

LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Sérgio Rolim Mendonça

7.1. GENERALIDADES. VENTAJAS Y DESVENTAJAS. TIPOS.

Las lagunas de estabilización son el método más simple de tratamiento de aguas residuales que existe. Son constituidas por excavaciones poco profundas cercadas por taludes de tierra. Generalmente tienen forma rectangular o cuadrada.

El tratamiento a través de lagunas tiene tres objetivos:

- Remover de las aguas residuales la materia orgánica que ocasiona la contaminación.
- Eliminar los microorganismos patógenos que representan un grave peligro para la salud.
- Utilizar su efluente para reuso, con otras finalidades, como agricultura, por ejemplo.

Por lo tanto, los factores que influyen sobre la calidad deseada para el efluente de las lagunas de estabilización dependen de la visión de los diferentes sectores:

- Salud - número de microorganismos patógenos o indicadores.
- Medio ambiente - principales indicadores de la contaminación: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos (SS).
- Reuso - dependiendo del uso que se dará al efluente, serán definidos los criterios para la reducción de DBO y SS y bacteriológica.

Los métodos de tratamiento convencionales (lodos activados o filtros de escurrimiento) usados en los países desarrollados consumen grandes cantidades de energía, además de usar equipos electromecánicos sofisticados y dispendiosos y necesitar de técnicos especializados para su adecuada operación y mantenimiento.

Esos métodos no tienen éxito en los países en desarrollo debido principalmente a la dificultad para operar y mantener esos equipos y de mantener un stock de repuestos adecuado, además de las barreras para la obtención de recursos financieros para tal fin.

La mayoría de los países de clima tropical ofrece condiciones ideales para el tratamiento de las aguas residuales mediante procesos naturales, como es el caso de las lagunas de estabilización. Esto se debe principalmente a la temperatura ambiente.

La relación que existe entre las bacterias y las algas en una laguna de estabilización está presentada por la Figura 7.1.

Las bacterias descomponen la materia orgánica, formando nitrógeno inorgánico, NH_3 , fosfatos, PO_4 y dióxido de carbono, CO_2 . Las algas usan estos compuestos juntamente con la energía de la luz solar, para la fotosíntesis, liberando oxígeno para la solución. El oxígeno es, a su vez, asimilado por las bacterias, cerrando así el ciclo. El efluente de una laguna de estabilización contiene algas suspendidas y el exceso de los productos finales de

Ingeniero Civil y Sanitario. "Master of Science" en Control de la Contaminación Ambiental de la Universidad de Leeds, Inglaterra. Asesor en Salud y Ambiente de la Organización Panamericana de la Salud (OPS). Colombia.

la decomposición bacteriana

Según Mendonça (1990), las principales ventajas de los sistemas de lagunas de estabilización son:

- Bajo costo.
- Necesitan poco o ningún componente importado.
- Nulo consumo energético.
- Simples de construir y de operar.
- Confiables y fáciles de mantener
- Pueden absorber aumentos bruscos de cargas hidráulicas u orgánicas.
- Posibilidad de uso como sistemas reguladores para riegos.
- Fácil adaptación a variaciones estacionarias.
- Posibilidad de tratar vertidos industriales fácilmente biodegradables (mataderos, lecherías, industrias de frutas, etc.).
- Elevada estabilización de la materia orgánica.
- Producen un efluente de alta calidad con excelente reducción de microorganismos patógenos.

Las principales desventajas de los sistemas de tratamiento convencionales son:

- Alto costo.
- Necesitan componentes importados.
- Tienen construcción compleja
- Necesitan operadores especializados.
- Necesitan mantenimiento especializado y repuestos.
- Tienden a sobrecargarse.
- Elevado consumo de energía eléctrica.
- Pobre eliminación de microorganismos patógenos.

La única desventaja de las lagunas de estabilización es que requieren mas terreno que cualquier otro tipo de tratamiento de aguas residuales.

Las lagunas de estabilización pueden ser clasificadas básicamente en cuatro tipos: anaeróbicas, facultativas, de maduración y estrictamente aeróbicas o de alta tasa.

Las *lagunas anóxicas*, según Saqqar & Pescod (1996), son un tipo de estado en que las lagunas *anaeróbicas* pueden funcionar. Las *lagunas anóxicas* que pueden ser asumidas erróneamente como lagunas anaeróbicas, son aquellas cuyo consumo de oxígeno por los microorganismos, principalmente bacterias facultativas, es cerca o levemente más grande que el oxígeno producido por las algas existentes. Estas lagunas son caracterizadas por tres aspectos principales. Primero, concentraciones diurnas de oxígeno disuelto (SO_2) a profundidades mayores que 10 cm son usualmente iguales a cero. Las *lagunas anóxicas* comparten esta propiedad con las lagunas anaeróbicas. Segundo, excepto en lagunas primarias, hay algún aumento en la concentración de los sólidos suspendidos en el efluente de la laguna, comparado con el afluente de sólidos suspendidos. Esto indica la existencia de crecimiento de algas lo cual también puede ser observado a través de la presencia de un color verdoso o por mediciones positivas de clorofila en la laguna. Tercero, el valor de pH es más alto del que normalmente se encuentra en las lagunas anaeróbicas ($\cong 7 \pm 0,2$). La segunda y tercera condiciones, las cuales son típicamente observadas en conjunto, ocurren

normalmente en las unidades de lagunas facultativas. Todas las tres condiciones deben ser satisfechas para que una laguna pueda ser clasificada como *anóxica*. Si ninguna de las condiciones segunda o tercera pueden ser obtenidas, entonces esa laguna puede ser definida como laguna anaeróbica. La laguna puede cambiar a laguna facultativa cuando la primera condición es reversada, la mayoría de las concentraciones diurnas de SO_2 (20 horas al día) exceden a 1 mg/l en la profundidad media útil de la parte superior (\cong mitad) de la laguna. Las lagunas aeróbicas son aquellas en las cuales el SO_2 puede ser detectado totalmente a través de la columna de agua de la laguna en la mayor parte del día (20 horas y más).

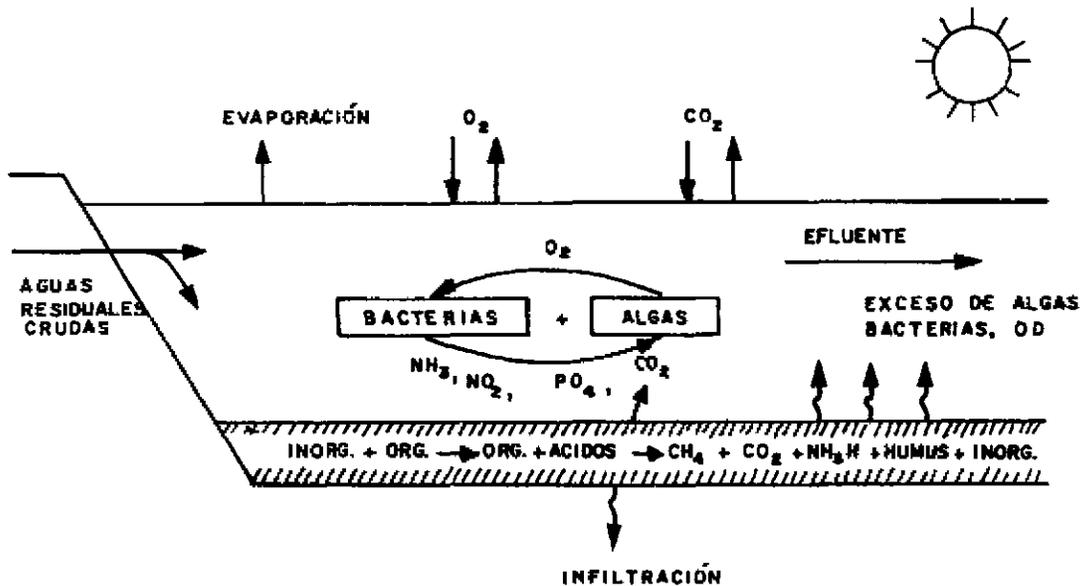


Figura 7.1- Ecosistema de lagunas facultativas.

Las *lagunas anaeróbicas* son diseñadas siempre que sea posible, en asociación con lagunas facultativas o aeradas mecánicamente. Tienen la finalidad de oxidar compuestos orgánicos complejos antes del tratamiento a través de esos tipos de lagunas. Las *lagunas anaeróbicas* no dependen de la acción fotosintética de las algas, pudiendo así ser construidas con profundidades más grandes que las otras lagunas, con variación de 3 a 5 metros. Su área del nivel medio no debe exceder a 5 ha.

Las *lagunas facultativas* tienen profundidades que varían de 1,5 a 2,5 metros con áreas relativamente grandes. La profundidad mínima de las lagunas facultativas primarias debe ser igual a 1,5 metros mientras las facultativas secundarias no deben tener profundidades inferiores a 1,2 metros. El área máxima de las lagunas facultativas no debe exceder a 15 ha. Funcionan a través de la acción de algas y bacterias con la influencia de la luz solar y de la fotosíntesis. La materia orgánica contenida en los desechos es estabilizada, parte transformándose en materia más estable en forma de celdas de algas y parte transformándose en productos inorgánicos finales que salen con el efluente. Esas lagunas son llamadas *facultativas* debido a las condiciones aeróbicas mantenidas en la superficie, liberando oxígeno y a las condiciones anaeróbicas mantenidas en la parte inferior donde la

materia orgánica es sedimentada. Son el tipo más usado

Las *lagunas de maduración* tienen la principal finalidad de reducir los coliformes fecales (CF) contenidos en los desechos de las aguas residuales. Son construidas siempre, después del tratamiento completo a través de una laguna facultativa primaria o secundaria o de una planta de tratamiento convencional. Con adecuado dimensionamiento se puede conseguir remociones de coliformes fecales mayores del 99,999%. Tienen profundidades menores que las lagunas facultativas, variando de 0,6 a 1,5 metros. El área máxima de su nivel medio no debe sobrepasar a 2 ha.

Las *lagunas estrictamente aeróbicas* o de *alta tasa de degradación* tienen profundidades muy poco profundas, variando normalmente de 0,3 a 0,5 metros, siendo su principal aplicación la producción y cosecha de algas. Son diseñadas para el tratamiento de aguas residuales decantadas. Constituyen un poderoso método para la producción de proteínas, siendo de 100 a 1000 veces más productivas que la agricultura convencional. Según Mara (1976), deberán ser usadas apenas como método de tratamiento de aguas residuales, cuando hubiera la factibilidad del reaprovechamiento de la producción de algas. Su operación exige personal capaz y su uso se restringe a unidades experimentales. Mayores detalles no serán presentados en este trabajo.

7.2. FACTORES FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS QUE INTERVIENEN EN EL MECANISMO DE AUTODEPENDENCIA DE LAS LAGUNAS

7.2.1. Introducción

Existen varios factores que afectan las condiciones hidráulicas y biológicas de las lagunas de estabilización. Algunos de esos factores pueden ser tenidos en cuenta con ocasión de la elaboración del proyecto. Entretanto, existen otros factores que no son controlables por el hombre. Son constituidos por fenómenos meteorológicos, tales como vientos, temperatura, precipitaciones pluviométricas, radiación solar y evaporación. Además de esos, pueden considerarse las variaciones locales, como infiltración y características de las aguas residuales que recibirán el tratamiento.

Todos esos factores deben ser tomados en cuenta para que sus efectos puedan ser minimizados. Previsiónes como la escogencia adecuada de la localización de la laguna y del proyecto mismo pueden reducir el impacto causado por los factores no controlables por el hombre.

7.2.2. Fenómenos naturales no controlables

7.2.2.1. Acción de los vientos.

La acción de los vientos es útil cuando es posible la homogeneización de la masa líquida, llevando oxígeno de la superficie a las capas más profundas, haciendo que el afluente y los microorganismos, sean dispersados en toda la extensión de esa masa. Auxilian al movimiento de las algas, principalmente de aquellas especies desprovistas de movimiento

propio y consideradas grandes productoras de oxígeno, como las algas verdes del género *Chlorella*. Cuando la fotosíntesis no fuere suficiente al existir déficit de oxígeno, el viento puede contribuir para la transferencia y difusión de oxígeno de la atmósfera hacia la masa líquida

Siempre que sea posible, las lagunas deben ser construidas en lugares donde la acción de los vientos dominantes no esté en dirección de las habitaciones. Las lagunas anaeróbicas, las cuales pueden expedir malos olores, como medida de precaución, deben ser construidas por lo menos a 500 o 1.000 metros de la comunidad.

