

## Lagunas aireadas

Ing. Jairo Alberto Romero Rojas

Ingeniero civil, MEEE, profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia, director del Centro de Estudios Ambientales y de la Especialización en Saneamiento Ambiental, y profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

### RESUMEN

En este artículo se describen las características y requisitos del proceso de lagunas aireadas, así como dos ejemplos de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante dicho sistema.

### 1. DESCRIPCIÓN

Una laguna aireada es un estanque de 2 a 5 m de profundidad, hecho para el tratamiento biológico de aguas residuales. En el sistema de tratamiento se usa un equipo de aireación mecánica con el objeto de suministrar oxígeno y mezcla. Esta laguna se diseña como aeróbica, con suficiente introducción de potencia para mantener todos los sólidos en suspensión, o facultativa o de mezcla incompleta, con un nivel de potencia apenas suficiente para crear la turbulencia requerida para la dispersión de oxígeno y permitir sedimentación de sólidos. Las lagunas aireadas facultativas son las más usadas porque producen un buen efluente, los niveles de potencia son inferiores, requieren control mínimo y la remoción de lodos es poco frecuente, cada diez años o más. Las lagunas aireadas aeróbicas son muy usadas para aguas residuales industriales de concentración alta.

El equipo de aireación puede producir mezcla turbulenta, como en el caso de los aireadores superficiales, o condiciones de flujo laminar, como en los sistemas de aire difuso<sup>(1)</sup>.

La laguna aireada aeróbica es semejante a un sistema muy diluido de lodos activados de aireación prolongada, sin recirculación de lodos,

con concentraciones de sólidos suspendidos de 100 mg/L a 400 mg/L; requiere menos potencia que un sistema de lodos activados, pero es más sensible a la temperatura que éste a causa de la magnitud del área y la ausencia de recirculación de lodos, por lo que se diseñan como procesos de mezcla completa de lodos activados sin recirculación. Los procesos bioquímicos de oxidación de la materia orgánica y de síntesis celular son similares a los que ocurren en el proceso de lodos activados.

Las lagunas aireadas surgieron, alrededor de 1957, como solución a los problemas de malos olores existentes en lagunas naturales de oxidación sobrecargadas excesivamente y para mejorar la calidad de los efluentes. Sin embargo, al agregar aireadores a lagunas de oxidación natural, se incrementan la turbulencia y la

turbiedad, desaparecen las algas y surgen condiciones muy diferentes de las de lagunas naturales de oxidación de aguas residuales. En lagunas aireadas, con temperatura alta y cargas bajas, es posible obtener un grado alto de nitrificación. Un sistema de tratamiento de aguas residuales, con lagunas aireadas, permite obtener remociones de DBO mayores del 90% y remociones de coliformes fecales del 90 al 95%, con periodos de aireación de 2 d a 6 d. Diagramas de flujo típicos de plantas de tratamiento con lagunas aireadas se incluyen en la figura 1. En la figura 2 se muestra un esquema de la laguna aireada de Bismarck, en Estados Unidos.

### 2. REQUISITOS DE DISEÑO

Prácticamente, la ecuación más usual para diseño de lagunas aireadas es la basada en un modelo de mezcla completa y tasa de reacción de primer orden.

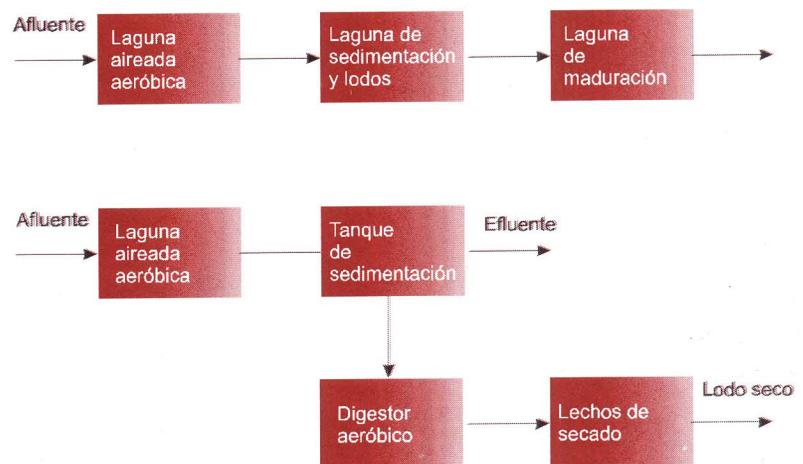


Figura 1. Plantas de tratamiento con lagunas aireadas.

