

Tema 8 – Ecología y Calidad de Agua

CI4102 Ingeniería Ambiental
Profesora Ana Lucia Prieto



¿Qué es la ECOLOGÍA?

Es el estudio de la **relación entre organismos y su medio ambiente**.

Tomando como medio ambiente las componentes **físicas, químicas y biológicas**.

Ejemplos de Estudios Ecológicos:

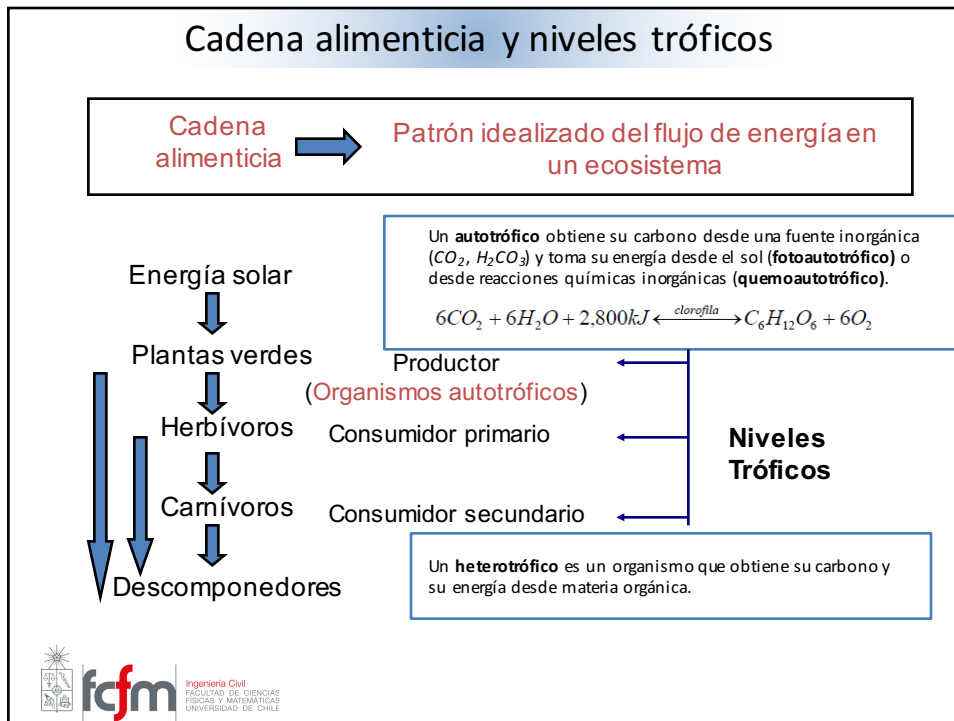
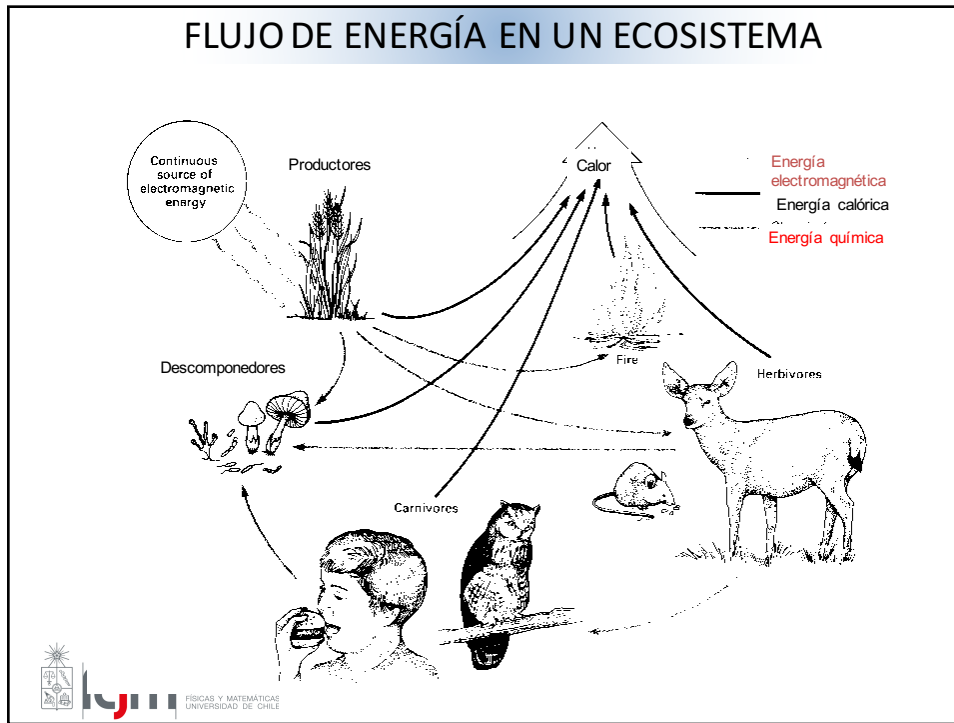
- Cómo afecta la **química del suelo** el desarrollo de ciertas especies vegetales
- Cómo afecta el **caudal de un río** el desarrollo de ciertas especies ícticas (Fauna íctica = Peces) **Caudales ecológicos**
- Cómo afectan las **descargas de aguas servidas** en un río o lago el desarrollo de seres vivos en dichos medio

Ecosistema = Ambiente abiótico (sin vida) + Biota (seres vivos)



Agua, aire, suelo





Bioacumulación y biomagnificación

Cada organismo necesita ingerir **varias veces su masa** para mantenerse vivo.