Si en el lugar donde las lagunas fueron construidas, estuviere sujeto a vientos fuertes, la formación de ondas puede provocar erosión en los taludes internos. Normalmente esto puede ocurrir en lagunas con espejos de aguas superiores a 10 hectáreas. Para prevenir esos efectos, los taludes deberán recibir protección en unos 30 cm por debajo y por encima de los niveles mínimos y máximos del agua.

Los dispositivos de entrada y salida de las lagunas deben estar localizados de modo que la dirección de los vientos predominantes ocurra del efluente para el afluente. Esto hará que no sea favorecida la formación de cortocircuitos en las lagunas y evitará la salida de sobrenadantes en el efluente

7.2.2.2. Temperatura

Las reacciones físicas, químicas y bioquímicas que ocurren en las lagunas de estabilización son grandemente influenciadas por la temperatura. Es un parámetro que se relaciona con la radiación solar y afecta tanto la velocidad de la fotosíntesis como el del metabolismo de las bacterias responsables de la depuración de las aguas residuales. Esos fenómenos son retardados por las bajas temperaturas. Por eso, el proyecto de las lagunas debe tener en cuenta siempre, las condiciones de temperatura más adversas.

Una caída de 10°C en la temperatura reducirá la actividad microbiológica en aproximadamente 50%. La actividad de fermentación del lodo no ocurre significativamente en temperaturas por debajo de 17°C. Aumenta en actividad en proporción de cerca de cuatro veces para cada 5°C de elevación de temperatura entre 4°C y 22°C.

La producción óptima de oxígeno para algunas especies de algas en las lagunas facultativas es obtenida entre 20 a 25°C, con valores límites para más y para menos, respectivamente 37 y 4°C, sin embargo se sabe que temperaturas más altas pueden ser toleradas y que algunas especies de algas ya fueron observadas creciendo normalmente debajo de una capa de hielo. A partir de temperaturas próximas a 35°C, la actividad fotosintética de las algas decrece. Las *Chlorophytas* (algas verdes) tienden a disminuir o desaparecer y las *Euglenophytas* (Euglenas) pasan a predominar. Por encima de los 35°C, prevalecen las *Cyanophitas* (algas azules) y particularmente las *Oscillatorias*. Además de eso, es probable que lagunas con temperaturas más altas sean más sensibles a choques hidráulicos o a repentinos aumentos de carga orgánica, con la consecuente menor eficiencia en la reducción de DBO. Los géneros más comunes de algas encontradas en las lagunas son presentadas por la Figura 7.2.

La actividad bacteriana se torna más intensa en temperaturas más altas, en las cuales el oxígeno disuelto es usado a una tasa mayor. Si la cantidad de oxígeno solicitada no fuere

compensada por una producción más alta de oxígeno, condiciones anaeróbicas pueden prevalecer y el efluente puede tornarse turbio y aparecer malos olores.

La variación de temperatura del agua en las lagunas es menor que en el aire, en virtud de que la inercia térmica del agua es mayor que la del aire. La temperatura superficial del agua es casi siempre inferior a la del aire.

Los cambios bruscos o repentinos en la temperatura pueden acarrear problemas de corta duración en las lagunas facultativas. La figura 7.3 presenta esta variación.

La actividad de las algas puede cesar después de una brusca disminución en la temperatura, originando sedimentación parcial de las mismas, lo que acarreará un aclaramiento en la coloración verdosa de las lagunas, acompañado de una disminución de su eficiencia.

Una súbita elevación de temperatura puede provocar un rápido aumento de las actividades de las bacterias aeróbicas y facultativas, una multiplicación del número de esas bacterias y, consecuentemente un mayor consumo de oxígeno que podrá no ser suplido por las algas, así ellas pasen por un proceso de desarrollo.

Se ha verificado con relación a la calidad del efluente que, en los meses más fríos hay un aumento en la concentración de amonio y fósforo y una disminución de los sólidos en suspensión. Todos estos fenómenos están íntimamente relacionados con el decrecimiento de la actividad de las algas.

En el caso de las lagunas anaeróbicas se ha comprobado que la temperatura del agua durante la noche es prácticamente constante para todo el volumen de la laguna, con una temperatura superficial levemente inferior a la media de aquella que la laguna presenta en las horas en que la temperatura ambiente es más baja. Por lo tanto, durante la noche, un flujo de calor es producido a partir de las capas inferiores, con temperaturas levemente mayores, para la superficie. En algunas horas del día, cuando la temperatura ambiente supera la temperatura media del agua, esta absorbe energía, dando principio al proceso de estratificación térmica. El gradiente térmico es mayor cuanto más elevada fuere la temperatura ambiente en relación a la del agua.

También, en lo que se refiere a las lagunas anaeróbicas, la temperatura del efluente de la laguna es superior a la temperatura media del agua e inferior a la temperatura superficial durante las horas diurnas, en la noche, por ejemplo, los tres valores son muy semejantes.

Como en una laguna de estabilización, no existe temperatura uniforme, se torna más conveniente usar la expresión *temperatura media de la laguna o temperatura superficial de la laguna*, conforme sea el caso, a cambio de *temperatura de la laguna*.

Algunos criterios del proyecto consideran la temperatura media mínima mensual del agua que puede ocurrir durante el año. La fórmula de McGarry & Pescod (1970) considera la temperatura media mínima mensual del aire, el cual es un parámetro encontrado más fácilmente por intermedio de datos meteorológicos y tablas que las de temperatura del agua. Existen fórmulas que son usadas para convertir la temperatura del aire en temperatura del agua, pero no son aplicadas indiscriminadamente, pues pueden suministrar resultados ilusorios. Sin embargo, en ausencia de datos locales, pueden ser usados. Un ejemplo de tal fórmula es presentado por Eckenfelder Jr (1966):

$$T_o - T_e = (T_w - T_a) fA/Q \quad (7.1)$$

donde,

- Q = Caudal medio del afluente, m³/día;
- T_o = Temperatura del agua residual afluente, °C;
- T_e = Temperatura del agua residual efluente, °C;
- T_w = Temperatura media de la laguna, °C;
- T_a = Temperatura del aire, °C;
- A = Area del nivel medio de la laguna m²;
- f = Coeficiente de transferencia de calor, m/día.

De manera general, grandes reactores, lagunas por ejemplo, ganan calor de las aguas residuales afluentes, de la radiación solar y de la actividad bacteriana en el reactor. Frecuentemente, las aguas residuales afluentes son la mayor fuente de ganancia de calor, en donde la radiación solar, representa una pequeña parte y la actividad microbiana aun es menor. Por lo tanto, la ganancia de calor es esencialmente proporcional al caudal del efluente y las condiciones de la laguna. Las pérdidas de calor de la laguna pueden ocurrir simultáneamente, en gran parte a través de la convección y radiación solar y en menor escala por medio de la evaporación. Estas pérdidas son proporcionales al área superficial expuesta y las condiciones ambientales. Despreciándose las pérdidas localizadas y las ganancias, se puede efectuar un balance de energía, desde que la ganancia de calor total sea igual a la pérdida de calor total en condiciones de maduración o equilibrio en la laguna. Entonces, la ganancia de calor total es igual a la pérdida de calor total. La ecuación (7.1) podrá transformarse en la ecuación (7.2).

$$Q(T_o - T_e) = (T_w - T_a) f A / Q \quad (7.2)$$

Si las condiciones de mezcla completa ocurrieren, $T_e = T_w$, y la ecuación (7.2) será transformada en la ecuación (7.3)

$$A / Q = t / h = (T_o - T_w) / f (T_w - T_a) \quad (7.3)$$

donde,

- t = tiempo de retención, días;
- h = profundidad útil de la laguna, m.

El coeficiente de transferencia de calor es igual a 0,489 m/día, WHO EMRO (1987), para la región central de los Estados Unidos. Selcuk (1974), encontró el valor de f igual a 0,40m/día para Turquía.

El proyecto de lagunas de acumulación para el control de la polución térmica, especialmente para el caso de descargas industriales con temperaturas elevadas, que necesitan ser mantenidas en una laguna por determinado periodo de tiempo, para hacer que la temperatura sea disminuida a un valor deseable, puede ser elaborado utilizándose la ecuación (7.3).

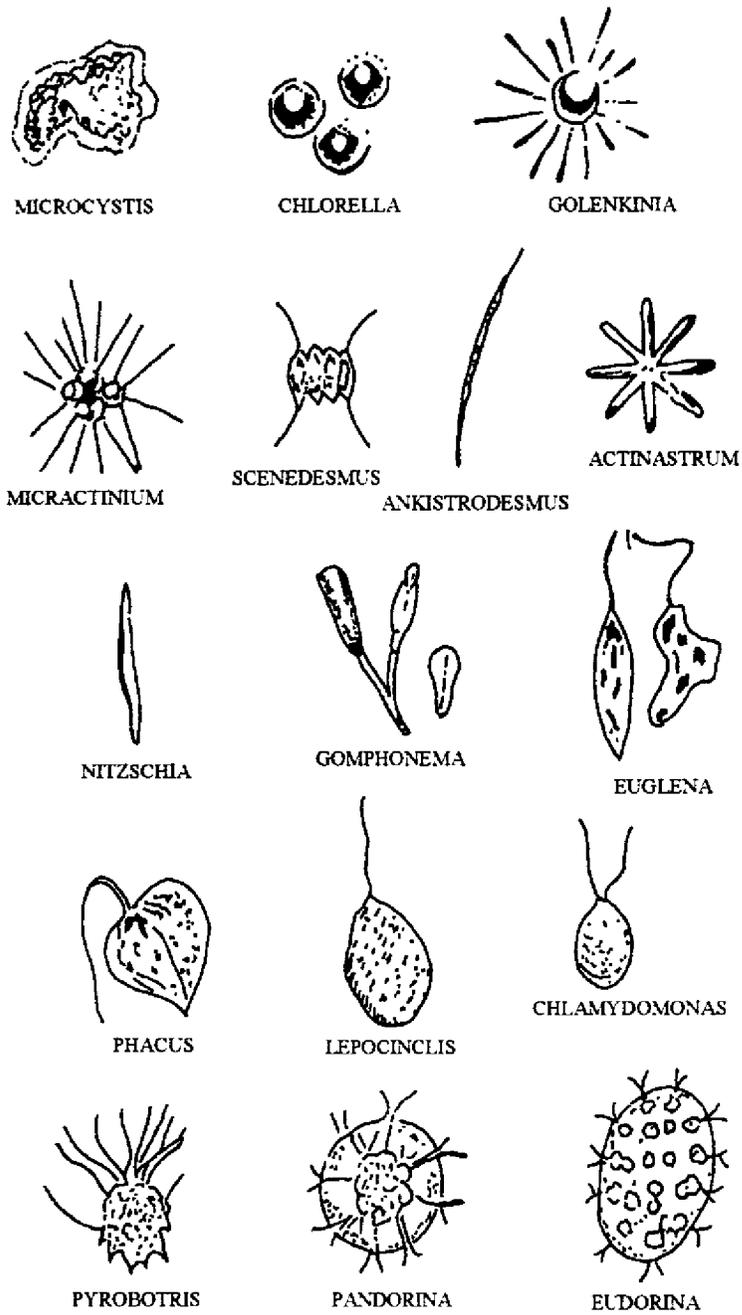


Figura 7.2- Géneros más comunes de algas encontradas en las lagunas de estabilización.