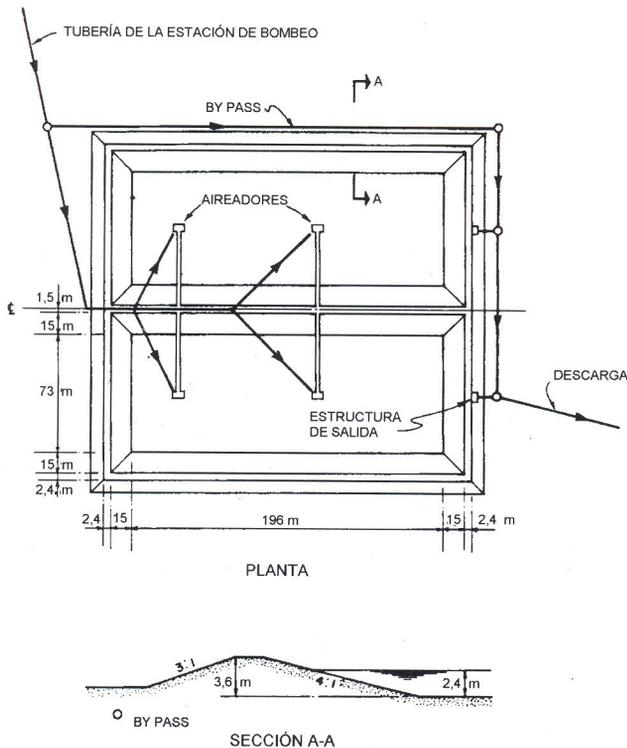


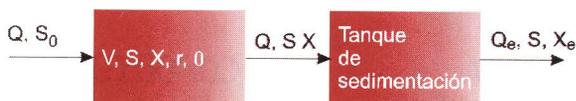
Figura 2. Laguna aireada de Bismark, Dakota del Norte, EE.UU.

El diseño de una laguna aireada requiere la evaluación cuidadosa de los siguientes factores:

- Características de remoción de DBO
- Requerimientos de oxígeno para oxidación biológica
- Efecto de la temperatura
- Relaciones de transferencia de oxígeno
- Requisitos de mezcla
- Configuración geométrica de la laguna
- Disposición de los aireadores
- Concentración de biomasa en la laguna
- Producción de lodos
- Clarificación y depuración del efluente

### 3. CARACTERÍSTICAS DE REMOCIÓN DE DBO

Suponiendo una laguna aireada como un reactor biológico de mezcla completa con cinética de remoción de DBO de primer orden y en estado permanente:



Se puede escribir el balance de masa en términos de DBO así:

$$g \text{ DBO removida/d} = g \text{ DBO afluente/d} - g \text{ DBO efluente/d} \quad (1)$$

Suponiendo despreciables las pérdidas o ganancias de agua por evaporación, percolación y lluvia, el balance de masa sería:

$$rV = S_0 Q - SQ \quad (2)$$

Donde:  $r$  = tasa de remoción de DBO de primer orden, mg/L.d

$V$  = volumen de la laguna,  $m^3$

$Q$  = caudal de aguas residuales,  $m^3/d$

$S_0$  = DBO del afluente, mg/L

$S$  = DBO del efluente, mg/L

Por seguridad, para diseño, se supone generalmente que toda la DBO del afluente es DBO soluble biodegradable y, para el efluente, se usa la DBO soluble. Nuevamente, considerando la tasa de remoción de DBO como una ecuación de primer orden, la tasa es proporcional a la concentración de DBO remanente:

$$\frac{dS}{dt} = KS \quad (3)$$

donde:  $S$  = concentración de DBO remanente, mg/L

$K$  = constante de remoción de DBO, base natural, específica para cada residuo y cada laguna en particular,  $d^{-1}$

$t$  = tiempo, d

Para condiciones de equilibrio, la tasa de remoción,  $r$ , es igual a  $KS$ ; por lo tanto, reemplazando en la ecuación 2:

$$r = KS = \frac{Q}{V}(S_0 - S) \quad (4)$$

$$\frac{KSV}{Q} = S_0 - S \quad (5)$$

Reemplazando:

$$\frac{V}{Q} = \theta = \text{tiempo de retención}$$

La ecuación anterior queda así:

$$K\theta = S_0 - S \quad (6)$$

$$K\theta = \frac{S_0 - S}{S} = \frac{S_0}{S} - 1 \quad (7)$$

$$\theta = \frac{S_0 - S}{KS} \quad (8)$$

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1}{1 + K\theta} \quad (9)$$

La ecuación 9 es la ecuación típica de diseño de procesos de tratamiento en mezcla completa con tasa de remoción de primer orden.

De acuerdo con la ecuación 9, el porcentaje de remoción de DBO en la laguna,  $E$ , estará dado por:

$$E = 100 - \frac{100}{1 + K\theta} \quad (10)$$

Para diseño es más conveniente expresar el tiempo de retención en función del porcentaje de remoción deseado:

$$\theta = \frac{E}{K(1 - E)} \quad (11)$$

En la figura 3 se incluye la solución gráfica de la ecuación 7.

Consecuentemente, el tiempo de retención requerido depende del porcentaje de remoción de DBO deseado y del valor de  $K$ . El valor de  $K$  puede determinarse experimentalmente u obtenerse de estudios previos, es función del tipo de agua residual, de la clase de laguna, de la carga orgánica y del tiempo de retención.

En general se recomienda un tiempo de retención mayor de dos días y menor de seis, con 4 d como valor típico. Sin embargo, en sistemas municipales de los Estados Unidos se han usado valores de 7 d a 90 d<sup>2</sup>.

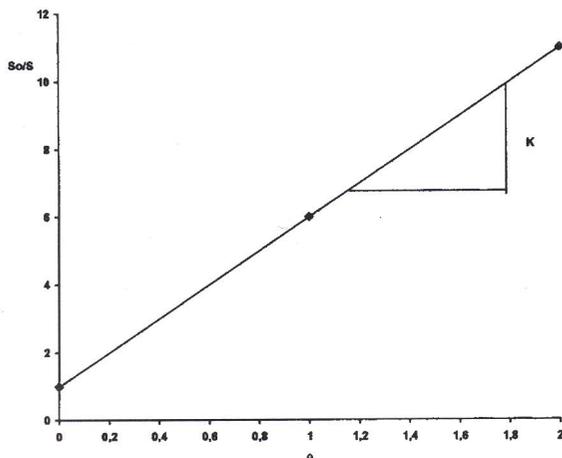


Figura 3. Solución gráfica de la ecuación 7.

