

Manual técnico del agua.

Barraque. Ch., y otros

ed. Degremont. 1979.

TRATAMIENTOS ESPECÍFICOS

3.2. Tratamiento específico de eliminación y corrección de aguas naturales

1. ELIMINACIÓN DE HIERRO Y MANGANESO

El hierro y el manganeso deben eliminarse de las aguas de consumo, por diversas razones:

- causas de corrosión o de obstrucción de las tuberías (directamente. Por precipitación y formación de depósitos, o indirectamente, favoreciendo el desarrollo de bacterias específicas);
- aspecto del agua;
- sabor metálico;
- inconveniente en el lavado de la ropa.

Igualmente, son indeseables estos elementos en numerosas aguas de fabricación, en especial en industrias lecheras, papeleras o textiles.

En las aguas de superficie, el hierro y el manganeso se encuentran generalmente en estado oxidado y precipitado, por lo que se eliminan por tratamientos clásicos de clarificación.

En aguas profundas desprovistas de oxígeno, se presentan en forma reducida (estado de oxidación + 2) y disueltas, en cuyo caso deben someterse a los tratamientos específicos que se examinan seguidamente.

A. Estados naturales del hierro y del manganeso - Problemas analíticos

El hierro férrico no complejo se encuentra en estado precipitado; las **formas disueltas del hierro**, que conducen a los tratamientos estudiados en este capítulo, podrán ser los siguientes:

- *Hierro ferroso* (bivalente), ya sea en forma Fe^{2+} , o en forma de iones hidratados: $FeOH^+$ a $Fe(OH)_3^-$. En aguas cuyo TAC es notable, el ion Fe^{2+} se encontrará sobre todo en estado de hidrogenocarbonato (o bicarbonato) y su solubilidad, deducida de las leyes que rigen los equilibrios químicos, seguirá la relación:

$$[Fe^{2+}] = \frac{K'_{FeCO_3}}{K'_2} \frac{[H^+]}{[HCO_3^-]} = \frac{[H^+]}{[HCO_3^-]}$$

$$\text{con } [Fe^{2+}] \cdot [CO_3^{2-}] = K'_{FeCO_3}$$

$$\text{y } \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = K'_2$$

En presencia de H₂S, la solubilidad es menor (debido al bajo valor del producto de solubilidad del sulfuro ferroso que, por ello, precipita).

- *Complejos*. formados con Fe²⁺ o Fe³⁺ :
 - minerales: silicatos, fosfatos o polifosfatos. sulfatos, cianuros, etc.;
 - orgánicos: podrá tratarse, en realidad, de fenómenos de formación de complejos propiamente dicha, de quelación o de peptización, en especial con los ácidos húmicos, fúlvicos, tánicos, etc.

Para definir un tratamiento de desferrización, no basta conocer el contenido total de hierro, sino que deben conocerse igualmente las diferentes formas bajo las cuales puede presentarse este elemento; los diferentes estados del hierro en el agua pueden resumirse de la forma siguiente:

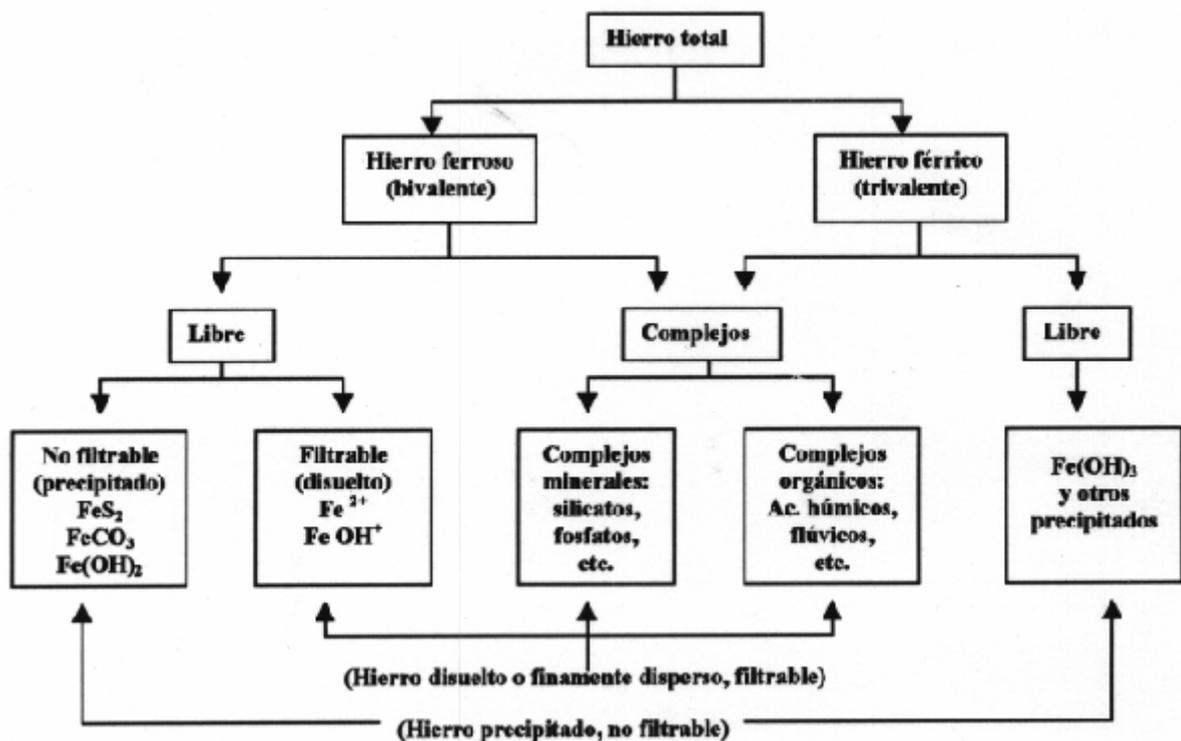


Gráfico: **Hierro total**

En la práctica, se tendrá ya un conocimiento suficiente del problema, determinando: hierro total, hierro total filtrable, Fe²⁺ total, Fe²⁺ filtrante; la eliminación de las formas disueltas planteará problemas, sobre todo en presencia de hierro complejo: si resulta imposible efectuar análisis detallados sobre el terreno, podrá suponerse la presencia de complejos, y por tanto de dificultades de tratamiento, si el contenido total en hierro disuelto es superior al valor de la solubilidad teórica, deducido del pH y de la alcalinidad.

Lo mismo que el hierro, el **manganeso** puede presentarse bajo diferentes formas: bicarbonatos, complejos minerales y orgánicos, etc. Es preciso efectuar las mismas investigaciones analíticas que para el hierro.

Para abordar cualquier problema de eliminación de hierro o de manganeso, es necesario determinar "in situ" la mayor parte de las características del agua, después de proceder a una explotación suficiente del pozo para asegurarse de la representatividad de la muestra.

La forma del hierro en el agua depende, ante todo, del pH y del potencial de oxidación-reducción; en la figura 419, se ve que el hierro puede pasar de una forma disuelta (por ejemplo, Fe^{2+} o FeOH^+) a una forma precipitada (FeCO_3 , Fe(OH)_2 o Fe(OH)_3), al aumentarse el potencial (oxidación), el pH, o ambos. El manganeso sigue una ley análoga. Sobre estos principios se basan, en general, los diferentes tratamientos que se enumeran seguidamente.

B. Tratamiento por oxidación y filtración

Esta técnica es la que se utiliza con mayor frecuencia, especialmente para aguas de pozo. Eventualmente puede añadirse un cierto número de tratamientos suplementarios, tales como: corrección de pH, oxidación química, decantación, etc. Siempre es necesario airear un agua de origen profundo, desprovista de oxígeno, aun cuando se utilice igualmente un oxidante químico.