Sustancias no biodegradables son **magnificadas** al pasar de un nivel trófico a otro

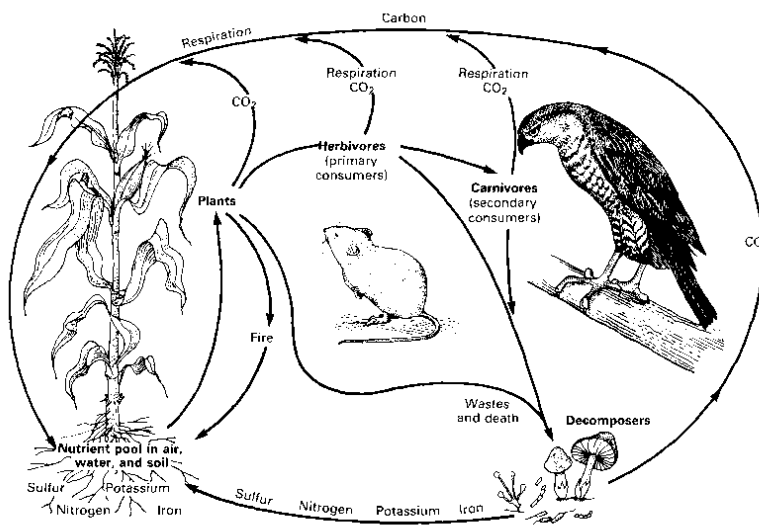
Por ejemplo, la concentración de DDT (diclorodifenil dicloroetano) puede aumentar en miles de veces en los tejidos grasos de los animales y aves carnívoras

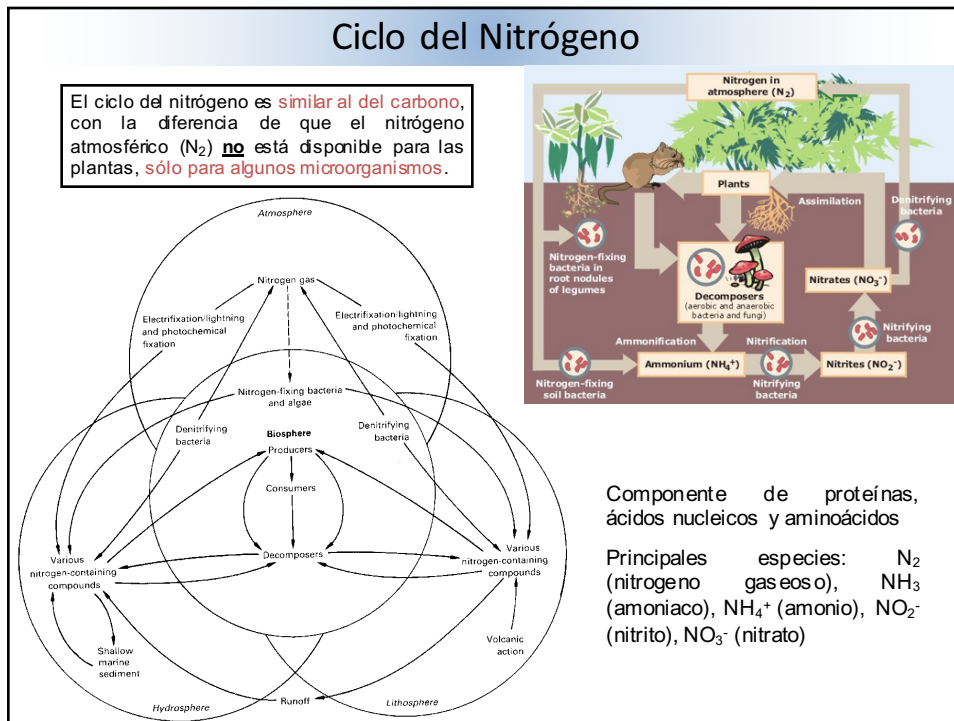
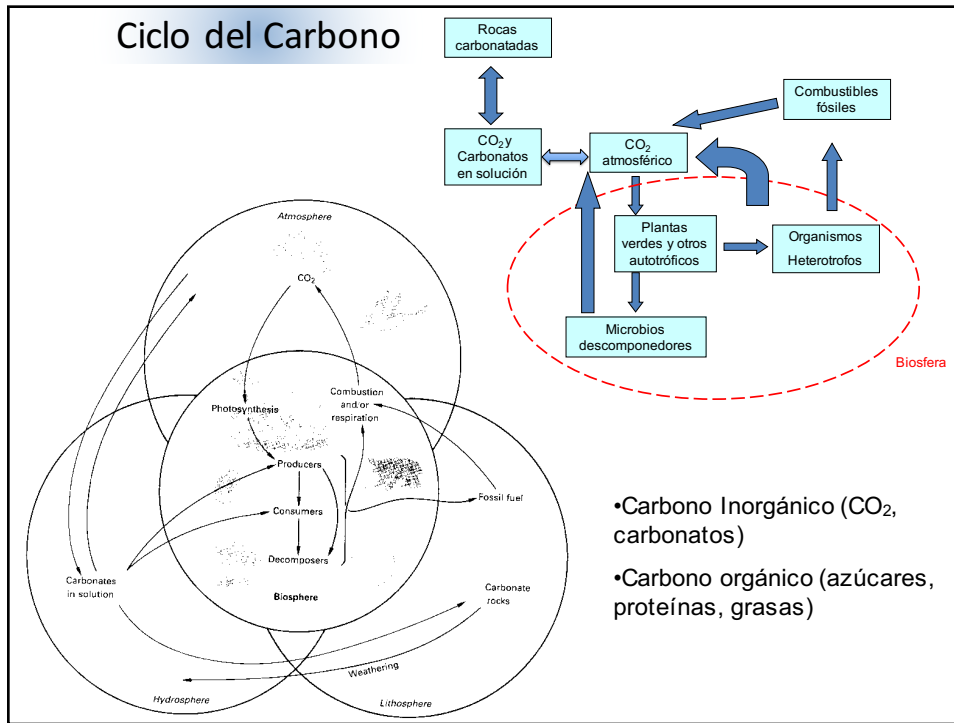
Se define el **Factor de Concentración**: $FC = \frac{\text{Concentración en organismo}}{\text{Concentración en agua}}$

