

CAPITULO 6

ANÁLISIS Y DISEÑO DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO

6.1 Cinética del crecimiento biológico

Antes de adentrar en el diseño de las distintas partes que componen el tratamiento biológico o secundario, es necesario establecer las bases de su funcionamiento. El primer punto que se debe tratar para entender correctamente los principios que componen el tratamiento es la cinética de crecimiento biológico, es decir, el comportamiento y función de los microorganismos dentro del sistema.

Para asegurar el crecimiento de los microorganismos en un proceso biológico de tratamiento de agua residual se les debe permitir un tiempo de contacto suficiente con el alimento (materia orgánica), de manera que éstos puedan asimilarlo y de paso removerlo del agua. Este tiempo requerido depende de la tasa de crecimiento propia de los microorganismos y ésta a su vez está relacionada con la velocidad con la que los microorganismos metabolizan o utilizan el residuo. Suponiendo que las condiciones ambientales son propicias y se encuentran debidamente controladas, se puede asegurar una estabilización eficaz de la materia orgánica mediante el control de la tasa de crecimiento de los microorganismos.

6.1.1 Crecimiento celular

Tanto en los sistemas de alimentación continua como en los de alimentación discontinua, la tasa de crecimiento de biomasa se puede definir con las siguientes expresiones:

$$r_g = mX \tag{6.1}$$

$$r_g = \frac{dX}{dt}$$

donde r_g = tasa de crecimiento bacteriano, masa / volumen*tiempo.

μ = tasa de crecimiento específico, tiempo⁻¹.

X = concentración de microorganismos, masa/volumen

S = concentración de sustrato, masa/volumen..

6.1.2 Crecimiento con limitación de sustrato

Si el sustrato (denotado comúnmente por "S") está presente en cantidades limitadas, será el primero en agotarse y se detendrá el crecimiento. Experimentalmente se ha podido determinar que el efecto de disponer de cantidades limitadas de sustrato, a menudo, se puede definir adecuadamente mediante la siguiente expresión desarrollada por Monod:

$$m = m_m \left(\frac{S}{k + S} \right) \tag{6.2}$$

donde μ = tasa de crecimiento específico, tiempo⁻¹.

μ_m = máxima tasa de crecimiento específico, tiempo⁻¹.

S = Concentración del sustrato que limita el crecimiento, masa/unidad de volumen.

k = constante de velocidad mitad, concentración de sustrato a la mitad de la máxima tasa de crecimiento, masa/unidad de volumen.

El efecto de la concentración de sustrato (S) sobre la tasa de crecimiento específico (μ) propuesto por Monod se ilustra en la Figura 6.1.

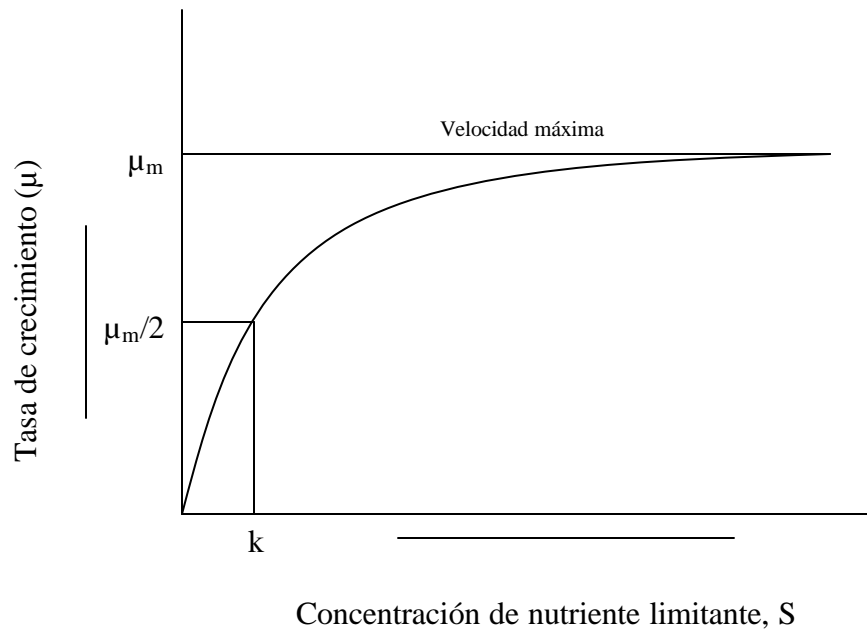


Figura 6.1 Efecto de la concentración de sustrato en la Tasa de crecimiento de la biomasa.

Sustituyendo la ecuación (6.2) en la (6.1) la expresión de la tasa de crecimiento que resulta es:

$$r_g = \frac{\mu_m X S}{k + S} \quad (6.3)$$

6.1.3 Crecimiento celular y utilización del sustrato

En los sistemas de cultivo de alimentación, tanto continuo como discontinuo, una parte del sustrato se transforma en células nuevas y otra parte se oxida dando origen a productos finales orgánicos e inorgánicos. Dado que se ha observado que la cantidad de células nuevas producidas es la misma para un sustrato dado, se ha desarrollado la siguiente relación entre el grado de utilización del sustrato y la tasa de crecimiento.

$$r_g = -Yr_{su} \quad (6.4)$$

Donde r_g = tasa de crecimiento bacteriano, masa/unidad de volumen.

Y = masa de células formadas por unidad de masa de sustrato consumido, masa/masa.

r_{su} = tasa de utilización de sustrato, masa/volumen * tiempo.

Si se sustituye el valor de r_g de la ecuación (6.3) en la ecuación (6.4) el grado de utilización del sustrato se puede definir como:

$$r_{su} = -\frac{m_m X S}{Y(k + S)} \quad (6.5)$$

En la ecuación 6.5 el término μ_m/Y se sustituye por el término q , definido éste como la tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismos:

$$q = \frac{m_m}{Y} \quad (6.6)$$

Al sustituir el término q en la ecuación (6.5) se obtiene la siguiente expresión:

$$r_{su} = -\frac{qXS}{k + S} \quad (6.7)$$

6.1.4 Efectos del metabolismo endógeno

En los sistemas bacterianos que se emplean en el tratamiento biológico del agua residual, la distribución de edades de las células es tal que no todas las células del sistema están en fase de crecimiento exponencial (Figura 6.2). Consecuentemente, la expresión de la tasa de crecimiento se debe corregir para tener en cuenta la energía necesaria para el mantenimiento celular. Otros factores tales como muerte y depredación también deben ser objeto de consideración. Generalmente, estos factores se engloban en uno único, y se supone que la disminución de la masa celular causada por ellos es proporcional a la concentración de organismos presentes. En la literatura técnica, esta disminución se identifica como decaimiento endógeno y se ha expresado de la siguiente manera:

$$r_d = -bX \quad (6.8)$$

donde b = coeficiente de decaimiento endógeno, tiempo⁻¹.

X = concentración de células, masa/ volumen.