Fuente. CETESB (1989)

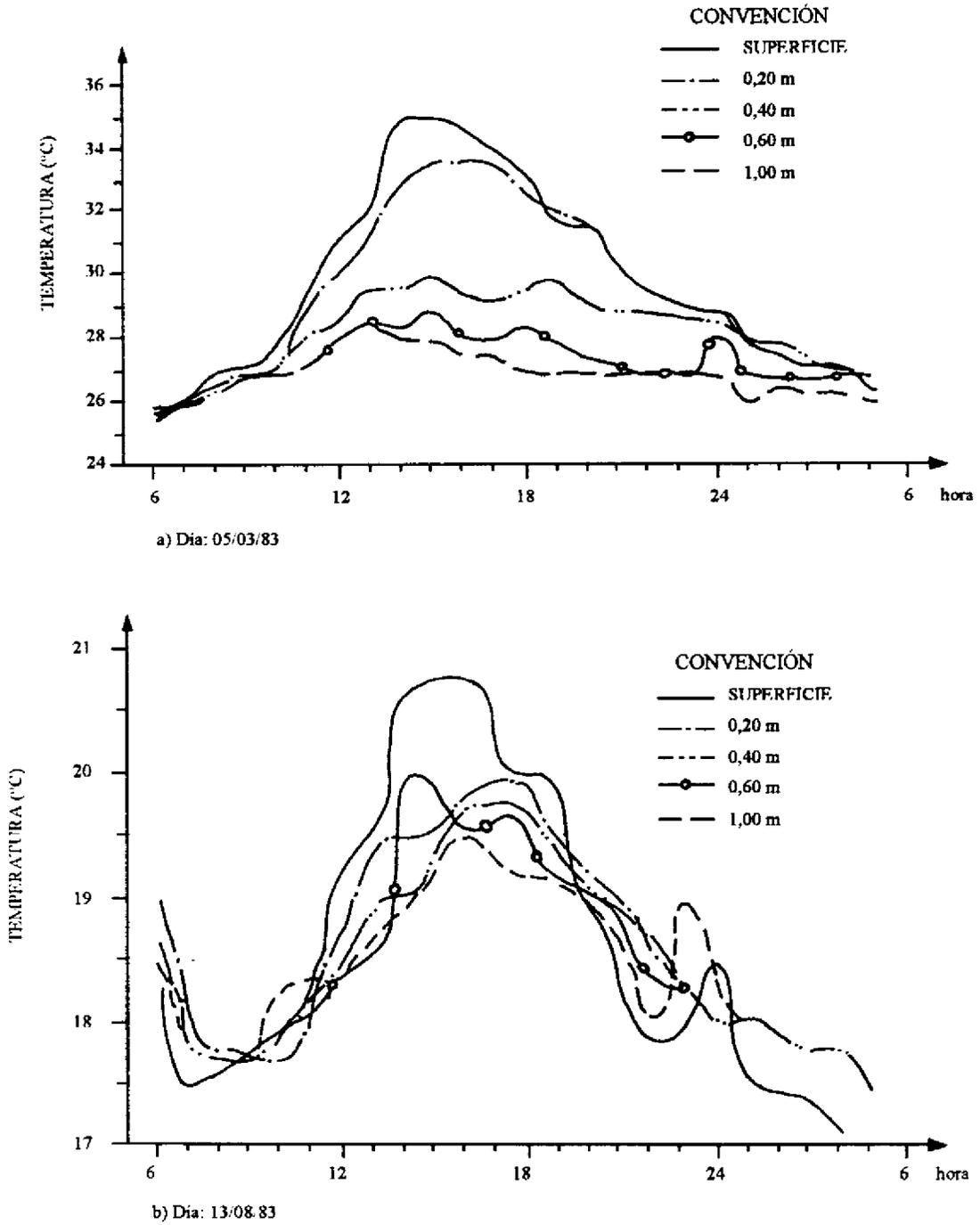


Figura 7.3- Variación horaria de la temperatura en las diferentes profundidades de una laguna facultativa (profundidad útil: 1,20 m).
 a) Situación de mala mezcla vertical.
 b) Situación de buena mezcla vertical.

Fuente: CETESB (1989)

Ejemplo 7.2.2.1 Estimar la temperatura del efluente de una laguna con 3,7 metros de profundidad y 11 días de retención, que recibe desechos líquidos de una industria con temperatura igual a 40°C. La temperatura media del aire es igual a 23°C y el coeficiente de transferencia de calor adoptado es de 0,49 m/día, admitiéndose una mezcla completa.

De la ecuación (7.3), obtenemos:

$$T_w = (hT_o + ftT_a)/(h + ft) = (3,7 \times 40 + 0,49 \times 11 \times 23)/(3,7 + 0,49 \times 11) = 30^\circ C$$

7.2.2.3. Precipitaciones Pluviométricas

La precipitación pluviométrica media y máxima podrán tener alguna influencia en la actuación y confiabilidad de la laguna. El tiempo de retención podrá ser reducido durante periodos de lluvia. Lluvias intensas pueden diluir el contenido de las lagunas rasas, afectando el alimento disponible para la biomasa. El aumento repentino del caudal podrá acarrear en el efluente grandes cantidades de sólidos, arrastre significativo de la población de algas y el acarreamiento de materiales inorgánicos, principalmente arcilla. Entre tanto, la precipitación del agua lluvia directamente en el espejo de agua de la laguna, no ha provocado efectos duraderos o perjuicios mensurables en las lagunas de estabilización.

Para que esos problemas sean minimizados, las lagunas deben ser provistas de caja de alimentación, con rebose lateral para desviar las contribuciones que excedan la capacidad de tratamiento de la instalación, para el cuerpo receptor. Para contener inundaciones, las lagunas deben estar dotadas de zanjas desviadoras de aguas lluvias, que deberán ser mantenidas limpias y conservadas.

7.2.2.4. Radiación solar

La energía solar es indispensable para la operación efectiva de las lagunas facultativas, una vez que contribuye a la producción de oxígeno a través de la fotosíntesis de las algas. Por lo tanto la idea de que la velocidad de fotosíntesis aumenta sin límite en la medida que aumenta la radiación solar, no es verdad. De hecho, además de una cierta intensidad de radiación, la tasa de aumento de la fotosíntesis disminuye hasta que la producción de oxígeno alcance un nivel constante, una especie de límite de saturación. A partir de ese punto, la producción de oxígeno fotosintético no aumentará, así la radiación solar aumente. Para bajas intensidades de luz, la luz es un factor limitante en la producción de oxígeno, en cambio que para altas intensidades de luz, durante varias horas de sol caliente en día claro, la temperatura es el factor que favorece la producción de oxígeno.

Las lagunas facultativas dependen de la radiación solar, la cual varía principalmente con la latitud. Entre tanto, otro factor significativo es la temperatura atmosférica. Las nubes y la nubosidad reducen la luz disponible en alguna extensión, pero como ya fue enfatizado, la luz solar directa no es esencial. La cantidad de luz solar disponible auxilia a determinar el área y la profundidad necesaria para una operación adecuada. La energía utilizada por las algas, proviene principalmente de la parte visible del espectro de radiación solar, particularmente entre longitudes de onda o color, de 4000 a 7000 Angstroms. Apenas del

2% al 7% de esa radiación solar visible, son utilizables por las algas para acelerar la fotosíntesis, no necesitando de una exposición continua a la energía solar. Para muchas algas, una intensidad mayor que 20.000 ergs/cm².s (480 velapés), afecta adversamente su crecimiento. Buenas condiciones de crecimiento de algas y de dispersión de oxígeno ocurren en los primeros 60 centímetros de profundidad.

La gradual reducción de luz en la medida en que la misma va penetrando a través del agua, sigue la ley de Beer - Lambert, la cual es dada por la ecuación típica de flujo de pistón de primer orden, de acuerdo con la ecuación (7.4).

$$I = I_0 e^{-\alpha C_c h} \quad (7.4)$$

donde,

- I = intensidad de la luz a cualquier profundidad, ergs/cm².s;
- I_0 = intensidad de la luz incidente en la superficie, ergs/cm².s;
- α = coeficiente de absorción de luz, cm²/mg;
- C_c = concentración de células de algas, mg/cm³;
- h = profundidad de penetración de la luz, cm.

Basado en un trabajo experimental, Oswald (1972), recomienda que, para desarrollarse una concentración específica de algas en una laguna, su profundidad permisible no debe exceder tres veces la profundidad de la penetración, adoptándose la ecuación (7.4) para la deseada concentración de algas.

La ecuación (7.4) podrá ser transformada en la ecuación (7.5).

$$h = 3(\ln I_0 - \ln I) / \alpha C_c \quad (7.5)$$

Ejemplo 7.2.2.4.1. Estimar la profundidad permisible en una laguna de modo que la concentración de algas sea igual a 80 mg/l en donde hayan nutrientes suficientes e intensidad media de luz incidente en la superficie igual a 83.700 ergs/cm².s (2 000 velapés). Admitir para la intensidad de luz en cualquier profundidad como siendo igual a 1.000 ergs/cm².s y $\alpha = 1.5 \times 10^{-3}$ cm²/mg.

De la ecuación (7.4), obtenemos:

$$h = 3 (\ln 83.700 - \ln 1.000) / 1,5 \times 10^{-3} \times 80 = 110 \text{ cm} = 1,10 \text{ m}$$

La radiación solar media es calculada por la expresión (7.6).

Radiación Media = mínima + (máxima - mínima) x factor p / cielo claro (7.6)

Los valores mensuales de radiación máxima y mínima en función de la latitud son recolectados por entidades oficiales responsables por la divulgación de esos índices, en cada país.

Ejemplo 7.2.2.4.2. Estimar la producción teórica de oxígeno por día por hectárea de superficie de laguna para una ciudad localizada en latitud 10⁰, donde el factor para cielo claro en el mes de junio es de 0,45 Admitir radiación máxima igual a 262 cal./cm² día y mínima de 129 cal./cm² día. El peso medio de las algas producidas será del orden de 6 000 cal./g. de algas, con eficiencia de conversión igual a 6%. El peso molecular del oxígeno producido se asume que sea igual a 1,3 veces la cantidad de algas producidas.

- Radiación Media = $129 + (262 - 129) \times 0,40 = 182 \text{ cal./cm}^2 \cdot \text{día}$
- Producción de algas con 6 % de eficiencia =
 $= 182 \times 10^8 \times 6 \times 10^{-2} / 6.000 \times 10^3 = 182 \text{ kg. algas/ha. día} = 18,2 \text{ g. algas/m}^2 \cdot \text{día}$
- Producción de oxígeno correspondiente
 $\text{O}_2 = 1,3 \times 182 = 237 \text{ kg O}_2/\text{ha.día}$
- Carga superficial permisible de DBO_5 en la laguna para eficiencia del 80%
 $\lambda_s = 237 / 0,80 = 296 \text{ kg DBO}_5/\text{ha.día}$
- Relación entre la radiación media y la carga superficial de DBO_5 :
 $182 / 296 = 0,61$

Neel et alli (1961) observaron que esa relación debe estar siempre por encima de 0,38 para que sea mantenido el oxígeno disuelto en la laguna.

Las figuras (7.4), (7.5) y (7.6) presentan relaciones entre la velocidad de procesamiento de la fotosíntesis, intensidad de la luz incidente, temperatura y radiación solar.

7.2.2.5. Evaporación

La evaporación combinada con la infiltración a través de una laguna con un fondo permeable determina la reducción de caudal afluente y en casos extremos, puede hacer que el caudal del efluente sea nulo

El balance hídrico está dado por la ecuación (7.7).

$$Q_e = Q_a + (P_r + P_c) - (E + P_e) \quad (7.7)$$

donde,

Q_e = Caudal del efluente;

Q_a = Caudal del afluente;

P_r = precipitación que cae sobre la laguna;

P_c = infiltración del agua subterránea en la laguna (ocurre cuando el nivel freático está por encima del fondo de la laguna),

E = Evaporación;

P_e = pérdidas por infiltración (ocurre cuando el nivel freático está por debajo del fondo de la laguna y no hay impermeabilización alguna del mismo).

Todas las unidades de la ecuación (7.7) podrán estar en $\text{m}^3/\text{día}$ o l/s .

La evaporación es una pérdida de agua que provoca una mayor concentración de sustancias poluentes, aumentando la salinidad del medio. El sustrato concentrado por encima del valor determinado, puede resultar en salinidad perjudicial al equilibrio osmótico en las paredes celulares de los microorganismos y, en consecuencia, al equilibrio biológico.

La evaporación está íntimamente ligada a las condiciones climáticas locales, dependiendo principalmente de los vientos, grado higrométrico del aire y la temperatura del aire y del agua. En el Estado de São Paulo, en términos medios se puede contar con una evaporación de 500 mm anuales, lo que corresponde a aproximadamente al 5% del efluente.

De los levantamientos climatológicos - temperatura, precipitación y evaporación, disponibles en Brasil, se verifica que la influencia de la evaporación en la eficiencia del funcionamiento de las lagunas puede ser considerada despreciable, a excepción de las regiones calientes y semiáridas localizadas en el Noreste del país.