Los valores de  $K$  varían ampliamente en la literatura, como puede verse en la tabla 1.

Tabla 1  
VALORES DE  $K$  EN LAGUNAS AIREADAS

$K_{20}$ , d <sup>-1</sup>	Ecuación	Observaciones
0,28	$K_T = 0,28(1,09)^{T-20}$	(2)
0,28		(3)
0,2 - 0,7		Agua residual doméstica <sup>(4)</sup>
0,3 - 1,0		Agua residual doméstica <sup>(5)</sup>
0,35	$K_T = 1,2(1,085)^{T-35}$	(6)
0,4 - 0,5		Para lagunas aireadas secundarias de aguas residuales domésticas <sup>(7)</sup>
0,5 - 1,0		Agua residual doméstica <sup>(8)</sup>
2,5	$K_T = 2,5(1,085)^{T-20}$	Agua residual de una fábrica de textiles <sup>(5)</sup>
< 3,0		Aguas residuales industriales <sup>(8)</sup>
2,7 - 4,8		Lagunas primarias de aguas residuales domésticas <sup>(7)</sup>
5,0	$K_T = 5,0(1,035)^{T-20}$	Agua residual doméstica <sup>(9)</sup>

El valor de  $K$  depende de la temperatura. El efecto de la temperatura se evalúa por la ecuación clásica:

$$K_T = K_{20} \theta^{T-20} \quad (12)$$

El coeficiente de actividad por temperatura en lagunas aireadas es igual a 1,08<sup>(10)</sup>. Por tanto, en general:

$$K_T = K_{20} (1,08)^{T-20} \quad (13)$$

Donde:  $K_{20}$  = constante de remoción a 20°C, d<sup>-1</sup>  
 $K_T$  = constante de remoción a la temperatura  $T$   
 $T$  = temperatura de diseño, °C

El valor de  $K$  también está afectado por la relación de nutrientes; en general se recomienda como relación apropiada de DBO/N/P una relación de 100/5/1.

Cuando se diseñan lagunas en serie se puede aplicar la misma ecuación de remoción de DBO, reconociendo que el valor de  $K$ , aunque se supone constante en todas las lagunas, cambia de una laguna a otra. El valor de  $K$  puede disminuirse en un 20% para cada laguna adicional. Todo lo anterior indica la gran importancia del valor de  $K$  en el diseño de lagunas aireadas.

### 3.1 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE $K$

De conformidad con la ecuación (7):

$$\frac{S_0}{S} = 1 + K\theta \quad (14)$$

Por lo tanto, el gráfico de  $S_0/S$  contra  $\theta$ , como se indica en la figura 3, permite calcular el valor de  $K$ .

## 4. REQUERIMIENTOS DE OXÍGENO PARA OXIDACIÓN BIOLÓGICA

Teóricamente, el oxígeno requerido por los microorganismos para oxidación biológica debe ser igual a la DBO removida. En la práctica, se calcula por la expresión:

$$\text{Oxígeno requerido} = (\text{Factor}) (\text{DBO removida}) \quad (15)$$

Muchos autores calculan el valor del factor,  $F$ , en términos de la relación entre la DBO última y la DBO estándar:

$$F = \frac{\text{DBOU}}{\text{DBO}} \quad (16)$$

En general, para la mayoría de las aguas residuales  $F = 1, 1,1-1,5$  y para las aguas residuales domésticas es muy usado  $F = 1,3$

Por lo tanto:  $\text{OR} = FES_0Q \times 10^{-3}$  (17)  
 Donde:  $\text{OR}$  = oxígeno requerido, kg/h  
 $E$  = eficiencia fraccional de remoción de DBO  
 $Q$  = caudal, m<sup>3</sup>/h  
 $S_0$  = DBO afluente, mg/L

También se acostumbra calcular la cantidad de oxígeno requerido en términos de la DBO del afluente así:

$$\text{OR} = FS_0Q \times 10^{-3} \quad (18)$$

Para lagunas aireadas en serie, los requerimientos de oxígeno se pueden calcular por las ecuaciones anteriores, pero como la tasa de remoción de DBO obedece a una ley de primer orden, la primera laguna removerá la mayor porción de DBO, la segunda laguna una porción menor y la tercera, y demás lagunas, porciones cada vez menores.

La tasa a la cual se requiere oxígeno, en la primera laguna aireada aeróbica, se puede calcular así<sup>(11)</sup>:

$$\text{OR} = 6,3 \times 10^{-5} QS_0 \quad (19)$$

donde:  $\text{OR}$  = oxígeno requerido, kg/h  
 $Q$  = caudal, m<sup>3</sup>/d  
 $S_0$  = DBO afluente, mg/L

Para lagunas aireadas facultativas, la tasa máxima de oxígeno requerido es igual a<sup>(11)</sup>:

$$\text{OR} = 4,17 \times 10^{-5} AB \quad (20)$$

$$B = 60 (1,05)^{T-20} \quad (21)$$

donde:  $\text{OR}$  = oxígeno requerido, kg/h  
 $A$  = área del fondo de la laguna, m<sup>2</sup>  
 $B$  = demanda bental de oxígeno, g/m<sup>2</sup>d  
 $T$  = temperatura del agua en la laguna durante la semana más cálida del año, °C.

