankland, E, "First report of the rivers pollution control commission of 1868", *Royal Commission*, Quinto informe, Inglaterra (1908)

2. American Public Health Association, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, Decimocuarta edición, APHA, Wáshington, DC (1976)*

3. Gamon, J J, "River and laboratory BOD rate considerations", *Journal of the Sanitary Engineering Division*, Procs ASCE, 92, SA1, 135 (1966)

---

* Se han señalado con asterisco las referencias que, según el autor del presente trabajo, son de especial interés para el lector

4. Clark, W, "BOD: A re-evaluation", *Water and Sewage Works*, EUA (may 1974)

5. Gaudy, A F, Jr, *Biochemical oxygen demand*, en Water Pollution Microbiology, editor, R Mitchell, John Wiley and Sons, Nueva York (1972)

6. Mowat, Anne, "Measurement of metal toxicity by biochemical oxygen demand", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 48, 5, EUA (may 1976)

7. Eckenfelder, W Wesley, Jr, *Industrial water pollution control*, McGraw-Hill Book Co, Nueva York (1966)

8. American Public Health Association, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, Decimotercera edición, APHA, Wáshington, DC (1971)

9. Marske, D M y Polkowski, L B, "Evaluation of methods for estimating biological oxygen demand parameters", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 44, 10, EUA (1972)

10. Metcalf y Eddy Inc, *Wastewater engineering treatment, disposal, and reuse*, Segunda edición, McGraw-Hill Book Co, Nueva York (1979)

11. McGhee, T J, Torrens, R L y Smaus, R J, "BOD determinations on feedlot run-off", *Water and Sewage Works*, EUA (jun 1972)

12. Bochinski, J, "Measuring oxygen demand? Take your pick-TC, BOD, COD, TOC, and TOD", *Pollution Engineering*, EUA (ene 1973)

13. Klein, L y Gibbs, Ch R, "Graphical method for calculating biochemical oxygen demand", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 51, 9, EUA (sep 1979)*

14. Arthur, R M, "Let's upgrade the BOD test", *Water and Sewage Works*, EUA (jun 1974)

15. Hammer, M J y MacKichan, K A, *Hydrology and quality of water resources*, John Wiley and Sons, Nueva York (1981)*

16. United States Environmental Protection Agency, *Wastewater laboratory procedures and chemistry*, Región VII, Kansas City, Mis (jun 1975)*

17. Young, J C y Clark, J W, "Second order equation for BOD", *Journal of the Sanitary Engineering Division*, Procs ASCE, 91 (feb 1965)

18. Discussions by K Keshavan, Walter J Weber, Jr and Roger Carlson, ASCE, Sanitary Engineering Division, SA3 (jun 1965)

19. Discussions by Gerald M Leigh, Wilber A Blain, Edward D Schroeder, J D Norman and A W Bush, ASCE, Sanitary Engineering Division, SA5 (oct 1965)

20. Closure by James C Young and John W Clark, ASCE, Sanitary Engineering Division, SA2 (abr 1966)

21. Landine, R C, "Second order and first order kinetics for BOD data", *Water and Sewage Works*, Reference number, EUA (1971), R-45

22. Sheehy, J P, "Rapid methods for solving first-order equations", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 32, 6, EUA (jun 1960)

23. Payrow, H G, *Sanitary engineering*, Primera edición, segunda reimpresión, International Textbook Co, Scranton, Penn (1943)

24. Steel, E W y McGhee, T J, *Water supply and sewerage*, Quinta edición, McGraw Hill Book Co, Nueva York (1979)*

25. Thomas, H A, Jr, "Graphical determination of BOD curve constants", *Water and Sewage Works*, 97, EUA (1950)*

26. Benedict, A H y Carlson, D A, "The real nature of the Streeter-Phelps temperature coefficient", *Water and Sewage Works*, 117, EUA (feb 1970)*

27. Sletten, O, "Determining BOD curve parameters", *Water and Sewage Works*, EUA (abr 1966)

28. Bagchi, D y Chaudhuri, N, "Simplified graphical evaluation of BOD curve constants", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Parte 2, EUA (may 1970)

29. Velz, C J, *Applied stream sanitation*, Wiley-Interscience, Nueva York (1970)*

30. Landine, R C, "Prediction of dissolved oxygen levels in the South Saskatchewan River", Tesis doctoral, *Universidad de Saskatchewan*, Saskatoon, Saskatchewan (1970)

31. Hach Company, *Products for analysis*, Loveland, Col, EUA (1982)

32. Brown, J A, Jr, Lynwood, J P, Rice, C y Lines, J M, "BOD: Determining the necessary dilution technique", *Water and Sewage Works*, EUA (may 1973)

33. Sawyer, C N y McCarty, P L, *Chemistry for environmental engineering*, Tercera edición, McGraw Hill Book Co, Nueva York (1978)*

34. Sierp, F, "A new method for determining biochemical oxygen demand", *Industrial and Engineering chemistry*, 20 EUA (1928)