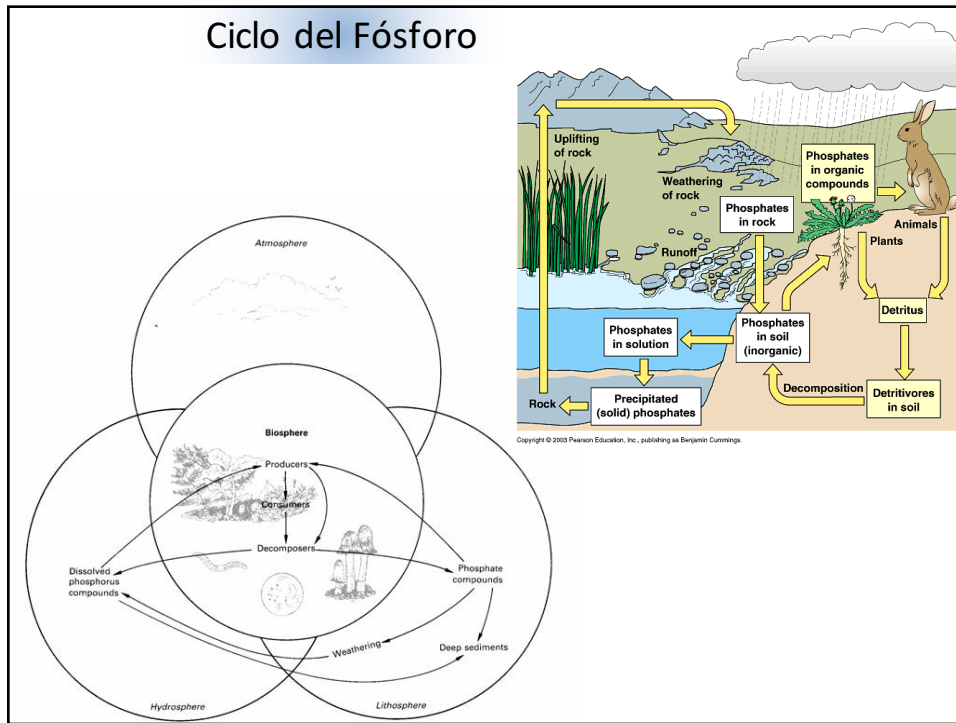
| Cadena Alimenticia | DDT (ppm) | Factor de Concentración |
|-----------------------|-----------|-------------------------|
| Agua | 0.00005 | 1 |
| Plancton | 0.04 | 800 |
| Peces pequeños | 0.094 | 18,800 |
| Peces depredadores | 1.33 | 26,600 |
| Aves (pequeños peces) | 3.91 | 78,200 |
| Aves (carroñeras) | 6.00 | 120,000 |
| | 22.6 | 460,000 |



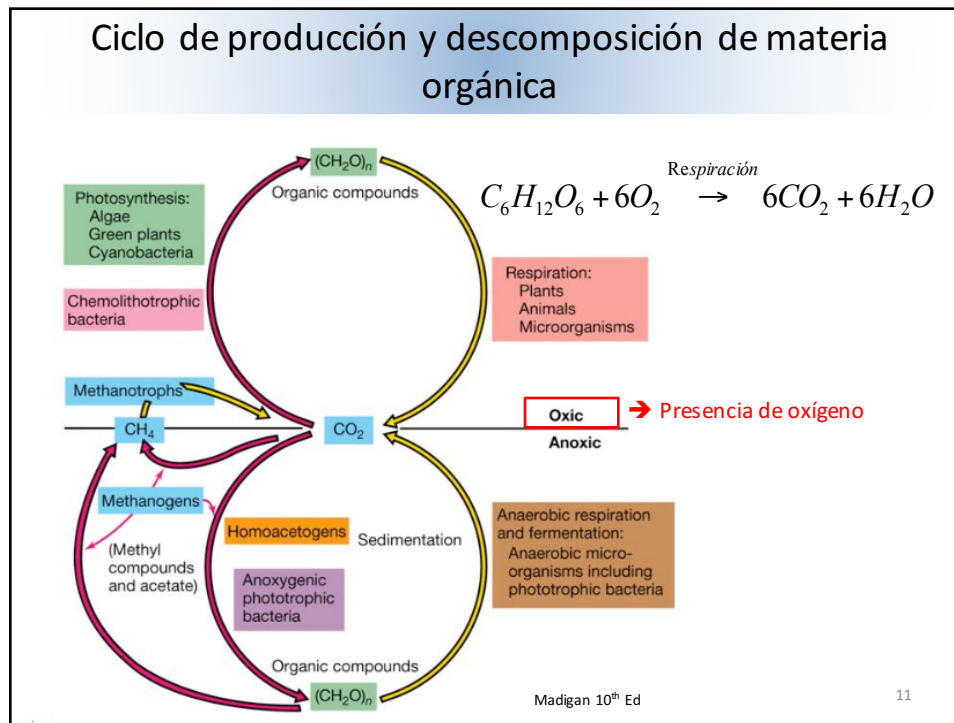
CICLOS DE NUTRIENTES (Carbono, Nitrógeno, Fósforo)







Materia Orgánica y Oxígeno



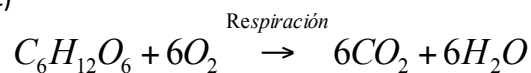
Demanda de Oxígeno

Oxígeno disuelto (OD) es uno de los parámetros más importantes que determinan la calidad del agua en fuentes superficiales. La reacción de mayor interés en aguas superficiales es la escasez de oxígeno.

El agua tiene una concentración particular de oxígeno cuando está en equilibrio con el aire/atmósfera.

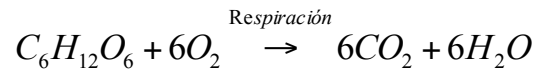
OD < 2~3 mg/L, peces mueren
 3 mg/L < OD < 4 mg/L, estrés en peces
 OD > 5 mg/L, peces sobreviven

Demanda de oxígeno (DO) – cantidad de oxígeno disuelto que se consume por un proceso en particular (e.g. degradación de un contaminante)



Demanda de Oxígeno

Demanda Teórica de Oxígeno (DTO) – Demanda de oxígeno que se calcula a partir de la estequiometría de la reacción. Cantidad de oxígeno necesaria para oxidar una sustancia hasta CO_2 y H_2O . Es necesario saber el compuesto de interés.



Demanda Química de Oxígeno (DQO) – Oxígeno necesario para oxidar cualquier material oxidable en solución. Es una medición experimental y el resultado de adicionar un oxidante fuerte (ácido crómico) a una solución. Similar a DTO pero usualmente mayor al DBO.



Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) – Oxígeno consumido por organismos aerobios mientras oxidan un material degradable en el agua.

Define cuánto material es biodegradable y si es posible usar métodos biológicos para control de contaminación.