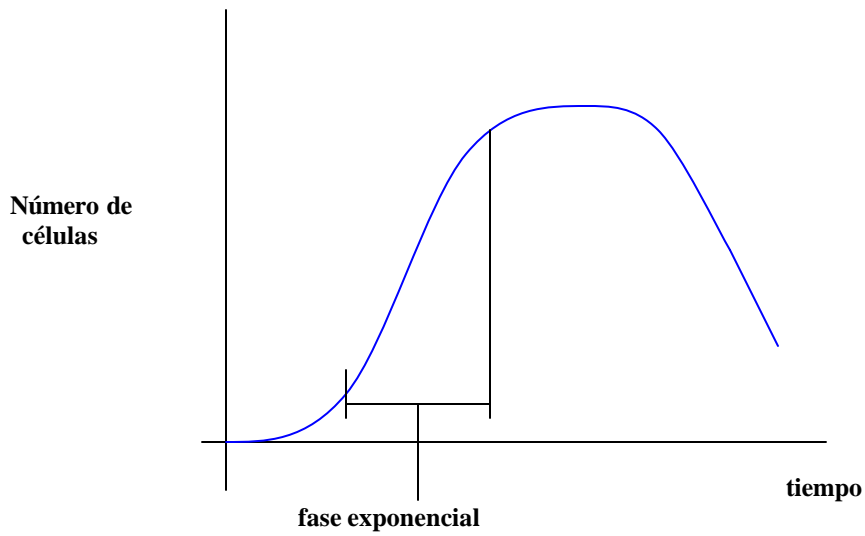


Figura 6.2 Curva típica de crecimiento para microorganismos

Cuando la ecuación (6.8) se combina con las ecuaciones (6.3) y (6.4), las expresiones que se obtienen para la tasa neta de crecimiento son:

$$r_{neta} = \frac{\mathbf{m}_m X S}{k + S} - bX \quad (6.9)$$

$$r_{neta} = -Yr_{su} - bX \quad (6.10)$$

donde r_{neta} es la tasa neta de crecimiento bacteriano, masa/ volumen.

La expresión correspondiente para la tasa neta de crecimiento específico (μ) viene dada por la ecuación 6.11.

$$m = m_m \frac{S}{k + S} - b \quad (6.11)$$

Los efectos de la respiración endógena sobre la producción neta de bacterias se tienen en cuenta al definir una producción observada de la siguiente manera.

$$Y_{obs} = -\frac{r_{neta}}{r_{su}} \quad (6.12)$$

6.1.5 Efectos de la temperatura

La dependencia de la temperatura de las constantes de la velocidad de la reacción biológica es muy importante a fin de asegurar la eficacia conjunta de un proceso de tratamiento biológico. La temperatura no sólo influye en las actividades metabólicas de la población microbiana, sino que también tiene un profundo efecto sobre factores tales como la velocidad de transferencia de gases sobre las características de sedimentación de los sólidos biológicos. El efecto de la temperatura sobre la velocidad de reacción de un proceso biológico se suele expresar de la siguiente manera:

$$r_T = r_{20} \mathbf{q}(T - 20) \quad (6.13)$$

donde r_T = constante de reacción a T°C

r_{20} = constante de reacción a 20°C

θ = coeficiente de actividad-temperatura.

T = temperatura, en °C.

6.2 Fundamentos para el diseño del reactor de mezcla completa con recirculación

En el sistema de mezcla completa, el líquido del reactor se mezcla completamente, y se supone que el contenido de biomasa activa en el agua que entra al reactor es nulo. El tanque de sedimentación secundario en el que se separan las células del reactor para su posterior recirculación, es una parte integral del proceso de lodos activados. Debido a la presencia de esta unidad de separación de sólidos, la elaboración de un modelo cinético requiere de dos hipótesis adicionales:

1. La estabilización biológica de los residuos se produce únicamente en el reactor.
2. El volumen utilizado al calcular el tiempo de retención de lodos del sistema sólo incluye el volumen del reactor.

El tanque de sedimentación sirve como depósito desde el que se recirculan los sólidos para mantener una concentración adecuada de ellos en el tanque biológico. El *tiempo medio de retención hidráulica del sistema*, t_s , se define como:

$$t_s = \frac{V_T}{Q} = \frac{V_r + V_s}{Q} \quad (6.14)$$

donde V_T = volumen del reactor + volumen del tanque de sedimentación.

Q = caudal afluente.

V_r = volumen del reactor.

V_s = volumen del tanque de sedimentación.

El *tiempo medio de retención hidráulica del reactor* (t), se define como:

$$t = \frac{V_r}{Q} \quad (6.15)$$

El *tiempo medio de retención de lodos* q_x , definido como la masa de microorganismos del reactor dividida por la masa diaria de microorganismos purgada del sistema, viene dado por la siguiente expresión:

$$q_x = \frac{V_r X}{Q_w X_r + Q_e X_e} \quad (6.16)$$

donde Q_w = tasa de purga de lodos desde el caudal de recirculación

Q_e = caudal de líquido efluente de la unidad de separación.

X_e = concentración de microorganismos en el efluente de la unidad de separación de sólidos.

X_r = concentración de microorganismos en la línea de recirculación de lodos.

6.2.1 Balance de masa

El planteamiento de un balance de masa, sobre microorganismos, para un reactor de flujo continuo puede expresarse como:

$$\begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{c}
 \text{Velocidad de acumulación} \\
 \text{de microorganismos} \\
 \text{dentro de los límites del} \\
 \text{sistema} \\
 \text{(acumulación)}
 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c}
 \text{Cantidad de} \\
 \text{microorganismos} \\
 \text{que entran en el} \\
 \text{sistema} \\
 \text{(entrada)}
 \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c}
 \text{Cantidad de} \\
 \text{microorganismos} \\
 \text{que salen del} \\
 \text{sistema} \\
 \text{(salida)}
 \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c}
 \text{Crecimiento neto} \\
 \text{de microorganismos} \\
 \text{dentro de los} \\
 \text{límites del sistema} \\
 \text{(crecimiento neto)}
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

$$\frac{dX}{dt} V_r = QX_0 - [Q_w X + Q_e X_e] + V_r (r_{neta}) \quad (6.17)$$

Sustituyendo en la ecuación (6.10) por la tasa de crecimiento y suponiendo que la concentración de biomasa en el afluente es nula y que prevalecen condiciones de flujo estable ($dX/dt=0$), se tiene que:

$$\frac{Q_w X + Q_e X_e}{V_r X} = -Y \frac{r_{su}}{X} - b \quad (6.18)$$

El término de la izquierda de ésta ecuación (6.18), representa el inverso del *tiempo medio de retención de lodos* (θ_x) definido anteriormente. Con las ecuaciones (6.16) y (6.18) se obtiene:

$$\frac{1}{\theta_x} = Y \frac{r_{su}}{X_a} - b \quad (6.19)$$

El término r_{su} (tasa de utilización de sustrato) se determina por medio de la siguiente expresión:

$$r_{su} = -\frac{Q}{V_r}(S_0 - S) = -\frac{S_0 - S}{t} \quad (6.20)$$

donde $(S_0 - S)$ = cantidad de sustrato utilizada, mg/l

S_0 = concentración de sustrato en el afluente, mg/l

S = concentración de sustrato en el efluente, mg/l

t = tiempo de retención hidráulica, d.

La concentración de microorganismos en el reactor, X_a , se puede obtener haciendo una sustitución en la ecuación (6.20) en la (6.19) y despejando el valor de X_a :

$$X_a = \frac{q_x}{t} \left(\frac{Y(S_0 - S)}{(1 + bq_x)} \right) \quad (6.21)$$

Haciendo un balance del sustrato, se obtiene que la concentración de sustrato en el efluente es:

$$S = \frac{k(1 + q_x b)}{q_x(Yq - b) - 1} \quad (6.22)$$

La ecuación para la producción de lodos observada en un sistema con recirculación se muestra a continuación:

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + bq_x} \quad (6.23)$$

La producción diaria de lodo que hay que purgar se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$P_x = Y_{obs}(S_0 - S)(1000g/kg)^{-1} \quad (6.24)$$

en donde: $(S_0 - S)$ = cantidad de substrato utilizado, mg/L.