## 5. TEMPERATURA EN LAGUNAS AIREADAS

Una forma práctica de valorar la temperatura de diseño para una laguna es la siguiente<sup>(3)</sup>:

$$T = T_a + \frac{T_o - T_a}{3} \quad (22)$$

donde:

$T$  = temperatura del agua en la laguna, durante la semana más fría del año, °C.  
 $T_o$  = temperatura, del afluente, durante la semana más fría del año, °C.  
 $T_a$  = temperatura promedio, del aire, durante la semana más fría del año, °C.

El valor de  $T$ , en la ecuación 22, también se puede cuantificar con base en temperaturas del mes más frío.

## 6. RELACIONES DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

El oxígeno requerido por una laguna aireada se suministra mediante equipos de aireación superficial o de aire difuso.

El rendimiento nominal de los equipos de aireación superficial debe corregirse, para las condiciones de diseño, así:

$$N = N_0 \alpha (1,024)^{T-20} \left[ \frac{\beta C_{s(T,A)} - C_L}{C_{s(20,0)}} \right] \quad (23)$$

donde:

$N$  = tasa real de transferencia de oxígeno, kg O<sub>2</sub> / kWh  
 $N_0$  = tasa nominal de transferencia de oxígeno en condiciones normales, kg O<sub>2</sub> / kWh, o tasa de transferencia de oxígeno bajo condiciones estándar  
 $\beta$  = relación entre la concentración de saturación de oxígeno en el agua residual y la concentración de saturación en agua potable; generalmente igual a 0,9 para aguas residuales domésticas  
 $\alpha$  = relación de la tasa de transferencia de oxígeno en agua residual,  $K_{La}$ , a la tasa de transferencia de oxígeno en agua potable. Para aguas residuales domésticas se citan los siguientes valores típicos:

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,7^{(9)} \\ \alpha &= 0,9^{(5)} \\ \alpha &= 0,8 - 0,95^{(8)} \\ \alpha &= 0,8 - 0,85^{(11)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}NP^{(8)} &= 12 - 20 \text{ W/m}^3 \\ NP^{(9)} &= 5 \text{ W/m}^3 \\ NP^{(11)} &= 6 \text{ W/m}^3 \\ NP^{(5)} &= 20 \text{ W/m}^3 \\ NP^{(12)} &= 3 - 4 \text{ W/m}^3\end{aligned}$$

Para aguas residuales industriales:

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,5 - 1,3^{(8)} \\ \alpha &= 0,3 - 2,0^{(11)}\end{aligned}$$

- $C_{S(T,A)}$  = concentración de saturación de oxígeno disuelto en agua potable, a la temperatura  $T$  y altitud  $A$  del lugar, mg/L
- $C_{S(20,0)}$  = concentración de saturación de oxígeno disuelto en agua destilada a  $20^\circ\text{C}$  y al nivel del mar; 9,1 mg/L
- $C_L$  = concentración de OD a mantener en la laguna, generalmente 1,0 - 1,5 mg/L; 2,0 mg/L según las normas de los Diez Estados<sup>(3)</sup>

Los valores de  $C_{S(T,0)}$  se encuentran tabulados en diferentes textos; el valor de  $C_{S(T,A)}$  se calcula así<sup>(9)</sup>:

$$C_{S(T,A)} = C_{S(T,0)} \frac{P_A}{760} \quad (24)$$

$$P_A = 760 \left( 1 - \frac{A}{9450} \right) \quad (25)$$

$$C_{S(T,A)} = C_{S(T,0)} \left( 1 - \frac{A}{9450} \right) \quad (26)$$

donde:

- $P_A$  = presión barométrica del lugar, mmHg
- $C_{S(T,0)}$  = concentración de saturación de OD p temperatura  $T$  y 0 msnm, en agua pot mg/L
- $A$  = altitud del lugar, msnm

Generalmente, para aireadores flotantes:

$$\begin{aligned}N_o &= 1,2 - 2,4 \text{ kg O}_2/\text{kWh} \\ N &= 0,8 - 1,0 \text{ kg O}_2/\text{kWh}\end{aligned}$$

En cada caso particular deben consultarse los catálogos de los fabricantes.

## 7. REQUISITOS DE MEZCLA

Para lagunas aireadas aeróbicas, en las cuales se desea mantener una mezcla completa del agua, dispersión uniforme de oxígeno y suspensión de todos los sólidos, se recomienda un nivel de potencia,  $NP$ , de:

También el nivel de potencia, en lagunas aeróbicas con aireadores superficiales de baja velocidad, se puede calcular por la expresión<sup>(7)</sup>:

$$NP = 0,004 X + 5 \quad (27)$$

donde :

- $NP$  = nivel de potencia,  $\text{W/m}^3$
- $X$  = mg/L de sólidos suspendidos en la laguna, generalmente 150 a 250 mg/L

La ecuación 27 indica que el nivel de potencia en lagunas aeróbicas es del orden de  $6 \text{ W/m}^3$ .