13

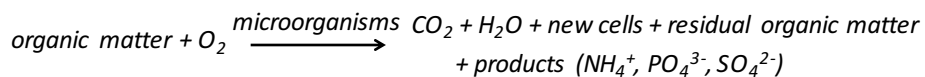
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

Oxígeno necesario para descomponer materia orgánica
en una muestra de agua

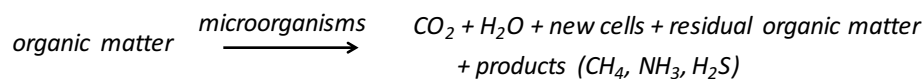
Se le ha dado atención históricamente porque...

Las bacterias descomponen (break-down) la materia orgánica en compuestos simples

Descomposición aeróbica



Descomposición anaeróbica



14


Medida del DBO

DBO₅ es un estandar de medida usado en plantas de tratamiento de agua



Día 1: Agregar agua con materia orgánica (o sustancia contaminante) + bacterias. Saturar la solución con aire (~ 8.24 mg/L a 25°C). Medir OD.

Cubrir e incubar a 20°C por un tiempo = t (5 days)





Medir OD a los 5 días. A medida que las bacterias consumen mat. org., también consumen O₂ (generando DBO)



Medidor de OD



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

¿Cómo realizar un test de DBO5 y DQO? (video):
https://www.youtube.com/watch?v=UEQzOjxC_Wo

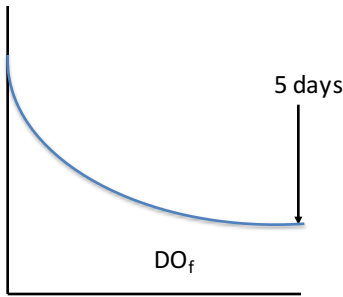
15

Medida del DBO

$$DBO = OD_i - OD_f$$


La degradación de DBO es una reacción de 1er orden

DO₀ = DO_i



Dissolved oxygen (mg/L)

Time (days)



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

16

Medida del DBO

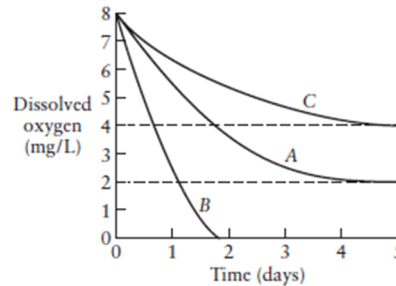


Figure 9.3 Decrease in dissolved oxygen in three different BOD bottles: A is a valid test for a 5-day BOD; B is invalid because it reaches zero dissolved oxygen before the fifth day; and C is the same as B but with prior dilution.

$$DBO_5 = (OD_i - OD_5) \times D$$

Factor de dilución se define como D

Por ejemplo, si se diluye la muestra 1:10 \rightarrow D = 10



17

Medida del DBO

Ej. Test de DBO_5 . Se espera que el DBO_5 esté dentro de 50-350 mg/L. Prepare varias diluciones.

| Botella # | Sample (mL) | OD_i (mg/L) | OD_f (mg/L) | D | DBO_5 (mg/L) |
|-----------|-------------|---------------|---------------|-----|----------------|
| 1 | 20 | 8.9 | 1.5 | 15 | 110 |
| 2 | 10 | 9.0 | 2.5 | 30 | 195 |
| 3 | 5 | 9.1 | 5.8 | 60 | 198 |
| 4 | 2 | 9.1 | 7.8 | 150 | 240 |


*Descartar test # 4 porque el decaimiento de OD < 2.0 mg/L y el volumen de muestra usado es muy pequeño.

Ejemplo de calc. \rightarrow Test #2: $DBO_5 = (OD_i - OD_5) \times D$

$$DBO_5 = (9 - 2.5) \times 30 = 195 \text{ mg/L}$$



18



El consumo de DBO es de 1er orden

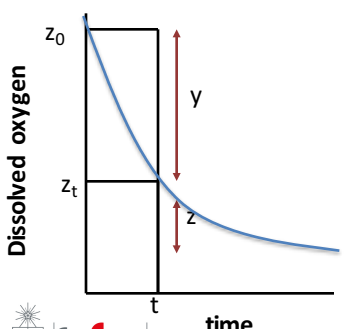
Balance de OD masa en reactor/botella de DBO

$\frac{dM}{dt} = \underset{0}{\text{Entradas}} - \underset{0}{\text{Salidas}} + \underset{0}{\text{Producción}} - \text{Consumo}$

$\frac{dz}{dt} V = -rV \rightarrow \frac{dz}{dt} = -k_1 z$


$k_1 = \text{constante cinética}$
 $z = \text{OD al tiempo } t \text{ (mg/L)}$

$$z = z_0 e^{-k_1 t}$$



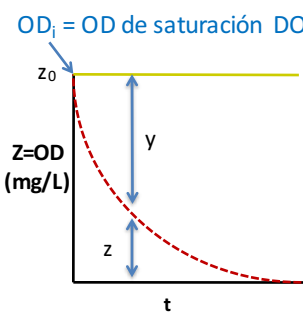
$L = z + y$

L también se llama DBO último o DBO_{ult}



Cómo se comporta el DBO en el tiempo?

$OD_i = \text{OD de saturación DO } (OD_{sat}) = z_0$



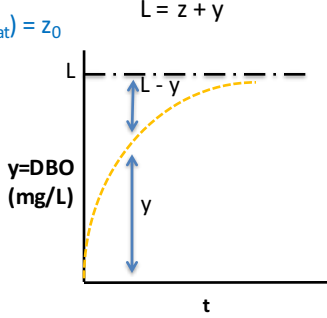
$z = z_0 e^{-k_1 t}$

$L - y = z_0 e^{-k_1 t}$

$y = L - L(e^{-k_1 t})$

$y = L(1 - e^{-k_1 t})$

$L = z + y$




Substituyendo $z = L - y$

$y = DBO_t, \text{ mg/L}$

$L = \text{DBO último, mg/L}$

$k_1 = \text{constante de deoxigenación base e, d}^{-1}$



¿Cómo se comporta el DBO en el tiempo?