Tabla 6.1 Valores típicos de los coeficientes cinéticos para el proceso de lodos activados.(Metcalf & Eddy, 1991)

Coeficientes	Unidades para SSV	Valores para 20°C	
		Rangos	Típico
Y	mg VSS/mg BOD ₅	0.4-0.8	0.6
b	d ⁻¹	0.025-0.075	0.06
k	mg/l BOD ₅	25-100	60

Un parámetro que se utiliza habitualmente en la práctica como parámetro de diseño y control es la relación alimento-microorganismos (F/M), que se define como:

$$F / M = \frac{S_0}{tX} \quad (6.25)$$

6.3 Separación de sólidos (sedimentador secundario)

La función del sedimentador secundario es la de separar los lodos activados del líquido-mezcla. Esta separación de sólidos es el último paso, antes de la descarga requerida para la producción de un efluente estable, bien clarificado, y con bajo contenido en DBO, DQO y sólidos totales.

A pesar de que gran parte de la información mencionada anteriormente acerca de los tanques de sedimentación primaria sigue siendo aplicable a los tanques de sedimentación secundaria, la presencia en el líquido-mezcla de gran cantidad de sólidos floculentos, hace que se deba prestar atención al proyecto de estos tanques, ya que tienden a formar un manto de lodo de profundidad variable.

Para diseñar correctamente los tanques de sedimentación secundaria se deben tomar en cuenta los siguientes factores: 1.- tipos de tanques, 2.- características de sedimentabilidad de los lodos en relación con las necesidades de espesamiento para la correcta operación de la planta, 3.- cargas de superficie y cargas de sólidos, 4.- profundidad del agua, 5.- reparto del caudal, 6.- diseño de la entrada de agua, 7.- situación y carga sobre el vertedero, y 8.- eliminación de espumas. A continuación se explican brevemente cada una de estas necesidades.

6.3.1 Tipos de sedimentadores secundarios

Los tipos de tanques de sedimentación secundaria más empleados en el tratamiento de agua residual son los tanques circulares y rectangulares. También existen tanques cuadrados, pero

no son tan eficaces en la retención de sólidos, y por esta razón no son tan comunes. En los tanques rectangulares se recomienda que la longitud total del tanque no exceda de 10 a 15 veces su profundidad.

Los tanque circulares tienen diámetros de entre 10-40 m, teniendo en cuenta que el radio no debería exceder en 5 veces la profundidad del agua en la periferia del tanque. Existen dos tipos de tanques circulares: 1.- de alimentación central, y 2.- de alimentación periférica. Ambos utilizan mecanismos rotatorios para transportar y evacuar el lodo del fondo del clarificador. A su vez, también existen dos tipos de mecanismos de succión: 1.- el que se mantiene por reducción de la altura estática en cada una de las tuberías de extracción (Figura 6.2), y 2.- el fango se extrae por presión hidrostática o por bombeo (Figura 6.3).

6.3.2 Sedimentabilidad del lodo secundario

Las características de sedimentación de los lodos pueden variar temporalmente debido a cambios en la cantidad y peso específico de los sólidos suspendidos que escapan a la sedimentación primaria. Por esto, es necesario adoptar criterios de proyecto conservadores que eviten el escape ocasional de sólidos del lodo. El índice de volumen de lodos se utiliza como medida de las características de sedimentabilidad del lodo.

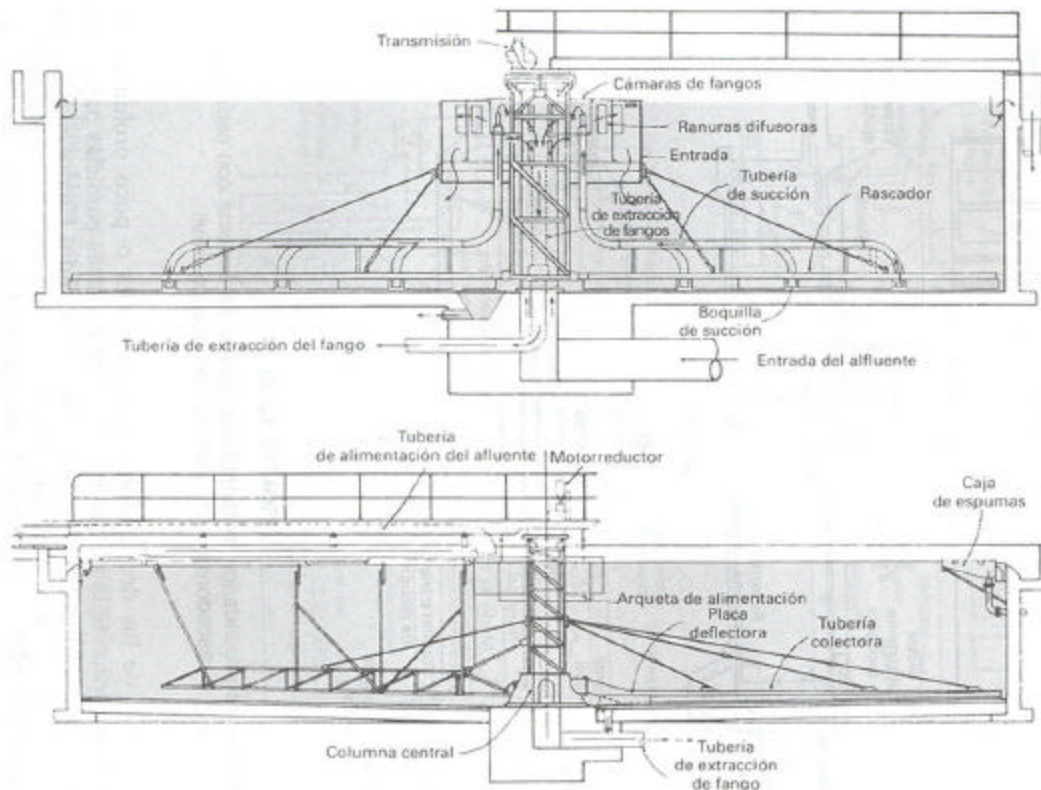


Figura 6.3 Tanques de sedimentación secundaria circulares para la extracción rápida del lodo: (a) lodo extraído con tubos de succión, y (b) lodo extraído por tubería colectora múltiple (Metcalf & Eddy, 1996)

En un tanque de sedimentación secundario, existe un flujo constante de sólidos en sentido descendente. Dentro del tanque, el flujo de sólidos descendente se produce por la sedimentación por gravedad y por el transporte de masa debido al caudal extraído del fondo, el cual se bombea y recircula. En cualquier punto del tanque, el flujo de masa de sólidos originado por la sedimentación por gravedad (SF_g) se calcula como:

$$SF_g = kCV \quad (6.26)$$

donde: SF_g = flujo de sólidos por acción de la gravedad, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$.

$$k = 1/1000$$

C = concentración de sólidos, mg/L .

V = velocidad de sedimentación de los sólidos, m/h .

Utilizando el valor del flujo de sólidos límite, la superficie necesaria deducida con un balance de masas se puede expresar de la siguiente manera:

$$A = \frac{(1+a)QC_0}{SF_L} (1/1000 \text{ g/kg}) \quad (6.27)$$

donde: A = área transversal, m^2

Q = caudal volumétrico total que entra en el tanque de sedimentación, $\text{m}^3/\text{día}$

C_0 = concentración de sólidos en el caudal de entrada al tanque de sedimentación, g/m^3

SF_L = flujo de sólidos límite, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$.

$$a = Q_u/Q.$$

6.3.3 Cargas de superficie y cargas de sólidos

Debido a la gran cantidad de sólidos que pueden escapar con el efluente si sobrepasan los criterios establecidos para el diseño, las cargas de superficie de diseño se deben basar en las condiciones de caudal punta. Las cargas de superficie se pueden calcular dividiendo el flujo del caudal entre la superficie del tanque. Las cargas de superficie que se muestran en la Tabla

6.1 son valores típicos empleados en el diseño de sistemas biológicos. Estos valores están basados en los caudales de agua residual (en lugar de los caudales de líquido-mezcla), debido a que la carga de superficie es equivalente a una velocidad de flujo ascensional. El caudal de lodo de retorno se extrae de la parte inferior del tanque y no contribuye a la velocidad de flujo ascensional.