VELOCIDAD DE FOTOSÍNTESIS NORMALIZADA

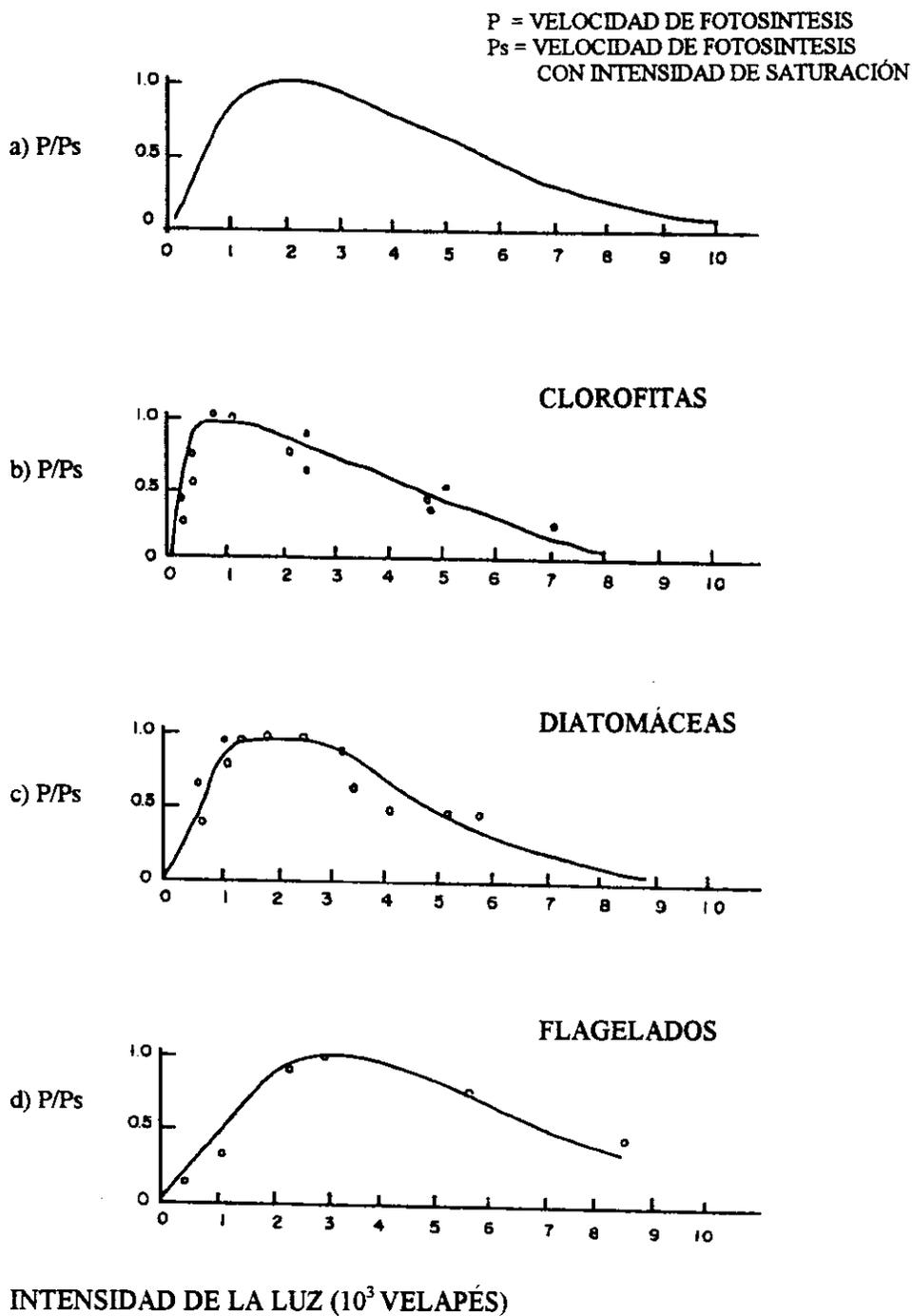


Figura 7.4 - Variación de la fotosíntesis normalizada en función de la intensidad de la luz incidente.

a) Curva teórica; b, c, d) Valores promedios (1956)

Fuente: CETESB (1989)

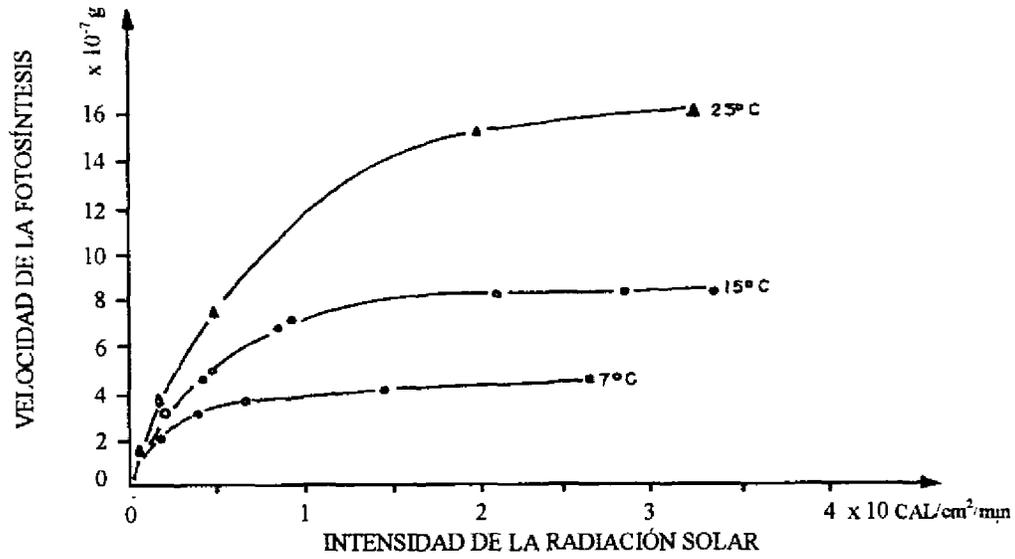


Figura 7.5 - Variación de la velocidad de la fotosíntesis en función de la temperatura y radiación solar.

Fuente: CETESB (1989)

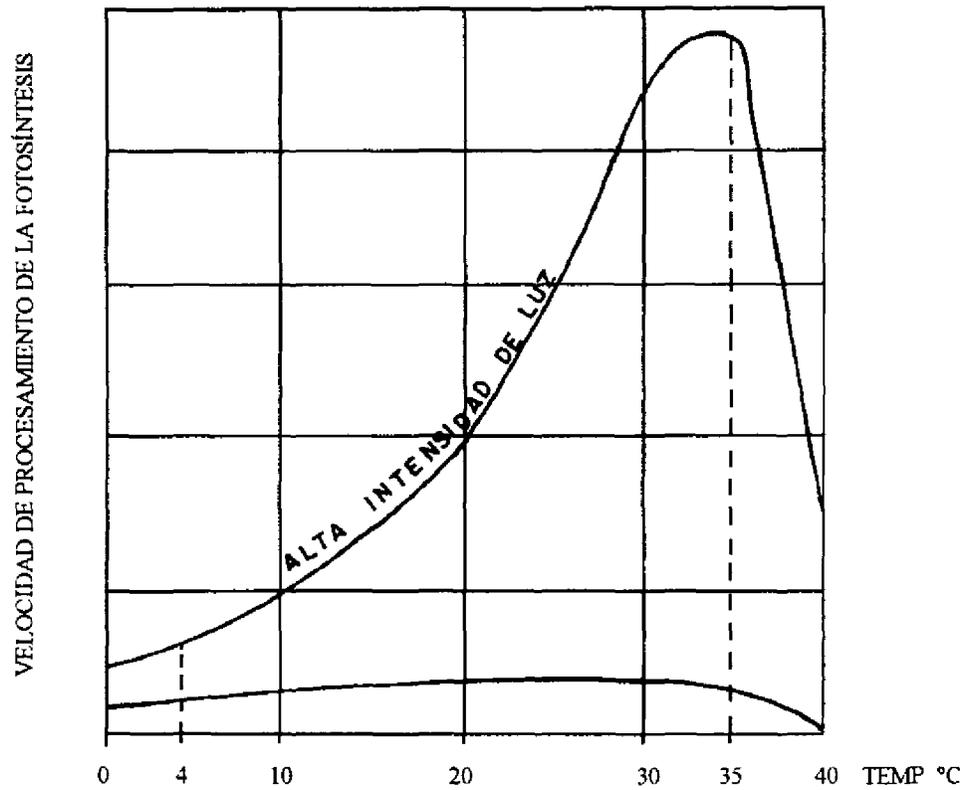


Figura 7.6 - Relación entre la velocidad de procesamiento de la fotosíntesis y la temperatura.

De acuerdo con Matsushita (1972), el mayor déficit de precipitación - evaporación, ocurre en la región semiárida del Noreste del Brasil, en donde se puede observar una variación media de la concentración de la materia orgánica del orden del 5% y una variación del volumen de la laguna del 10% del volumen del afluente de aguas residuales durante su permanencia en la laguna. Esos valores se verifican también en las regiones ecuatorial, central y centro-sur, en un periodo de cuatro a cinco meses al año. Se admiten sin embargo, que ellos no afectan el rendimiento de las lagunas.

WHO/EMRO (1987) admite que para efectos de diseño el 10% de volumen de la laguna facultativa se evapora.

7.2.3. Factores físicos

Los factores físicos están generalmente relacionados con el proyecto de las lagunas de estabilización, pudiendo ser controlados por el proyectista.

7.2.3.1. Área superficial

El área superficial de una laguna de estabilización está determinada en función de la carga orgánica, usualmente expresada en términos de DBO_5 , aplicada por día, principalmente para las lagunas facultativas.

En climas calientes, cargas orgánicas variando de 150 a 400 kg. $\text{DBO}_5/\text{ha.día}$ han sido usadas con éxito para las lagunas facultativas. Las cargas mas bajas se aplican a temperaturas del aire ambiente en torno a 20°C y las mas altas temperaturas próximas a 30°C . Las cargas superficiales que exceden de 200 a 250 kg. $\text{DBO}_5/\text{ha.día}$, han sido objeto de problemas ocasionales de malos olores, en cuanto que las cargas que excedan 400kg. $\text{DBO}_5/\text{ha.día}$, probablemente llevan a la anaerobiosis, esto es, ausencia de oxígeno disuelto y/o a una caída brusca en la eficiencia total del sistema.

Las lagunas anaeróbicas son dimensionadas en función de las tasas volumétricas o a partir de los tiempos de retención previamente fijados.

La experiencia en otros países recomienda carga orgánica volumétrica de DBO_5 variando entre 100 a 400 g $\text{DBO}_5/\text{m}^3.\text{día}$, tiempo de retención de tres a mas días, láminas de agua de 3 a 5 metros y cargas orgánicas superficiales variando de 1.000 a 6.000 kg. $\text{DBO}_5/\text{ha.día}$.

En el Estado de São Paulo no existe ninguna laguna anaeróbica que opere acercándose a esos criterios. La CETESB (1989), constató que en lagunas anaeróbicas funcionando con cargas superficiales de 2.000 kg. $\text{DBO}_5/\text{ha.día}$, el olor llega a tomarse incómodo.

En el Noreste de Brasil, Campina Grande, Estado de Paraíba, investigaciones realizadas por Silva (1982), constataron que la carga orgánica volumétrica ideal para las lagunas anaeróbicas tratando aguas residuales domésticas está cerca de 300 g $\text{DBO}_5/\text{m}^3.\text{día}$ para un tiempo de retención variando entre 1 y 2 días, con reducción de DBO_5 del orden de 70 a 80% y temperatura del agua en un rango de variación de 25 a 27°C .

La latitud es también un factor preponderante en la escogencia de la carga orgánica superficial de la laguna facultativa. Como primera aproximación para el proyecto de

lagunas facultativas se puede usar la ecuación (7.8), propuesta por Arceivala et al. (1970)

$$\lambda_s = 375 - 6,25L \quad (7.8)$$

donde,

λ_s = carga orgánica máxima superficial en kg. DBO₅/ha.día;

L = latitud.

