

No habiendo problemas específicos (olor, etc.) las dosis empleadas en las aguas filtradas están en el orden de 0.2 a 0.7 mg/l.

La acción bactericida y viricida del permanganato de potasio es semejante a la del cloro, pero esta acción no prosigue después de la filtración, ya que los compuestos formados en el agua son retenidos casi totalmente en los filtros rápidos. Se debe a esto que un agua sometida a pretratamiento con permanganato (principalmente para remover el olor o el fierro y manganeso) necesite la aplicación posterior de cloro para mantener la esterilidad de la red de distribución.

GENERALIDADES

4.4.2. Algas (1)

Siempre que la densidad de algas en una fuente pase de un cierto valor, sin que sea posible controlarlas por medio de medidas preventivas, se debe aplicar algicidas o recurrir a otros medios que las eliminen del agua. El número límite de algas por mililitro de agua varía mucho de acuerdo con la especie de alga considerada. Así, ciertos organismos como por ejemplo el *Dinobryon* que provoca un mal olor muy pronunciado, se debe combatir cuando está presente en números relativamente bajos, inferiores a 1,000 por ml; mientras que otros como el *Tetraedron*, etc., a veces pueden estar presentes en números superiores a 3,000 por ml. sin causar ningún problema en el tratamiento o perjudicar directamente la calidad del agua. En igual forma, esos números dependen mucho del tamaño de las células, siendo esa una de las causas por las cuales se procura referir su densidad en unidades patrón de área o de volumen, o por lo menos, anotar en la hoja de recuento, el tamaño promedio aproximado de las células o colonias contadas, a fin de que en la interpretación de los resultados se pueda tomar en consideración la masa de materia orgánica constituida por las algas. Además es necesario considerar el tipo de perjuicio que puede causar el microorganismo en cuestión. Se debe combatir las algas que se ha comprobado que son tóxicas aún cuando estén en números relativamente pequeños, con la finalidad de evitar que se acumulen en los filtros o en los reservorios de distribución pudiendo llegar a concentraciones tóxicas o entrar en descomposición dando origen a productos tóxicos. De un modo general, es un criterio razonable procurar controlar cualquier desarrollo superior a 100-200 organismos por mililitro de agua cuando se trata de organismos de tamaño relativamente grande (de alrededor de 50 micras de diámetro o de largo) y de 2,000 - 3,000 organismos por mililitro, en el caso de organismos de dimensiones pequeñas (de más o menos 10 micras de diámetro o de largo). Aún cuando se trate de aquellas especies que no causan ningún inconveniente específico, porque en concentraciones superiores a esas son perjudiciales por constituir una masa de materia orgánica en suspensión. En el caso de organismos que producen gusto y olor se deben realizar pruebas de sa-

bor y olor límites para determinar la concentración máxima permisible para cada especie en el agua. Los métodos normales de la Organización Mundial de la Salud recomiendan, como límite, 300 unidades patrón de área, por ml (UPA) (28).

El control de los organismos por medio de algicidas se debe hacer antes que la especie considerada alcance números elevados, ya que su destrucción en masa puede resultar en la acumulación de materia orgánica en descomposición, produciendo varios inconvenientes tales como la formación de sabor y olor desagradables, el desprendimiento de sustancias tóxicas, el establecimiento de una demanda bioquímica de oxígeno elevada, la formación excesiva de lodo en los decantadores de las plantas de tratamiento, la formación de ambiente anaerobio, etc. Por medio de un control semanal del número de organismos existentes en una fuente es posible verificar, en muchos casos cuándo la curva de crecimiento entra en la fase de progresión logarítmica, momento en que se deberá iniciar la aplicación de algicidas.

Los algicidas se deben dosificar cuidadosamente, a fin de que no ocurran fenómenos de selección en virtud de la aplicación de dosis insuficientes (15) (17) (29). La destrucción de las especies más sensibles puede dejar el ambiente libre para el desarrollo de las especies más resistentes que toman su lugar, trayendo a veces inconvenientes más serios de los que podrían ocurrir con la flora normal bien equilibrada biológicamente, en que las diferentes especies se controlan mutuamente. También pueden ocurrir selecciones de ese tipo con el empleo de algicidas orgánicos los cuales, por su propia composición química, son selectivos, actuando algunos de ellos solamente sobre las algas azules.