La carga de sólidos de un tanque de sedimentación secundaria se puede calcular dividiendo los sólidos totales aplicados entre la superficie del tanque. La carga de sólidos representa un valor característico de una determinada suspensión. En la Tabla 6.2 se presentan valores típicos de las cargas de sólidos empleados en el diseño de sistemas de tratamiento secundario.

Tabla 6.2 Información para el diseño de sedimentadores secundarios (Metcalf & Eddy, 1996)

Tipo de tratamiento	Carga de superficie, m ³ /m ²		Carga de sólidos, kg/m ² -h		Profundidad, metros
	Media	Punta	Media	Punta	
Sedimentación a continuación del proceso de lodos activados	0.678 - 1.356	1.695 - 2.035	3.9 - 5.85	9.76	3.6 - 6.0

6.3.4 Profundidad de agua

La profundidad de agua de un sedimentador secundario se suele medir en los muros perimetrales de los sedimentadores circulares. La profundidad es un factor que afecta a la eficiencia en la eliminación de sólidos y en la concentración de lodos de recirculación. La Tabla 6.1 muestra el rango de profundidad de estos tanques. Los tanques de mayor

profundidad presentan la ventaja de una mayor flexibilidad de explotación y un mayor margen de seguridad frente a cambios en el proceso de lodos activados.

6.3.5 Reparto de caudales

En los casos en los que las capacidades de los diferentes tanques no son iguales, el caudal se debe repartir proporcionalmente a las áreas superficiales de los diferentes tanques. Los métodos de reparto de caudales a los tanques de sedimentación secundaria incluyen el uso de vertedores, válvulas de control de caudal, reparto por simetría hidráulica, y control mediante compuertas u orificios de alimentación (ver Figura 6.4).

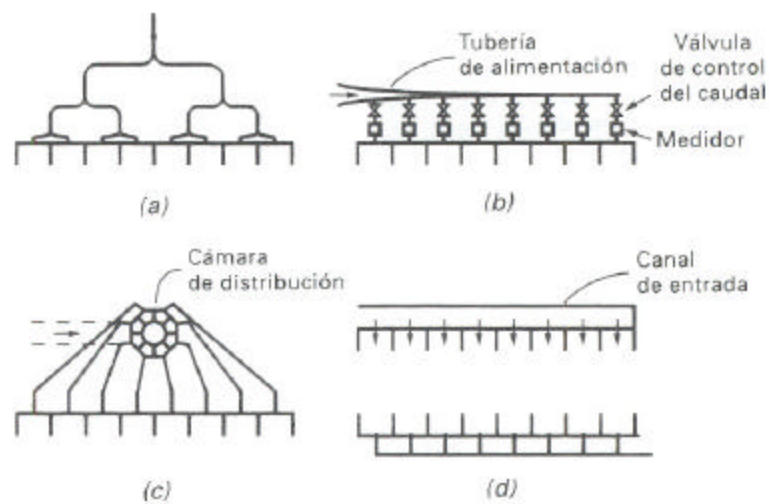


Figura 6.4 Métodos para la partición de caudales: (a) simetría hidráulica, (b) medición del caudal y control de la alimentación, (c) por vertedero, y (d) control de la compuerta de alimentación. (Metcalf & Eddy, 1996)

6.3.6 Diseño de la entrada del tanque

La entrada del agua en el tanque a gran velocidad puede aumentar la formación de corrientes de densidad y la resuspensión del lodo sedimentado, provocando un rendimiento poco satisfactorio del sedimentador. Los dispositivos de entrada de agua al tanque deben disipar la energía del agua entrante, distribuir uniformemente el flujo, eliminar las corrientes de densidad y minimizar las perturbaciones a la capa de lodos. En los tanques de sedimentación circulares se coloca, al centro del sedimentador, una campana difusora la cual recibe el flujo entrante y tiene como funciones principales la de disipar la energía del mismo y además distribuirlo en toda el área superficial. El tamaño de dicha campana difusora no debe ser inferior al 25 % del diámetro del tanque.

6.3.7 Ubicación y carga sobre los vertederos

La ubicación óptima de los vertederos para la obtención de un efluente bien clarificado se sitúa entre las dos terceras partes y las tres cuartas partes de radio medido desde el centro. Las cargas sobre vertedero empleadas en tanques de grandes dimensiones no deben superar los 375 m³/m lineal*día a caudal máximo.

6.3.8 Eliminación de espumas

Generalmente, en los sedimentadores secundarios se produce muy poca espuma. No obstante, se pueden presentar situaciones en las que aparecen materias flotantes que se deben eliminar.

Los equipos de recogida de espumas incluyen las cajas de flotantes con rampa de rascado, el canal desnatador rotativo solidario del puente y tuberías ranuradas.

6.4 Diseño del proceso de lodos activados

A continuación se presenta el diseño del tratamiento biológico por lodos activados, de mezcla completa, y las instalaciones de sedimentación secundaria para el tratamiento del caudal promedio para el municipio de San Andrés Cholula, el cual es de $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua residual sedimentada con 226 mg/L de DBO reducido (tomando en cuenta el 36 % de remoción del DBO en el sedimentador primario). Se considerará además que el efluente podrá contener una concentración máxima de 40 mg/L de DBO, puesto que se desea proteger la vida acuática en el cuerpo de agua receptor (NOM-001-ECOL-1996). Considerando una temperatura promedio de 20°C y que son aplicables los siguientes datos:

1. La relación entre los sólidos suspendidos volátiles del líquido-mezcla (SSVLM) y los sólidos suspendidos del líquido-mezcla (SSLM) = 0.8
2. SSLM = $4,000 \text{ mg/L}$, por lo tanto: SSVLM = $3,200 \text{ mg/L}$.
3. El tiempo de retención de proyecto, $\theta = 5$ días.
4. $X_v = 40/1.42 = 28 \text{ mg-VSS/L}$ (concentración de biomasa que puede escaparse del sedimentador).
5. El 65 % de los sólidos suspendidos es biodegradable.
6. $\text{DBO}_5 = 0.7 \text{ DBO}_L$ (supuesto, se obtiene en pruebas de laboratorio).
7. Según la CNA, $Q_{\text{max,hor}} = 2.17 Q_{\text{prom}} = 41,410 \text{ m}^3/\text{día}$ ó $0.48 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los resultados de las pruebas de sedimentabilidad de los SSLM han sido supuestos y extraídos de una referencia bibliográfica (Metcalf & Eddy, 1996).