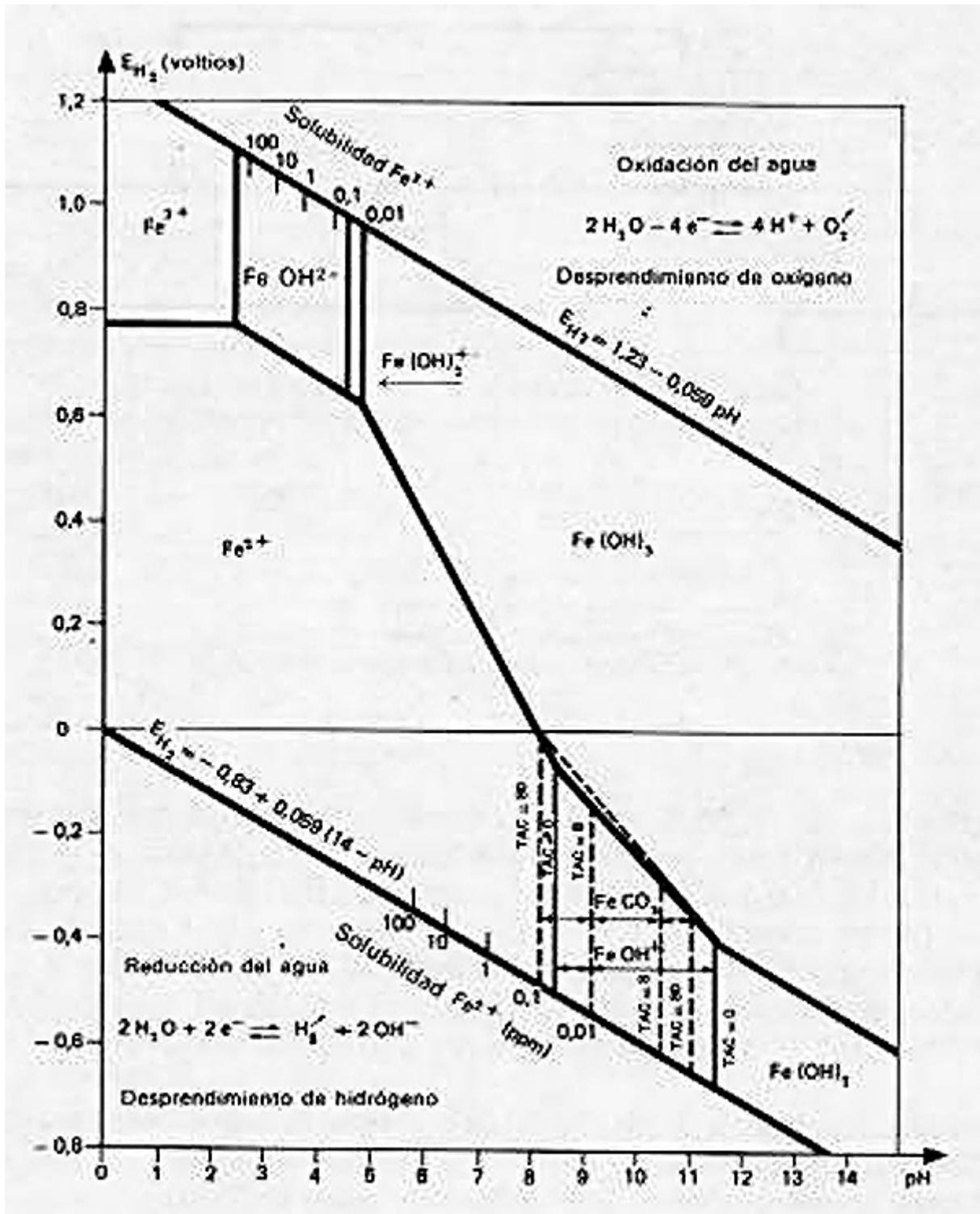


Fig. 419.. - Diagrama «potencial-pH» del hierro (Zonas de existencia de iones y precipitados) según HEM, 1961.

A veces resulta conveniente realizar una precloración, que acelera la oxidación del hierro y permite la eliminación química del amoníaco. Sin embargo, también puede ser contraproducente, si no puede alcanzarse el punto crítico; en efecto, se suprimen entonces ciertas acciones biológicas de desferrización y nitrificación, sin que pueda ejercerse un efecto oxidante suficiente. Por ello, toda precloración debe supeditarse a unos ensayos previos.

Se examinan seguidamente los modelos de aplicación más frecuentes.

B1. Desferrización simple sin decantación (aeración~filtración)

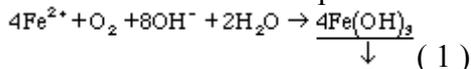
- *Principio:* este proceso se refiere a aguas brutas cuyo contenido máximo en hierro es de 5mg/l y que no presentan otras características desfavorables: manganeso, color, turbiedad, ácidos húmicos, tolerándose no obstante un pequeño contenido de amoníaco y una agresividad carbónica moderada. En algunos casos, podrán tratarse de igual forma aguas cuyo contenido en hierro llegue hasta 10 mg/l.

La primera parte del tratamiento de desferrización se basa en una oxidación del hierro bivalente por el oxígeno del aire. Esta aeración puede hacerse:

- a la presión atmosférica, en instalaciones por gravedad;
- a presión, por inyección de aire comprimido en unas torres de oxidación rellenas de materiales de contacto (normalmente, lava volcánica).

La ventaja de las instalaciones del segundo tipo consiste en la posibilidad de hacer que trabajen a la presión de impulsión en la red, sin bombeo de recogida. Por el contrario, la aeración a la presión atmosférica permite generalmente la evacuación, de forma más económica, del gas carbónico agresivo, que exige un tratamiento costoso de neutralización cuando su contenido es elevado.

La rapidez de la oxidación del hierro bivalente por el oxígeno depende de varios factores, en especial: temperatura, pH, contenidos de hierro y de oxígeno disuelto. La ecuación de la reacción puede escribirse:



y su cinética se expresa por la relación de Stumm & Lee:

$$-d(\text{Fe}^{2+}) = k \cdot (\text{Fe}^{2+}) \cdot P_{\text{O}_2} \cdot (\text{OH}^-)$$

siendo la constante k función de la temperatura y del poder amortiguador del agua bruta. La reacción (1) muestra que se necesitan 0,14 mg de oxígeno para oxidar 1mg de hierro. La ecuación (2) muestra que la reacción será tanto más rápida cuanto más elevado sea el pH y cuanto más próxima esté el agua a la saturación de oxígeno.

El tiempo de oxidación determinado en laboratorio con un agua sintética puede verse considerablemente disminuido en la mayoría de las instalaciones, gracias al efecto catalítico:

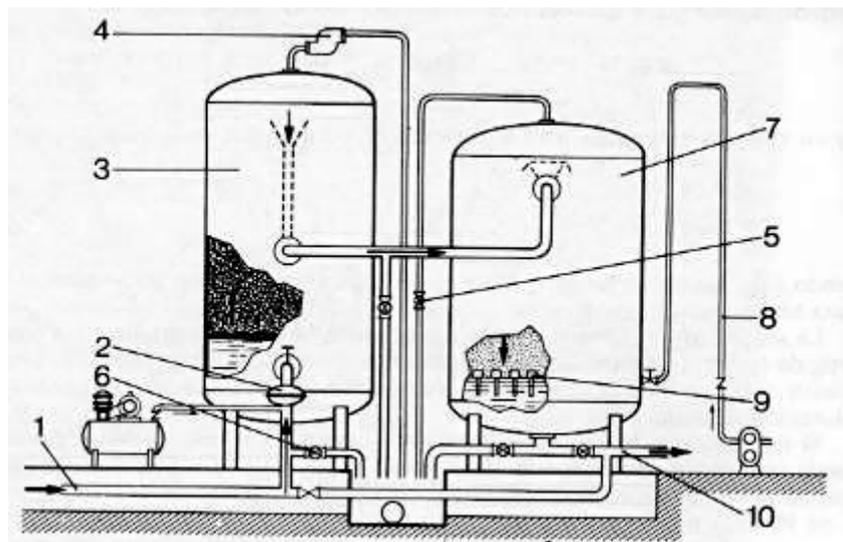
- de los sedimentos anteriores;
- de ciertos aniones presentes en el agua, principalmente silicatos y fosfatos;
- eventualmente, de ciertos catalizadores metálicos introducidos en el agua durante el tratamiento: trazas de sulfato de cobre pueden ejercer gran influencia en la oxidación del hierro y del manganeso por el oxígeno o los oxidantes químicos.

Lo mismo sucede con ciertos fenómenos biológicos, que se examinan más adelante. Por el contrario, la presencia de ácidos húmicos retrasa la oxidación del hierro.

Según las técnicas utilizadas, el precipitado formado puede contener mayor o menor proporción de carbonato ferroso, más cristalino que el hidróxido férrico; esta particularidad explica las notables diferencias observadas en el funcionamiento de algunas instalaciones: la talla efectiva del material filtrante puede estar comprendida entre 0,5 y 1,7 mm, y la velocidad entre 5 y 20 m³/(m² .h), si no es más.

También, por las mismas razones, es muy variable el peso de hierro retenido por unidad de superficie filtrante: 200 a 2 500 g de Fe por m² de arena, según los casos. De forma general, los filtros bicapa (antracita + arena) se adaptan muy bien a la desferrización. Algunas sustancias, como ácidos húmicos, silicatos, fosfatos o polifosfatos, desempeñan un papel inhibitor en la precipitación y la filtración del hidrato férrico. Pueden combatirse estos efectos por medio de tratamientos complementarios: oxidación (permanganato potásico, ozono), coagulación (sulfato de alúmina) o floculación (alginato), según el caso.

- *Aplicación:* el tipo más corriente es el de la **instalación a presión** representada en la figura nº 420 y que consta de:
 - Una *torre de oxidación*, que comprende un lecho de lava volcánica muy pura y porosa, que divide el agua y le asegura, por contacto con el aire, una gran superficie de oxidación.
 - Un *filtro* lavable por retorno de agua e inyección de aire. Puede combinarse este filtro con la torre de oxidación.



- | | |
|--|----------------------------------|
| 1 – Llegada de agua bruta | 6 – Válvula de vaciado |
| 2 – Mezclador de laberinto | 7 – Filtro de arena |
| 3 – Torre de oxidación | 8 – Aire a presión |
| 4 – Válvula de evacuación automática de aire | 9 – Fondo con boquillas |
| 5 – Válvula manual de purga de aire | 10 – Salida de agua desferrizada |

Fig. 420 – Instalación de desferrización a presión.

Las estaciones por gravedad llevan una aeración a presión atmosférica, seguida de una filtración abierta o cerrada (en este último caso, con o sin bombeo de recogida).

Si el agua bruta presenta, asimismo, un contenido apreciable de amoníaco, puede diseñarse la instalación para realizar simultáneamente una nitrificación y una desferrización: la aeración se realiza entonces en un depósito relleno de lava volcánica, sobre la cual se desarrollan las bacterias nitrificantes. El volumen de este depósito «nitrificador» es función del caudal de agua bruta y de la dosis de amoníaco que haya de eliminarse.

B2. Eliminación de hierro, con decantación.

Es preciso intercalar una decantación, entre la aeración y la filtración, en los casos siguientes:

- contenido elevado de hierro en el agua bruta, que da lugar a un volumen excesivo de precipitado;
- presencia de color, turbiedad, ácidos húmicos, agentes que dan lugar a complejos, etc., que implica la adición de un coagulante (sulfato de aluminio o cloruro férrico) en dosis superior a unos 10 g/m³ de producto comercial.