La figura 7.7 presenta cargas orgánicas recomendables para lagunas de estabilización en India en función de la latitud, estimadas en función de la ecuación (7.8).

Las lagunas facultativas pueden funcionar como lagunas primarias o secundarias. Según la CETESB (1989) es muy importante el establecimiento de la máxima carga orgánica superficial, para que queden aseguradas las dos condiciones esenciales:

- que la operación se procese sin desprendimiento de malos olores. Para eso, la demanda de oxígeno solicitada por las bacterias no debe exceder de la capacidad de reoxigenación resultante de la fotosíntesis y de la reaireación superficial;
- que la calidad del efluente, obtenida en una primera laguna, determina el tamaño de la siguiente laguna, esto es, cuanto menos suficiente fuera la remoción de DBO₅ en la célula primaria, mayor será el tamaño de una o de las demás lagunas siguientes

7.2.3.1.1. Cargas orgánicas superficiales para lagunas facultativas (kgDBO₅/ha.día)

⇒ *Recomendaciones de la OMS*

- climas tropicales 200 a 400
- 20 a 25° C 200 a 250
- 25 a 30° C 250 a 400

EXTRABES, Campina Grande, Paraíba, Nordeste Brasil: hasta 400 o más

- para temperatura promedio anual de 26° C, en Campina Grande ideal hasta 350

⇒ *Lagunas de San Juan, Lima, Perú:* 400 a 1158

- olores livianos ocasionales 200 a 400

malos olores livianos con frecuencia y fuertes olores a cargas mayores de 700, con temperaturas entre 19 y 27,5° C, además de muy baja precipitación pluvial (entre 1,0 mm a 1,9 mm por mes)

400 a 700

7.2.3.2. Altura de la lámina líquida

Después de la construcción de las lagunas, éstas deben ser llenadas con aguas residuales o agua del cuerpo receptor a través de bombeo, a una profundidad mínima de 1 metro. Si la lámina mínima de agua bajara hacia los 60 cm probablemente habrá un desarrollo de plantas acuáticas y gran parte de la superficie de la laguna estará cubierta de vegetación que subirá por encima de la superficie del agua. La penetración de la luz se dificultará y la eficiencia de la laguna podrá caer a un nivel inaceptable. Podrá haber entonces

proliferación de mosquitos. Los mismos problemas podrán ocurrir durante los primeros meses de funcionamiento de la laguna, cuando su nivel aun esté bajo. Es aconsejable que la laguna sea llenada hasta llegar a un nivel normal de operación lo más rápido posible, aun cuando no sea con aguas residuales. Cuando el nivel del agua llegare a un valor mayor de 2 metros, la luz solar tendrá dificultad de alcanzar las capas inferiores haciendo que la fotosíntesis se reduzca al punto de desarrollar en el fondo de la laguna, una gran capa anaeróbica, que podrá eventualmente perjudicar el proceso.

En el caso de desechos industriales que funcionan periódicamente, la lámina de agua debe ser mantenida en un mínimo de 90 cm. El mantenimiento mínimo de una laguna es necesario para impedir la exposición de los bancos de lodos a la atmósfera previniendo con eso la emanación de malos olores.

Cuando la tasa de infiltración en el suelo es grande, podrá haber la posibilidad de contaminación del nivel freático, además de existir la dificultad de mantenerse el nivel en la laguna. Se debe efectuar la impermeabilización del fondo de la laguna, cuando el suelo presenta en su composición menos del 15 % de arcilla, tierra violácea o tierra natural. La permeabilización del fondo de la laguna podrá ser hecha utilizándose arcilla compactada, revestimiento asfáltico o tela de polietileno. En suelos permeables existe reducción gradual de la tasa de permeabilidad, en la medida que los vacíos del mismo son ocupados por el lodo a través de la colmatación, ocurriendo el impedimento total de la infiltración alrededor de los 6 meses

7.2.3.3. Cortocircuitos

La ocurrencia de cortocircuitos en las lagunas es la causa de varios problemas, tales como la aparición de zonas muertas o estancadas que reducen el volumen efectivo y el área superficial de la laguna, con la posibilidad de problemas de olor en las áreas sobrecargadas. La reducción de la eficiencia de la laguna es una consecuencia inevitable.

Las aguas residuales deben ser introducidas en la laguna abajo de la superficie a una cierta distancia de su borde. Es aconsejable que sean previstas dos o más entradas a través de tuberías y la salida sea instalada lo más distante posible de la más próxima entrada. La salida de las lagunas debe estar ubicada en sentido contrario a la dirección de los vientos dominantes y así facilitar la disminución de materiales flotantes hacia el cuerpo receptor. Las corrientes de agua inducidas por los vientos son más propensas a la formación de cortocircuitos de lo que propiamente son las posiciones relativas de entrada y salida. Lagunas con formas irregulares, también contribuyen para la formación de cortocircuitos.

7.2.3.4. Mezcla.

La distribución de las aguas residuales en una laguna debe ser lo más uniforme posible, para que se pueda utilizar todo el volumen de la laguna proyectada para el tratamiento obteniéndose con eso el tiempo de retención ideal. De esa manera será posible evitarse la formación de cortocircuitos o corrientes preferenciales y zonas muertas o regiones en donde las aguas quedan quietas.

- En las grandes lagunas, principalmente las facultativas se pueden instalar cortinas de lona plástica, en forma de canales independientes o en forma de mamparas de flujo horizontal

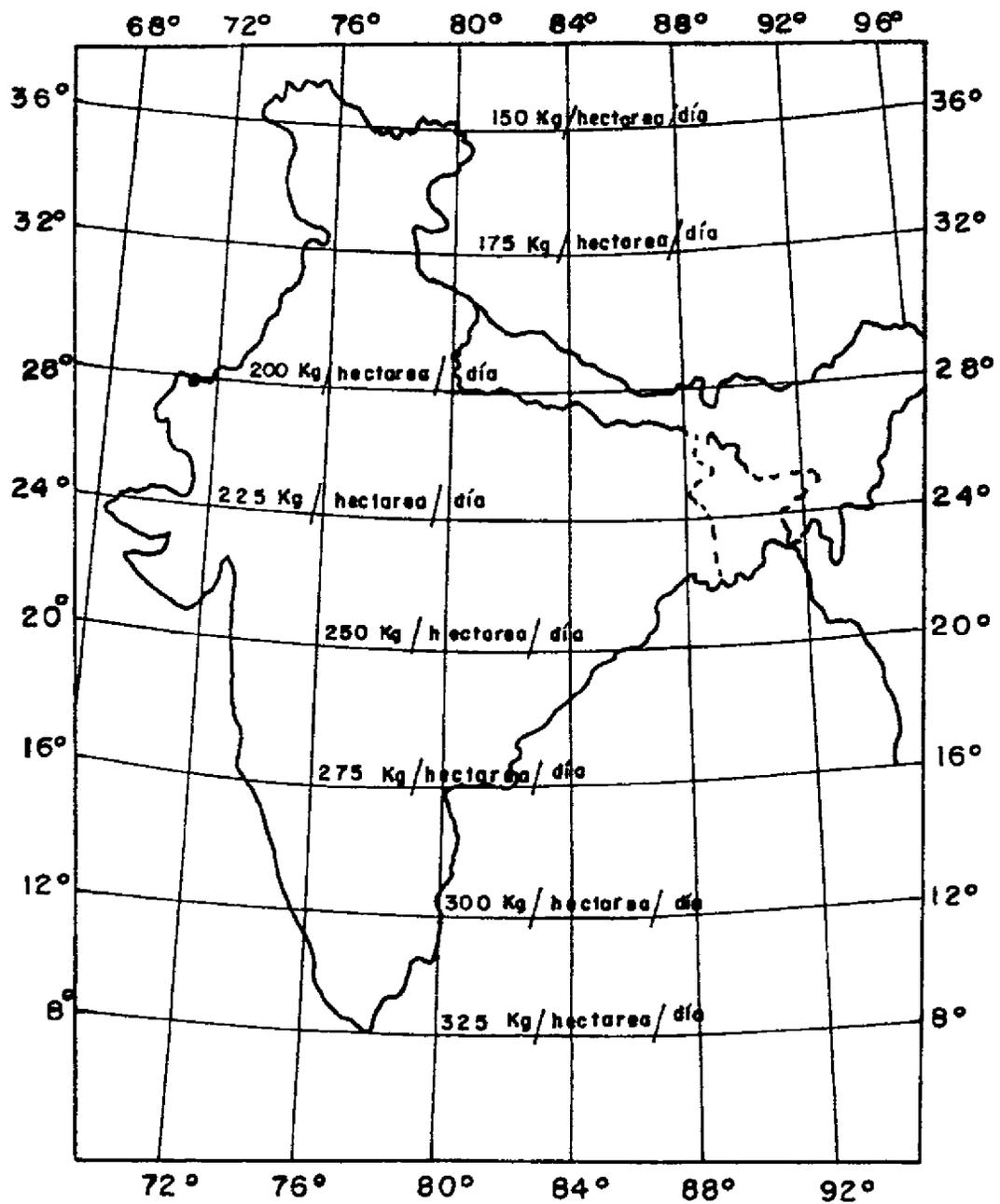


Figura 7.7 - Cargas orgánicas recomendadas para lagunas de estabilización en función de la latitud para India.

Fuente Arceivala et alli (1970)

El uso de esas mamparas o cortinas busca principalmente:

- La obtención de mejor tratamiento, dirigiendo el flujo del agua afluyente cuidadosamente a través de la laguna y aumentándose, en consecuencia la utilización del área del espejo de agua.
- el impedimento o prevención de cualquier tendencia a la estratificación a través de la instalación de mamparas.

Las figuras (7.8) y (7.9) presentan detalles de esquemas y fijación de mamparas en las lagunas de estabilización.

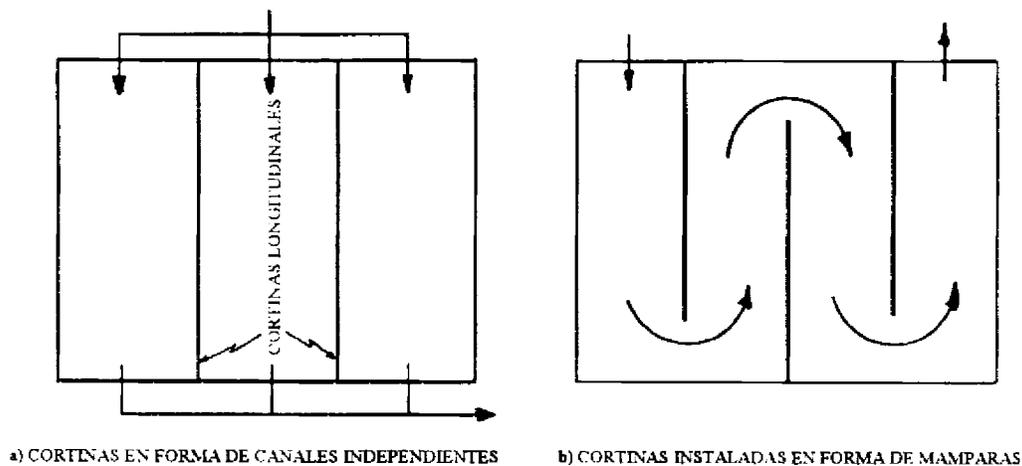


Figura 7.8 - Esquemas posibles de empleo de cortina en lagunas de estabilización.

Fuente: CETESB (1989)

7.2.3.4.1. Patrones de caudal y mezcla en las lagunas

Todos los tanques o lagunas usadas para el tratamiento de aguas residuales pueden denominarse como reactores. Sus patrones de caudal dependen de las condiciones de mezcla, las cuales dependen de la forma del reactor, de la energía de entrada por unidad de volumen, de la dimensión o escala de la unidad de tratamiento, además de otros factores. Los patrones de caudal afectan el tiempo de exposición para el tratamiento y distribución del sustrato en el reactor.

Los patrones típicos de caudal y mezcla incluyen los reactores discontinuos y los reactores con caudal continuo. Los reactores con caudal continuo pueden ser clasificados en:

- Flujo pistón;
- Mezcla completa
- Flujo disperso
- Combinaciones en serie o en paralelo de los anteriores reactores.

7.2.3.4.1.1. Reactores discontinuos

Los reactores discontinuos son sistemas cerrados sin caudal continuo. Son frecuentemente usados en estudios de laboratorio.