Para aireación con aire comprimido, el nivel de potencia se puede cuantificar por la ecuación siguiente<sup>(7)</sup>:

$$NP = \frac{3,9 Q_a}{V} \log \left( \frac{h + 10,366}{10,366} \right) \quad (28)$$

donde:

- $NP$  = nivel de potencia,  $\text{W/m}^3$
- $Q_a$  = flujo de aire, L/min
- $h$  = profundidad líquida sobre el difusor, m
- $V$  = volumen de la laguna,  $\text{m}^3$

Experiencias en lagunas piloto de laboratorio<sup>(7)</sup> indican que en un tanque de 40 L, con profundidad de agua de 20 cm y con flujo de aire de 7 L/min, se obtiene mezcla completa. Para un flujo de aire de 1,5 L/min se logra un régimen de mezcla incompleta y laguna facultativa con concentraciones mayores de 2,0 mg/L de OD. Lo anterior para niveles de potencia del orden de  $5,7 \text{ W/m}^3$  y  $1,2 \text{ W/m}^3$ , respectivamente.

Para lagunas aireadas facultativas el nivel de potencia recomendado es de:

$$\begin{aligned}NP^{(8)} &= 1,2 - 2,0 \text{ W/m}^3 \\ NP^{(7,11)} &= 1,0 \text{ W/m}^3 \\ NP^{(5)} &= 3,0 - 4,0 \text{ W/m}^3 \\ NP^{(12)} &= 0,8 \text{ W/m}^3\end{aligned}$$

## 8. CONFIGURACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LOS AIREADORES

Como las lagunas aireadas tienen tiempos de retención prolongados, no es necesario localizar la tubería de entrada cerca o debajo de un aireador; sin embargo, para evitar acumulación de lodos a la entrada, se recomienda colocar

una rejilla como pretratamiento y prolongar la tubería del afluente más allá del talud de la laguna. Los aireadores deben espaciarse de manera uniforme en toda el área de la laguna; en lagunas de forma irregular se debe atribuir, a cada aireador, un área superficial aproximadamente igual. En lagunas de forma regular, el área se distribuye en un número de cuadrados iguales al número de aireadores y se pone un aireador en el centro de cada cuadrado. En cualquier caso, la localización de los aireadores se hace atendiendo las especificaciones del fabricante para evitar interferencia en las áreas de influencia y hacer el equipo lo más rendidor posible. El montaje usual de los aireadores se hace sobre plataformas, cuadradas o rectangulares, soportadas sobre columnas. Si el nivel del agua en la laguna es variable, se prefieren equipos montados sobre flotadores; sin embargo, este puede controlarse mediante un vertedero de efluente. Preferiblemente, la unidad de salida debe diseñarse para que el nivel del agua, en la laguna, no varíe más de 2,5 cm entre la operación con caudal máximo y la operación con caudal mínimo. Antes del vertedero de salida debe colocarse una pantalla retenedora de espumas y de las olas que pueda crear el equipo de aireación.

Las unidades de aireación se consiguen, comúnmente, en capacidades de 0,75 kW a 75 kW, 1 - 100 HP. Para lagunas pequeñas que requieren menos de 7,5 kW, 10 HP, se usa solamente un aireador en un estanque cuadrado. Para potencias entre 7,5 kW y 75 kW, 10 HP - 100 HP, se prefiere usar dos aireadores en un estanque rectangular. Para potencias mayores, es preferible usar lagunas en paralelo, especialmente si el número de aireadores es mayor de cuatro.

Generalmente, una laguna aireada tiene profundidad nominal de operación de 1,5 m a 5,0 m; la profundidad más común es de 3 m. Se usan pendientes en los taludes V : H de 1 : 1,5 a 1 : 3 y se provee un recubrimiento de concreto, polietileno o geomembrana, debajo de cada aireador, para prevenir la erosión inducida por la turbulencia creada por dichos equipos.

El volumen de la laguna puede verificarse por la fórmula siguiente:

$$V = D \left( a_T L_T - S D a_T - S D L_T + \frac{4}{3} S^2 D^2 \right) \quad (29)$$

donde:

- V = volumen, m<sup>3</sup>
- D = profundidad del agua, m
- a<sub>T</sub> = ancho de la laguna en la superficie del agua, m
- L<sub>T</sub> = longitud de la laguna en la superficie del agua, m
- S = pendiente, H : V

## 9. CONCENTRACIÓN DE BIOMASA EN LA LAGUNA

La concentración de biomasa en la laguna es función de la cantidad de DBO removida y del coeficiente de producción de crecimiento; se puede calcular por la ecuación desarrollada para procesos de lodos activados:

$$X = \frac{Y(S_0 - S)}{1 + k_d \theta} \quad (30)$$

donde:

- X = concentración de microorganismos en el reactor, mg SSV/L
- S<sub>0</sub> = concentración de sustrato en el afluente, mg/L
- S = concentración de sustrato en el efluente del reactor, mg/L
- k<sub>d</sub> = coeficiente de respiración endógena, d<sup>-1</sup>
- θ = tiempo de retención, d

## 10. PRODUCCIÓN DE LODOS

La producción de lodos se puede cuantificar por la expresión:

$$P_x = XQ \quad (31)$$

Suponiendo un 80% de sólidos volátiles en los sólidos de la laguna:

$$P_{x(ss)} = \frac{XQ}{0,8} \quad (32)$$

donde:

- P<sub>x</sub> = Producción de lodos, g SSV/d
- X = concentración de biomasa en el reactor, mg SSV/L
- P<sub>x(ss)</sub> = producción de lodos, g SS/d