Para el tratamiento de estas aguas, es conveniente recurrir a los procesos de decantación por contacto de fangos, que se describen en las páginas 172 y siguientes. La decantación debe ir precedida, necesariamente, de una aeración, si el agua bruta está desprovista de oxígeno.

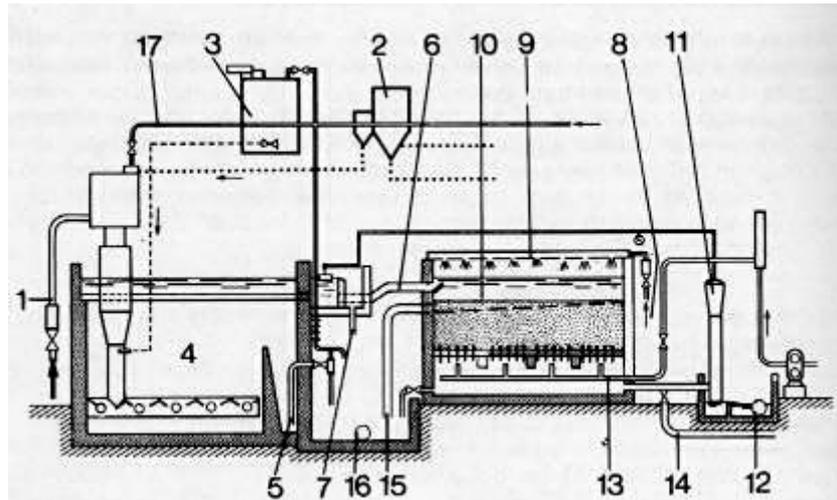
Teniendo en cuenta que frecuentemente se alimenta una misma instalación a partir de varios pozos, es necesario a veces adaptar el tratamiento para conseguir la combinación más económica: por ejemplo, en la instalación representada en la figura 421, se tratan dos aguas de origen diferente. Una de ellas contiene mucho hierro, que precipita con cal en un decantador Pulsator, mientras que la otra, poco cargada de hierro, se mezcla con la anterior, después de la aeración, por medio de una rampa de pulverización dispuesta, por encima de los filtros.

B3. Eliminación de manganeso.

Cuando un agua bruta contiene manganeso, suele ser en presencia de hierro. Pero los procesos de desferrización que acaban de examinarse, generalmente son insuficientes para la eliminación eficaz del manganeso: la precipitación en forma de hidróxido o la oxidación con oxígeno sólo serían posibles en el caso de un pH demasiado alcalino (9 a 9,5 como mínimo); a veces es posible la oxidación con cloro, pero en presencia de un fuerte exceso de cloro, que debe neutralizarse seguidamente.

Por el contrario, se obtiene una oxidación suficientemente rápida con dióxido de cloro, permanganato potásico u ozono, que llevan al manganeso bivalente al estado de oxidación + 4 y lo precipitan en forma de dióxido de manganeso:





- | | |
|--|--|
| 1 – Entrada de agua bruta con gran contenido de hierro | 10 – Filtro abierto |
| 2 – Dosificador de cal | 11 – Sifón de regulación del caudal del filtro |
| 3 – Dosificador de coagulante | 12 – Salida de agua filtrada desferrizada |
| 4 – Decantador PULSATOR | 13 – Llegada de aire a presión, de lavado |
| 5 – Concentración y extracción de fangos del filtro | 14 – Agua de lavado del filtro |
| 6 – Salida de agua decantada parcialmente desferrizada | 15 – Evacuación de fangos de lavado del filtro |
| 7 – Rebose | 16 – Salida general de fangos |
| 8 – Entrada de agua bruta con poco contenido de hierro | 17 – Llegada de agua a presión |
| 9 – Rampa de difusión | |

Fig. 421. - Instalación de desferrización de dos aguas con distinto contenido de hierro.

Según estas reacciones, las cantidades teóricas de oxidante que deben utilizarse son, respectivamente, para 1 mg/l de Mn (II):

Dióxido de cloro (ClO₂): 2,5 mg/l

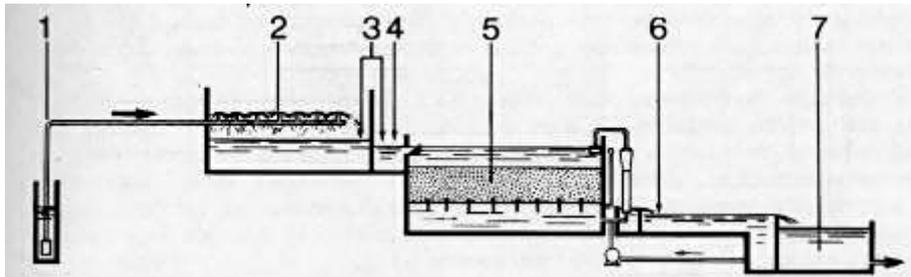
Permanganato potásico (KMnO₄): 1,9 mg/l

Ozono (O₃): 0,87 mg/l

En efecto, la dosis real puede desviarse sensiblemente de estos valores, en función, sobre todo, del pH, pero también del tiempo de contacto, de la presencia de sedimentos anteriores, del contenido de materias orgánicas, etc. En la práctica, esta dosis estará comprendida entre una y seis veces el contenido de manganeso, en el caso del permanganato potásico, una vez y media y diez veces en el caso del dióxido de cloro, y una vez y media y cinco veces en el caso del ozono.

La dosis exacta de tratamiento sólo puede determinarse experimentalmente. Generalmente, se conseguirá un notable ahorro de oxidante químico, aplicándolo **después** de una aeración, la cual habrá actuado ya anteriormente sobre las sustancias fácilmente oxidables, especialmente sobre el hierro (II) y el sulfuro de hidrógeno.

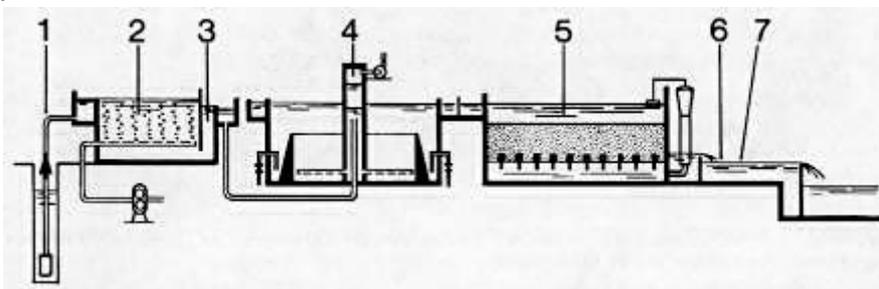
Desde el punto de vista tecnológico, estos procesos de oxidación energética del manganeso pueden aplicarse en las mismas instalaciones (por gravedad o a presión) que las que se han citado anteriormente para la desferrización, con o sin decantación; sólo se trata entonces de añadir un reactivo suplementario. Las figuras 422 y 423 muestran ejemplos de instalaciones por gravedad, con filtros de hormigón, en las que la desferrización puede ir acompañada de una eliminación de manganeso, coagulación-floculación y ajuste de pH. A veces, el punto exacto de inyección de los reactivos sólo puede determinarse en el transcurso de la explotación.



- | | |
|--|--|
| 1 – Bombeo a distancia de agua bruta y precloración eventual | 4 – Coagulante y/o floculante eventuales |
| 2 – Aeración y eliminación de CO ₂ por pulverización | Complemento de oxidación con KMnO ₄ si el agua contiene manganeso |
| 3 – Corrección eventual de pH (a efectuar antes o después de oxidación completa, según el caso; el punto de inyección exacto se determinará, por lo tanto, durante la explotación) | 5 – Filtro de arena (o, eventualmente, bicapa), por gravedad |
| | 6 – Desinfección con cloro |
| | 7 – Depósito de agua tratada |

N.B. Para aguas que contengan manganeso, la aeración (en 2) y el complemento de oxidación (en 4) pueden sustituirse por un pretratamiento con ozono.

Fig. 422. - Eliminación de hierro y manganeso en estación abierta, por aeración y filtración.



- | | |
|---|--|
| 1 – Bombeo de agua bruta | 4 – Floculación, clarificación, desferrización |
| 2 – Aeración | |
| 3 – Inyección de coagulante y, eventualmente, ayudante. En caso necesario, ajuste del pH y complemento de | 5 – Filtración |
| | 6 – Corrección del pH eventual |
| | 7 – Desinfección |

oxidación con KMnO_4 o ClO_2

N.B. Para aguas que contengan manganeso, la aeración (en 2) y el complemento de oxidación (en 3) pueden sustituirse por un pretratamiento con ozono.

Fig. 423. - Eliminación de hierro y manganeso por aeración, decantación y filtración.

La eliminación de manganeso puede exigir modalidades especiales en ciertos casos:

- empleo de Ozono: la torre de contacto agua-ozono sustituye, en principio, a la aeración clásica examinada anteriormente; sin embargo, puede ser conveniente realizar una pre-aeración, utilizando el aire procedente de la torre de contacto, en la que quedan trazas de ozono utilizables. Por otra parte, en este tratamiento puede formarse permanganato, si existe un exceso de ozono; para evitar una ligera tonalidad rosácea del agua tratada, será preferible filtrar el agua oxidada a través de antracita (en filtro monocapa o bicapa) o de carbón activo, en lugar de a través de arena;
- aguas que no contienen manganeso: para eliminar correctamente el dióxido de manganeso formado en la oxidación, puede ser necesario realizar una coagulación- floculación y una filtración bicapa (antracita + arena). También pueden conseguirse excelentes resultados si, previamente, se ha revestido el material filtrante de una capa de dióxido de manganeso: en tal caso, puede practicarse el mismo tipo de tratamiento que se efectúa a través de zeolitas o arenas verdes.