7.2.3.4.1.2. Flujo pistón

El flujo pistón es aquel en el cual todo elemento de caudal deja el reactor en el mismo orden en que entró. No existe dispersión o mezcla. Todo elemento de caudal es expuesto al tratamiento en el mismo periodo de tiempo, llamado "tiempo teórico de retención".

Las sustancias biodegradables reducen la concentración durante su paso a través del reactor debido a la actividad bioquímica. La remoción del sustrato para una ecuación de primer orden es dada por la ecuación (7.9)

$$S_e / S_o = e^{-k_1 t} \quad (7.9)$$

donde,

S_o = concentración inicial del sustrato, mg / l

S_e = concentración final del sustrato, mg / l,

K_1 = tasa constante de remoción del sustrato, día⁻¹,

t = tiempo de retención hidráulica, días.

7.2.3.4.1.3. Mezcla completa

La mezcla completa es aquella en la cual todos los elementos del caudal son instantáneamente y altamente mezclados en el reactor de modo que su contenido sea perfectamente homogéneo en todos los puntos de ese reactor. En consecuencia, la concentración del efluente es igual a la concentración del reactor. La ecuación para mezcla completa es presentada por la ecuación (7.10)

$$S_e / S_o = 1 / (1 + k_1 t) \quad (7.10)$$

Las unidades son las presentadas anteriormente

7.2.3.4.1.4. Flujo disperso

El flujo disperso está caracterizado como aquel en que cada elemento de caudal tiene un tiempo de retención diferente para cada periodo de tiempo. Es llamado también de flujo arbitrario y está comprendido entre dos límites, el flujo pistón ideal y la mezcla completa.

El *número de dispersión*, d , caracteriza las condiciones de mezcla en un reactor. Está presentado por la ecuación (7.11)

$$d = D/UL = Dt/L^2 \quad (7.11)$$

donde,

d = número de dispersión (adimensional)

D = Coeficiente de dispersión axial o longitudinal, m^2/h ,

U = velocidad media del flujo, m/h ;

L = Largo del reactor, m ;

t = tiempo de retención hidráulica, h .

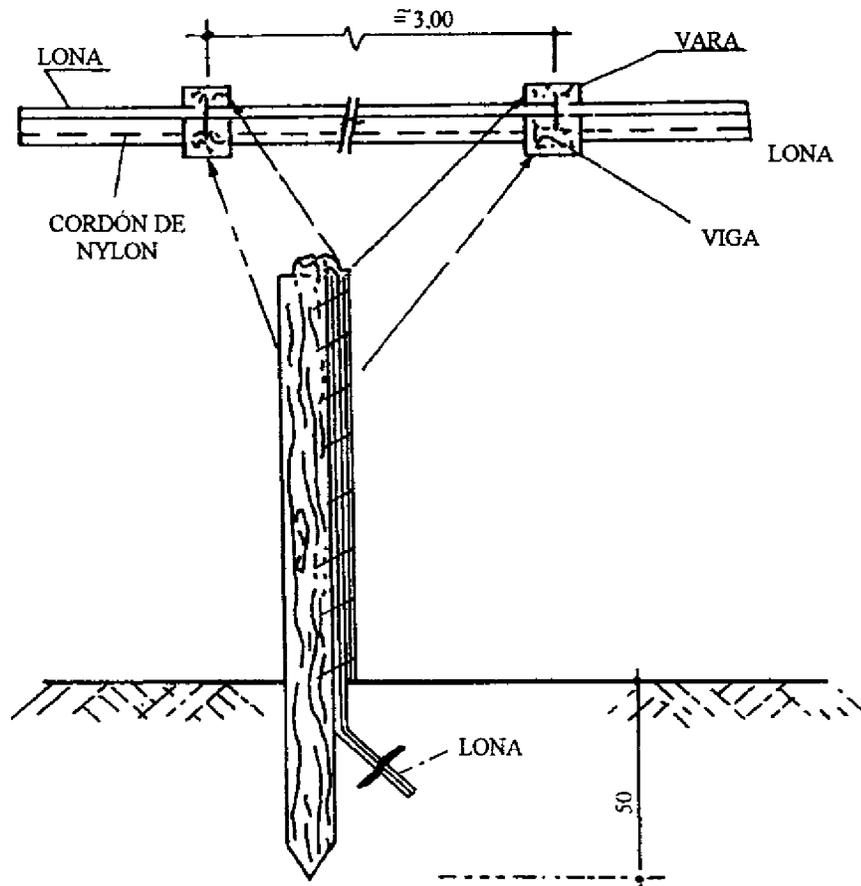


Figura 7.9- Detalle de fijación de las lonas plásticas en las lagunas de estabilización.

Fuente CETESB (1989)

La velocidad media del flujo está definida por la ecuación (7 12)

$$U = Q/24wh \quad (7 12)$$

donde,

Q = caudal de flujo, m^3/s ,

w = ancho del reactor, m ,

h = profundidad del reactor, m.

Por definición, la dispersión está ausente en flujo pistón ideal. Por eso, $D = 0$ y $d = D/UL = 0$. Por otro lado, la dispersión es infinita en la mezcla completa ideal, cuando $D = \alpha$ y $d = D/UL = \alpha$. Consecuentemente el flujo disperso varía de 0 a α . La Figura 7.10 presenta esquemas de los varios tipos de reactores

Según Arceivala (1981), los principales factores que afectan la dispersión en las unidades del tratamiento de aguas residuales, son:

- la escala del fenómeno de mezcla;
- la geometría de la unidad,
- la potencia unitaria por unidad de volumen (mecánica y neumática);
- el tipo de disposición de entradas y salidas;
- la velocidad de entrada y sus fluctuaciones;
- las diferencias de densidad y temperatura entre el caudal afluyente y el contenido del reactor;
- el número de Reynolds, el cual, en términos, es afectado por algunos de los factores ya mencionados.

El flujo disperso es gobernado por la ecuación de Wehner-Wilhelm (1958), y traída a la ingeniería sanitaria por Thirimurthy (1969). Es presentado por la expresión (7.13).

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{4ae^{1/2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}} \quad (7.13)$$

donde,

$$a = \sqrt{1 + 4K_1 t d} \quad (\text{adimensional}) \quad (7.14)$$

Las demás unidades ya fueron presentadas anteriormente. La figura 7.11 presenta una gráfica donde se puede estimar los porcentajes de DBO removida y remanente para flujo pistón y mezcla completa a través de la ecuación de Wehner-Wilhelm.

La ecuación (7.13) podrá ser simplificada pues, el segundo término de su denominador es muy pequeño y como aproximación puede ser depreciado y presentada por la ecuación (7.15) Mientras tanto, la ecuación (7.15) deberá ser usada apenas cuando el número de dispersión, d , sea menor que 2, según Thirimurthy (1974)

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{4ae^{(1-a)/2d}}{(1+a)^2} \quad (7.15)$$

Varios autores también presentaron ecuaciones para la estimación de la dispersión.

La ecuación para dispersión (7.16), Yáñez (1988), es un modelo simple con una alta correlación que depende de una sola variable.

$$d = \frac{L/W}{-0,26118 + 0,25392(L/W) + 1,01368(L/W)^2} \quad (7.16)$$

donde,

- d = número de dispersión (adimensional),
 L = longitud de la laguna, m;
 W = ancho de la laguna, m.

Para $L/W = 1$ (laguna cuadrada) $\rightarrow d = 0,99362$

Para $L/W = 2$ (laguna rectangular) $\rightarrow d = 0,46497$

Para $L/W = 3$ (laguna rectangular) $\rightarrow d = 0,31173$

Para $L/W = 4$ (laguna rectangular) $\rightarrow d = 0,23566$

La ecuación para dispersión (7.17), presentada por Sáenz (1992) es una modificación de la ecuación de Polprasert & Bhattari (1985) para expresar la viscosidad cinemática en función de la temperatura del agua.

$$d = \frac{1,158[t(W + 2h)]^{0,489} W^{1,511}}{(T_{\text{agua}} + 42,5)^{0,734} (Lh)^{1,489}} \quad (7.17)$$

donde,

- t = tiempo de detención, días,
 h = profundidad media de la laguna, m;
 T_{agua} = temperatura del agua, °C.

Las demás unidades ya fueron presentadas anteriormente.

El número de dispersión D/UL puede ser estimado de dos maneras:

- a través de trazadores en una unidad existente (en escala real) o de un adecuado modelo reducido,
- usando métodos empíricos los cuales son menos perfectos, pero muy útiles para la estimativa del probable número de dispersión, antes de que una unidad de tratamiento sea construida.

Arceivala (1981), efectuó investigaciones con trazadores en varios tipos de procesos de tratamiento, tales como lagunas aireadas mecánicamente, lagunas de estabilización, decantadores de sección rectangular y otros tipos de unidades, en donde obtuvo correlación empírica entre el coeficiente de dispersión axial, D , y el ancho de la unidad, W

Las correlaciones empíricas obtenidas por los ensayos de Arceivala (1981), son presentadas por las ecuaciones (7.18), (7.19), (7.20), y (7.21):

1. Para lagunas con anchos iguales o mayores a 30 m.
 a. con mamparas, $D = 33 W$ (7.18)

b. sin mamparas, $D = 16,7 W$ (7.19)

2. Para lagunas con anchos menores de 10 m
 a. con mamparas, $D = 11 W^2$ (7.20)

b. sin mamparas, $D = 2 W^2$ (7.21)

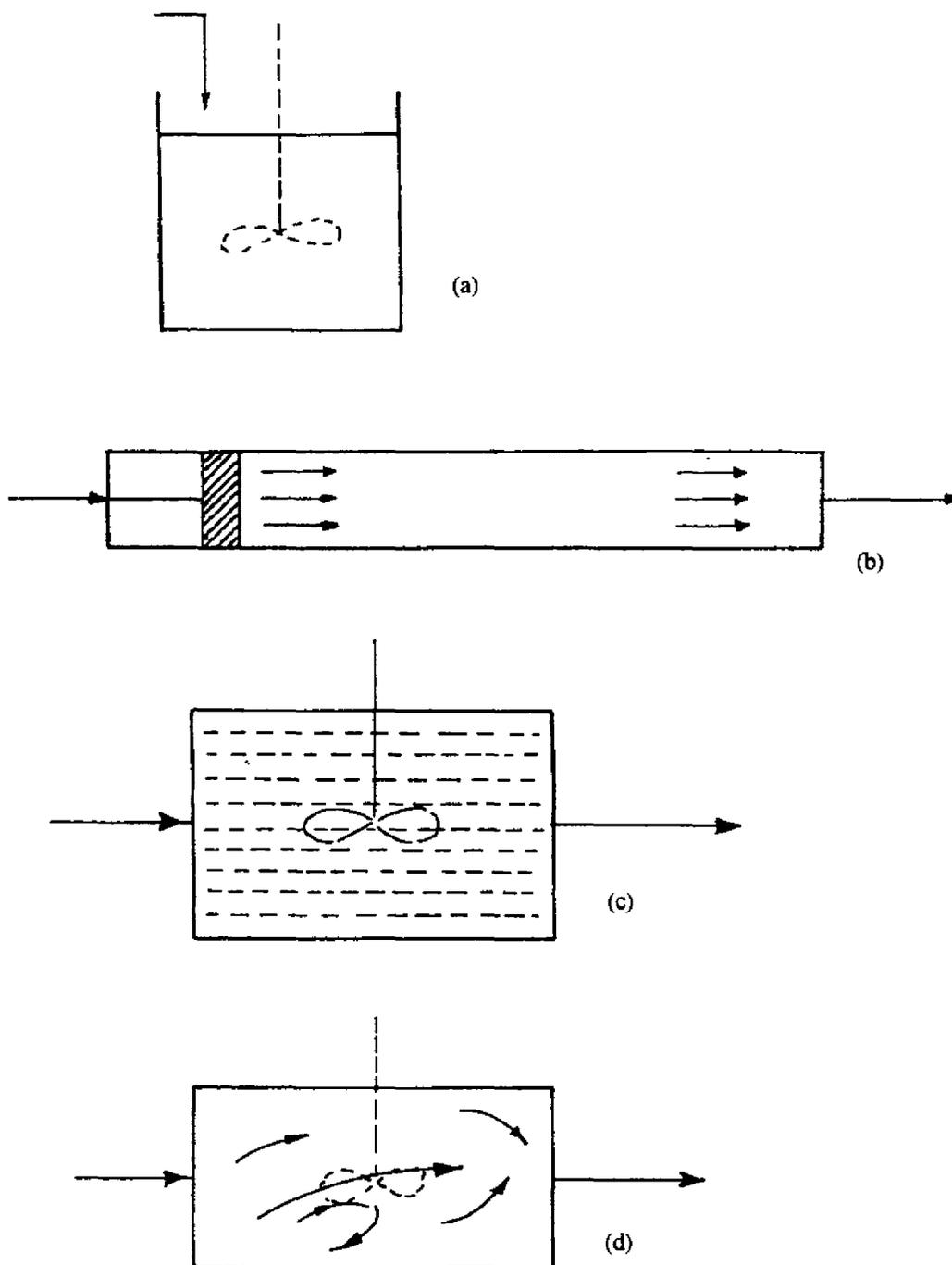


Figura 7.10 - Diferentes tipos de reactores: a) reactor discontinuo; b) reactor tipo flujo pistón; c) reactor tipo mezcla completa; d) reactor tipo flujo disperso.