DBO₅ no nos indica que tan rápido se consume el OD

El consumo de OD consumo depende de:

- Naturaleza del contaminante/compuesto
- Capacidad de los organismos de utilizar/degradar el compuesto
- **Temperatura**

La constante cinética es dependiente de la temperatura y tiene que modificarse acorde:

$$k_T = k_{20} \theta^{(T-20^\circ\text{C})}$$

$$\theta = 1.047 \text{ for } T > 20^\circ\text{C}$$

$$\theta = 1.135 \text{ for } 4^\circ\text{C} < T < 20^\circ\text{C}$$

TABLE 5.9 Typical values for the BOD rate constant k at 20 °C

| Sample | k (day ⁻¹) ^a | K (day ⁻¹) ^b |
|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Raw sewage | 0.35–0.70 | 0.15–0.30 |
| Well-treated sewage | 0.12–0.23 | 0.05–0.10 |
| Polluted river water | 0.12–0.23 | 0.05–0.10 |

^aLowercase k reaction rates to the base e .

^bUppercase K reaction rates to the base 10.

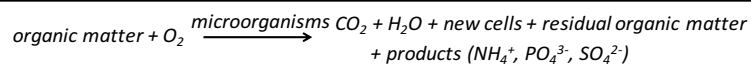
Source: Davis and Cornwell (1991).



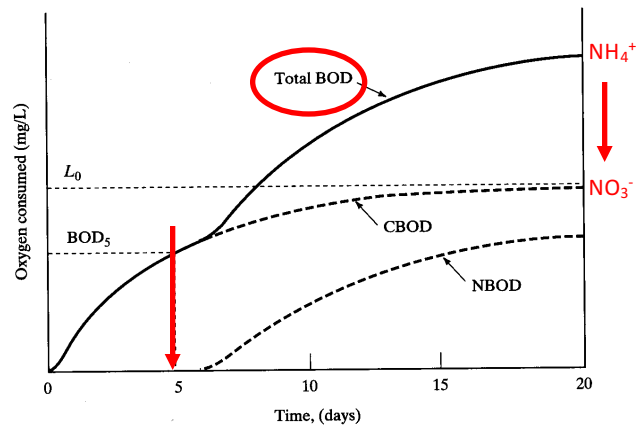
21

N-DBO

Hasta ahora sólo hemos considerado la **demanda carbónica de oxígeno**



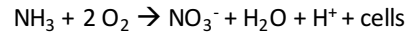
La oxidación de amonio ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$) también genera demanda biológica de oxígeno o N-DBO (NBOD en la gráfica)



22

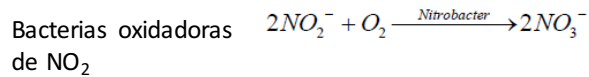
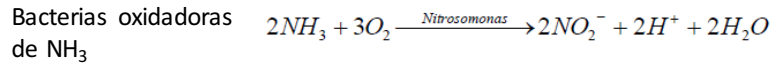
Demanda biológica de oxígeno por nitrógeno (N-DBO)

N-DBO se representa como:



Es particularmente importante en vertientes y ríos que viajan por más de 5 días.

La generan 2 tipos de bacteria



$$L = \text{DBO}_{\text{ult}} = a(\text{DBO}_5) + b(\text{NK})$$

L = BOD último (carbonáceo + nitrogenoso)

NK = Nitrógeno Kjeldahl (N orgánico + amonía) en mg/L

a and b = constantes (dependen de las características particulares del agua, estado de las especies químicas, etc.)

DBO en Ríos

Importancia del oxígeno disuelto

- $OD < 2 \sim 3$ mg/L, peces mueren
- $3 \text{ mg/L} < OD < 4$ mg/L, estrés en peces
- $OD > 5$ mg/L, peces sobreviven

La adición de material biodegradable an un cuerpo de agua puede generar una demanda de DO, lo que produce **deoxigenación**

Consumo de O_2 debido a DBO

Procesos:

- Consumo de oxígeno para descomponer materia orgánica (1^{er} orden)
- Descomposición de la materia orgánica (1^{er} orden)

A medida que un río/vertiente fluye, el contacto con el aire favorece su **reaeración** o re-disolución de O_2 en el agua (1^{er} orden en deficit de oxígeno)

O_2 reintroducido via deposición atmosférica



DBO en ríos y vertientes: Modelo de Streeter-Phelps

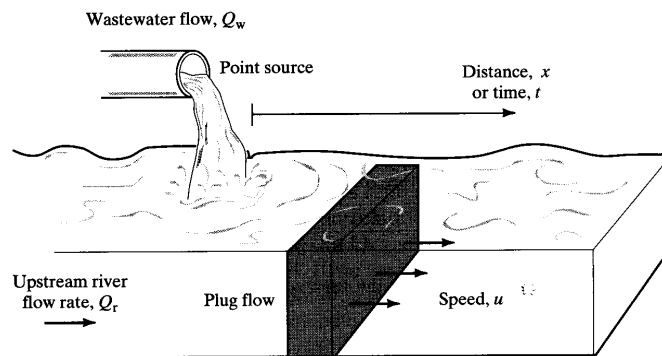
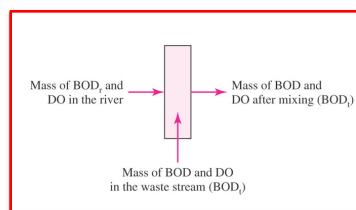


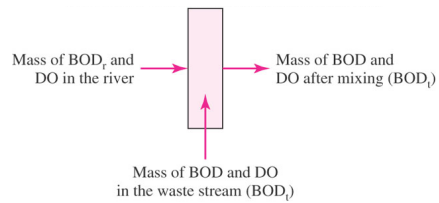
FIGURE 5.14 The point-source, plug flow model for dissolved-oxygen calculations.