Una sustancia para ser utilizada como algicida en las aguas de abastecimiento, además de ser eficiente en la destrucción de algas, debe obedecer a varios requisitos tales como (30) (31) : ser de fácil adquisición en el mercado y a bajo precio, que no tenga que emplearse en concentraciones muy elevadas para destruir a las algas porque convertiría el tratamiento en antieconómico; en las cantidades empleadas, no ser tóxica a los seres humanos, animales domésticos, peces, plantas cultivadas y otros organismos que se abastecen con el agua tratada.

Se ha comprobado que además de una parte de los algicidas que se pierde en la sedimentación, sobre todo cuando se trata de sales de cobre, otro gran porcentaje queda retenido en los aparatos de filtración en particular en los filtros de tierra de diatomeas. Esto quiere decir que apenas una parte de los algicidas empleados en el tratamiento llega hasta la red de distribución y en ella misma, hay una reducción antes de que el agua llegue a los consumidores normales. Esto constituye una dificultad en el tratamiento de algas en las piscinas que utilizan recirculación del agua, siendo necesario una aplicación continua de nuevas cantidades de algicidas para cubrir el porcentaje perdido (32).

4.4.2.1. El Cloro como Algicida.

El cloro, aunque no sea tan usado como el sulfato de cobre, constituye un algicida eficaz para muchas algas y debe ser empleado sobre todo en el caso de aquellas especies que son resistentes al sulfato de cobre. La acción tóxica del cloro sobre las células de las algas parece que se produce de la misma manera que con las bacterias, siendo el ácido hipocloroso el compuesto activo que al penetrar a través de la membrana celular ejerce su acción sobre las proteínas o sobre las enzimas celulares. De esa manera altera las características físico-químicas de las algas, impidiendo la continuación de sus actividades vitales normales (20). Las variaciones que existen, de resistencia al cloro, entre las diferentes especies de algas y de otros grupos de microorganismos, se deben principalmente a las diferencias de permeabilidad de sus membranas celulares al ácido hipocloroso. En general, son más resistentes las especies que tienen membranas gruesas, o impregnadas de calcio, lignina, sílice o envueltas en secreciones mucilaginosas. Así, las diatomeas son mucho menos afectadas por la presencia de cloro que las otras algas, debido a la caja silicosa constituida por la frústula que encierra a cada una de las células. Mientras que un número de especies pueden ser destruidas completamente con dosis que varían de 0.3 a 0.5 mg/l (excepcionalmente 0.6 a 0.7 mg/l) de cloro, las diatomeas necesitan de 1.0 a 2.0 mg/l (33) para ser destruidas. Sin embargo, hay excepciones, como por ejemplo, el género Acnathes que siendo resistente a concentraciones tan elevadas como 1.0 mg/l de sulfato de cobre puede ser controlado con cloro en una concentración de 0.25 mg/l (34). Además de las diatomeas, son particularmente resistentes a la cloración las algas de los géneros: Chlorella, Cosmarium, Closterium, Gomphosphaeria y Ela-katothrix (9).

Generalmente se emplea el cloro en aguas corrientes, canalizaciones abiertas o en lechos filtrantes (8). También se le emplea conjuntamente con el sulfato de cobre para evitar que se desarrollen en mayor número las especies que son resistentes a este algicida. Por ejemplo, se citan casos en que, en una fuente, al tratar de destruir algas diatomeas del género Synedra, con sulfato de cobre, resultó una superproducción de algas verdes del género Palmella que pudo ser controlada solamente con cloro. La aplicación de cloro (generalmente en forma líquida) al agua de un reservorio involucra varios problemas, entre ellos el de la profundidad en que debe aplicarse, a fin de que no sea absorbido totalmente antes de que llegue a la superficie. Otros factores que se deben tomar en cuenta son la estratificación del lago, los fenómenos de circulación del agua y sobre todo la demanda de cloro.