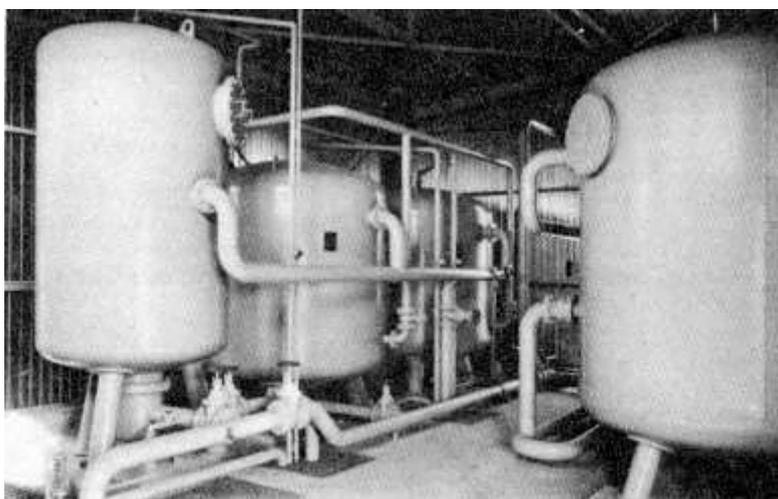
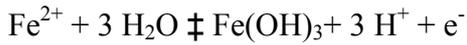


Fig. 424. - Estación de desferrización y neutralización del cuartel de OBERHOFFEN, en Haguenau (Francia). Caudal $60 \text{ m}^3/\text{h}$.

C. Tratamiento asociado a una decarbonatación

La decarbonatación con cal, que produce un pH elevado, favorece la eliminación del hierro y del manganeso. La precipitación del carbonato ferroso es prácticamente total a pH 8,2, y la del hidróxido ferroso a pH 10,5 (ver figura 425). En presencia de un potencial Redox elevado, el hierro (II) disuelto puede precipitar en forma de $\text{Fe}(\text{OH})_3$.



Para el manganeso, los valores del pH de precipitación son del orden de 9,2 para el carbonato y de 11,5 para el hidróxido, respectivamente.

Por lo tanto, una descarbonatación parcial, a pH próximo a 8, puede producir una desferrización completa. En ciertos casos, especialmente en aparatos de descarbonatación catalítica, se consigue, con el mismo pH, una eliminación suficiente de manganeso, sí bien, teóricamente, habría de combinarse con una descarbonatación total a pH 9,5 ó 10.

El funcionamiento de la instalación realizada en Ratingen, Alemania Federal, para 1000 m³/h, (ver fig. 426), se basa en este principio. En esta instalación se efectúa simultáneamente la descarbonatación, desferrización, eliminación de manganeso y nitrificación.

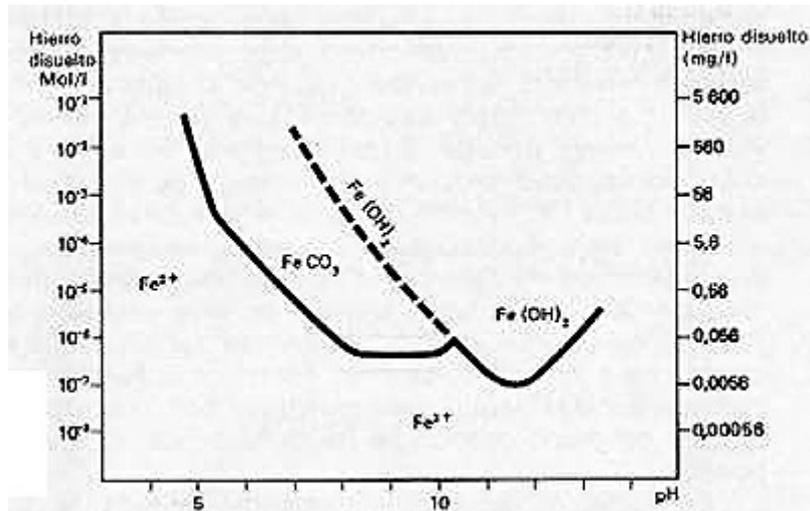


Fig. 425.-Solubilidad del hierro en función del pH, en un agua de alcalinidad media.

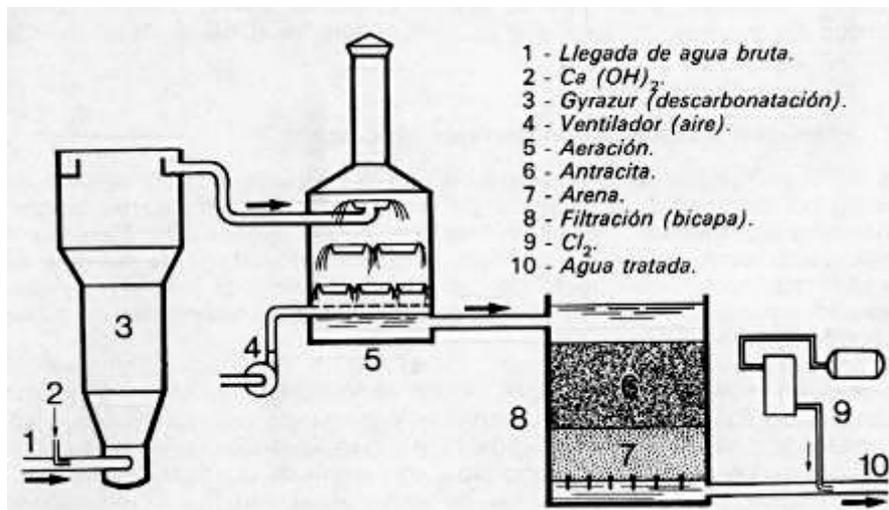


Fig. 426. - Descarbonatación parcial, aeración, filtración.

Esquema de principio de la instalación de RATINGEN (Rep. Fed. de Alemania).

D. Tratamientos biológicos

El metabolismo de algunos microorganismos autótrofos se basa en la oxidación del hierro y del manganeso; en condiciones favorables, las reacciones son muy rápidas y la eliminación de estos dos elementos es completa. El nitrógeno amoniacal es un elemento esencial de la nutrición bacteriana, por lo que la presencia de amoníaco en el agua bruta favorece este tipo de tratamiento (por otra parte, generalmente se produce una nitrificación simultánea).

En su principio, estos tratamientos biológicos no difieren esencialmente de la oxidación-filtración que se ha examinado anteriormente; pero, en su realización, presentan ciertas particularidades en lo que concierne al contenido de oxígeno, la velocidad de filtración y la talla efectiva de la arena.

Esta técnica, que se aplica especialmente en Holanda y en Alemania, resulta interesante, sobre todo, cuando el agua bruta contiene simultáneamente hierro, manganeso y amoníaco. **Los filtros secos** constituyen su ejemplo más conocido; asimismo, da lugar a instalaciones de **filtración doble**, cuya secuencia es: adición de un caudal muy pequeño de aire al agua bruta (en función del potencial Redox), desferrización en una primera etapa de filtración, aeración intensiva, eliminación de manganeso en una segunda etapa de filtración (los microorganismos que oxidan el manganeso sólo pueden desarrollarse cuando es muy pequeño el contenido de hierro). Pero nunca se tiene «a priori» la certeza del desarrollo de los microorganismos, por lo que a veces resulta difícil controlar el funcionamiento de las instalaciones proyectadas según este principio: por lo tanto, sólo puede elegirse este tipo de procesos cuando se ha demostrado su fiabilidad, mediante ensayos previos.

En realidad, no está claramente definida la frontera entre oxidación puramente química y tratamiento biológico, por lo que el buen funcionamiento de muchas instalaciones del primer tipo se debe al desarrollo de microorganismos.

E. Filtración a través de materiales especiales

- Intercambiadores de iones: sólo podrían preverse para la eliminación de pequeñas cantidades de hierro y de manganeso. Por otra parte, pueden atascarse rápidamente, y eliminan asimismo otros cationes (Ca, Mg...): por ello, normalmente no se utilizan para problemas específicos de hierro y de manganeso, tanto más cuanto que no serían económicos y rara vez serían admitidos por los diferentes Servicios de Higiene para el tratamiento de aguas para el consumo humano.
- Materiales recubiertos de MnO₂: En EE.UU., a veces se utilizan zeolitas o arenas verdes. En primer lugar, deben enriquecerse en MnO₂ (que son capaces de fijar por intercambio iónico), funcionando entonces como intercambiadores

de electrones: el dióxido de manganeso oxida el hierro y el manganeso bivalentes (que precipitan y son retenidos por la masa filtrante), y se reduce a su vez en forma de sesquióxido Mn_2O_3 . El dióxido se regenera seguidamente, de forma continua o discontinua, con permanganato potásico.

Ciertos productos, tales como pirolusita, CZ, etc., pueden incluirse dentro de esta categoría. Pero estas técnicas sólo son aplicables a pequeñas instalaciones, y con dosis reducidas de hierro y manganeso, en un agua desprovista de materia orgánica, que son poco frecuentes en Europa.

Si se ha sometido al agua bruta a una aeración previa, los materiales recubiertos de MnO_2 pueden ejercer igualmente un efecto catalítico sobre la oxidación del hierro y del manganeso con oxígeno; en este caso, no se produce transformación del dióxido de manganeso, por lo que la regeneración no es necesaria.

