

desague, lo cual es perjudicial para las cualidades estéticas de la laguna aerobia. Existen referencias al hecho de que, en algunas lagunas del sudoeste de los Estados Unidos, la proliferación de algas verdeazuladas, así como, consecuentemente, la producción de mal olor, se encuentran relacionadas con temperaturas muy elevadas (63). El análisis comparativo de innumerables lagunas de oxidación de California reveló la existencia de una variación geográfica en la flora algológica (64). De un modo general, los análisis sistemáticos de los géneros existentes en lagunas del Estado de Sao Paulo, Brasil, (65) confirman los resultados encontrados en California, excepto con relación a las algas verdeazuladas como Microcystis, que alcanzan en Sao Paulo, números muy elevados, así como las algas verdes, Chlorococcum, no mencionadas en California. También se han observado con frecuencia las variaciones estacionales, así como las modificaciones debidas a la variación de carga de DBO, pH y otras características del efluente clarificado.

Se han realizado estudios experimentales de tratamiento de desagües utilizando cultivos de diferentes especies de algas.

En general las algas experimentadas son del género Chlorella (66) (67) (68) y Euglena (69) que son las más frecuentes en lagunas de oxidación. Sin embargo, se han obtenido buenos resultados en el laboratorio, con algas verdeazuladas filamentosas del género Oscillatoria (70).

## 2. Nutrimientos.

El principal problema en la alimentación de los organismos es la adquisición del carbono en forma simple, como  $CO_2$ , para la síntesis de la materia orgánica, o bien en la forma de compuestos orgánicos para ser asimilados por los organismos heterotróficos. Para las formas de vida que se desarrollan en los desagües, la fuente de carbono está principalmente constituida por los diferentes tipos de compuestos orgánicos, de que se nutren las bacterias, protozoarios y otros organismos heterotróficos y por el anhídrido carbónico resultante de la actividad de éstos, que servirá para la nutrición de los autotróficos. Algunas algas, como Chlorella, Chlorococcum, Euglena, etc., que normalmente viven autotróficamente cuando se encuentran en presencia de la luz, pueden vivir gracias a la materia orgánica, de la misma forma que las bacterias y los protozoarios, cuando la luz es escasa.

Por otro lado, también son importantes, las fuentes de algunos otros elementos que entran en la composición de la célula, especialmente nitrógeno y fósforo. Para los organismos heterótrofos estos elementos se obtienen a partir de las propias moléculas de los compuestos orgánicos más complejos, mientras que para los fotosintetizantes las principales fuentes de esos elementos son el amoníaco y las sales minerales resultantes de la descomposición de la materia orgánica, así como de otras sustancias, especialmente detergentes, que son lanza-

das al desague. Sin embargo, en general, esos elementos no llegan a constituir factores limitativos en las lagunas de estabilización, al contrario de lo que ocurre normalmente en las aguas no contaminadas. En vista de que se precisa cantidades muy pequeñas, en relación al carbono, y que se encuentran en cantidades relativamente grandes en aguas que reciben mucha materia orgánica compleja, estos elementos solamente llegan a faltar o a tornarse limitativos en el caso de haber un suministro excesivo de carbono bajo forma de compuestos simples, esto es, constituyendo moléculas que no contengan nitrógeno y fósforo. Además de esto, el fósforo, aunque presente, puede precipitarse, en forma de ortofosfatos insolubles, cuando el pH del medio se eleva a niveles mayores de 9.0 (71).

Las algas que habitan una laguna de oxidación presentan diferentes grados de auto o heterotrofismo. Por eso algunas especies son capaces de vivir en completa ausencia de luz, alimentándose de materia orgánica; otras, aunque autotróficas, pueden utilizar compuestos nitrogenados reducidos, tales como amoníaco o aún aminoácidos mientras que las autotróficas estrictas solamente pueden asimilar el nitrógeno en la forma oxidada, de nitratos. Para estas últimas, las formas más complejas de compuestos nitrogenados son, aún, tóxicas, y esto puede permitir una variación de géneros acompañando la secuencia de fases de la depuración, o sea, a lo largo de la laguna, ya que los compuestos, como proteínas, aminoácidos y amoníaco, abundantes en el desague sin oxidar, van siendo poco a poco sustituidos por nitritos y finalmente solamente por nitratos a medida que se aproxima al efluente (64).

