

caracterizadas por diferentes concentraciones de materia orgánica, oxígeno, etc. Se observa que la polución disminuye con el transcurso del tiempo o con la extensión recorrida por la corriente, gracias a la oxidación biológica que en ella se verifica y a la restauración del oxígeno disuelto, promovida por la aireación superficial o por la actividad de los organismos fotosintetizantes. Así, las sucesivas zonas de Kolkwitz-Marsson pueden reconocerse como regiones caracterizadas por los diferentes grados de autopurificación del curso de agua.

De acuerdo con Suter y Whipple (18), pueden reconocerse cuatro zonas de autopurificación a lo largo de un curso de agua que recibe una fuerte contribución en desagües: zona de Degradación, zona de Descomposición Activa, zona de Recuperación y zona de Aguas Limpias. Las zonas de degradación y de descomposición activa son denominadas por Suter, respectivamente: zona de Polución Reciente y zona Séptica, sin embargo, las denominaciones dadas por Whipple son las consagradas por el uso.

a) Zona de Degradación. En el punto en que se produce el lanzamiento de los residuos orgánicos, el agua se vuelve inmediatamente muy turbia, de color ceniciento, habiendo formación de depósitos de partículas en el fondo. En este punto la descomposición aún no tiene inicio o se produce en pequeña escala, pudiendo encontrarse oxígeno disuelto en cantidad suficiente para permitir la vida de muchos peces que allí afluyen en busca de partículas que les sirvan de alimento. Luego, se inicia la proliferación bacteriana originando una enorme población constituida por bacterias aerobias que se alimentan de esa materia orgánica, utilizando para su oxidación o respiración, el oxígeno disuelto en el medio, el cual comienza a reducirse hasta 40% de saturación o sea, cerca de 3.5 mg/l, en época de calor. En este punto se inicia la zona siguiente. El contenido de anhídrido carbónico sigue una curva inversa a la del oxígeno: es tanto mayor cuanto menos OD haya. El contenido de compuestos nitrogenados complejos es también elevado. Proteínas y otras formas de nitrógeno orgánico existen en el punto de lanzamiento pero son luego oxidados, dando lugar al amoníaco que crece, progresivamente, en concentración. La demanda bioquímica de oxígeno, producida por todo este material orgánico en descomposición, alcanza un máximo en el punto donde se produce el lanzamiento, disminuyendo enseguida. Bacterias coliformes están presentes en densidades que pueden ser medidas en decenas de millares por ml. Las bacterias de vida libre, de los desagües, alcanzan también, cifras máximas en esta primera zona, siendo comunes las concentraciones de centenas de millares por ml de agua. Pueden formarse densas masas de Sphaerotilus. Alcanzan también un auge de desarrollo los hongos que, de la misma forma que las bacterias, dependen de la presencia de materia orgánica en el medio, para su nutrición, así como de oxígeno disuelto (las formas aerobias) para su respiración, actuando, pues, del mismo modo que aquellas, en el sentido de promover la autopurificación. Son igualmente abundantes algunos protozoarios, como ciertas for-

mas de ciliados coloniales que alcanzan números superiores a 100,000 por centímetro cúbico (Ej: géneros Vorticella, Epistylis y Carchesium). Las algas son raras, sea en virtud de la falta de luz, cuya penetración está limitada por la excesiva turbiedad, sea por causa de la presencia de sustancias tóxicas para las mismas, que se originan de la descomposición del desague, o también, por la falta de oxígeno durante la noche (cuando no lo producen por fotosíntesis) imposibilitando su respiración. Pocos géneros pueden, sin embargo, ser encontrados en las regiones más favorables, en la superficie, en las márgenes o sobre piedras y pedazos de madera que no están totalmente sumergidos: Stigeoclonium, Oscillatoria, Phormidium. En aguas que no tengan gran velocidad, comienzan a aparecer gusanos tubificídeos en gran número, en el fondo.