La restricción principal al uso del cloro como algicida está en la formación de compuestos odoríferos clorofenólicos, tal como se indicó en páginas anteriores. Para que esto no suceda es necesario aplicar dosis excesivas de cloro, de tal modo que se oxiden totalmente esos compuestos. Así por ejem-

plo, cuando hay presencia de algas flageladas del género Synura se ha comprobado que hay formación de un sabor desagradable en el agua cuando se aplican dosis de 1.4 mg/l de cloro, aunque la muerte de las algas pueda ser provocada por concentraciones mucho menores; ese gusto disminuye de intensidad cuando se aplica 1.8 mg/l y finalmente desaparece con una supercloración a 2 mg/l (29). El bióxido de cloro ha sido señalado recientemente y por muchas razones, entre las que se destaca la reducción de gusto y olor, como un algicida que promete, aunque de costo relativamente alto (31).

4.4.2.2. Sulfato de Cobre.

En general, se atribuye a los americanos Moore y Kellerman el descubrimiento, en 1904, del poder algicida del sulfato de cobre, aún cuando se le aplica en dosis muy pequeñas (8) (35). Aunque, parece que ya se habían realizado experimentos en ese sentido en Europa desde 1890 (36). Rápidamente esa sustancia fué adoptada como algicida por muchos operadores de plantas de tratamiento de agua, a pesar de que habían algunas objeciones relativas a los posibles efectos tóxicos que podría tener sobre el organismo humano. Sin embargo, según se pudo comprobar sería necesario una cantidad de 20 mg/l de cobre o un máximo de 100 mg por día en el agua, para que se produjesen intoxicaciones humanas. Por otro lado, de acuerdo a éste y otros autores una concentración igual a 5 mg/l convierte al agua en absolutamente impasable debido al gusto que le produce. Se ha observado también que varios alimentos de uso diario contienen concentraciones de cobre más elevadas que las empleadas en el tratamiento de aguas para el control de las algas. Así, el trigo tiene una concentración que puede variar de 190 a 800 mg por kilogramo, la avena de 40 a 200, las lentejas de 110 a 150, las alverjas de 13 a 110, etc., llegando en algunos alimentos hasta 2,000 mg por kilogramo, como es el caso de las ostras. Además gran parte del cobre aplicado se pierde, por precipitación, en los reservorios y canales, quedando poco en las aguas que llegan hasta los consumidores. Por otro lado, se sabe que el cobre en pequeñas cantidades es beneficioso al organismo humano, porque actúa como catalizador en la asimilación del fierro y su aprovechamiento en la síntesis de la hemoglobina, desempeñando pues un papel importante en la curación de las anemias. Finalmente, el exceso de cobre en el agua se puede percibir por la reacción que tiene con los jabones alcalinos, produciendo una coloración verde que mancha las ropas (8) (37).

Sin embargo, mucho más nocivos son los efectos que ese elemento produce sobre los peces. En general, se citan como muy sensibles al cobre los peces como: las truchas, las carpas, los bagres, los peces rojos de los acuarios ornamentales, etc. Para éstos la dosis letal es generalmente inferior a 0.5 mg/l, mientras que otros peces, como el "black-bass", son resistentes a dosis hasta de 2 mg/l o más de $\text{Cu SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (38). Sin embargo, no se puede esta-

blecer valores muy positivos y constantes para esos límites, ya que la intoxicación de los peces por el cobre depende de muchos factores, tales como la dureza de las aguas, el pH, la agitación, etc.) Por ejemplo, es significativo el hecho de que ciertos peces que en aguas dulces pueden morir intoxicados con 4 mg/l son resistentes a dosis de 30 mg/l cuando están en el agua de mar (39). Los experimentos han demostrado que la intoxicación de los peces por el cobre y otros metales pesados es un fenómeno de naturaleza coloidal, que consiste en la coagulación de la mucosa de las branquias causando la asfixia. En este fenómeno, la agitación del agua ejerce una influencia directa, sobre todo cuando es provocada por el burbujeo del aire que se hace en los acuarios, de tal manera que los peces mueren con dosis de cobre (o zinc, etc.) muy inferiores a las que normalmente causarían su muerte (40). Aunque gran parte del cobre se ha de precipitar antes de que el agua llegue hasta los consumidores, es aconsejable evitar el empleo de dosis superiores a 0.5 mg/l de $\text{Cu SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, a no ser de que se trate de aguas duras. Siempre se debe controlar el cobre residual (aproximadamente 4 veces menor que el del sulfato) en el efluente de las plantas de tratamiento.