Las algas tienden a aumentar el contenido de materia orgánica de los desagües, ya que sintetizan esas sustancias a partir de compuestos minerales. Además de formar nuevas células, reproduciéndose o creciendo, segregan, también, para el medio, sustancias orgánicas elaboradas por ellas, las cuales se disuelven en el medio. Esto ocurre en mayor cantidad, siempre que el tiempo de detención sea superior a 6 días (68) (71). Este material elaborado, así como el de las propias algas cuando mueren, pueden constituir fuente nutritiva para las bacterias, o sea, factor de DBO. Mientras las algas se mantienen vivas, su material se mantiene en forma estable, no oxidable, sin constituir factor de demanda de oxígeno y constituyendo, por el contrario, fuente de oxígeno para el medio. En cuanto a la materia orgánica segregada, en forma soluble, para el medio, no se puede decir lo mismo: es siempre un factor de demanda, debiendo evitarse su superproducción, en la medida de lo posible, a través del control del tiempo de detención.

La presencia de gas sulfhídrico, en el agua de la laguna (proveniente de áreas sépticas resultantes de deficiencias del sistema) es sumamente tóxico para las algas, aún cuando se trate de pequeñas concentraciones.

## 3. Temperatura.

La temperatura del agua de una laguna de estabilización acompaña, más o menos, la curva de variación de la temperatura externa, con excepción de las capas más profundas que se

mantiene más estables, pudiendo haber diferencias de hasta 5°C entre las temperaturas del fondo y de la superficie (63). La eficiencia de la laguna, con respecto a la estabilización del desague, aumenta con la elevación de la temperatura, dentro de ciertos límites. Admiten algunos autores (66) una reducción a la mitad, de la tasa de reacción en esas lagunas, para cada 10°C de descenso de la temperatura (siguiendo de cerca, pues, la curva prevista por la expresión de Van't Hoff - Arrhenius) dentro de los límites de 3 a 35°C determinados respectivamente por el enorme retraso que sufre la actividad bacteriana en las temperaturas próximas al punto de congelación del agua y, en el otro extremo, por la inactividad térmica de varios tipos de algas. De esas observaciones se concluye que, en función de la temperatura promedio local, se debe calcular el tiempo de detención en la laguna así como la carga de DBO y superficie total de la laguna, considerando que en las bajas temperaturas el tiempo de reacción debe ser prolongado. Hay, también, la posibilidad de variar el tiempo de detención, la carga de DBO o la profundidad de la laguna en diferentes estaciones del año. Con menor profundidad hay una mejor distribución de la temperatura en la masa de agua, mientras que las más profundas tienden a retener calor en el fondo, lo que es deseable, en el invierno, a fin de evitar demoras en el proceso.

#### 4. Luz

La eficiencia de una laguna de oxidación depende, en gran parte, de la producción de oxígeno por fotosíntesis y esta producción depende, a su vez, del número de algas, o mejor dicho, de la concentración de clorofila existente en el agua de la laguna, así como, además de esto, de la intensidad luminosa. Experiencias realizadas con *Euglena gracilis*, así como con otras especies de algas frecuentes en lagunas de oxidación, revelan que apenas una pequeña porción, que representa aproximadamente del 5 al 7% del total de intensidad luminosa que llega a las algas en la superficie del agua en un día claro, es suficiente para que éstas queden saturadas de luz. Aún en días de lluvia la intensidad de luz puede ser superior al límite de saturación. El exceso, además de no poder ser utilizado en la fotosíntesis puede ser, aún, perjudicial, causando amarillamiento de las células por destrucción de la clorofila (66) (72). También debe recordarse que este pequeño porcentaje representa el máximo que puede ser utilizado, para una elevada tasa de fotosíntesis, pero si se considera únicamente la energía luminosa necesaria para que la tasa de producción de oxígeno por fotosíntesis sea simplemente superior a la de consumo por respiración de las propias algas, se comprueba que ésta representa apenas de 0.2 a 0.3% de la intensidad luminosa que, en días claros, alcanza la superficie del agua.

La intensidad luminosa, en determinada profundidad, puede variar con los siguientes factores locales (63): latitud y altitud, cobertura de nubes, etc.; factor estacional; radiación diaria; penetración de la luz incidente, de acuerdo con la profundidad, turbiedad, espuma, cobertura de hielo, etc.

(Ver Capítulo 2). En ciertos lugares, las algas situadas a profundidades mayores de 60 cm no producen suficiente cantidad de oxígeno para cubrir su propia demanda respiratoria.