b) Zona de Descomposición Activa. Esta zona solamente se puede reconocer en aguas que reciben una fuerte carga de desagües. Se caracteriza por presentar acentuado color ceniza y depósitos de lodo oscuros, en el fondo, con fuerte mal olor. En la porción mediana de esta zona, el oxígeno disuelto puede ser totalmente consumido por las bacterias, hongos y otros organismos aerobios, creándose condiciones de anaerobiosis en todo el cuerpo de agua o, por lo menos, en los puntos de mayor concentración de lodo orgánico. Después, también en esta zona satisfecha la mayor parte de la demanda de oxígeno, éste aparece hasta alcanzar el 40% de saturación, iniciándose, entonces, la zona siguiente. En ese punto desaparece, por consiguiente, la vida aerobia, surgiendo en su lugar una flora y una fauna constituidas por organismos capaces de respiración intramolecular, lo que da origen al desprendimiento de burbujas que contienen gases tales como metano, hidrógeno sulfurado, y otros, responsables del mal olor característico del ambiente séptico. El nitrógeno se encuentra en gran cantidad, también en forma orgánica, pero predominantemente en la forma de amoníaco que puede iniciar su oxidación a nitritos.

El número de bacterias, ya sea del grupo coliforme, o de las especies patógenas, disminuye rápidamente, en el transcurso de esta zona. Especialmente en el caso de las bacterias patógenas y fecales en general; esa reducción puede estar influenciada por la presencia de Bacteriófagos, o virus que parasitan bacterias, habiendo sido ya observado, en 1896, por Hankin, que el agua filtrada del río Jumna ejercía acción antiséptica sobre las bacterias agentes del cólera (19) (20). Trabajos más recientes han demostrado que las aguas de desagües son muy ricas en bacteriófagos destructores de los bacilos disentéricos, tíficos, paratíficos clostridiums y otros patógenos además del Escherichia coli. Con éste, existen muchos otros factores responsables de la purificación bacteriana: la luz, la precipitación de partículas que arrastran bacterias para el fondo, floculación para formar partículas mayores y adsorción, presencia de oxígeno (que es un elemento tóxico para muchos organismos de vida anaerobia), así como la falta de sustancias nutritivas, para las bacterias de vida libre. En la región de esta zona de completa -

ausencia de oxígeno, la flora bacteriana aerobia es totalmente sustituida por la flora anaerobia, sucediendo lo mismo con la fauna. El número de protozoarios se eleva en el transcurso de esta zona, así como también el de gusanos tubificídeos y larvas de insectos resistentes a la falta de oxígeno, tales como los sirfídeos, que obtienen oxígeno de la atmósfera, por medio de su largo sifón respiratorio, y los quironómídeos que reservan oxígeno químicamente combinado con la hemoglobina. Todos estos, sin embargo, de vida aerobia, así como las bacterias filamentosas del género *Sphaerotilus*, los hongos, etc., desaparecen en la porción anaerobia de la zona de descomposición activa, para reaparecer nuevamente donde el oxígeno vuelve a elevarse.

c) Zona de Recuperación. La zona de recuperación presenta una secuencia inversa a la de la zona de degradación. Se inicia en el punto en que el oxígeno disuelto alcanza el 40 % de saturación y se extiende hasta la región en que el contenido inicial de oxígeno, característico de las aguas limpias, se restablece. A medida que la demanda de oxígeno producida por la presencia de materia orgánica se va satisfaciendo, con la destrucción de ésta, comienza a haber un saldo de ese gas que constantemente es introducido en el curso de agua por la atmósfera, a través de la superficie o por organismos fotosintetizantes que ya allí proliferan en número cada vez más grande. Las aguas ya se presentan mucho más claras y los depósitos que se sedimentan en el fondo tienen una textura más granulada y no tan fina, sin presentar desprendimiento de gases o mal olor. Entre los compuestos de nitrógeno, predominan las formas más oxidadas: nitritos y nitratos, pudiéndose también encontrar amoníaco. Esta es la zona de mineralización por excelencia. Así los compuestos de nitrógeno, también los de fósforo, azufre, etc., son oxidados hasta transformarse en sustancias estables, como fosfatos y sulfatos. Esto permite una fertilización del medio que facilita el mayor desarrollo de vegetales fotosintetizantes, como algas u otras plantas que, a su vez, constituyen alimento adecuado para toda la serie de animales microscópicos que habitan las aguas dulces.