En el punto de descarga,
asumimos condiciones
de mezcla completa



Descargas en ríos y vertientes



En el punto de descarga, asumimos condiciones de mezcla completa

BM en el pistón para encontrar Q_M , L_M , y OD_M en el punto de mezcla

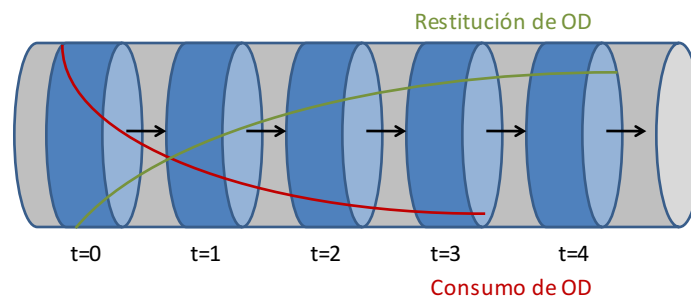
BM volumétrico: $Q_M = Q_R + Q_W$

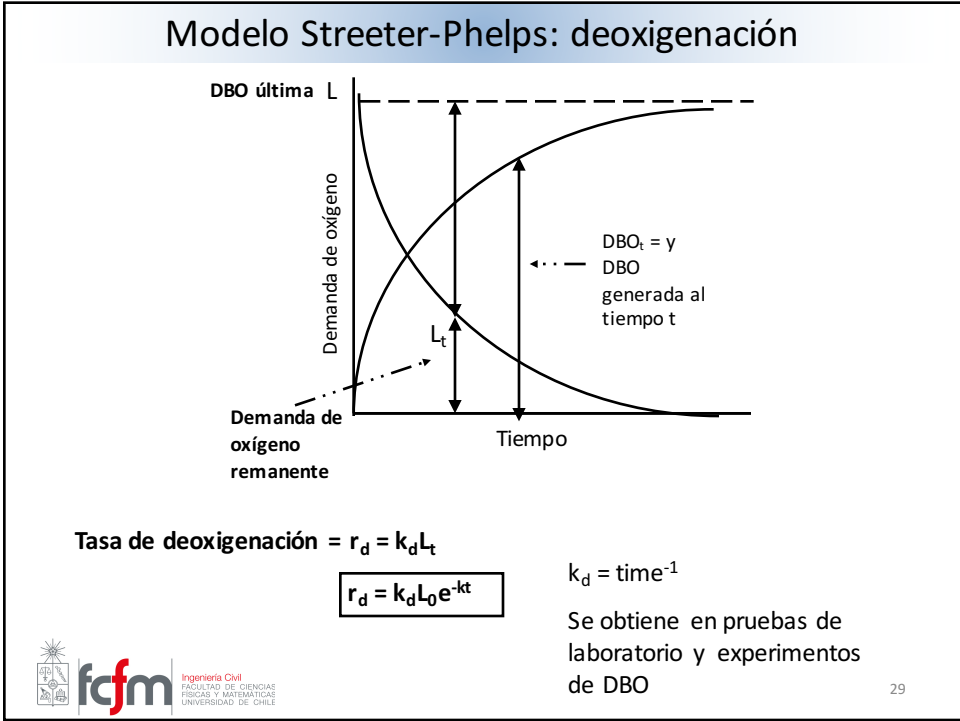
BM para la DBO_{ult} (mg/L): $L = \frac{Q_R L_R + Q_W L_W}{Q_M}$

BM para el OD (mg/L): $OD_M = \frac{Q_R OD_R + Q_W OD_W}{Q_M}$

A medida que el río fluye...

- Después de la mezcla inicial, el río se comporta como un PFR
 - OD es consumido por microorganismos que utilizan carbono orgánico
 - OD se reincorpora al río debido al equilibrio del agua con la atmósfera.





Desarrollo del modelo Streeter-Phelps: Reaireación

$$r_r = k_r D$$

Donde r_r es el déficit de oxígeno disuelto

$$D = S - z$$

D = Déficit de OD

S = Conc. de saturación de OD

z = OD en tiempo t

TABLE 5.10 Typical Reaeration Constants for Various Bodies of Water

| Water body | Range of k_r , at 20 °C (day ⁻¹) ^a |
|----------------------------------|---|
| Small ponds and backwaters | 0.10-0.23 |
| Sluggish streams and large lakes | 0.23-0.35 |
| Large streams of low velocity | 0.35-0.46 |
| Large streams of normal velocity | 0.46-0.69 |
| Swift streams | 0.69-1.15 |
| Rapids and waterfalls | > 1.15 |

^aBase e.

Source: Tchobanoglous and Schroeder (1985).



Oxygen Solubility Table

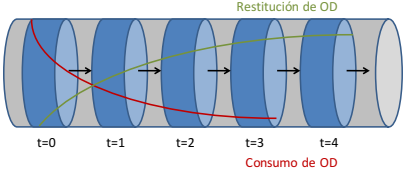
Fuente: USGS (<https://water.usgs.gov/cgi-bin/dotables>)

Solubility of oxygen in fresh water at various temperatures and pressures
[Solubility shown in milligrams per liter. Values based on published equations by Benson and Krause (1980 and 1984).
°C, degrees Celsius; mm Hg, millimeters of mercury]