## 11. CLARIFICACIÓN Y DEPURACIÓN DEL EFLUENTE

La concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente de la laguna aireada, X<sub>e</sub>, antes de su sedimentación, es igual a la concentración de sólidos suspendidos del afluente, X<sub>0</sub>, más los sólidos suspendidos volátiles, o biomasa producida, convertidos a sólidos totales, suponiendo un porcentaje de sólidos volátiles del 80%. O sea,

$$X_e = X_0 + \frac{X}{0,8} \quad (33)$$

La DBO total del efluente de la laguna aireada se puede calcular por la relación:

$$DBO_{Total} = S_e + CX \quad (34)$$

donde:

- $S_e$  = DBO soluble del efluente de la laguna, mg/L
- $C_e$  = 0,4 - 0,5
- $X$  = concentración de biomasa en el reactor, mg SSV/L, generalmente menor o igual a 250 mg/L en lagunas de mezcla completa y menor o igual a 25 mg/L en lagunas aireadas secundarias facultativas o de mezcla incompleta de aguas residuales domésticas<sup>(7)</sup>.

## 12. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LAGUNAS AIREADAS EN SERIE

En un sistema de tratamiento con lagunas aireadas, integrado por una laguna primaria aeróbica seguida de  $n$  lagunas facultativas iguales, la DBO soluble del efluente,  $S_e$ , se puede calcular por la expresión:

$$S_e = \frac{S_0}{(1 + K_1\theta_1)(1 + K_2\theta_2)^n} \quad (35)$$

Donde:

- $S_e$  = DBO soluble del efluente, mg/L
- $S_0$  = DBO total del afluente, mg/L
- $K_1$  = constante de remoción de DBO en la primera laguna,  $d^{-1}$
- $K_2$  = constante de remoción de DBO en la segunda y demás lagunas,  $d^{-1}$
- $\theta_1$  = tiempo de retención en la primera laguna, d
- $\theta_2$  = tiempo de retención en la segunda y demás lagunas, d
- $n$  = número de lagunas de mezcla incompleta o facultativas

De la ecuación anterior se deduce:

$$\theta_2 = \left[ \frac{S_0}{S_e(1 + K_1\theta_1)} \right]^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (36)$$

El tiempo total de retención en el sistema de lagunas es:

$$\theta = \theta_1 + n\theta_2 \quad (37)$$

El costo mínimo se obtiene cuando las lagunas son iguales<sup>(7)</sup>, es decir,

$$\theta_1 = \theta_2$$

Para  $n = 1$ , el tiempo de retención óptimo es de dos días; para  $n = 2$ , el tiempo de retención óptimo es de 1,5 días; para  $n = 3$ , el tiempo de retención óptimo es de 1,2 días y para  $n = 4$ , el tiempo de retención óptimo es de 1,0 d. En todos los casos, se observa que el tiempo de retención total es menor de cinco días. Los experimentos de Kouzell<sup>(7)</sup>

indican que con dos lagunas aireadas en serie es factible obtener remociones de DBO del 90% para aguas residuales domésticas.

## 13. EJEMPLO

Diseñar una laguna aireada para tratar un caudal de aguas residuales de 2.000 m<sup>3</sup>/d con DBO de 250 mg/L. La laguna debe proveer un 90% de remoción de DBO durante el verano y un 85% de remoción de DBO en invierno. El terreno disponible para las lagunas es de 2 hectáreas. Se supone:  $\alpha = 0,9$ ;  $\beta = 0,95$ ;  $K_{10} = 0,65 d^{-1}$ , temperatura mínima de la laguna 10°C y máxima de 24°C,  $F = 1,3$ ;  $N_0 = 1,8 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ ; presión barométrica del lugar 600 mmHg; profundidad = 3 m; pendiente en los taludes,  $V : H = 1 : 2$ .

### Solución

Tiempo de retención requerido en invierno:

$$\theta = \frac{E}{(100 - E)K} = \frac{85}{(100 - 85)0,65} = 8,7 d$$

Tiempo de retención requerido en verano:

$$K_{20} = \frac{0,65}{(1,075)^{-10}} = 1,34 d^{-1}$$

$$K_{24} = 1,34 (1,075)^5 = 1,92 d^{-1}$$

$$\theta = \frac{90}{(100 - 90)1,92} = 4,7 d$$

Como es evidente, invierno determina el tiempo de retención de diseño.

Por tanto, se diseñará con  $\theta = 8,7 d$

La cantidad de oxígeno requerido será:

$$OR = FPQS_0 \times 10^{-3}$$

$$OR = 1,3 \times 0,9 \times 2.000 \times 250 \times 10^{-3} = 585 \text{ kg O}_2/d$$

$$OR = 24,4 \text{ kg O}_2/h$$

La tasa de transferencia de oxígeno será, para verano:

$$C_{s(24,0)} = 8,4 \text{ mg/L}$$

$$C_L = 1,0 \text{ mg/L}$$

$$C_{s(20,0)} = 9,1 \text{ mg/L}$$

$$C_{s(24,A)} = 8,4 \times \frac{600}{760} = 6,6 \text{ mg/L}$$

$$N = 1,8 \times 0,9 (1,024)^4 \left[ \frac{0,95 \times 6,6 - 1}{9,1} \right] = 1,03 \text{ kg O}_2 / \text{kWh}$$