El número de bacterias es bastante reducido. El número de protozoarios que se alimentan de bacterias entra, también, en declinio. Surgen, como ya se dijo, las primeras algas que luego entran en intensa reproducción: primeramente las algas verdeazuladas, en la superficie y márgenes, después los clo-roflagelados y algas verdes, finalmente las diatomeas se presentan exuberantes, a medida que las aguas se van volviendo más y más claras, permitiendo la penetración de la luz. Tienen máximo desarrollo, en esta zona, los rotíferos y micro-crustáceos. Gran número de larvas de quironómídeos, además de moluscos y muchos gusanos, se desarrollan, también, en gran cantidad, sirviendo de alimento a los primeros peces, más tolerantes, que comienzan a aparecer.

d) Zona de Aguas Limpias. En esta zona, las aguas alcanzan las condiciones normales existentes antes de producirse

la polución, por lo menos en lo que se refiere al contenido de oxígeno disuelto, a la DBO y a los índices bacteriológicos. Mientras tanto, en virtud de la gran mineralización que se lleva a cabo en la zona anterior, esas aguas son mucho más fértiles que antes de recibir la polución. La producción de algas y, por consiguiente, toda la productividad de estas aguas, es mucho mayor, pudiendo dar origen a fenómenos de floración, con todas las consecuencias que provienen de la super-población de algas. Esta super-población puede, a su vez, llevar a una supersaturación de oxígeno. Predominan las formas completamente oxidadas y estables de compuestos minerales: nitratos, fosfatos, etc.

Las algas sirven de alimento a los protozoarios y éstos a los rotíferos, crustáceos y larvas de insectos de los cuales se alimentan los peces. Se restablece así, el ciclo biodinámico normal de un cuerpo de agua. Se encuentran allí las ninfas de odonatos, efímeros, tricópteros y plecópteros, así como los grandes crustáceos de agua dulce, moluscos y peces de varias especies.

La principal característica de esta clasificación en zonas, tanto en el sistema de Suter (más antiguo, creado en 1922) como en el de Whipple (1926), está en el hecho de reconocer la existencia de dos zonas intermedias entre las aguas polucionadas y las limpias (21). Todos los otros sistemas creados para delimitar diferentes regiones en un curso de agua polucionada, inclusive el de Kolkwitz-Marsson, reúnen las dos en una sola, denominada polisapróbica o séptica. La restricción que se puede hacer, en algunos casos, en el empleo de este sistema, es el mismo que ya se ha mencionado, en el Capítulo 5, en relación al sistema de Kolkwitz-Marsson, o sea, el de la posibilidad de la coexistencia de elevadas DBO y supersaturación de oxígeno, debido a la gran actividad fotosintética.

### 6.3. Tratamiento de Aguas de Desecho.

En el tratamiento de desagues se procura repetir, en ambiente reducido y en corto espacio de tiempo, los mismos procesos que se verifican a lo largo de la trayectoria de un río, o en el área de un lago, con respecto a la autopurificación. Para esto es necesario que se proporcione al desague, en la estación de tratamiento, las condiciones ideales que favorezcan la oxidación biológica, condiciones esas que se refieren principalmente a la proliferación bacteriana, (en vista de que son esos microorganismos los principales responsables de la realización de la depuración) e introducción de oxígeno, en el caso de los procesos de tratamiento aerobio. Los diferentes métodos y sistemas existentes para el tratamiento de desagues procuran, exactamente, conseguir una elevada tasa de oxidación biológica a través de diferentes procesos de abastecimiento de oxígeno.