Tabla 6.3 Datos de sedimentación de SSLM (Metcalf & Eddy)

SSLM (mg/l)	1600	2500	2600	4000	5000	8000
Velocidad de sedimentación inicial (m/h)	3.3	2.4	1.5	0.6	0.3	0.09

6.4.1 Cálculo del reactor de lodos activados de mezcla completa

En primer lugar, se calcula la concentración de DBO₅ soluble a la salida del tratamiento biológico utilizando la siguiente relación:

$$DBO_{salida} = DBO_{soluble \text{ no degradado}} + DBO_{sólido} \quad (6.28)$$

en donde:

a) La fracción biodegradable de los sólidos biológicos del efluente ($DBO_{sólido}$) es:

$$DBO_{sólido} = \left(43 \frac{mgVSS}{l} \right) \times 0.65 = 28 \frac{mg}{l} DBO \quad (6.29)$$

b) El DBO_L última de los sólidos biodegradables del efluente es:

$$DBO_{sol.bio.} = \left(28 \frac{mgVSS}{l} \right) \times \left(1.42 \frac{mgDBO}{mgVSS} \right) = 40 \frac{mg}{l} DBO \quad (6.30)$$

c) El DBO_5 de los sólidos suspendidos del efluente es:

$$DBO_{sol.susp.} = \left(40 \frac{mgDBO_5}{l} \right) \times 0.7 = 28 \frac{mg}{l} DBO \quad (6.31)$$

d) El DBO_5 soluble del agua a tratar que escapa al tratamiento es:

$$DBO_{soluble} = 40 - 28 = 12 \frac{mg}{l} DBO \quad (6.32)$$

Conociendo el $DBO_{entrada}$ (226 mg DBO/l) y el de salida (40 mg DBO/l) se puede calcular el porcentaje de remoción de DBO con que debe trabajar el sistema:

a) El porcentaje de remoción de $DBO_{soluble}$ es:

$$\% \text{ de remoción de } DBO_{soluble} = \frac{(353 \times 0.64) - 12}{353 \times 0.64} \times 100 = 94.7\% \quad (6.33)$$

b) El porcentaje de remoción de DBO_{total} es:

$$\% \text{ de remoción de } DBO_{total} = \frac{226 - 40}{226} \times 100 = 82.3\% \quad (6.34)$$

Con el valor propuesto para el tiempo de retención de lodos ($q_x = 5$ días), y con las ecuaciones 6.15 y 6.21, se puede calcular el volumen del reactor biológico:

$$X_a = \frac{q_x Y (S_0 - S)}{t(1 + bq_x)} \quad (6.35)$$

en donde: $(S_0 - S)$ = cantidad de substrato utilizado, mg/l.

$$t = V_r / Q \quad (6.36)$$

Sustituyendo t en la ecuación 6.21 y despejando para (V_r) se obtiene:

$$V_r = \frac{q_x Q Y (S_0 - S)}{X_a (1 + bq_x)} \quad (6.37)$$

$$V_r = \frac{(5d)(19083m^3/d)(0.6mg/mg)((226 - 12)mg/l)}{(3200mg/l)(1 + (0.06 * 5d))} = 2945m^3$$

En donde $Y = 0.6$ mg/mg también ha sido propuesto como parámetro cinético para describir el crecimiento de biomasa por unidad de sustrato consumida.

No obstante, este valor teórico de (Y) se verá reducido a otro valor (Y_{obs}), ya que no todos los microorganismos se encuentran en la fase de crecimiento exponencial. El valor de (Y_{obs}) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + bq_x} = \frac{0.6}{1 + (0.06 \times 5)} = 0.4615 \quad (6.38)$$

Con este nuevo valor se puede calcular la producción diaria de lodo activado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_x = Y_{obs} (S_0 - S)(1000g / kg)^{-1}$$

$$P_x = (0.4615)(19083)(226 - 12)(1 / 1000) = 1884.8kg / día$$

$$P_{x(ss)} = 1884.8 / 0.8 = 2356kg / día$$

De los lodos activados producidos diariamente será necesario desechar alguna porción, mientras que el resto será recirculado al tanque reactor. La cantidad de lodo de desecho generado diariamente se calcula como:

Cantidad de lodo de desecho = incremento de SSLM – SS perdidos en el efluente:

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de lodo} &= (2356 \text{ kg} / \text{día}) - (19083 \text{ m}^3 / \text{día}) \times (43 \text{ mg} / \text{l}) \times (1 \text{ kg} / 1000 \text{ g}) \\ \text{de desecho} &= 1536 \text{ kg} / \text{día} \end{aligned} \quad (6.39)$$

Empleando la definición numérica del tiempo de retención de lodos (q_x), se puede calcular la magnitud del gasto de desecho (Q_w).

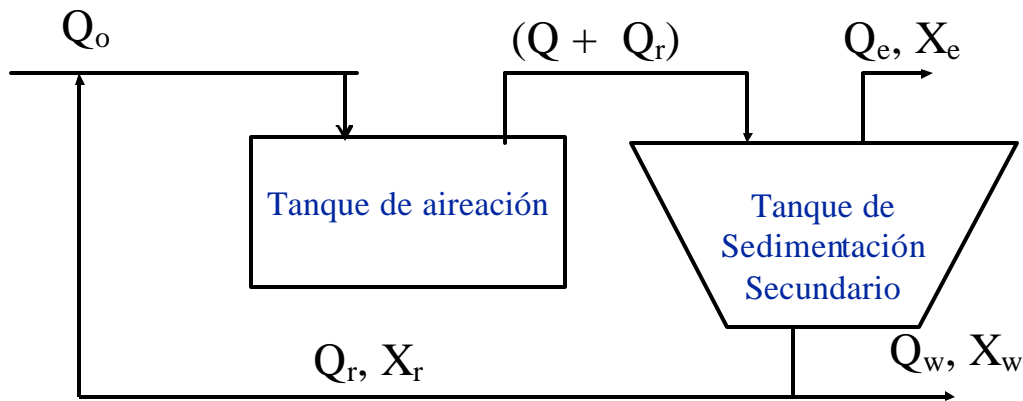


Figura 6.5 Balances de masa en el tanque de aireación y en el sedimentador secundario.

$$q_x = \frac{V_r X}{Q_w X + Q_e X_e} \quad (6.40)$$

$$5d = \frac{2945 \text{ m}^3 \times 3200 \text{ mg} / \text{l}}{Q_w \times 3200 \text{ mg} / \text{l} + 19083 \text{ m}^3 / \text{d} \times 43 \text{ mg} / \text{l} \times 0.8}$$

despejando Q_w :

$$Q_w = 383 \text{ m}^3/\text{d}$$

Tiempo de retención hidráulica, t :

$$t = \frac{V_r}{Q} = \frac{2945 \text{ m}^3}{19083 \text{ m}^3/\text{d}} = 0.154 \text{ días} = 3.7 \text{ horas} \quad (6.41)$$

Cálculo de la demanda de oxígeno:

a) Calcular la masa de DBO_L consumida en el proceso:

$$\begin{aligned} \text{DBO}_L \text{ consumida} &= \frac{Q(S_0 - S)}{0.7} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \\ &= \frac{19083(226 - 12)}{0.7 \times 1000} = 5833 \text{ kg/día} \end{aligned} \quad (6.42)$$

b) Demanda de oxígeno requerido para regradar DBO_L consumida:

$$\text{kgO}_2 / \text{día} = 5833 \text{ kg/día} - 1.42(P_x) \quad (6.43)$$

$$\text{kgO}_2 / \text{día} = 5833 \text{ kg/día} - 1.42 \times (1884.8 \text{ kg/día}) = 3,156.6 \text{ kgO}_2 / \text{día}$$

Para la determinación de la relación F/M (alimento/microorganismo) se utilizará la ecuación 6.25.

a) Cálculo de la relación Alimento / Microorganismo (F/M, por sus iniciales en ingles):

$$F / M = \frac{S_0}{tX} = \frac{226mg / l}{0.154d \times 3200mg / l} = 0.46d^{-1} \quad (6.44)$$

b) Cálculo de la carga volumétrica:

$$\begin{aligned} \text{Carga volumétrica (kg/m}^3 \times \text{d)} &= \frac{S_0 Q}{Vr} (1/1000kg / d) & (6.45) \\ &= \frac{(226mg / l)(19083m^3 / d)}{2945m^3} \times \frac{1}{1000} \\ &= 1.46kgDBO_5 / m^3 - \text{día} \end{aligned}$$