- Carbón activo: sólo se consigue la retención total del hierro y del manganeso, después de la aplicación de un oxidante potente, como el ozono o el permanganato. Este procedimiento es costoso, pero está justificado cuando es preciso eliminar también los malos sabores.
- Productos alcalinos: se han utilizado a veces carbonatos o dolomita calcinada: Neutralite, Akdolít, Magno-dol, etc. Estos tratamientos presentan poco interés si no es necesario neutralizar gas carbónico agresivo, aumentando al mismo tiempo la alcalinidad del agua. De todas formas, la doble función del material filtrante (desferrización y neutralización) puede crear dificultades de explotación.

F. Magnesia en polvo y diatomeas

Este procedimiento consiste en introducir magnesia en polvo en el agua bruta, después de una aeración, y en filtrarla a través de diatomeas. La magnesia actuaría de forma triple:

- adsorción del ion ferroso sobre el polvo de magnesia;
- precipitación de $Fe(OH)_2$ y $FeCO_3$;
- catálisis de la oxidación del hierro con oxígeno (fenómeno preponderante).

Esta técnica, de difícil aplicación, no se ha puesto en práctica en instalaciones importantes.

En resumen, los tratamientos de eliminación de hierro y manganeso son generalmente delicados, y al mismo problema pueden aplicarse soluciones diversas. Ante todo, es preciso hacer un planteamiento correcto del problema: se necesita tener un profundo conocimiento de las características del agua bruta, y los ensayos previos, en instalaciones piloto, son en este caso aún más útiles que en el tratamiento de aguas de superficie.

3.2.2. NEUTRALIZACIÓN - REMINERALIZACIÓN

Si un agua natural o tratada no se encuentra en equilibrio carbónico y contiene gas carbónico agresivo, debe preverse su neutralización.

Esta neutralización se realiza por aeración, por adición de reactivos alcalinos (cal, sosa, carbonato sódico) o por filtración sobre productos alcalinotérreos (mármol, Neutralite, Akdolite, Magno, etc.). Estos tratamientos, con excepción de la aeración, dan lugar a un incremento de la mineralización del agua. Si esta mineralización es insuficiente para evitar que el agua sea corrosiva frente a las conducciones metálicas, aunque se encuentre en equilibrio carbónico, debe efectuarse una mineralización complementaria.

Normalmente, la aeración se practica a la entrada de la instalación, en tanto que la neutralización química por reactivo alcalino puede efectuarse:

- a la salida de la instalación, al final del tratamiento;
- parcialmente a la entrada (ajuste del pH de floculación, por ejemplo), con introducción del complemento de tratamiento a la salida de la instalación;
- con menor frecuencia, totalmente a la entrada de la instalación.

Por lo que se refiere a la remineralización, se hace normalmente al final del tratamiento (en el caso de aguas dulces o que hayan sufrido un tratamiento de desalinización por ósmosis inversa u otro procedimiento).

3.2.3: DESCARBONATACIÓN - DESENDURECIMIENTO

Para reducir la dureza del agua, debida generalmente a un exceso de calcio, puede efectuarse un desendurecimiento por resinas intercambiadoras de iones, o por descarbonatación con cal.

- *Desendurecimiento con resinas*: este tratamiento se aplica exclusivamente a aguas claras o clarificadas.

En el abastecimiento público de agua, sólo está autorizado el empleo de resinas catiónicas del tipo sulfónico; en Francia, las resinas aniónicas no están admitidas oficialmente.

Las resinas catiónicas intercambian sus iones sodio con los iones calcio del agua. No se modifica su grado alcalimétrico ni su contenido en sulfatos y cloruros; la mineralización cálcica es sustituida por una mineralización sódica.

Se obtiene así agua con un grado hidrotimétrico nulo, que no es agradable para la bebida. Es preferible mantener un cierto TH residual (8 a 15 °F), desendureciendo únicamente una parte del caudal, que se mezcla, a continuación, con el caudal restante.

El interés de este tratamiento consiste en que no produce residuos sólidos y puede efectuarse a presión. En el caso de grandes caudales, puede realizarse fácilmente el tratamiento por intercambiadores de iones de marcha continua, según el procedimiento E.C.I.-DEGRÉMONT.

- Desendurecimiento por descarbonatación con cal:

Cuando un agua es dura (fuerte grado hidrotimétrico) y presenta además un grado alcalimétrico completo (TAC) elevado, puede desendurecerse por descarbonatación con cal. Esta descarbonatación puede efectuarse:

- de forma catalítica, en un Gyrazur, si no es necesario realizar una clarificación simultánea y si el contenido de magnesio es bajo;
- en un decantador, en los casos restantes.

Se utiliza, como reactivo de clarificación, cloruro férrico. El sulfato de alúmina, al pH del tratamiento, daría lugar a una solubilización de la alúmina que podría flocular más adelante.

En este tratamiento, y por las mismas razones indicadas anteriormente, es necesario, en el caso de un agua potable:

- descarbonatar sólo una parte del caudal y mezclarla con el resto que, eventualmente, deberá ser también clarificado;
- o descarbonatar parcialmente el agua, al mismo tiempo que se clarifica. Se observa, en este caso, que es necesario adoptar en los decantadores velocidades ascensionales tanto menores cuanto menos completa es la descarbonatación. Además, el pH puede ser demasiado elevado, siendo necesario corregirlo.

En el caso de aguas con mucha dureza permanente, puede combinarse una descarbonatación con cal con un desendurecimiento con carbonato sódico con lo que se consigue, después de alcanzar el TAC mínimo, precipitar el calcio de los sulfatos y cloruros y reducir el TH. Para que el agua sea agradable para la bebida, debe contener un cierto TAC, por lo que se mezcla con una porción de agua no descarbonatada.

3.2.4 ELIMINACIÓN DE SULFATOS Y CLORUROS

Puesto que no está autorizada la eliminación de sulfatos y cloruros mediante resinas intercambiadoras de iones en el tratamiento de un agua potable, deben utilizarse otros procedimientos que, si bien exigen gastos de primera instalación superiores a los de las resinas intercambiadoras de iones, tienen la ventaja de que sus gastos de explotación son menores.

En el caso de grandes, caudales de agua de mar, o de aguas salobres, se emplea normalmente la desalinización por destilación instantánea («flash»). Una solución más simple en el caso de caudales pequeños y medios, es la desalinización a través de membranas, que pueden realizarse por dos procedimientos principales:

- Electrodiálisis, en el que, por medio de membranas especiales y bajo la acción de una corriente eléctrica, se divide el agua a tratar en dos partes: una solución salina concentrada y un agua parcialmente desmineralizada. Este procedimiento sólo se aplica en el caso de aguas poco salobres ya que la capacidad de caudal de las membranas disminuye cuando aumenta la salinidad del agua que debe tratarse. Sólo es económico cuando se trata de agua cuya salinidad sea inferior a 3 g/l que lleva a 0,5 g/l. Cuanto menos salina es el agua, mayor es el consumo de corriente, debido al incremento de resistividad del agua desmineralizada. Por ello, este procedimiento apenas se utiliza para tratar aguas con una salinidad inferior a 0,5 g/l.

La electrodiálisis puede aplicarse a caudales que pueden llegar a varios millares de m³/día.

- Ósmosis inversa: en este caso, el agua pura atraviesa las membranas bajo la acción de una presión superior a la presión osmótica.

Otra diferencia fundamental: puede tratarse un agua de salinidad inferior a 500 mg/l con un grado muy fuerte de reducción de su mineralización (e independientemente de la salinidad inicial) y un gasto muy pequeño de energía. Este procedimiento se adapta lo mismo a las aguas muy concentradas, como es el agua de mar, que a las poco salinas cuya calidad se quiere mejorar.

3.2.5 FLUORURACIÓN Y ELIMINACIÓN DEL FLÚOR

Debe preferirse el término «fluoruración» al de «fluoración» ya que el reactivo que se dosifica es el fluoruro. En cambio puede decirse «cloración» porque lo que se dosifica es el cloro.

Se considera, generalmente, que un contenido pequeño de flúor en el agua de abastecimiento (0,4 a 1 mg/l) favorece la formación del esmalte dental y protege los dientes contra la caries.

Por el contrario, un exceso de flúor produce la destrucción del esmalte dental y un conjunto de alteraciones de carácter endémico, que se agrupan bajo el nombre de

«fluorosis»: deformaciones dentales, manchas del esmalte, descalcificación, mineralización de los tendones, molestias digestivas y nerviosas, etc.

Estos defectos se manifiestan, según los individuos, con unos contenidos muy variables de flúor en el agua. Es necesario desechar o tratar las aguas que contengan más de 1 a 1,5 mg/l, expresado en flúor.

Se comprende, por tanto, que pueda preverse, según los casos, una aportación artificial, o la eliminación de este elemento.

A. Fluoruración

Acogiéndose al dictamen favorable de la O.M.S. se practica especialmente en U.S.A.; pueden citarse algunos otros casos aislados en Europa, Australia, América del Sur, etc. Este tratamiento, sin embargo, no tiende a generalizarse todavía ya que no está libre de riesgo y encuentra mucha oposición. Pueden utilizarse los siguientes productos:

- hexafluorosilicato sódico: Na_2SiF_6 , que es el que se emplea con mayor frecuencia;

- ácido hexafluorosilícico: H_2SiF_6 ;

- fluoruro sódico: NaF ;

- con menor frecuencia: hexafluorosilicato amónico: $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$; ácido fluorhídrico: HF ; hexafluorosilicato magnésico: MgSiF_6 ; fluoruro cálcico: CaF_2 elegirá el producto en función de la cantidad total que haya de distribuirse, y de las condiciones económicas locales.