| Temp. (°C) | Barometric Pressure (mm Hg) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 570 | 580 | 590 | 600 | 610 | 620 | 630 | 640 | 650 | 660 | 670 | 680 | 690 | 700 | 710 | 720 | 730 | 740 | 750 | 760 |
| 0 | 10.95 | 11.14 | 11.33 | 11.53 | 11.72 | 11.91 | 12.11 | 12.30 | 12.49 | 12.69 | 12.88 | 13.07 | 13.27 | 13.46 | 13.65 | 13.85 | 14.04 | 14.23 | 14.43 | 14.62 |
| 1 | 10.64 | 10.83 | 11.02 | 11.21 | 11.39 | 11.58 | 11.77 | 11.96 | 12.15 | 12.34 | 12.52 | 12.71 | 12.90 | 13.09 | 13.28 | 13.46 | 13.65 | 13.84 | 14.03 | 14.22 |
| 2 | 10.35 | 10.53 | 10.72 | 10.90 | 11.08 | 11.27 | 11.45 | 11.63 | 11.82 | 12.00 | 12.18 | 12.37 | 12.55 | 12.73 | 12.91 | 13.10 | 13.28 | 13.46 | 13.65 | 13.83 |
| 3 | 10.07 | 10.25 | 10.43 | 10.61 | 10.79 | 10.96 | 11.14 | 11.32 | 11.50 | 11.68 | 11.86 | 12.03 | 12.21 | 12.39 | 12.57 | 12.75 | 12.93 | 13.10 | 13.28 | 13.46 |
| 4 | 9.81 | 9.98 | 10.15 | 10.33 | 10.50 | 10.68 | 10.85 | 11.02 | 11.20 | 11.37 | 11.54 | 11.72 | 11.89 | 12.07 | 12.24 | 12.41 | 12.59 | 12.76 | 12.93 | 13.11 |
| 5 | 9.55 | 9.72 | 9.89 | 10.06 | 10.23 | 10.40 | 10.57 | 10.74 | 10.91 | 11.08 | 11.25 | 11.42 | 11.59 | 11.75 | 11.92 | 12.09 | 12.26 | 12.43 | 12.60 | 12.77 |
| 6 | 9.31 | 9.47 | 9.64 | 9.80 | 9.97 | 10.14 | 10.30 | 10.47 | 10.63 | 10.80 | 10.96 | 11.13 | 11.29 | 11.46 | 11.62 | 11.79 | 11.95 | 12.12 | 12.28 | 12.45 |
| 7 | 9.08 | 9.24 | 9.40 | 9.56 | 9.72 | 9.88 | 10.04 | 10.20 | 10.37 | 10.53 | 10.69 | 10.85 | 11.01 | 11.17 | 11.33 | 11.49 | 11.66 | 11.82 | 11.98 | 12.14 |
| 8 | 8.85 | 9.01 | 9.17 | 9.33 | 9.48 | 9.64 | 9.80 | 9.95 | 10.11 | 10.27 | 10.43 | 10.58 | 10.74 | 10.90 | 11.06 | 11.21 | 11.37 | 11.53 | 11.69 | 11.84 |
| 9 | 8.64 | 8.79 | 8.95 | 9.10 | 9.25 | 9.41 | 9.56 | 9.71 | 9.87 | 10.02 | 10.18 | 10.33 | 10.48 | 10.64 | 10.79 | 10.94 | 11.10 | 11.25 | 11.41 | 11.56 |
| 10 | 8.43 | 8.58 | 8.73 | 8.88 | 9.03 | 9.18 | 9.33 | 9.49 | 9.64 | 9.79 | 9.94 | 10.09 | 10.24 | 10.39 | 10.54 | 10.69 | 10.84 | 10.99 | 11.14 | 11.29 |
| 11 | 8.24 | 8.38 | 8.53 | 8.68 | 8.82 | 8.97 | 9.12 | 9.26 | 9.41 | 9.56 | 9.71 | 9.85 | 10.00 | 10.15 | 10.29 | 10.44 | 10.59 | 10.73 | 10.88 | 11.03 |
| 12 | 8.05 | 8.19 | 8.33 | 8.48 | 8.62 | 8.77 | 8.91 | 9.05 | 9.20 | 9.34 | 9.48 | 9.63 | 9.77 | 9.91 | 10.06 | 10.20 | 10.35 | 10.49 | 10.63 | 10.78 |
| 13 | 7.86 | 8.01 | 8.15 | 8.29 | 8.43 | 8.57 | 8.71 | 8.85 | 8.99 | 9.13 | 9.27 | 9.41 | 9.55 | 9.69 | 9.83 | 9.97 | 10.11 | 10.26 | 10.40 | 10.54 |
| 14 | 7.69 | 7.83 | 7.97 | 8.10 | 8.24 | 8.38 | 8.52 | 8.65 | 8.79 | 8.93 | 9.07 | 9.20 | 9.34 | 9.48 | 9.62 | 9.76 | 9.89 | 10.03 | 10.17 | 10.31 |
| 15 | 7.52 | 7.66 | 7.79 | 7.93 | 8.06 | 8.20 | 8.33 | 8.47 | 8.60 | 8.74 | 8.87 | 9.00 | 9.14 | 9.27 | 9.41 | 9.54 | 9.68 | 9.81 | 9.95 | 10.08 |
| 16 | 7.36 | 7.49 | 7.62 | 7.76 | 7.89 | 8.02 | 8.15 | 8.28 | 8.42 | 8.55 | 8.68 | 8.81 | 8.95 | 9.08 | 9.21 | 9.34 | 9.47 | 9.61 | 9.74 | 9.87 |
| 17 | 7.20 | 7.33 | 7.46 | 7.59 | 7.72 | 7.85 | 7.98 | 8.11 | 8.24 | 8.37 | 8.50 | 8.63 | 8.76 | 8.89 | 9.02 | 9.15 | 9.28 | 9.41 | 9.54 | 9.66 |
| 18 | 7.05 | 7.18 | 7.31 | 7.43 | 7.56 | 7.69 | 7.81 | 7.94 | 8.07 | 8.20 | 8.32 | 8.45 | 8.58 | 8.70 | 8.83 | 8.96 | 9.09 | 9.21 | 9.34 | 9.47 |
| 19 | 6.91 | 7.03 | 7.16 | 7.28 | 7.41 | 7.53 | 7.66 | 7.78 | 7.90 | 8.03 | 8.15 | 8.28 | 8.40 | 8.53 | 8.65 | 8.78 | 8.90 | 9.03 | 9.15 | 9.28 |
| 20 | 6.77 | 6.89 | 7.01 | 7.13 | 7.26 | 7.38 | 7.50 | 7.62 | 7.75 | 7.87 | 7.99 | 8.11 | 8.24 | 8.36 | 8.48 | 8.60 | 8.73 | 8.85 | 8.97 | 9.09 |
| 21 | 6.63 | 6.75 | 6.87 | 6.99 | 7.11 | 7.23 | 7.35 | 7.47 | 7.59 | 7.71 | 7.83 | 7.95 | 8.07 | 8.19 | 8.31 | 8.43 | 8.55 | 8.67 | 8.79 | 8.92 |
| 22 | 6.50 | 6.62 | 6.74 | 6.85 | 6.97 | 7.09 | 7.21 | 7.33 | 7.45 | 7.56 | 7.68 | 7.80 | 7.92 | 8.04 | 8.15 | 8.27 | 8.39 | 8.51 | 8.63 | 8.74 |
| 23 | 6.37 | 6.49 | 6.61 | 6.72 | 6.84 | 6.95 | 7.07 | 7.19 | 7.30 | 7.42 | 7.53 | 7.65 | 7.77 | 7.88 | 8.00 | 8.11 | 8.23 | 8.35 | 8.46 | 8.58 |
| 24 | 6.25 | 6.36 | 6.48 | 6.59 | 6.71 | 6.82 | 6.94 | 7.05 | 7.16 | 7.28 | 7.39 | 7.51 | 7.62 | 7.73 | 7.85 | 7.96 | 8.08 | 8.19 | 8.30 | 8.42 |
| 25 | 6.13 | 6.24 | 6.36 | 6.47 | 6.58 | 6.69 | 6.81 | 6.92 | 7.03 | 7.14 | 7.25 | 7.37 | 7.48 | 7.59 | 7.70 | 7.81 | 7.93 | 8.04 | 8.15 | 8.26 |
| 26 | 6.02 | 6.13 | 6.24 | 6.35 | 6.46 | 6.57 | 6.68 | 6.79 | 6.90 | 7.01 | 7.12 | 7.23 | 7.34 | 7.45 | 7.56 | 7.67 | 7.78 | 7.89 | 8.00 | 8.11 |
| 27 | 5.90 | 6.01 | 6.12 | 6.23 | 6.34 | 6.45 | 6.56 | 6.67 | 6.78 | 6.88 | 6.99 | 7.10 | 7.21 | 7.32 | 7.43 | 7.53 | 7.64 | 7.75 | 7.86 | 7.97 |
| 28 | 5.80 | 5.90 | 6.01 | 6.12 | 6.22 | 6.33 | 6.44 | 6.54 | 6.65 | 6.76 | 6.87 | 6.97 | 7.08 | 7.19 | 7.29 | 7.40 | 7.51 | 7.61 | 7.72 | 7.83 |
| 29 | 5.69 | 5.80 | 5.90 | 6.01 | 6.11 | 6.22 | 6.32 | 6.43 | 6.53 | 6.64 | 6.74 | 6.85 | 6.95 | 7.06 | 7.16 | 7.27 | 7.38 | 7.48 | 7.59 | 7.69 |
| 30 | 5.59 | 5.69 | 5.79 | 5.90 | 6.00 | 6.11 | 6.21 | 6.31 | 6.42 | 6.52 | 6.63 | 6.73 | 6.83 | 6.94 | 7.04 | 7.14 | 7.25 | 7.35 | 7.46 | 7.56 |