Gasto de aire requerido:

a) La cantidad teórica de aire necesaria, suponiendo que el contenido de oxígeno en el aire es del 21 %, es:

$$\text{Oxígeno requerido} / (\text{densidad del aire} \times 0.21) \quad (6.46)$$

$$\text{Cantidad de aire necesaria} = \frac{3156.6 \text{ kg/día}}{1.21 \text{ kg/m}^3 \times 0.21} = 12423 \text{ m}^3 / \text{día} \quad (6.47)$$

6.4.2 Cálculo del sedimentador secundario

Con base en las pruebas de sedimentabilidad del lodo activado presentadas en la Tabla 6.3 se puede construir una curva de flujo de sólidos por gravedad en el sedimentador secundario por diseñar. Para ello es necesario estimar las velocidades de sedimentación del lodo, correspondientes a diversas concentraciones del mismo. Por tal motivo se construye una curva con los datos presentados en la Tabla 6.3 y se obtiene una regresión exponencial para estimar velocidades de concentraciones no reportadas (Figura 6.6).

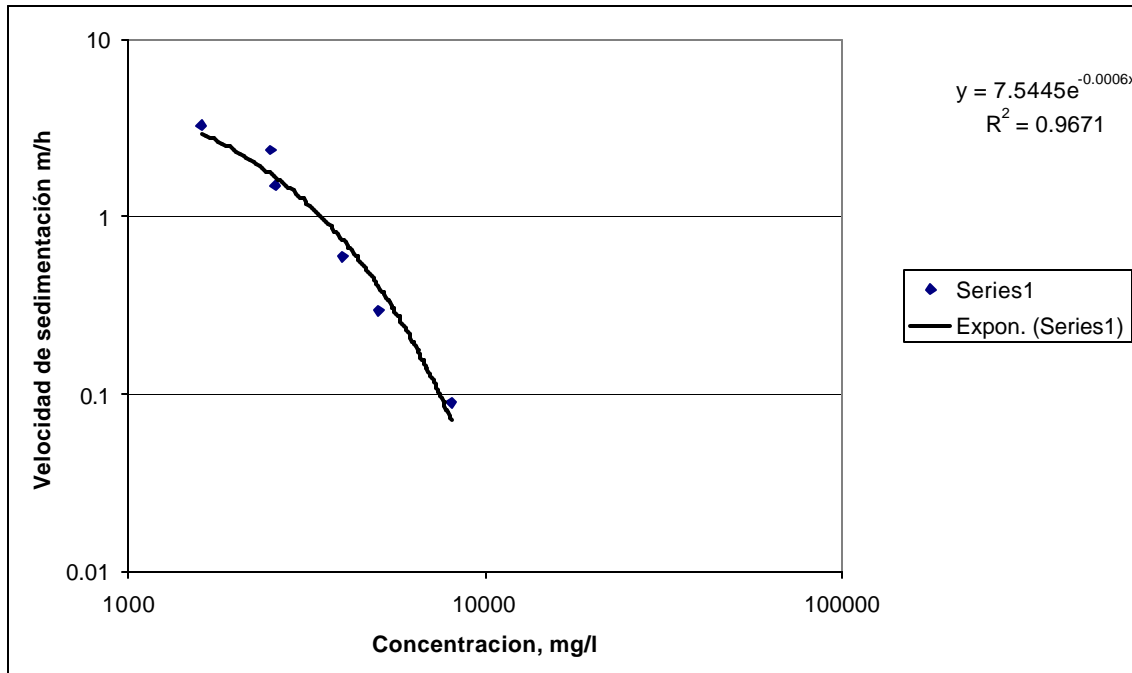


Figura 6.6 Datos de sedimentación en papel doblemente logarítmico

Con los datos obtenidos de concentración de sólidos y velocidad de sedimentación, se recurre a la ecuación 6.26, y se calcula el flujo de sólidos (SF_g) (ver Tabla 6.4).

Tabla 6.4 Flujo de sólidos para el sedimentador secundario

Concentración de sólidos, X, mg/L	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
Velocidad de sedimentación inicial, m/h	4.14	3.07	2.27	1.68	1.25	0.68	0.38	0.21	0.11	0.06	0.03
Flujo de sólidos, $kg/m^2 \cdot h$	4.14	4.60	4.54	4.21	3.74	2.74	1.88	1.24	0.79	0.50	0.31

Con los flujos de sólidos obtenidos y sus correspondientes concentraciones de lodo que los producen, se prepara una curva como la que se muestra en la Figura 6.7.

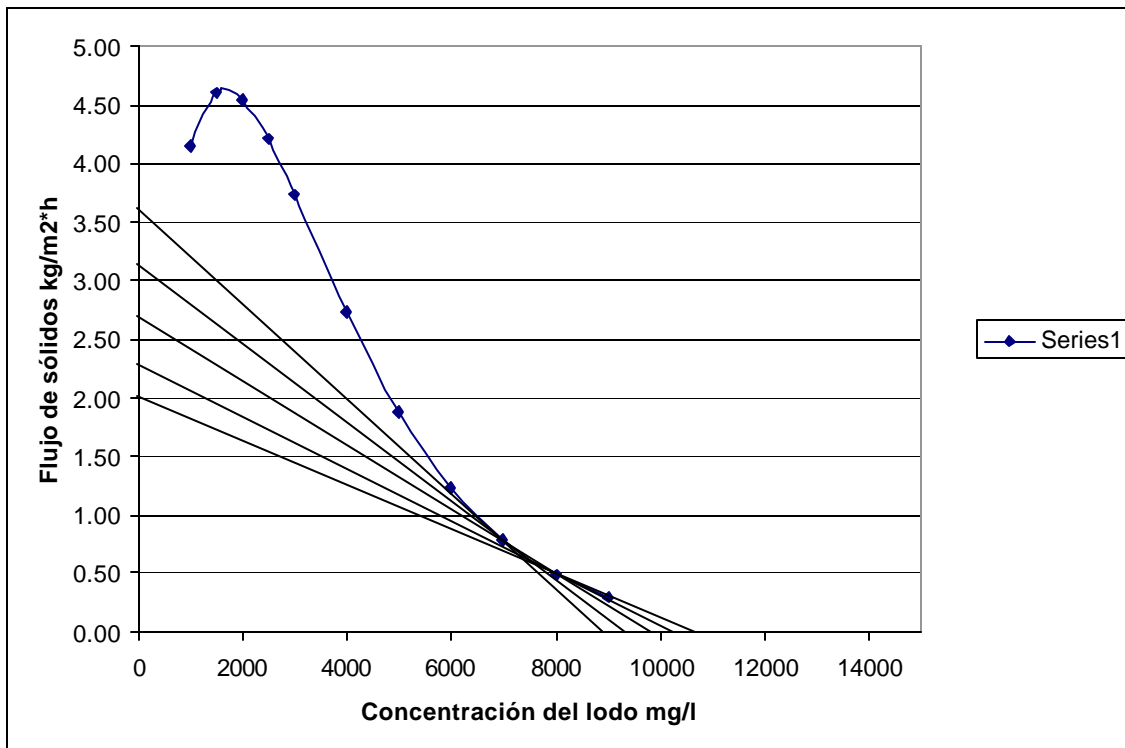


Figura 6.7 Flujo de sólidos contra concentración del lodo.

Utilizando esta curva, se trazan tangentes a la curva de flujo de sólidos en los puntos de concentración del lodo deseados (ver Figura 6.7), y a continuación se prepara una tabla resumen (Tabla 6.5) de los valores límite del flujo de sólidos (intersección eje y) para las diferentes concentraciones del lodo del fondo.