Se regula el tratamiento (teniendo en cuenta las posibles fluctuaciones del contenido inicial del agua bruta, si no es nulo) de forma que se obtenga un contenido en flúor comprendido entre 0,4 y 1 mg/l, según el clima del país considerado.

En este tratamiento, deben tomarse todas las precauciones necesarias con respecto a la protección del personal de la instalación y a la eventualidad de una sobredosificación accidental.

B. Eliminación del flúor

En algunas aguas naturales se encuentra hasta 10 mg/l de flúor. Debe reducirse este contenido hasta 1 mg/l aproximadamente (el límite admisible es tanto menor cuanto mayor es la temperatura media anual).

Los procedimientos que se emplean son:

B 1. Tratamiento con fosfato tricálcico: Desde hace mucho tiempo, se ha advertido la afinidad del flúor por este cuerpo, ya que se encuentran siempre contenidos apreciables de flúor en los fosfatos naturales, como los apatitos, las fosforitas (2 al 5 %), así como en los huesos. Parece que en el apatito, de fórmula $3 \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2, \text{CaCO}_3$, el ion carbonato ha sido reemplazado por el flúor para dar el fluorapatito insoluble. El mismo papel de intercambiador de iones desempeña el hidroxapatito (en el que el CaCO_3 es reemplazado por $\text{Ca}(\text{OH})_2$), que puede regenerarse indefinidamente con sosa, que transforma el fluorapatito en hidroxapatito.

En la práctica, se utilizan:

- productos naturales, extraídos de huesos de ganado especialmente: cenizas de huesos (negro animal) o polvo de huesos;
- O bien apatito sintético, que puede obtenerse en el agua por una mezcla, cuidadosamente controlada, de cal y ácido fosfórico.

Estas sustancias pueden añadirse, en forma de polvo fino, al agua a tratar: por otra parte, su acción puede combinarse entonces con la del sulfato de aluminio. Pero, generalmente, es preferible acondicionarlas de forma que se constituya un material filtrante, que debe regenerarse periódicamente.

B 2. Tratamiento con alúmina: puede utilizarse sulfato de aluminio, pero la dosis necesaria es muy elevada: 150 a 1000 g/m³, según los casos. El agua así tratada puede contener una dosis muy fuerte de aluminio disuelto; hay que prever una floculación posterior al hacer el ajuste del pH.

La filtración sobre alúmina activada ya se ha practicado con éxito; la regeneración se hace con sulfato de aluminio, o con sosa y ácido sulfúrico. La capacidad de retención puede ser muy variable, según el contenido inicial de flúor en el agua bruta y las condiciones de funcionamiento: 0,3 a 4,5 g de ion F⁻ por litro de producto.

B 3 Desendurecimiento del agua con cal: puede emplearse este método si el agua tiene un contenido suficiente en magnesio, ya que el hidróxido magnésico formado es el que adsorbe el flúor. En caso contrario, hay que enriquecer fuertemente el agua en magnesio por adición de sulfato magnésico o utilizando cal dolomítica.

Se estima que son necesarios 50 mg/l de magnesio para eliminar 1 mg/l de flúor.

B 4 Filtración sobre carbón activo: este tipo de tratamiento (regeneración con sosa y gas carbónico) sólo puede aplicarse si se trabaja en medio muy ácido (en principio, pH 3, como máximo) y se practica seguidamente una recarbonatación, lo que le hace inaplicable en la mayoría de los casos.

B 5. Otros procedimientos: si el ion fluoruro ha de eliminarse coincidiendo con una mineralización excesiva del agua, la ósmosis inversa puede representar una solución específica de este problema particular. Igualmente, existen procedimientos electroquímicos con ánodo de aluminio, de los cuales, sin embargo, todavía no se tiene noticia de aplicación industrial importante.

En todos los casos, para definir el tratamiento más conveniente, deberán realizarse ensayos previos (si es posible, sobre el terreno), así como un estudio económico.

En resumen, el conjunto de las técnicas que acaban de enumerarse puede conducir a procesos que incluyan una decantación o una filtración; este último tipo, sobre todo, es el que ha dado lugar a algunas realizaciones industriales, estando constituidos los materiales filtrantes más frecuentes por productos a base de fosfato tricálcico (negro animal o productos sintéticos), o por alúmina activada.

3.2.6. ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO Y SUS COMPUESTOS

- El ion **amonio** (NH₄⁺), indeseable en un agua de bebida, no siempre es fácil de oxidar. Si se encuentra presente en pequeña cantidad, puede utilizarse cloro para transformarlo en cloramina. Pero, como es necesario utilizar una dosis de cloro de unas 10 veces la dosis de amoniaco expresada en nitrógeno, no es posible este procedimiento cuando el contenido empieza a ser importante.

El dióxido de cloro y el ozono no ejercen acción alguna sobre el ion amonio.

Puede conseguirse la nitrificación en filtros secos, en presencia de hierro y manganeso. También puede conseguirse por aeración en torres de contacto que contengan puzolana, en las que se desarrollan bacterias nitrificantes si se añade una pequeña dosis de nutriente fosfatado.

Una preaeración en cabeza de un decantador que funcione sin precloración (puesto que el cloro es un veneno para las bacterias nitrificantes) o a la entrada de filtros que

funcionen a poca velocidad, da lugar a una nitrificación parcial cuyo proceso puede completarse por reinyección en el suelo de un agua aireada de nuevo y recogida a continuación, después de una percolación bastante larga.

- Los **nitritos**, intolerables en un agua de bebida, se transforman fácilmente en nitratos por la acción de un oxidante (cloro u ozono).
- Cuando, en un agua destinada al consumo humano, los **nitratos** sobrepasan el valor fijado por las normas, es indispensable prever un tratamiento que asegure su eliminación: pueden utilizarse ciertas resinas; también puede adoptarse un tratamiento de *desnitrificación* biológica. Cuando la mineralización del agua exige un tratamiento por ósmosis inversa, se eliminan igualmente los nitratos. Por otra parte, se recomienda vigilar cuidadosamente la desinfección de un agua cuya concentración en nitratos tiende a aumentar.

3.2.7. ELIMINACIÓN DE ALGAS Y PLANCTON

A. Eliminación de algas.

Las algas se desarrollan especialmente, bajo la influencia de la luz solar, en depósitos abiertos, decantadores, piscinas, etc. El ácido carbónico libre es indispensable para su desarrollo.

Pueden eliminarse las algas, o limitar su proliferación, con sulfato de cobre (2 a 3 g/m^3), o por una desinfección con cloro-cobre. Desgraciadamente el cobre es tóxico para los peces y no existe un tratamiento que elimine las algas sin perjudicar a los peces.

Puede limitarse la proliferación de algas reduciendo con cal el contenido del agua en CO_2 asimilable.

Se evita el desarrollo de algas no coloreadas, en las tuberías, por tratamiento del agua con cal, o por una desinfección cloro-cobre.

La cloración intermitente, en dosis masivas, constituye el procedimiento habitual para la protección de los circuitos de condensadores.

Por último, puede impedirse el desarrollo de algas en decantadores y filtros abiertos, por adición de unos gramos de carbón activo en polvo por m^3 . Su acción es debida al obstáculo que opone a la penetración de los rayos solares en el agua, pero, para que se produzca la coagulación con las algas microscópicas que pudieran encontrarse presentes en el agua bruta, es necesario efectuar al mismo tiempo una dosificación de cloro. Se encuentran actualmente en el comercio algicidas de uso reservado a las aguas industriales, especialmente sales derivadas del amonio cuaternario, pentaclorofenato sódico ciertos derivados organosulfurados.

B. Eliminación del plancton.

El plancton es el conjunto de pequeños organismos animales (protozoos gusanos, crustáceos, larvas, insectos, etc.) y vegetales (algas) que viven en suspensión en el agua. Sus dimensiones son muy variables y pueden estar comprendidas entre 1 micra y varios milímetros. Para eliminar el plancton, pueden utilizarse los siguientes procedimientos:

B 1. Microtamizado: puede efectuarse una filtración sobre un microtamiz si el agua sólo contiene algas y no presenta valores considerables de turbiedad, coloración, materia orgánica, etcétera.

El paso de malla de las telas debe adaptarse a las especies que se quiere eliminar; generalmente está comprendido entre 10 y 40 micras.

El microtamizado es eficaz, especialmente, con ciertas especies de algas verdes (*Pediastrum*, *Scenedesmus*, *Coelastrum*, *Cosmarium*, etc.), de diatomeas (*Asterionella*, etc.), de cianofíceas (*Anabaena*, *Microcystis*, etc.); con estas especies puede

esperarse la eliminación de un porcentaje del 90 al 95 %; para el conjunto del fitoplancton, esta cifra varía generalmente, a lo largo del año, entre el 50 y el 80 %.

Del zooplancton el microtamizado elimina especialmente los rotíferos, los crustáceos entomostráceos (copépodos, cladóceros) y los nemátodos.

En todos los casos, sin embargo, los elementos de reproducción (esporas o huevos según los casos) sólo se eliminan de forma imperfecta y el microtamizado para ser eficaz, debe ir seguido de una cloración.

Se utilizan microtamices para eliminación del plancton:

- en cabeza de una instalación de filtración lenta, para aliviar su trabajo durante los períodos de crecida de plancton;
- en el tratamiento de un agua de lago o de presa, en la que sólo hay que eliminarlo en cantidad limitada.

B 2. Oxidación: Todos los oxidantes desinfectantes (cloro, dióxido de cloro, ozono) destruyen el plancton si se mantiene un contenido residual suficiente durante un cierto tiempo (variable según las especies). Es necesario, sin embargo, prever a continuación un medio de retención mecánica para eliminar los residuos (corpúsculos muertos).