Partiendo de la ecuación, ya mencionada, de Beer-Lambert (Ver Capítulo 2) se puede llegar a una fórmula:

$$d = \frac{\log \frac{I_0}{I_d}}{n}$$

la cual permite determinar, en una laguna que recibe determinada intensidad de luz, a qué profundidad se encuentran las algas en el llamado Punto de Compensación, o sea, en el punto en que producen, por fotosíntesis, tanto oxígeno como el que consumen en la propia respiración. Esta será, teóricamente, la mayor profundidad productiva de la laguna, ya que por debajo de ésta, aunque la luz aún esté presente, las algas consumirán más oxígeno del que pueden producir. Es necesario conocer de antemano el valor de  $I_d$ , o sea, la intensidad luminosa necesaria para alcanzar el punto de compensación, de las propias especies de algas en cuestión, lo que puede ser determinado en el laboratorio. Entretanto, en la mayor parte de los casos, considerando la relativamente pequeña cantidad de oxígeno producido fotosintéticamente que necesita ser elaborado por todo el conjunto de algas de la laguna, a fin de promover la estabilización, admiten los autores que son las variaciones de temperatura y no las de intensidad luminosa las que constituyen el factor más importante para promover la más eficiente actividad microbiológica en la laguna (66).

#### 5. Profundidad.

La profundidad de la laguna es un factor importante que debe considerarse, no sólo por limitar la penetración de la luz, sino también por interferir en la distribución del calor en la masa de agua. Algunos autores admiten que este último aspecto es el más importante, ya que la temperatura es más limitativa que la luz en la mayoría de los casos (66).

En general, se calcula (en función de la temperatura como también de la penetración de luz) que la mayor eficiencia se obtiene con profundidades de 60 cm a 1 m. siendo que la mejor distribución del calor se realiza con 60 cm. En las regiones de temperatura promedio elevada y, principalmente, tomando en cuenta que la intensidad luminosa y la temperatura son factores climatológicos que se encuentran asociados, es posible que las lagunas de oxidación presenten un elevado rendimiento con las máximas profundidades admitidas o sea, cerca de un metro, a no ser que haya formación de una capa espesa de algas flotantes, principalmente *Microcystis*, que puede limitar mucho la penetración de la luz.

Otro factor que debe ser considerado en el cálculo de la profundidad de una laguna es el crecimiento de las plantas en

raizadas que puede ser perjudicial a la buena operación, así como constituir soporte para focos de larvas de insectos. En general, se observa que esa vegetación crece cuando la profundidad es inferior a 70 cm (63).

#### 6. Producción de Oxígeno.

El proceso de tratamiento en lagunas de estabilización es un proceso aerobio, en el cual la fotosíntesis realizada por las algas constituye la principal fuente de oxígeno. Para mantener las condiciones de aerobiosis es necesario que haya un equilibrio entre el oxígeno producido o introducido y el consumido por la oxidación biológica del sistema. En ese equilibrio entran, como factores principales: la población de algas que, según Hermann y Gloyna (66) es más considerable que las variaciones de intensidad luminosa que pueden ocurrir en diferentes épocas del año; la luz y, de otro lado, la población de bacterias y otros microorganismos heterótrofos y la carga de desague por oxidarse.

El oxígeno puede no provenir exclusivamente de la fotosíntesis, siendo posible, también, la reaireación por aire atmosférico, a través de la superficie expuesta. Se puede calcular la tasa de reaireación (71) comprobándose, entonces, que ésta debe variar entre 0 y 10 mg por litro por día, con valores promedios de 1 a 4 mg por litro por día, mientras que valores más altos solamente pueden obtenerse en lagunas muy poco profundas y con fuerte agitación provocada por el viento. En estas condiciones, solamente en tiempos de detención de 10 a 100 días sería posible lograr una DBO de 100 mg por litro tan sólo con reaireación atmosférica. Esto solamente puede suceder cuando la demanda de oxígeno se deja sentir muy lentamente, debido a la inactividad de las bacterias, producida por bajas temperaturas. Los valores de la reaireación obtenidos por medio de cálculos, sin embargo, no corresponden a la realidad, a no ser cuando la producción fotosintética es muy baja. De lo contrario, se forma un contra-gradiente de concentración de oxígeno, en la capa superficial del agua, que impide la penetración del aire por simple difusión (10). Sin embargo, el viento puede ejercer un papel importante en estos casos, por provocar la mezcla del oxígeno de la superficie con todo el cuerpo de agua.