Fuente: Arceivala (1981)

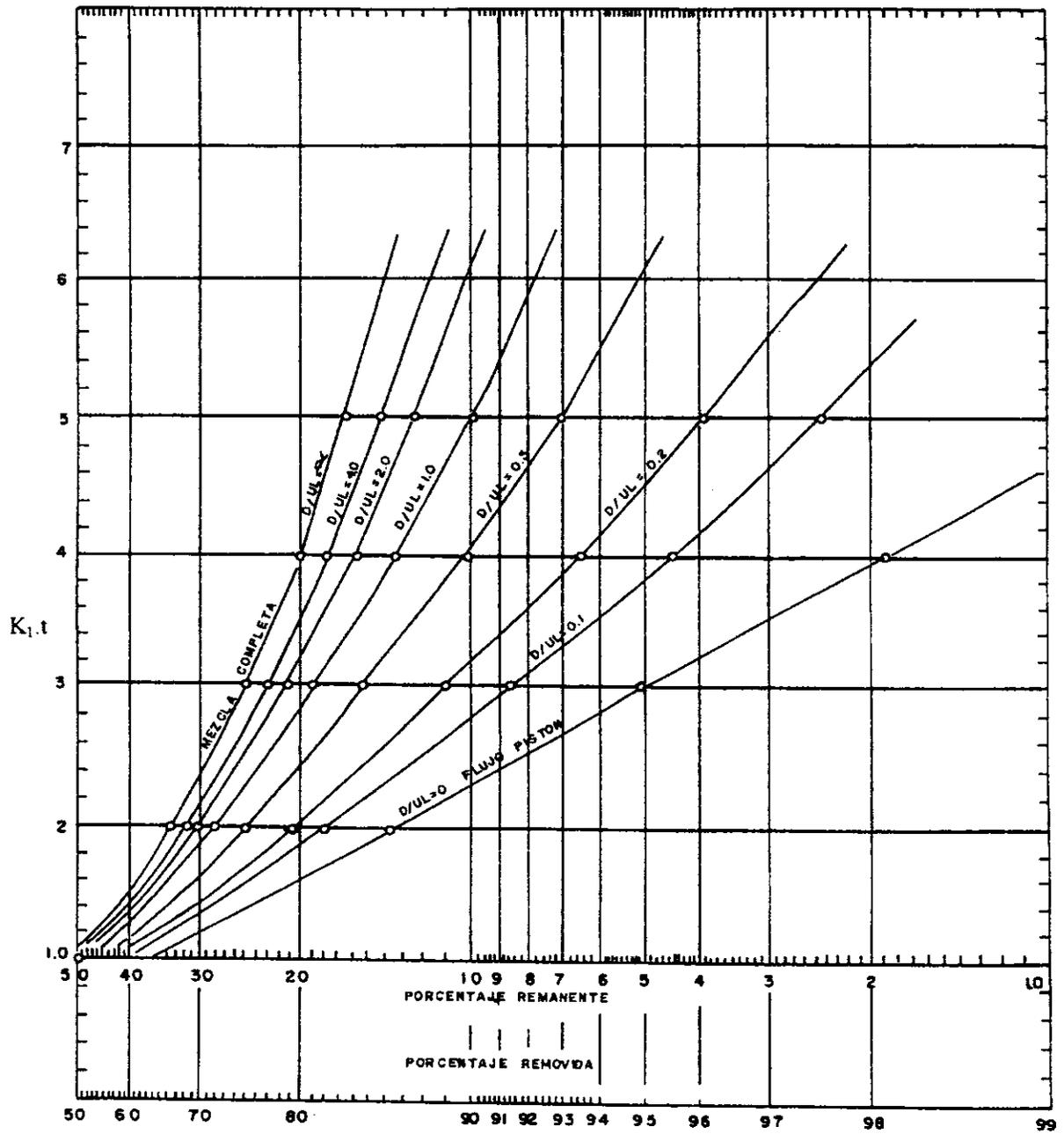


Figura 7.11 - Determinación de la eficiencia de remoción del sustrato usando la ecuación de WEHNER – WILHELM (1958)

Los resultados presentados muestran que D varía en función de W^2 para lagunas de pequeñas dimensiones con anchos menores de 10 metros mientras que la variación es lineal para anchos iguales o mayores de 30 metros. Además de eso, en cada caso se comprobó que en las unidades que poseían mamparas de flujo horizontal, invariablemente se obtenían mayores valores para el coeficiente de dispersión longitudinal del obtenido para las lagunas con el mismo ancho que no poseían mamparas. El motivo principal es que, cuando existen mamparas de flujo horizontal, el flujo del agua residual tiene que hacer curvas, aumentando con ese movimiento la dispersión.

Ejercicio 7.2.3.4.1. Estimar la eficiencia esperada de reducción del DBO en una laguna facultativa para diferentes valores de número de dispersión D/UL igual a 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2 y 4. Estimar también la eficiencia usando las ecuaciones de flujo pistón y mezcla completa. Adoptar $K_1 = 0,422 \text{ día}^{-1}$ y $t = 12,1$ días

Solución:

a) Cálculo de la eficiencia utilizándose la ecuación de flujo pistón:

$$S_e/S_o = e^{-k_1 t} = e^{-0,422 \times 12,1} = 0,006$$

$$E = (1 - 0,006) \times 100 \cong 99,4\%$$

b) Cálculo de la eficiencia utilizándose la ecuación de mezcla completa:

$$S_e/S_o = (1 + k_1 t)^{-1} = (1 + 0,422 \times 12,1)^{-1} = 0,164$$

$$E = (1 - 0,164) \times 100 \cong 83,6\%$$

c) Ecuación de flujo disperso usándose la ecuación de Wehnen-Wilhelm:

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{4ae^{1/2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}}$$

$$a = \sqrt{1 + 4K_1 t d}$$

$$d = \frac{D}{UL}$$

$$E = (1 - S_e/S_o) \times 100$$

Los resultados presentados en la tabla a seguir pueden ser obtenidos a través de las

ecuaciones anteriores o por medio de la gráfica de Thirimurthy, Figura 7.11.

D/UL	0	0,1	0,2	0,5	1	2	4	∞
EFICIENCIA (%)	99,3*	97,8	96,3	93,2	90,4	87,9	86,1	83,6**

* Flujo pistón

** Mezcla completa

Ejercicio 7.2.3.4.2. Estimar la eficiencia de remoción de DBO que puede esperarse en una laguna facultativa admitiendo el régimen de flujo en pistón. Los siguientes datos deberán ser utilizados: $S_o = 242 \text{ mg/l}$; $Q = 5.550 \text{ m}^3/\text{día}$; $h = 2 \text{ m}$; $t = 12,1 \text{ días}$, $K_1 = 0,422 \text{ día}^{-1}$ y $L = 3 \text{ W}$

Solución:

1) **Alternativa A: sin mamparas**

a) Área de la laguna.

$$A = Qt/h = (5550 \times 12,1)/2 \cong 33.578 \text{ m}^2$$

b) Cálculo de la eficiencia utilizándose la ecuación de flujo pistón:

$$E = 99,4\% \text{ (idéntico al ejemplo anterior)}$$

c) Cálculo de la eficiencia utilizándose la ecuación de mezcla completa:

$$E = 83,6\% \text{ (idéntico al ejemplo anterior)}$$

d) Dimensiones de la laguna:

- Ancho de la laguna para $L/W = 3$

$$W = \sqrt{A/3} = \sqrt{33.578/3} \cong 105,8 \text{ m}$$

- Longitud de la laguna

$$L = 3W = 3 \times 105,8 \cong 317,4 \text{ m}$$

e) Velocidad media de flujo:

$$U = \frac{Q}{24Wh} = \frac{5550}{24 \times 105,8 \times 2} \cong 1,09 \text{ m/h}$$

f) Coeficiente de dispersión longitudinal:

$$D = 16,7W \text{ (sin mamparas, } W \geq 30\text{m)}$$

$$D = 16,7 \times 105,8 \cong 1.767 \text{ m}^2 / \text{h}$$

g) Número de dispersión:

$$d = \frac{D}{UL} = \frac{1767}{1,09 \times 317,4} = 5,1 \text{ (mezcla completa)}$$

2. Alternativa B: con dos mamparas

a) Ancho de la laguna:

$$W = 105,8/3 \cong 35,3 \text{ m}$$

b) Longitud de la laguna.

$$L = 317,4 \times 3 \cong 952,2 \text{ m}$$

c) Coeficiente de dispersión longitudinal:

$$D = 33W \text{ (con mamparas, } W \geq 30\text{m)}$$

$$D = 33 \times 35,3 = 1.165 \text{ m}^2 / \text{h}$$

d) Número de dispersión:

$$d = \frac{D}{UL} = \frac{1.165}{(3 \times 1,09) \times 952,2} \cong 0,37 \text{ (flujo pistón)}$$

e) Eficiencia usándose la ecuación de Wehner-Wilhelm:

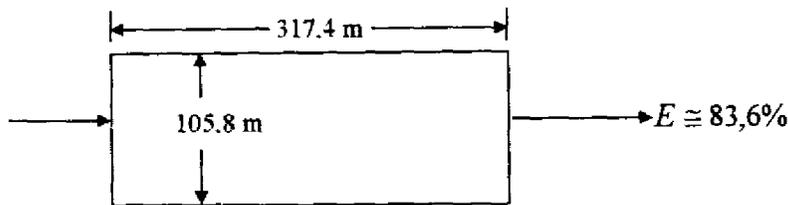
$$a = \sqrt{1 + 4K_1 t d} = \sqrt{1 + 4 \times 0,422 \times 12,1 \times 0,37} \cong 2,93$$

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{4ae^{1,2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}}$$

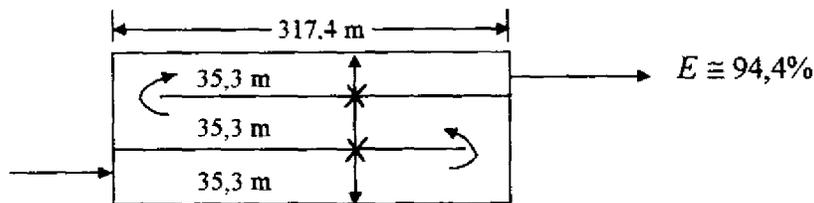
$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{4 \times 2,93 e^{1/2 \times 0,37}}{(1 + 2,93)^2 e^{2,93/2 \times 0,37} - (1 - 2,93)^2 e^{-2,93/2 \times 0,37}} \cong 0,056$$

$$E = (1 - 0,056) \times 100 \cong 94,4\%$$

f) Esquema para la laguna sin mamparas (mezcla completa)



g) Esquema para la laguna con dos mamparas (flujo pistón)



7.2.4. Factores químicos

7.2.4.1. Valor de pH

Tanto las lagunas anaeróbicas como las facultativas son operadas eficientemente con valores de pH ligeramente alcalinos. Los desechos líquidos industriales con valores extremos de pH, tendrán obligatoriamente que pasar por tanques de neutralización para corregir el pH antes de entrar a la laguna.