Las algas mueren inclusive en presencia de partículas de cobre colocadas en el agua. En 1893, Nageli observó que filamentos de *Spirogyra* cuando estaban en presencia de ese metal se morían. Su muerte era precedida por modificaciones en la estructura del protoplasma celular, debidas posiblemente a su coagulación y dió al fenómeno la denominación de acción oligo-dinámica. Senderling demostró por medio de los rayos X que el metal se disuelve en el agua en cierto grado, concluyendo que el proceso era de naturaleza iónica. Nauman cree que se trata de un fenómeno de adsorción electrostática polar o de un enlace químico fuerte del metal con algún elemento protoplasmático (20) (35).

El sulfato de cobre se puede aplicar puro o mezclado con el cloro, o aún con el cloro y el amoníaco, con excelentes resultados (cuprocloración y cuprocloraminación). La cantidad de sulfato de cobre que se debe aplicar como algicida, varía en cada caso con la especie de alga que ha de ser combatida, así como con las características del agua en tratamiento. No se puede establecer una dosis fija para una fuente determinada o para un tipo de alga. Se deben tener en consideración factores tales como dureza, temperatura y pH del agua (31). Con respecto a diferentes géneros de algas, se sabe que hay variaciones muy grandes en su comportamiento. Los flagelados pigmentados del género *Synura*, o las algas azules del género *Microcystis* son mucho más sensibles que muchos otros flagelados y que ciertas diatomeas como el *Achnanthes* (34). En medios de cultivo se ha observado los siguientes grados de resistencia al sulfato de cobre (41):

Algas	mg/l	(en $\text{Cu SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
<u>Algas Verdeazuladas.</u>		
<i>Calothrix</i>	hasta	8.0
<i>Cylindrospermum</i>	"	0.25
<i>Microcystis</i>	"	0.25
<i>Nostoc</i>	"	1.0
<i>Phormidium</i>	"	0.25
<i>Plectonema</i>	"	0.25
<i>Symploca</i>	"	2.0
<u>Algas Verdes.</u>		
<i>Ankistrodesmus</i>	"	0.5
<i>Chrorella</i>	"	0.5
<i>Chlorococcum</i>	"	2.0
<i>Coelastrum</i>	"	1.0
<i>Gloeocystis</i>	"	0.25
<i>Oocystis</i>	"	1.0
<i>Scenedesmus</i>	"	8.0
<i>Sphaerella</i>	"	0.5
<i>Stigeoclonium</i>	"	0.25
<u>Diatomeas</u>		
<i>Achnanthes</i>	"	1.0
<i>Gomphonema</i>	"	0.125
<i>Nitzschia</i>	"	1.0
<u>Cloroflagelados.</u>		
<i>Chlamydomonas</i>	"	1.0

Estos resultados no tienen mucho valor para los fines de aplicación práctica, solamente sirven para demostrar la sensibilidad relativa de las diferentes algas, a un agente tóxico. Es muy posible que las algas cuando están en un medio de cultivo adecuado, tienen una mayor resistencia a las sustancias tóxicas que en su medio ambiente natural donde se hallan sujetas a la competencia con otros organismos por las fuentes de alimentación y de luz (42). En su medio ambiente natural tienen aproximadamente el doble de sensibilidad. Además, en un medio de cultivo de pH y alcalinidad elevados, como es el caso de los medios empleados para algas, una parte del cobre se precipita en forma de compuestos insolubles, perdiendo su efecto tóxico (41).