35. Tool, H R, "Manometric measurement of the biochemical oxygen demand", *Water and Sewage Works*, EUA (jun 1967)

36. Barcroft, J, "Respiratory function of the blood", *Cambridge University Press*, Londres (1914)

37. Clark, J W, "Continuous recording of BOD determination", *Water and Sewage Works*, 107, EUA (1960)*

38. McKinney, R E, *Microbiology for sanitary engineers*, McGraw Hill Book Co, Nueva York (1962)*

39. Umbreit, W W, Burris, R H y Stauffer, J F, *Manometric techniques and related methods for the study of tissue metabolism*, Burgess Publishing Co, Minneapolis, Min (1984)*

40. Symons, J M y Labonte, R, "A procedure for continuous nitrification correction during Warburg respirometer studies", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 37, EUA (jun 1965)*

41. Clark, J W, Viessman, W, Jr y Hammer, M J, *Water supply and pollution control*, Tercera edición, Harper and Row Publishers, Nueva York (1977)*

42. Martínez, S, "Equipment buying decisions", *Chemical Engineering*, EUA (abr 1971).

13. BIBLIOGRAFIA

Ali, H I y Bewtra, J K, "Effect of turbulence on BOD testing", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 44, 9, EUA (sep 1972)

D'Alessando, P L y Characklis, W G, "Simple measurement technique for soluble BOD progression", *Water and Sewage Works*, 119, 9, EUA (sep 1972)

Dixon, N, "Graphic dissolved oxygen computation", *Civil Engineering*, EUA (mar 1971)

Elhalwagi, M M, "An engineering concept of reaction rate", *Chemical Engineering*, EUA (may 1971)

Gilbert, T W, Behymer, T D y Castaneda, H B, "Determination of dissolved oxygen in natural and wastewaters", *American Laboratory*, EUA (mar 1982)

Hammer, M J, "BOD determination for industrial wastewaters", *Water and Sewage Works*, Reference Number, EUA (1971)*

Hammer, M J, *Water and wastewater technology*, John Wiley and Sons, Nueva York (1975)

Heukelekian, H y Rand, M C, "Biochemical oxygen demand of pure organic compounds-A report of the research committee, FSIWA", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 27, 9, EUA (sep 1955)*

Janardan, K G y Schaeffer, "Oxygen demand parameters: Correlation of BOD_5 with COD", *Water and Sewage Works*, EUA (oct 1975)

Lewis, J W y Busch, A W, "BOD progression in soluble substrates", en cuatro partes, *Water and Sewage Works*, EUA (mar, abr, may y jun 1965)

Reynolds, J F, "Comparison studies of Winkler vs oxygen sensor", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 41, 12, EUA (dic 1969)

Reynolds, J F, Goellner, K A, "Statistical evaluation of BOD_5 vs ODI", *Water and Sewage Works*, EUA (ene 1974)

Sherrard, J H, Friedman, A A y Rand, M C, "BOD_5: Are there alternatives available?", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 51, 7, EUA (jul 1979)

Shriver, L E y Young, J C, "Oxygen demand index as rapid estimate of biochemical oxygen demand", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 44, 11, EUA (nov 1972)

Sundstrom, D W y Klei, H E, *Wastewater treatment*, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, Nueva Jersey (1979)*

Viraraghavan, T, "Communication - Correlation of BOD, COD and soluble organic carbon", *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 48, 9, EUA (sep 1976)

Young, J C y Clark, J W, "History of the biochemical oxygen demand test-research progress report", *Water and Sewage Works*, 112, 3, EUA (mar 1965).

INSTITUTO DE INGENIERIA
Sección editorial
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria
Coyoacán 04510, México, D F

Las *Series del Instituto de Ingeniería* publican trabajos de importancia producidos por los investigadores (ordinarios y visitantes) del propio Instituto. Se trata de contribuciones que, por su tema o extensión, no cabe que se publiquen en revistas científicas o libros.

Las *Series* constan de tres colecciones que se distinguen por su numeración y el color de sus cubiertas: 1) la serie ordinaria, en español, con cubierta azul y numeración natural, que publica trabajos de interés universal pero frecuentemente motivados por problemas nacionales; 2) la serie en lenguas extranjeras (inglés o francés), con cubierta gris y numeración precedida por la letra E, con trabajos sobre cuestiones de gran interés internacional o preparados con motivo de la participación en eventos de ese ámbito (suelen publicarse en esta colección preimpresos y sobretiros); 3) la serie orientada a la docencia, con cubierta ocre y numeración precedida de la letra D, que publica monografías sobre temas básicos de la ingeniería en respuesta a las necesidades de textos apropiados para algunos cursos universitarios.

Cada fascículo de las *Series* se publica con la aprobación técnica del Comité de Publicaciones del Instituto, basada en opiniones de árbitros internos y externos.

Todos los fascículos de las *Series del Instituto de Ingeniería* se venden al costo de impresión.