Tabla 6.5 Valores límite del flujo de sólidos con sus concentraciones correspondientes

Concentración de Lodos mg/L	8900	9300	9700	10100	10500
Flujo de Sólidos limitante kg/m ² *h	3.6	3.15	2.7	2.3	2

Para determinar la relación de recirculación necesaria para mantener la concentración de sólidos suspendidos del líquido mezcla (SSLM) en 4,000 mg/l, se utiliza la siguiente relación mediante un balance de masa en el afluente al reactor:

$$QX_0 + Q_r X_u = (Q + Q_r) \times 4,000 \text{ mg/l} \quad (6.48)$$

donde: Q = caudal afluente, m³/d

Q_r = caudal de recirculación, m³/d

X_0 = sólidos suspendidos del afluente, mg/L

X_u = sólidos suspendidos del caudal inferior, mg/L

Suponiendo que $X_0 = 0$ y $Q_r = aQ$, la expresión anterior se puede reescribir como:

$$aQX_u - a(4000 \text{ mg/l})Q = Q(4000 \text{ mg/l})$$

$$a = \frac{4000 \text{ mg/l}}{X_u - 4000 \text{ mg/l}} \quad (6.49)$$

donde a = relación de recirculación, Q_r/Q . (Tabla 6.6)

Tabla 6.6 Diferentes valores de a en función de las diferentes concentraciones de lodo del fondo.

Xu mg/L	8,900	9,300	9,700	10,100	10,500
Xu-4000 mg/L	4,900	5,300	5,700	6,100	6,500
a	0.82	0.75	0.70	0.66	0.62

Las relaciones de recirculación calculadas y utilizando una forma modificada de la ecuación 6.27, se podrá calcular la superficie de espesamiento necesaria del sedimentador para diferentes concentraciones del lodo (ver Tabla 6.7).

$$A = \frac{(1 + a)QX (3600s/h)}{SF_L} (1/1000g/kg) \quad (6.50)$$

donde: A = área transversal, m^2 .

Q = caudal volumétrico total que entra en el tanque de sedimentación, $m^3/día$

X = concentración de sólidos en el líquido mezcla, mg

SF_L = flujo de sólidos límite, $kg/m^2 \times día$

$a = Q_r/Q$

Tabla 6.7 Áreas de espesamiento

Xu mg/L	8,900	9,300	9,700	10,100	10,500
Flujo de Sólidos limitante $kg/m^2 \cdot h$	3.6	3.15	2.7	2.3	2
a	0.82	0.75	0.70	0.66	0.62
Area m^2	1,598	1,765	1,997	2,281	2,559

Con estos valores de las áreas y conociendo el caudal de entrada que es de 19,083 m³/d ó 792m³/h, se podrán calcular las cargas superficiales correspondientes (Tabla 6.8).

Tabla 6.8 Cargas de superficie

Area m²	1,598	1,765	1,997	2,281	2,559
Carga de Superficie m³/m²*h	0.50	0.45	0.40	0.35	0.31

Para comprobar que se cumplen las exigencias de clarificación suponiendo que el diseño final estará basado en una concentración del lodo del fondo de 9700 mg/l. La carga de superficie para esta concentración corresponde a 0.40 m³/m²*h, lo cual es equivalente a una velocidad de sedimentación de 0.40 m/h. Con la curva de sedimentación, esta velocidad correspondería a una concentración de lodo del fondo de 4, 900 mg/l.

Para estimar la profundidad necesaria para el espesamiento, se supondrá que la profundidad mínima permisible en la zona clarificada del tanque de sedimentación es de 1.5 m. También se supondrá que bajo condiciones normales, la masa de lodo retenida en el tanque de sedimentación secundaria es igual al 30 % de la masa del tanque de aireación, y que la concentración media de sólidos en la zona de lodos es aproximadamente de 7000 mg/l.

$$\begin{aligned} \text{Masa de sólidos en el tanque de aireación} &= (2,945\text{m}^2)(4,000\text{mg/l})(1/1,000\text{kg/g}) \\ &= 11780 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{Masa de sólidos en el tanque de sedimentación} = 0.3 \times 11,780 = 3,534 \text{ kg}$$

La profundidad de la zona de lodos en el tanque de sedimentación se puede calcular utilizando la siguiente relación:

$$(A, m^2)(d, m)(7,000 mg / l) = 3,534 kg$$

$$d = \frac{3,534 kg}{(7,000 mg / l) \times (1997 m^2)} \times (1,000 g / kg) \quad (6.51)$$

$$d = 0.25 m$$

A continuación se estimará la capacidad de almacenamiento necesaria en la zona de lodos suponiendo que en condiciones de caudal punta el exceso de sólidos se debe almacenar en el tanque de sedimentación secundaria debido a la limitada capacidad de las instalaciones de manejo de lodos. Como se mencionó anteriormente el caudal punta es de $2.17 \times Q_{prom.}$ y la carga punta de DBO en 7 días es $1.5 \times DBO_{prom.}$ Se supondrá que ambas puntas se producen simultáneamente. Para esto, se calculará la producción de sólidos bajo condiciones dadas utilizando la ecuación 6.24:

$$P_x = Y_{obs} Q(S_0 - S) \times (1 / 1,000 kg / g) \quad (6.52)$$

$$Y_{obs} = 0.4615$$

$$Q = 2.17 \times 19,083 \text{ m}^3/\text{d} = 41,410 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$S_0 = 1.5 \times 226 \text{ mg/l} = 339 \text{ mg/L}$$

$$S = 15 \text{ mg/L (valor supuesto para condiciones de cargas aumentadas)}$$

$$P_x = 0.4615 \times (41410)(339 - 15) \times (1/1,000)$$

$$P_x = 6,192 \text{ kg}$$

Con esto se podrá calcular la profundidad de almacenamiento de lodos necesaria para el tanque de sedimentación. Se supondrá que los sólidos totales en el tanque de sedimentación equivalen a 9,723 kg (6,162+3,534).

$$d = \frac{9,726 \text{ kg}}{(7000 \text{ mg/l}) \times (1997 \text{ m}^3)} (1,000 \text{ g/kg})$$

$$d = 0.7 \text{ m}$$

Por lo tanto la profundidad total necesaria será de:

$$\text{Profundidad} = (1.5 + 0.25 + 0.7) = 2.45 \text{ m} \quad (6.53)$$

Pero la Tabla 6.2 muestra que la profundidad mínima permisible es de 3.6 m, por lo que se utilizará este valor. Ahora se tendrá que comprobar la carga de superficie a caudal punta, el cual es de 41,410 m³/d, por lo tanto la carga de superficie a caudal punta será:

$$CS_{cp} = (41,410 \text{ m}^3/\text{d}) / (1,997 \text{ m}^2) = 20.7 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{d} \quad (6.54)$$

Este valor queda por debajo del valor de la Tabla 6.1 relativo al caudal punta.

El tiempo de retención del tanque de sedimentación resultará de la división del volumen del mismo entre el caudal promedio.

$$t = V / Q = [(1,997 \text{ m}^2 \times 3.6 \text{ m}) / (19,083 \text{ m}^3/\text{d})] \times 24 \text{ h} = 9 \text{ h} \quad (6.55)$$

En la Tabla 6.9 se presenta un resumen de los datos de diseño de las instalaciones de sedimentación.

Tabla 6.9 Resumen de los datos de diseño para el sedimentador secundario.