Para invierno:

$$C_{s(10,0)} = 11,3 \text{ mg/L}$$

$$C_{s(10,A)} = 11,3 \frac{600}{760} = 8,9 \text{ mg/L}$$

$$N = 1,8 \times 0,9(1,024)^{-10}$$

$$\left[ \frac{0,95 \times 8,9 - 1}{9,1} \right] = 1,05 \text{ kg O}_2 / \text{kWh}$$

Como  $1,03 < 1,05$ , verano controla la tasa de transferencia de oxígeno, o sea:

$$N = 1,03 \text{ kg O}_2 / \text{kWh}$$

Potencia requerida por aireación:

$$P = \frac{24,4}{1,03} = 24 \text{ kW} = 32 \text{ HP}$$

Potencia requerida por mezcla:

Para la laguna facultativa; con  $2 \text{ W/m}^3$

$$P = 2,0 \times 2.000 \times 8,7 \times 10^{-3} = 34,8 \text{ kW} = 46,6 \text{ HP}$$

La mezcla controla el diseño, por tanto se usarán tres aireadores de  $12 \text{ kW}$ .

Configuración de la laguna y colocación de los aireadores:

$$\text{Volumen} = 2.000 \times 8,7 = 17.400 \text{ m}^3$$

$$A = \text{Área} = \frac{17.400}{3} = 5.800 \text{ m}^2$$

Con una relación  $l/a = 3$  ( $r = 1/3$ )

La expresión siguiente<sup>(8)</sup> permite calcular las dimensiones de la laguna:

$$L_t = \frac{[4rA - 6r(SD)^2 + 2(SD)^2]^{1/2} + SD(1+r)}{2r} \quad (38)$$

donde:

$L_t$  = longitud de la laguna para la superficie libre del agua, m

$r$  = relación ancho/longitud

$S$  = pendiente de los taludes, en general 3/1; 2/1; 1,5/1 (H:V)

$D$  = profundidad, m

$$L_t = \frac{[4 \times 0,33 \times 5800 - 6 \times 0,33(2 \times 3)^2 + 2(2 \times 3)^2]^{1/2} + 2 \times 3(1 + 0,33)}{2 \times 0,33}$$

$$L_t = 144,7 \text{ m}$$

$$a_t = (L_t) r = 144,7 \div 3 = 48,2 \text{ m}$$

$$L_F = L_t - 2SD = 144,7 - 2 \times 3 \times 3 = 126,7 \text{ m}$$

$$a_F = a_t - 2SD = 48,2 - 2 \times 3 \times 3 = 30,2 \text{ m}$$

Las dimensiones de la laguna son:

144,7 m x 48,2 m en la superficie de agua; 126,7 m x 30,2 m en el fondo

La profundidad total puede ser de 3,5 m

Los aireadores se localizarán sobre el eje longitudinal de la laguna, el primero a 24,1 m de la orilla, el segundo a 48,2 m del primero, el tercero a 48,2 m del segundo y a 24,1 m desde la orilla.

## 14. EJEMPLO

Diseñar una laguna aireada para tratar un caudal de  $2.000 \text{ m}^3/\text{d}$  con DBO de  $250 \text{ mg/L}$ . La laguna debe proveer un 85% de remoción de DBO. El terreno disponible es de dos hectáreas, la temperatura mínima es de  $10^\circ\text{C}$ . Suponer:

$K_{20}$	=	$5 \text{ d}^{-1}$
Profundidad	=	3 m
$N_0$	=	$1,8 \text{ kg O}_2 / \text{kWh}$
$\alpha$	=	0,9
$\beta$	=	0,95
$k_d$	=	$0,06 \text{ d}^{-1}$
$C_L$	=	1 mg/L
$Y^L$	=	0,6

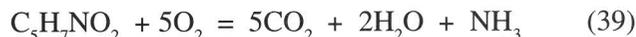
P barométrica del lugar =  $600 \text{ mmHg}$   
 Sólidos suspendidos del afluente =  $200 \text{ mg/L}$   
 Sólidos suspendidos del efluente =  $30 \text{ mg/L}$

## Solución

Por seguridad, se calcula con la DBO soluble del efluente así:

$$\text{DBO total del efluente} = \text{DBO soluble} + \text{DBO suspendida}$$

La DBOU de la biomasa suspendida se valora con base en la ecuación química para su oxidación:



O sea, 1 g de biomasa ejerce una DBOU de 1,42 g de  $O_2$ . Además, se puede suponer una relación de DBO/DBOU de 0,67 y una proporción de sólidos suspendidos biodegradables del 68%. Por tanto,

$$\begin{aligned} \text{DBO suspendida} &= (0,67) (0,68) (1,42) X_c = 0,65X_c \\ \text{DBO soluble} &= S = \text{DBO total} - 0,65X_c \\ S &= 250 (1 - 0,85) - (0,65) 30 = 18 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

La constante de remoción de DBO sería, según la ecuación 13:

$$K_{10} = 5 (1,08)^{10-20} = 2,3 \text{ d}^{-1}$$

El tiempo de retención requerido:

$$\theta = \frac{S_0 - S}{KS} = \frac{250 - 18}{2,3 \times 18} = 5,6 \text{ d}$$

La concentración de biomasa en la laguna:

$$X = \frac{Y(S_0 - S)}{1 + k_d \theta} = \frac{0,6(250 - 18)}{1 + 0,06 \times 5,6} = 104 \text{ mg / L}$$