### 6.3.1. Principios Biológicos del Tratamiento.

Ya se vió, en las páginas anteriores, que la purificación de las aguas ricas en materias orgánicas, como son los desagües, consiste, en último análisis, en la oxidación de ese material orgánico hasta estabilizarlo, o sea, transformarlo en sustancias de estructura molecular simple y bajo contenido energético y que, así, permanecen en las aguas, a no ser que, por intermedio de otras actividades biológicas, sean nuevamente transformadas en compuestos de más elevada estructura (síntesis).

La oxidación de las materias orgánicas, sin embargo, no se produce (a no ser, posiblemente, en escala sumamente reducida) por el simple contacto de éstas con el oxígeno del aire. Es necesaria la presencia de catalizadores, enzimas, que faciliten la realización de esa reacción. La presencia de bacterias, en gran cantidad, en los desagües, proporciona exactamente los catalizadores necesarios para la reacción, que son sus enzimas respiratorias. No se debe pensar que las bacterias tengan, por eso, un papel específico y "loable", que viene al encuentro de los deseos y necesidades del hombre de purificar sus desperdicios y sus cursos de agua; se trata tan sólo de un ciclo biológico, como tantos otros que contribuyen con la llamada economía de la naturaleza. Son las oxidaciones de ese tipo las que causan la descomposición de los cadáveres o de las hojas y troncos de árboles en el suelo. Las bacterias, hongos, gusanos y otros organismos, responsables de tales oxidaciones, no están "por una feliz casualidad" o por cualquier interés particular, facilitando la vida y el bienestar del hombre, sino que apenas se nutren para vivir: se alimentan de materia orgánica y respiran oxígeno. No hay razón para honrar a los buitres por el hecho de que se comen cadáveres, pues ellos están, al igual que las bacterias, promoviendo la oxidación biológica, así como el hombre también promueve oxidación biológica siempre que se alimenta y respira.

Existen dos caminos para la oxidación biológica: aerobio y anaerobio, realizados respectivamente por bacterias que respiran oxígeno del aire y bacterias que utilizan el oxígeno intramolecular. Pero en ambos casos, las bacterias desempeñan papel preponderante, como intermediarios de la reacción. Ya se dijo que, en el proceso de autopurificación de los cursos de agua, se presentan las dos formas de oxidación, predominando la primera en las aguas de la superficie, por donde se produce la entrada del aire atmosférico y la anaerobia en el fondo, especialmente en los depósitos de lodo orgánico o en todo el cuerpo de agua, cuando la carga de contaminación es suficientemente grande para consumir todo el oxígeno. Del mismo modo, el tratamiento artificial de los desagües puede seguir uno de esos dos caminos. En general es el mismo desagüe dividido en dos partes: una sedimentable, que constituye el lodo del desagüe, el cual es tratado anaerobicamente en digestores; otra, líquida, que

contiene materia orgánica soluble y partículas de pequeñas dimensiones, y por lo tanto de sedimentación más lenta, la cual es tratada aerobicamente. Estos sistemas imitan, así, el proceso que se realiza en los cursos de agua, en que existe la misma separación de dos fases, que sufren tratamiento anaerobio (la sedimentable) y aerobio (la soluble o finamente suspendida).