B3. Tratamiento completo: Si se quiere eliminar por completo el plancton, debe efectuarse conjuntamente una **precloración** (para matar los organismos anular su actividad en la arena de los filtros) y una coagulación:

- sobre filtro de arena, si el agua no tiene un contenido muy grande de plancton y materias en suspensión. La frecuencia de los lavados depende de la naturaleza, dimensión y abundancia de los diversos elementos del plancton. La velocidad de filtración está ligada a la frecuencia admisible para los lavados y al automatismo de los filtros. Cuando un agua tiene plancton es preciso ser prudente al elegir la velocidad de filtración;

- ajustada a la anulación del potencial Z, seguida de una decantación, preferentemente en un aparato de lecho de fangos concentrados, tipo PULSATOR, y de una filtración sobre arena, todo ello precedido de una precloración al punto crítico. Se ha comprobado que se produce siempre una eliminación del 98 al 99 % del plancton en el agua decantada y prácticamente del 100 % en el agua filtrada.

Con este último tratamiento pueden utilizarse velocidades de filtración grandes, consiguiéndose una seguridad de funcionamiento constante de los filtros, cualquiera que sea la abundancia del plancton.

3.2.8. ELIMINACIÓN DE MATERIAS ORGÁNICAS

La eliminación óptima de las materias orgánicas definidas por la medida de la oxidabilidad al permanganato potásico, constituye siempre el problema más delicado de resolver y el que exige la elección de los tratamientos más adecuados. Esta eliminación está limitada entre el 10 y 30 % del contenido del agua bruta, cuando se efectúa una oxidación química (aun con ozono), o una coagulación parcial sobre filtro. Con una buena coagulación-floculación-decantación pueden conseguirse rendimientos de eliminación del 40 al 70 %. inyectando, eventualmente, carbón activo en polvo en el decantador.

Puede conseguirse la eliminación de la mayor parte de la fracción restante por filtración a través de un filtro con precapa de carbón activo en polvo, aplicada sobre placas o bujías, o por filtración sobre carbón activo en grano.

Se elimina así del 75 al 95 % de la fracción residual. En filtración con precapa, en la que el carbón activo se renueva en cada ciclo, el rendimiento de eliminación es constante, siempre que la naturaleza del agua lo sea igualmente. La duración de los ciclos es, por lo general, del orden de una semana, con una alimentación en continuo de carbón en polvo.

Tomando como base solamente la eliminación de materias orgánicas. La duración de la vida del carbón en grano, antes de su saturación, es más corta que la correspondiente a la eliminación de detergentes, pesticidas y sabores. Este tiempo de duración es del orden de 3 a 9 meses, según la forma de empleo del carbón, el grado de trabajo adoptado, expresado en volumen de agua por volumen de carbón y por hora, y el valor mínimo tolerado del porcentaje de reducción de las materias orgánicas.

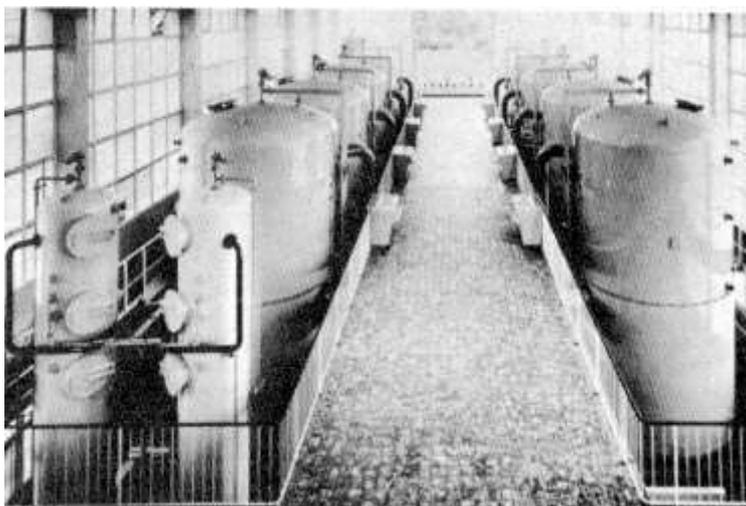


Fig. 427. - Conjunto de 8 filtros dobles, cargados con carbón activo en grano, para tratamiento de agua de río. Caudal: 7 500 m³/h. LÚBECK (R. FA).

La elección entre estos dos procedimientos depende de la presencia simultánea de contaminantes o microcontaminantes, de su naturaleza y del costo de eliminación.

Si el ciclo de trabajo de los filtros de precapa es corto, el consumo en carbón activo en polvo llega a ser prohibitivo y es más económica una filtración sobre carbón en grano, aunque no se obtenga una filtración tan afinada. Igualmente, si es necesaria una adsorción con un tiempo prolongado de contacto, es más conveniente efectuar una filtración sobre lecho de carbón en grano de gran altura; es preciso no olvidar, sin embargo, que en el filtro de precapa el tiempo corto de contacto se compensa parcialmente con la finura del carbón en polvo, que aumenta su eficacia.

Debe establecerse un balance, teniendo en cuenta tanto la calidad que se obtiene como el costo de la operación.

3.2.9. DESODORIZACIÓN DEL AGUA

Se entiende por «desodorización» de un agua de abastecimiento, tanto la eliminación de los malos sabores como la de los olores, que son dos manifestaciones distintas de un mismo fenómeno.

A. Malos sabores en las aguas brutas

Generalmente, los sabores y olores desagradables de las aguas naturales, se deben a la presencia de cantidades muy pequeñas de líquidos segregados por algas microscópicas, especialmente por actinomicetos (*Streptomicetes*, *Nocardia*, *Micromonospora*, etc.), que se desarrollan en las aguas de superficie o en el fondo de los lagos y de los ríos, cuando se reúnen ciertas condiciones de temperatura y de composición química del agua. Este fenómeno está relacionado frecuentemente con el estado de contaminación del agua, la

vida agrícola (corrientes de agua de lluvia después del abono de terreno, campañas azucareras. etc.) y las estaciones del año.

Los actinomicetos y algunas cianofíceas son los causantes de la aparición de sabores a fango, tierra, moho; se han identificado recientemente las sustancias que lo producen (geosmina, 2-metil-isoborneol),

Las algas dan al agua en la que se desarrollan, sabores y olores característicos de la especie predominante; se dice que tiene sabor a moho, a hierba, a geranio, a judías, a pescado, etc. Estos sabores, sin embargo, son mucho menos frecuentes que el sabor a fango.

Pueden liberarse también productos malolientes en la descomposición de vegetales o de materias orgánicas del suelo, en el desove de ciertos peces, en los vertidos industriales, etc. En este último caso, puede conocerse la industria contaminante efectuando tomas en el sentido ascendente de la corriente de agua.

Además de su clasificación cualitativa, todo mal sabor puede valorarse cuantitativamente diluyendo el agua que se está examinando con un agua de referencia, de sabor agradable y de salinidad parecida a la suya, hasta la desaparición del mal sabor: **el umbral de degustación** es igual a la inversa de la dilución a la que ha sido preciso llegar para obtener este resultado.

Un agua bien tratada deberá tener, por tanto, un umbral igual a 1, que expresa la ausencia de mal sabor. En algunos países se practica una medida del olor; en Francia, se considera preferible situarse en las mismas condiciones de apreciación que el consumidor, aunque una medida del olor pueda ser, con frecuencia, más sensible.

La eliminación de sabores y olores se obtiene:

- *por aeración*, para eliminar especialmente el *sulfuro de hidrógeno*;

- *utilizando un oxidante enérgico*.

- El ozono tiene una gran eficacia. Sin embargo, puede suceder que el mal sabor sea debido a la presencia de varias sustancias al mismo tiempo; en ese caso, puede preverse un tratamiento en dos fases, por ejemplo, con carbón activo en polvo (simultáneo a la floculación-decantación) seguido de un afinado con ozono después de la filtración. A veces son necesarios los dos productos para conseguir una desodorización total.

La acción del ozono puede variar en función de la temperatura. Se observa que, para temperaturas inferiores a 5 °C, la acción del ozono sobre los compuestos causantes de los malos olores es pequeña.

Por esta razón, cuando hay que tratar un agua de temperatura variable, interesa generalmente combinar la acción del ozono con la del carbón activo.

- Cloración, en dosis superior al punto crítico, seguida de eliminación del cloro residual.

- Empleo de dióxido de cloro.

- Utilización de permanganato potásico eventualmente combinado con carbón activo.

- Empleo de otros métodos como son el tratamiento con agua oxigenada y la filtración sobre dióxido de manganeso.

- *con carbón activo*.

Puede utilizarse solo, en polvo o en grano. El empleo de carbón activo en polvo adicionado en un decantador, en tanto que la dosis necesaria se mantenga dentro de ciertos límites (15 a 20 g/m³), es más económico que el del carbón en grano utilizado como material filtrante. Si el carbón activo en polvo debe añadirse, en algunos momentos, en dosis fuertes, o si no es suficiente para eliminar todos los sabores, puede obtenerse un buen resultado combinando la adición de una dosis menor, en un decantador, con una ozonización final que sirva, además, para la desinfección. El mayor interés de esta solución combinada, cuando es capaz de eliminar los sabores indeseables (lo que sucede normalmente), consiste en su gran elasticidad:

en períodos fríos, puede ser suficiente utilizar dosis de carbón en polvo pequeñas o aun nulas; como los sabores se intensifican normalmente con la temperatura, se aumenta la dosis de ozono hasta la capacidad máxima de la planta y, a continuación, se aumenta igualmente la dosis de carbón hasta hacer frente a las puntas de sabor. Con esto se limitan los gastos de carbón en polvo, utilizando de la mejor forma posible el gasto efectuado para la ozonización, que no puede reemplazarse, en su acción bactericida, por ningún carbón.