El volumen de la laguna:

$$V = Q\theta = (2.000) 5,6 = 11.200 \text{ m}^3$$

El área de la laguna:

$$A = \frac{V}{D} = \frac{11.200}{3} = 3.733 \text{ m}^2$$

(Una laguna cuadrada de 61 m x 61 m)

El oxígeno requerido:

$$\text{OR} = 1,3 \text{ DBOR} = 1,3 (250 - 18) (2.000) 10^{-3}$$

$$\text{OR} = 603,2 \text{ kg O}_2/\text{d} = 25,1 \text{ kg O}_2/\text{h}$$

La potencia requerida para aireación:

$$C_{S(T,A)} = C_{S(T,0)} \frac{P_A}{760} \Rightarrow C_{S(10,600)} = 11,3 \frac{600}{760} = 8,9 \text{ mg / L}$$

$$N = N_0 \alpha (1,024)^{T-20} \left[ \frac{\beta C_{S(T,A)} - C_L}{C_{S(20,0)}} \right]$$

Verano:

$$N = 1,8 \times 0,9 (1,024)^{-10} \left[ \frac{0,95 \times 8,9 - 1}{9,1} \right] = 1,0 \text{ kg / kW.h}$$

$$PR = \frac{25,1}{1,0} = 25,1 \text{ kW} = 33,7 \text{ HP}$$

La potencia requerida por mezcla:

Para mezcla completa se adopta un nivel de potencia de 5 W/m<sup>3</sup>

$$PR = 5 \times 11.200 = 56.000 \text{ W} = 56 \text{ kW} = 75 \text{ HP}$$

Se requieren tres aireadores de  $\approx 20 \text{ kW c/u}$ .

La producción de lodos sería:

$$P_x = XQ = (104) (2.000) 10^{-3} = 208 \text{ kg SSV/d}$$

$$P_x = \frac{XQ}{0,8} = 260 \text{ kg SST / d}$$

La concentración de sólidos del efluente de la laguna, sin sedimentar, sería:

$$X_e = X_0 + \frac{X}{0,8}$$

$$X_e = 200 + \frac{104}{0,8} = 330 \text{ mg / L}$$

El área del sedimentador sería:

$$A = \frac{Q}{CS} = \frac{2.000}{16} = 125 \text{ m}^2$$

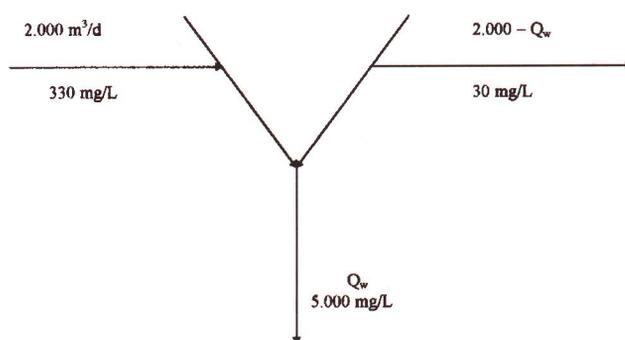
El diámetro del sedimentador:

$$\phi = \sqrt{\frac{4 \times 125}{\pi}} = 12,6 \text{ m}$$

La profundidad para un tiempo de retención de cuatro horas:

$$D = \frac{2.000 \times 4}{24 \times 125} = 2,7 \text{ m}$$

El caudal de lodos de desecho sería:



Por lo tanto,

$$2.000 \times 330 = 30 (2.000 - Q_w) + 5.000 Q_w$$

$$Q_w = 121 \text{ m}^3/\text{d}$$

## 15. REFERENCIAS

1. Middlebrooks, E.J., Middlebrooks, C.H.; Reynolds, J.H.; Watters, G.Z.; Reed, S.C. y George, D.B., *Wastewater Stabilization Lagoon Design, Performance and Upgrading*, Macmillan Pub. Co., Inc., 1982.
2. WEF, Asce, *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, 1992.
3. Great Lakes-Upper Mississippi River Board of State Sanitary Engineers, *Recommended Standards for Sewage Works*, Health Ed. Service, Albany, 1968.
4. Boulier, G. y Atchinson, T., *Practical Design and Application of the Aerated Facultative Lagoon Process*, Hinde Eng. Co., 1975.
5. Bartsch, E. H. y Randall, C.W., "Aerated Lagoons: A Report on the State of the Art", *J. WPCF*, Vol. 43, April 1971, p. 699.
6. Sáenz, F.R., "Lagunas de estabilización y otros sistemas simplificados para el tratamiento de aguas residuales", *Manual Dtiapa No. 64*, Lima, Perú, Cepis, octubre 1985.
7. Kouzell, Katsiri A., "Design Optimization for Dual Power Aerated Lagoons", *J. WPCF*, Vol. 59, No. 9, September 1987.
8. Parker, H. W., *Wastewater Systems Engineering*, Prentice Hall Inc., 1975.
9. Mara, D.D., *Sewage Treatment in Hot Climates*, Wiley, 1976.
10. Metcalf & Eddy Inc., *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*, 3ª ed., McGraw Hill, 1991.
11. Rich, L.G., *Low Maintenance, Mechanically Simple Wastewater Treatment Systems*, McGraw Hill, 1980.
12. Eckenfelder, W.W., *Principles of Water Quality Management*, CBI Pub. Co., 1980.
13. Cepis, "Curso intensivo sobre diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales para países en desarrollo", Lima, Perú, OPS, OMS, diciembre 1976.