### 6.3.2. Tratamiento Aerobio.

En el proceso aerobio se procura intensificar la proliferación de ciertos microorganismos, especialmente bacterias, que, además de la propiedad de oxidar aerobicamente la materia orgánica, tienen una característica de especial importancia para ese tipo de tratamiento -la de formar masas capaces de adsorber partículas en suspensión. Estando los procesos aerobios destinados principalmente al tratamiento de la fase líquida que contiene finas partículas en suspensión, es muy importante que se verifique la floculación (coagulación de un precipitado finamente dividido, para formar partículas mayores) de ese material, dando origen a masas de mayor tamaño y densidad, los grumos o flocs, de sedimentación más rápida, tal como se realiza en la coagulación y decantación de las aguas de abastecimiento, para remoción de las partículas en suspensión. En este último caso, se emplean coagulantes químicos, que, por su naturaleza coloidal, poseen acción de superficie, capaz de producir la adsorción de las partículas. En el caso del desagüe se observa el mismo fenómeno, sin embargo, a costa de masas con propiedades coloidales, constituidas por ciertos tipos de microorganismos que lo habitan, capaces de oxidar aerobicamente las partículas orgánicas adsorbidas. Por esa razón, se dará, en el presente capítulo, especial atención a las características de esas bacterias, principalmente en lo que se refiere a las propiedades de adsorción, nutrición, respiración y reproducción de esos organismos.

#### 6.3.2.1. La Formación de Grumos o Flocs.

Gran número de bacterias posee un envoltorio o vaina de consistencia gelatinosa, constituida por polisacáridos, que envuelven cada una de sus células. Siendo esta vaina embebible y parcialmente soluble en agua, puede algunas veces, aumentar mucho su espesor, apareciendo anastomosis entre las vainas de dos o más bacterias contiguas, llegando a constituir verdaderas masas gelatinosas, que contienen bacterias en su interior. Esa masa gelatinosa recibe el nombre de zooglea, existiendo opiniones favorables para su modificación a fito-glea, ya que se trata de material producido por organismos vegetales y no animales.

Esa masa zooglea ha sido considerada como elemento responsable de la coagulación de un precipitado finamente dividido, para formar partículas mayores o flocs, del material en suspensión en el desagüe. Por esa razón, ciertas bacterias capaces de digerir aerobicamente la materia orgánica, pero que

no poseen capacidad de formar zooglea, eran hasta hace poco consideradas de menor valor y hasta perjudiciales para el tratamiento.

La idea que prevalecía, hasta hace poco, sobre la formación de grumos o flocs en el desague, era, pues, la de que la propiedad de coagulación estaba directamente relacionada con la capacidad especial de las bacterias en producir zoogleas. Por esa razón, se creía que la bacteria Zooglea ramigera, cuya principal característica está en la gran cantidad de masa gelatinosa que sus colonias son capaces de producir, sería la que más importante papel desempeñaría en el proceso. La gelatina o zooglea, adsorbiendo gran número de partículas en suspensión, daría origen a grandes flocs que se precipitarían, siendo la materia orgánica en ellos contenida, asimilada por las bacterias.

Investigaciones realizadas en los últimos años alteraron profundamente esas ideas. Se comprobó que, tanto en medio de cultivo como en el desague, es posible obtener coagulación mediante innumerables especies de bacterias, además de la Zooglea ramigera y que esa característica de producir coagulación está relacionada no con propiedades especiales de uno o algunos tipos de bacterias, sino con determinadas condiciones de vida en que estas se encuentran. El punto de vista defendido hoy en día (22) es el de que la coagulación está proporcionada por características coloidales de la masa de bacterias, relacionadas con la intensidad de las actividades metabólicas de éstas. En verdad, según quedó demostrado a través de esos estudios, las bacterias se comportan como micelas de un coloide del tipo hidrófobo o liófobo, o sea, como los coloides inorgánicos. Sabemos que, en ese tipo de coloides, las micelas se encuentran sujetas a dos clases de fuerzas antagónicas; una proporcionada por su propia carga superficial electrocinética o potencial zeta, originada por la adsorción de iones del medio por la partícula: siendo siempre cargas de la misma señal en todas las partículas, éstas tienden a repelerse cuando se aproximan unas a las otras; otra, actuando en sentido contrario, responsable de una atracción que se verifica entre las partículas y que se denomina fuerza de Van der Waals. Siempre que las micelas del coloide chocan entre sí, en virtud del movimiento Browniano, una de las dos cosas puede suceder: o aglutinarse, y eso acontece siempre que el potencial zeta de las partículas es muy bajo, prevaleciendo las fuerzas de Van der Waals; o repelerse, en el caso del potencial electrocinético elevado. En el primer caso se dice que hubo floculación del sistema y ésta puede ocurrir siempre que se mezclen coloides de cargas opuestas, o cuando se mezcla un electrólito con la solución, etc.