La producción de oxígeno por algas es máxima cuando éstas se encuentran en fase logarítmica de reproducción y eso cuando las condiciones de nutrición son favorables, especialmente, en las lagunas de oxidación, en lo que se refiere al suministro de carbono. Faltando carbono éstas se tornan menos ricas en clorofila, pasando a acumular reservas bajo la forma de hidratos de carbono y grasas, además de acusar una producción de oxígeno menor que su propia demanda respiratoria (67) (72). Cualquier agua que contenga 100 mg por litro de DBO es capaz de producir aproximadamente 150 mg por litro de peso seco de algas en cerca de 3 días, con una producción de 175 y hasta 200 mg de oxígeno por litro por día. En general, se puede admitir que la tasa de reoxigenación por fotosíntesis, en una laguna de oxidación, es potencialmente 10 a

20 veces mayor que la atmosférica (71). El contenido de oxígeno disuelto puede llegar, en ciertas épocas, a 35 mg/l y 400% de saturación, siendo común un OD de 10 a 20 mg/l durante el día (73). La capa de la laguna donde se encuentra una mayor producción de oxígeno recibe el nombre de zona eufótica donde se presenta la adsorción de 99% de la luz incidente. En ciertas lagunas de los Estados Unidos (Dakota) esa capa tiene espesor variable entre 5 y 70 cm, disminuyendo la producción de oxígeno a medida que se verifica la extinción de la luz. En aquellas lagunas, la producción de oxígeno cerca de los 60 cm es ya inferior a la demanda producida por los microorganismos aerobios (63).

Algunas lagunas, en malas condiciones de funcionamiento, pueden tornarse rojizas, fenómeno que generalmente se debe a la presencia de bacterias fotosintetizantes. Tales organismos, no obstante, son anaerobios y la síntesis orgánica que realizan, en presencia de la luz, difiere mucho de la síntesis clorofiliana más común. Utilizan, como fuente de carbono, compuestos tales como alcoholes y ácidos orgánicos, frecuentemente donde hay descomposición anaerobia de desagües. Otras bacterias anaerobias no consiguen, sin embargo, proseguir sus procesos de oxidación biológica, desdoblando estos compuestos hasta su transformación completa en anhídrido carbónico, lo que sólo podría ser realizado en ambiente aerobio, sirviendo el oxígeno como aceptor adecuado de hidrógeno. Las bacterias fotosintetizantes, con todo, son capaces de desdoblar aquellos compuestos, ya que utilizan la luz como fuente de energía, la cual puede ser considerada, así, como condicionadora de un potencial de oxidación capaz de permitir la asimilación de moléculas reducidas en condiciones anaerobias. Esta capacidad que ningún otro ser vivo posee -confiere a las bacterias fotosintetizantes, un habitat particular y privado (74). La fijación del anhídrido carbónico, por estas bacterias, no constituye proceso esencial de síntesis, ya que utilizan otras fuentes de carbono. Además de esto, ese proceso de síntesis no lleva a la formación de oxígeno en el medio. Pueden utilizar amoníaco como fuente de nitrógeno. No pueden ser consideradas, al lado de las algas, como participantes de la oxigenación del medio, aunque puedan tener alguna importancia, en lagunas anaerobias, relacionada con la estabilización de compuestos químicos de residuos industriales, particularmente industrias procedentes del petróleo, etc.

Con frecuencia se atribuye la formación del hidrógeno sulfurado, en las lagunas de estabilización, a la presencia de "bacterias moradas" o "bacterias fotosintéticas", pero esto no es correcto. La producción del  $H_2S$  se debe a la actividad de las bacterias "sulfato-reductoras" (ejem. *Desulfovibrio*), mientras que las bacterias fotosintéticas, así como las demás "sulfobacterias", utilizan el hidrógeno sulfurado, oxidándolo a azufre, ya sea en un ambiente anaerobio (ejem. *Thiopedia* y otros géneros de bacterias fotosintéticas) o en un ambiente aerobio (ejem. *Beggiatoa* y otras sulfobacterias incoloras). Además, la producción del hidrógeno sulfurado no se debe solamente a un "exceso de sulfatos" en el medio, como en general se puede suponer. Sin embargo, aunque los sulfatos sean uno de