Parámetro	Valor
Superficie	1,997 m ²
Profundidad	3.6 m
Tiempo de retención	9 h
SSLM	4,000 mg/L
Flujo de sólidos limitante	2.7 kg/m ² *h
Carga de superficie	
A caudal promedio (Q ₀ = 19,083m ³ /día)	0.40 m ³ /m ² *h
A caudal punta (Q = 41,410m ³ /día)	0.8625 m ³ /m ² *h

6.4.3 Modelación del tratamiento secundario

La carga orgánica que entra al tratamiento secundario (S_0) puede variar por razones externas. Estos cambios en la concentración de materia orgánica se pueden presentar en temporada de lluvias por "dilución", o bien por la construcción de alguna fábrica de productos lácteos o alguna otra industria con características similares, cuyas descargas llegaran a la planta. En el primer caso, el contenido de materia orgánica en el agua residual puede diluirse con agua de lluvia, reduciendo su concentración hasta en un 50%. En el segundo caso, las concentraciones

de materia orgánica pueden incluso aproximarse a los 1,000 mg-DBO₅/L. A continuación se modelarán las concentraciones de sustrato a la entrada del tratamiento secundario.

El primer paso a realizar es proponer las diferentes concentraciones de DBO₅ a la entrada del reactor y multiplicarlas por 64%, asumiendo que la remoción de DBO producida por el sedimentador primario permanece igual que en el diseño original (ver Tabla 6.10).

Una vez obtenidas estos DBO_{5, reducidos}, se calculará la concentración de sustrato a la salida (*S*) mediante la siguiente ecuación:

$$S = k \frac{1 + bq_x}{Yq - (1 + bq_x)} \quad (6.56)$$

donde $k = 60$ mg-DBO/L

$$b = .06 \text{ d}^{-1}$$

$$q_x = 5 \text{ días}$$

$$Y = 0.6 \text{ mg-VSS/mg-DBO}_L$$

$$q = 27 \text{ mg-DBO}_L/\text{mg-VSS} \times \text{día}$$

Tabla 6.10 DBO₅ a la entrada del sistema y sus correspondientes DBO₅ reducidos por el tratamiento primario.

DBO a la entrada (mg/L)	DBO reducido (mg/L)
100	64
200	128
300	192
353	226
400	256
500	320
600	384
700	448
800	512
900	576
1000	640

Sustituyendo estos valores, se obtiene una concentración de sustrato (S) de 0.98 mg-DBO₅/L. Conociendo la concentración de sustrato que escapa del sistema se puede estimar ahora las diferentes concentraciones de biomasa en el reactor (X_a), utilizando las diferentes concentraciones de DBO₅ reducidas (S_0 , de la Tabla 6.10). La concentración de microorganismos activos se puede calcular con la siguiente expresión:

$$X_a = \frac{q_x Y (S_0 - S)}{t(1 + bq_x)} \quad (6.57)$$

donde $q_x = 5$ días

$$b = .06 \text{ d}^{-1}$$

$$Y = 0.6 \text{ mg-VSS/mg-DBO}_L$$

$$t = 0.154 \text{ días}$$

$$S = 0.979 \text{ mg-DBO}_5/\text{L}$$

$$S_0 = \text{concentraciones de DBO}_{5,\text{reducidas}} \text{ a la entrada (Tabla 6.10)}$$

Sustituyendo las diferentes concentraciones de DBO₅ reducidas a la entrada, se obtuvieron los siguientes resultados para X_a :

Tabla 6.11 Concentraciones de microorganismos activos

DBO ₅ a la entrada (mg/L)	DBO ₅ reducido (mg/L)	X_a (mg-VSS/L)
100	64	944
200	128	1903
300	192	2862
353	226	3371
400	256	3821
500	320	4781
600	384	5740
700	448	6699
800	512	7658
900	576	8617
1000	640	9576

Conociendo las diferentes concentraciones de microorganismos activos, se podrá calcular el DBO_{total} a la salida con la siguiente expresión:

$$DBO_{total} = S + 1.42 \frac{gDBO}{gVSS} X_a f_d \quad \% \text{ de sólidos que se escapan del sedimentador} \quad (6.58)$$

donde $S = 0.979 \text{ mg-DBO}_5/\text{L}$

X_a = concentraciones de microorganismos activos en mg/l

f_d = fracción biodegradable de la biomasa = 0.8

$\% = 0.01$

Sustituyendo las diferentes concentraciones de microorganismos activos, se obtienen los diferentes valores $DBO_{totales}$ a la salida, los cuales se muestran en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12 $DBO_{totales}$ a la salida.

DBO a la entrada (mg/L)	DBO reducido (mg/L)	X_a (mg-VSS/L)	$DBO_{totales}$ (mg/L)
100	64	944	12
200	128	1903	23
300	192	2862	33
353	226	3371	39
400	256	3821	44
500	320	4781	55
600	384	5740	66
700	448	6699	77
800	512	7658	88
900	576	8617	99
1000	640	9576	110

Como se puede observar en la Tabla 6.12, para mantener la concentración máxima de 40 mg/L de DBO₅ permisible (para proteger la vida acuática en el cuerpo de agua receptor NOM-001-ECOL-1996), se acepta un DBO₅ máximo de entrada de 353 mg/l, mismo con el que se diseñó el tratamiento biológico.

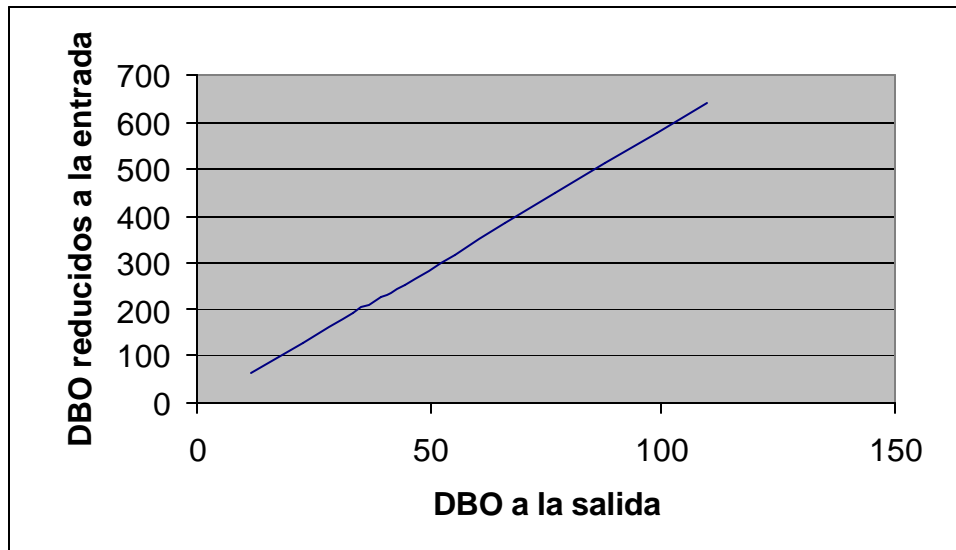


Figura 6.8 DBO₅ reducidos de entrada y DBO₅ de salida

Sin embargo, se observa que una concentración de 1,000 mg/l de DBO a la entrada, produce un DBO₅ a la salida del sistema de 110 mg/L, la cual todavía se encuentra dentro de los 150 mg/l de DBO₅ permisibles a la descarga que establece la Norma NOM-001-ECOL-1996 para uso agrícola. No obstante, la descarga producida por el sistema sería inapropiada para vertirse en un cuerpo de agua receptor con vida acuática, de acuerdo a la misma Norma Oficial. En la Figura 6.8 se muestra una gráfica con los diferentes DBO₅ de entrada reducidos por la remoción de DBO₅ del sedimentador primario contra sus DBO a la salida correspondientes.