En países de clima tropical, las lagunas anaeróbicas con tiempos de retención de 1 a 5 días y profundidades superiores de 3 metros, tienen funcionamiento satisfactorio, con pH óptimo variando de 7,0 a 7,2, con predominio de la fase metánica sobre la fase ácida de formación de ácidos volátiles

En el caso de las lagunas facultativas, cuando el color de la laguna se presenta verde oscuro, el valor del pH probablemente será alcalino. Si el color fuere verde-amarillo o pálido, indica con certeza que se ha iniciado el proceso de acidificación.

El pH de una laguna facultativa varía a lo largo del día en las diferentes capas de la masa líquida, prevaleciendo valores más elevados en la superficie. Durante las primeras horas de la mañana los valores del pH son bajos, debido a la presencia de exceso de gas carbónico

(CO₂) producido por la respiración bacteriana aeróbica durante la noche. Se vuelven más elevados en periodos comprendidos entre las 14 a 16 horas, ocasión en que las algas se encuentran en plena actividad fotosintética. Durante la noche, el pH vuelve a declinar sensiblemente, pues de un lado, las algas dejan de consumir gas carbónico, y de otro, este continúa siendo producido por las bacterias.

Para valores de pH por encima de 9, ocurre una reducción o mortandad de las bacterias entéricas de la especie *Escherichia coli*.

La Figura 7.12 presenta variación horaria de pH en diferentes capas de una laguna facultativa con profundidad útil de 1,2 metros.

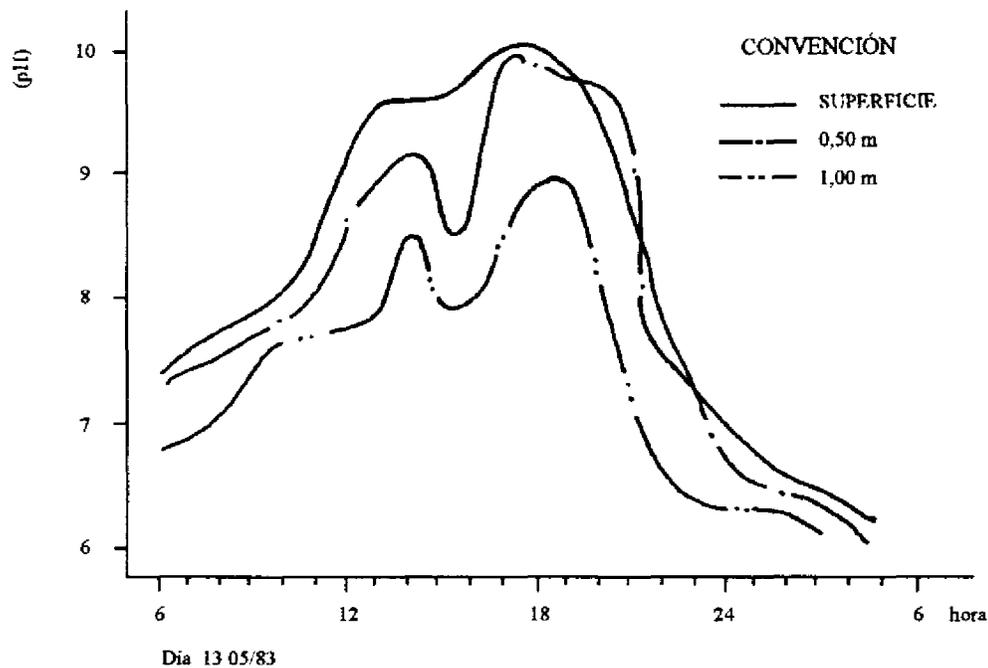


Figura 7.12 - Variación horaria de pH en diferentes capas de una laguna facultativa útil de 1,2 metros.

Fuente: CETESB (1989)

7.2.4.2. Materiales tóxicos

Los materiales tóxicos tales como metales pesados, pesticidas, desinfectantes, sulfitos, desechos líquidos de industrias de antibióticos y otros residuos industriales contenidos en el afluente de las lagunas deben ser eliminados inicialmente, con la notificación del problema al órgano oficial de control del medio ambiente.

Las lagunas anaeróbicas son excelentes sistemas de tratamiento para la remoción de materiales pesados a través del proceso de sedimentación, que ocurre naturalmente

Las lagunas de estabilización de manera general, son mas sensibles a la presencia de sustancias tóxicas de las de cualquier otro tipo de tratamiento de aguas residuales. El tiempo de retención permite adaptación gradual de la biomasa a las sustancias inhibidoras por medio de una selección natural. Las especies mas resistentes sobreviven y se multiplican mientras que las mas sensibles son eliminadas.

7.2.4.3. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto, (OD), es el mejor indicador de una operación satisfactoria en una laguna facultativa o de maduración. La principal fuente de OD, utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica y en sus funciones respiratorias, provienen del oxígeno producido por la acción fotosintética de las algas. Mientras tanto, la concentración de oxígeno disuelto puede caer a menos de 1 mg/l durante la madrugada y algunas veces, después de un día claro y asoleado. La completa reducción de oxígeno puede ocurrir también durante la noche debido a una excepcional explosión en el crecimiento de algas.

La capa superficial aeróbica sirve para evitar que gases mal olientes producidos por la capa anaeróbica sean liberados. Pueden seguir presentándose problemas de olor de vez en cuando en las lagunas facultativas, a despecho de la presencia de oxígeno disuelto en la capa superficial. Por ejemplo, en el caso de desarrollo de algas verde - azuladas, a consecuencia de la elevada temperatura del agua o cuando las placas de lodo flotan en la superficie de una laguna debido a que la temperatura del fondo haya aumentado rápidamente por encima de 22°C y una fuerte liberación de gas pudo haber ocurrido.

La Figura 7.13 presenta variaciones horarias de oxígeno disuelto en una laguna facultativa con profundidad útil de 1,2 metros.

7.2.5. Factores microbiológicos

7.2.5.1. Nutrientes

Tanto las bacterias como las algas necesitan de una fuente de nutrientes para que crezcan y se multipliquen. Varios elementos son necesarios, por ejemplo, el carbono, el nitrógeno y el fósforo son requeridos en mayor cantidad.

Las aguas residuales domésticas contienen todos los nutrientes necesarios para mantener una comunidad de bacterias y algas. Cuando la materia orgánica es suficiente para un óptimo crecimiento bacteriano, automáticamente es también adecuada para que haya un desarrollo de una población de algas.

La relación carbono/nitrógeno/fósforo para una agua residual doméstica es del orden de 11,4 : 3,7 : 1, mientras que para el desarrollo y reproducción de algas, esa razón es de 106 : 15 : 1. Para las bacterias aeróbicas, una relación aproximada de DBO/nitrógeno/fósforo está cerca de 100 : 5 : 1.

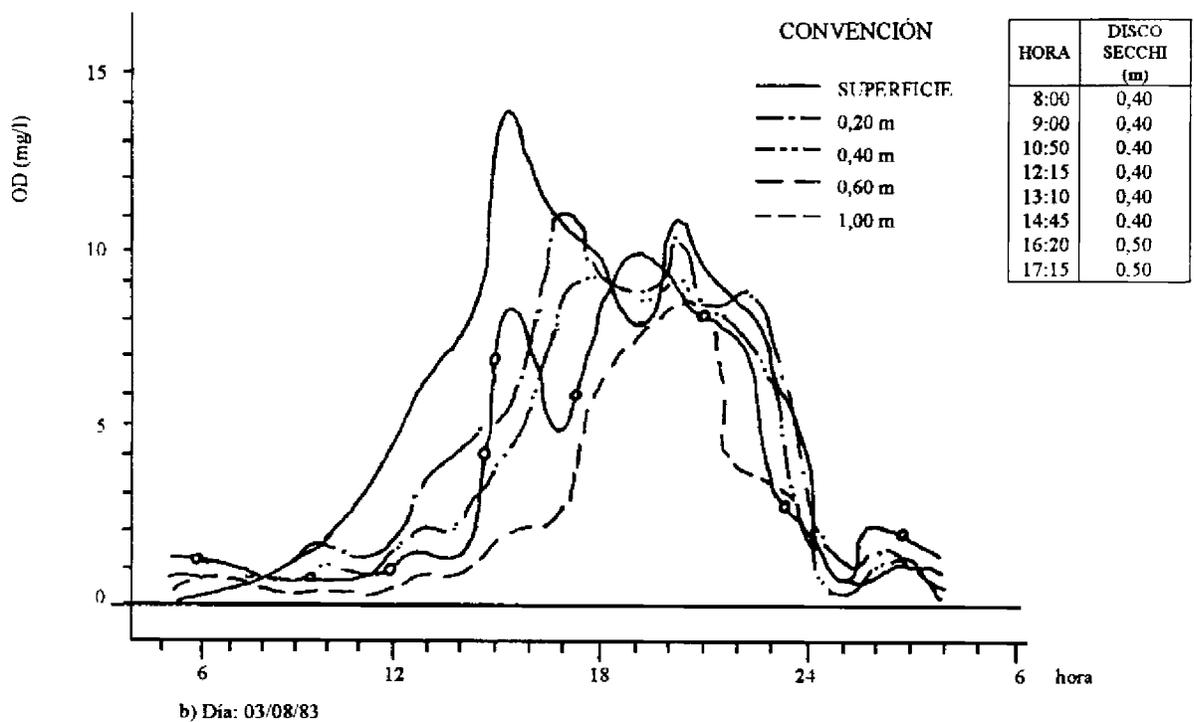
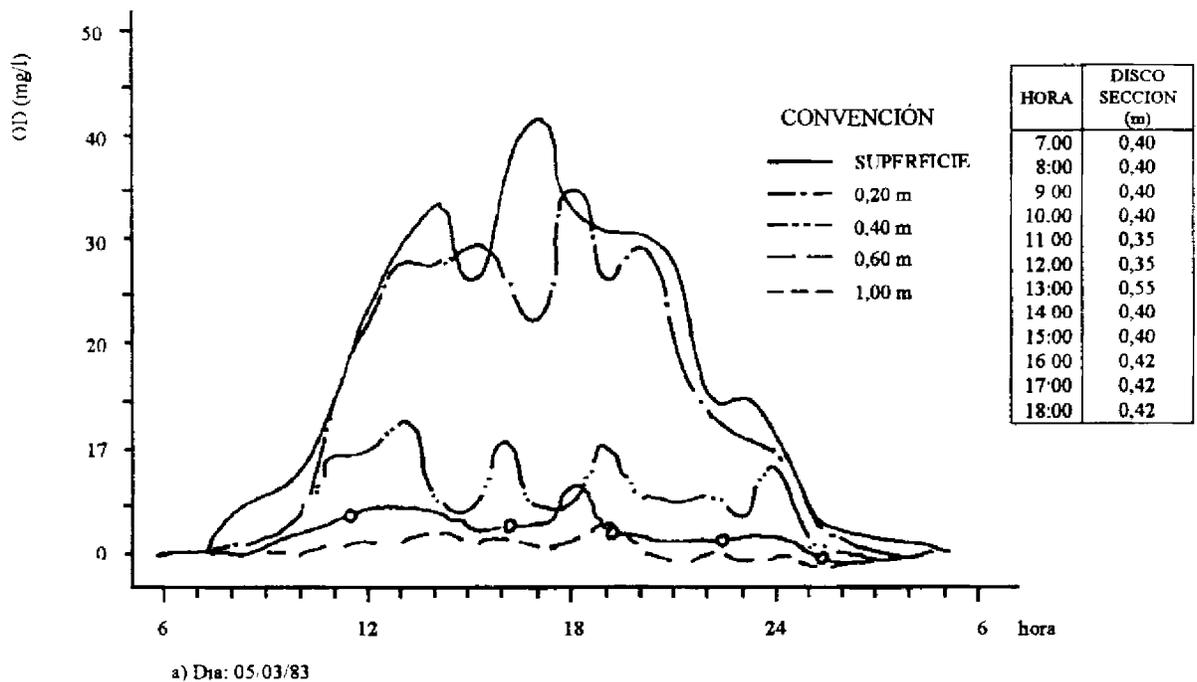


Figura 7.13- Variación horaria de oxígeno disuelto en las diferentes profundidades de una laguna facultativa con profundidad útil de 1,2 metros.

- a) Condición de mala mezcla vertical
- b) Condición de buena mezcla vertical

Fuente: CETESB (1989)