La masa de bacterias no es un verdadero coloide, pero se comporta como tal. Las células, que desempeñan el papel de micelas en el sistema, están envueltas por una cápsula de gelatina que puede tener mayor o menor desarrollo. Se ha comprobado, a través de experimentos, que partículas de esa naturaleza deberían aglutinarse siempre que el potencial zeta

de su superficie fuera inferior a 15 milivóltios. Sin embargo, midiéndose por intermedio de electroforesis el potencial de gran número de bacterias en cultivo, se encontró, para la gran mayoría de éstas, potencial situado entre 6 y 12 milivóltios, a pesar de no estar coaguladas en el medio de cultivo. La explicación para el hecho es la siguiente: la bacteria, cuando se encuentra en un medio rico en nutrimentos, se presenta dotada de gran movilidad siendo, gracias a esto, capaz de "huir" de la coagulación, oponiendo su propia energía de locomoción, a las fuerzas de Van der Waals que procuran aproximarlas. De hecho, se observó que, en el material coagulado, las bacterias se presentan inmóviles y con metabolismo reducido al mínimo. Por otro lado, nunca se produce coagulación cuando las bacterias se encuentran en la fase logarítmica de crecimiento, que es la curva de proliferación que se observa cuando el medio es sumamente rico en nutrimentos, o aún en la fase de declinación, en que siendo el medio más pobre, la proliferación es tan sólo proporcional a la cantidad de materia nutritiva: apenas son coaguladas las bacterias en fase endógena, cuando agotados los elementos nutritivos, las bacterias pasan a vivir principalmente de sus propias reservas nutritivas, cayendo la curva de producción. Siendo así, la coagulación está condicionada, además de los factores coloidales, a la capacidad energética del medio en que viven. El valor energético del desague se puede medir en kilogramos de DBO por día, por kilogramo de desague: cuando ese valor es muy elevado, las bacterias presentan un metabolismo intensificado y sus actividades locomotoras impiden la coagulación; cuando ese valor es bajo, las bacterias entran en inactividad, adhiriéndose unas a las otras ya que el movimiento Browniano las pone en contacto. Si, al material coagulado, se le agregan compuestos nutritivos, los flocs se desintegran nuevamente: si las bacterias no coaguladas se retiran del medio de cultivo rico en nutrimentos y se colocan en simple solución salina, pasan a formar flocs.

En los procesos aerobios de tratamiento de desagües, la coagulación es de gran importancia, a fin de producir la decantación del material en suspensión. Por otro lado, sin embargo, la metabolización de las sustancias orgánicas es altamente deseable, como ya vimos en las páginas anteriores. La aireación del desague, por cualquier proceso, produce la oxidación rápida de ese material a través de una intensa proliferación de bacterias aerobias, que consumen materia nutritiva, entrando en fase endógena, por super-población. En esa fase se presenta la coagulación, que permite la precipitación de las partículas restantes en suspensión. En esas condiciones, se pueden tener varias situaciones, con relación a los hechos mencionados: una aireación deficiente podrá mantener un exceso de materias nutritivas, por lo tanto, exceso de valor energético, impidiendo la buena coagulación; una aireación excesiva (particularmente en el caso de tratamiento por lodos activados) intensa coagulación, pero, dando origen a flocs de baja capacidad purificadora, en virtud de un metabolismo muy reducido de las bacterias que lo forman.