Modelo Streeter-Phelps



$$\frac{dD}{dt} = k_d L - k_r D$$

$r_d = k_d L_0 e^{-k_1 t}$

$k_d = k_1 =$ constante de deoxygenación

$r_r = k_r D$

$k_r = k_2 =$ constante de reaireación

La ecuación en términos de déficit : $\frac{dD}{dt} = k_1 L e^{-k_1 t} - k_2 D$


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

D = déficit de oxígeno en tiempo t (mg/L)

D₀ = déficit de oxígeno inmediatamente debajo de el punto de descarga

L₀ = DBO última (DBO_{ult}) justo debajo de la descarga

L = DBO en tiempo t



33

Desarrollo del modelo Streeter-Phelps

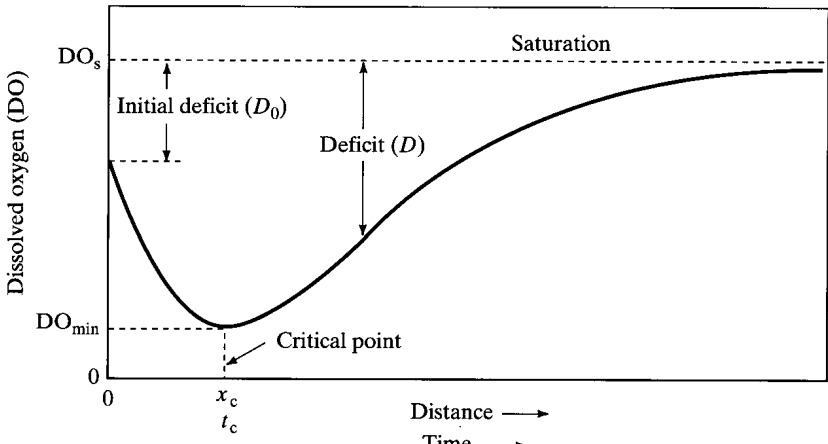



FIGURE 5.15 Streeter-Phelps oxygen sag curve.



34

Desarrollo del modelo Streeter-Phelps

En el punto crítico (donde OD está a su mínimo) →

$$\frac{dD}{dt} = 0$$

$$\frac{dD}{dt} = 0 = k_1 L e^{-k_1 t} - k_2 D$$

$$t_c = \frac{1}{k_2 - k_1} \ln \left[\frac{k_2}{k_1} \left(1 - \frac{D_0 (k_2 - k_1)}{k_1 L_0} \right) \right]$$

t_c = tiempo al punto crítico
 D_c = déficit en el punto crítico

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

DBO y OD en un curso de agua: Resumen

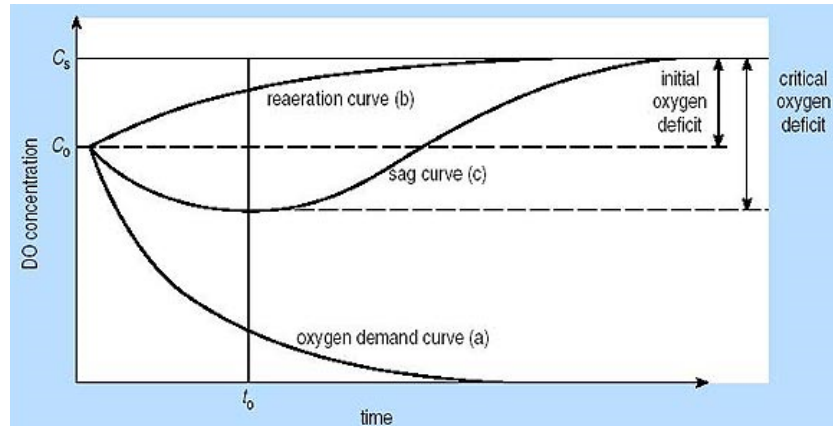
Procesos:

- Consumo de oxígeno para descomponer materia orgánica (primer orden)
- Descomposición de la materia orgánica (primer orden)
- Reacción (primer orden en el déficit de oxígeno)

$$L(t) = L_0 \cdot e^{-k_d \cdot t} \quad D(t) = C_S - OD(t)$$

$$D(t) = \frac{k_d \cdot L_0}{k_r - k_d} \cdot (e^{-k_d \cdot t} - e^{-k_r \cdot t}) + D_0 \cdot e^{-k_r \cdot t}$$

Evolución del OD en el tiempo



$$t_c = \frac{1}{k_r - k_d} \cdot \ln \left(\frac{k_r}{k_d} \cdot \left(1 - \frac{D_0 \cdot (k_r - k_d)}{k_d \cdot L_0} \right) \right)$$