El costo de producción de 3 g de ozono, incluidos los gastos de amortización es comparable al precio de 10 g de carbón activo en polvo; por ello interesa utilizar el ozono como tratamiento de base, cuando se dispone de este elemento para la desinfección, y tomar el carbón activo en polvo como complemento.

Por último, si la combinación ozono-carbón activo en polvo no puede llegar a eliminar totalmente los sabores, o si para ello es necesario una dosis media de carbón superior a 20 g/m^3 , o no se dispone de ozono, puede ser interesante efectuar una filtración sobre carbón activo en grano, ya que el costo de inversión de éste puede amortizarse en unos años.

B. Malos sabores producidos por el tratamiento

El empleo de cloro o de ozono, debido a la formación de compuestos de adición o de sustitución, puede dar lugar a la aparición de malos sabores. En especial, la presencia de fenol, aun en estado de trazas, origina la formación de clorofenol que tiene un sabor medicinal.

Algunos sabores son debidos también a la combinación del cloro con ciertas materias nitrogenadas y a la formación de tricloruro de nitrógeno NCl_3 , de olor a geranio.

Para identificar el olor especial del tricloruro de nitrógeno en el agua, basta compararlo con el de una muestra preparada de la forma siguiente: en un frasco de 500 ml, se introducen 250 ml de agua destilada, a los que se añaden unos cristales de cloruro amónico y después agua de cloro en cantidad justamente suficiente para que una pequeña parte de la muestra, tratada separadamente con ortotolidina, dé inmediatamente una ligera coloración amarilla.

En estas condiciones, se obtiene siempre la formación de tricloruro de nitrógeno en menos de 15 mm, ya que el líquido se acidifica con el agua de cloro. Los frascos utilizados para comparar estos olores deben mantenerse cerrados y lavados después de su uso con agua corriente para evitar todo riesgo de explosión del NCl_3 .

La formación de tricloruro de nitrógeno es más rápida con sustancias amoniacales que con materias albuminoideas. En este último caso, la duración de la reacción puede ser superior a las dos horas. Esto explica que un agua sin olor a la salida de una planta de tratamiento, pueda presentar olores en su distribución.

En todos los casos, la desinfección al punto crítico da el sabor mínimo. La supercloración, seguida de una eliminación total del cloro residual, elimina totalmente el tricloruro de nitrógeno y, en gran parte, el clorofenol; sin embargo la eliminación química del cloro deja generalmente subsistir pequeños sabores medicinales que se evitan totalmente con un tratamiento con carbón activo.

El dióxido de cloro destruye eficazmente los clorofenoles, pero en mucho menor grado el tricloruro de nitrógeno.

Se obtiene una eliminación total de los sabores y olores debidos al tratamiento de cloración, mediante el empleo de carbón activo (estudiado en el párrafo anterior).

C. Malos sabores producidos en las conducciones

El sabor a clorofenol debido a la reacción del cloro con el alquitrán de hulla de las tuberías, desaparece normalmente con bastante rapidez.

El empleo, actualmente generalizado, de revestimientos interiores a base de alquitrán de petróleo o de betún, ha hecho desaparecer este problema. Aparecen, sin embargo, otros sabores producidos por bacterias o mohos muy difíciles de eliminar. Estos organismos se desarrollan únicamente en aguas pobres en oxígeno y ricas en nitrógeno amoniacal. Se impide, por tanto, su desarrollo con una aeración energética y manteniendo en el agua trazas de antiséptico cloro o cloraminas.

3.3.10. ELIMINACIÓN DE MICROCONTAMINANTES

Los tratamientos anteriores eliminan la mayor parte de los contaminantes y microcontaminantes más corrientes. Se tienen en cuenta ahora los contaminantes y microcontaminantes cuya destrucción requiere una atención especial: fenoles, hidrocarburos, detergentes y pesticidas.

A. Fenoles y compuestos fenólicos

Los tratamientos mecánicos o por coagulación no tienen efecto sobre los fenoles. La filtración lenta no los elimina totalmente.

Un medio de lucha contra el sabor a clorofenol es el tratamiento con dióxido de cloro; pero si el contenido en fenol es variable o elevado, será necesario, para una seguridad de tratamiento, emplear dosis en exceso de dióxido de cloro, con el riesgo de introducir en el agua contenidos demasiado fuertes de clorito sódico. En ese caso, debe recurrirse al ozono o al carbón activo.

- *Acción del ozono:* el ozono destruye el fenol y los compuestos fenólicos siempre que las dosis que se empleen sean función de los tratamientos precedentes, del pH, de la naturaleza de dichos compuestos y de la concentración final deseada.

El pH tiene una gran influencia en la dosis de ozono que debe utilizarse: esta se duplica si el valor del pH baja de 12 a 7.

En la zona de valores de pH que corresponden al funcionamiento normal de las instalaciones de tratamiento de agua potable (7 a 8,5), el consumo de ozono por gramo de fenol eliminado es máximo. Las dosis de ozono varían según se trate de fenol puro, muy poco frecuente, de di o trifenoles, de cresoles o de naftoles y según que estos cuerpos se encuentren unidos a otros compuestos como los tiocianatos, sulfuros, etc. La dosis correcta sólo puede fijarse mediante un ensayo. Generalmente es del orden de cuatro veces el valor del contenido en compuestos fenólicos presentes, expresado en fenol puro.

Para la oxidación de los fenoles, no se necesita un tiempo de contacto prolongado. Con el empleo de ozono puede combinarse su eliminación con la desinfección total del agua a tratar, en tanto que la concentración de fenol se mantenga reducida.

- *Acción del carbón activo:* el carbón activo en polvo, aun después de una precloración, reduce el contenido en fenoles, de una forma más o menos completa, según su naturaleza, la dosis y el tipo de carbón y la concentración del medio.

Si se quieren eliminar totalmente los fenoles, es necesario efectuar una filtración sobre carbón activo en grano.

En general, los fenoles son adsorbidos fácilmente por los distintos carbones en granos, aun después de agotados por materias orgánicas.

- *Combinación ozono-carbón activo*: la combinación ozono-carbón activo sólo se prevé en el caso de que puedan producirse puntas importantes del contenido en fenol. En este caso, el empleo sólo de ozono puede resultar insuficiente en los momentos de máxima concentración, y no sería lógico sobredimensionar la instalación de ozono cuando basta efectuar, en este caso, una inyección en el decantador de carbón activo en polvo.

La combinación ozono-carbón activo en granos sólo será de interés si se presentan cantidades fuertes de fenol durante períodos relativamente prolongados.

B. Hidrocarburos

Aparte de los vertidos accidentales que pueden paralizar temporalmente una instalación, las películas de hidrocarburos que sobrenadan se eliminan generalmente en la toma de agua y las trazas que pasan a la planta de tratamiento se retienen por coagulación-floculación decantación y filtración sobre arena.

Si estos hidrocarburos dan sabor al agua, puede eliminarse éste, introduciendo carbón activo en polvo en el decantador, en dosis pequeñas (5 g/g de hidrocarburos). Con una filtración final sobre carbón activo en grano, se obtendrá una eliminación total.

En términos generales, el carbón activo es el material más conveniente para la eliminación de hidrocarburos de cadenas saturadas, cuyas moléculas de gran tamaño son poco solubles y difícilmente atacables por el ozono.

El ozono destruye totalmente los hidrocarburos policíclicos del tipo 3-4 benzopireno, sospechosos de ser cancerígenos en presencia de otros compuestos, como son los detergentes.

C. Detergentes

En general, los detergentes no se eliminan con un tratamiento clásico por coagulación-floculación, decantación y filtración. Tampoco la precloración tiene efecto sobre la degradación de estos productos. Es preciso recurrir a la formación de espuma, al ozono, o al carbón activo.

- *Eliminación por formación de espuma*: se emplea esta técnica cuando el contenido en detergentes es fuerte y quiere reducirse por debajo del umbral de formación de espuma (aproximadamente 0,3 a 0,4 g/m³).

Se inyectan para ello grandes cantidades de aire, bajo un espesor pequeño de agua; debe efectuarse, además, un tratamiento complementario de las espumas concentradas, por evaporación, o con carbón activo. Conviene conocer el contenido en fosfatos del agua tratada y reducirlo si es necesario.

- *Acción del ozono*: el ozono descompone en gran parte los detergentes no biodegradables si se utiliza en las dosis necesarias, que normalmente son, fuertes cuando el contenido que debe eliminarse es elevado.

Se observa una primera fase en la que la cantidad de ozono que debe emplearse varía en forma logarítmica en función de la reducción del contenido en detergente.

Si C es la concentración del detergente obtenida por adición de una dosis de ozono a un agua con una concentración inicial C_0 , el valor de x obedece a la ley:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-ax}$$

en la que el coeficiente "a" varía según la naturaleza de los detergentes y de otros compuestos de los que pueden encontrarse trazas en el agua.

Para reducir en un 50 % el contenido en detergentes aniónicos no biodegradables, es necesario utilizar dosis que varían entre 1,5 y 3 g de ozono por m³ de agua.

Una vez alcanzado un cierto grado de eliminación (70 a 95 % según los casos) se comprueba la presencia de un contenido residual de detergentes que no puede destruirse. Este contenido residual, sin embargo, es siempre inferior a los valores que pueden considerarse excesivos por sus efectos indirectos.

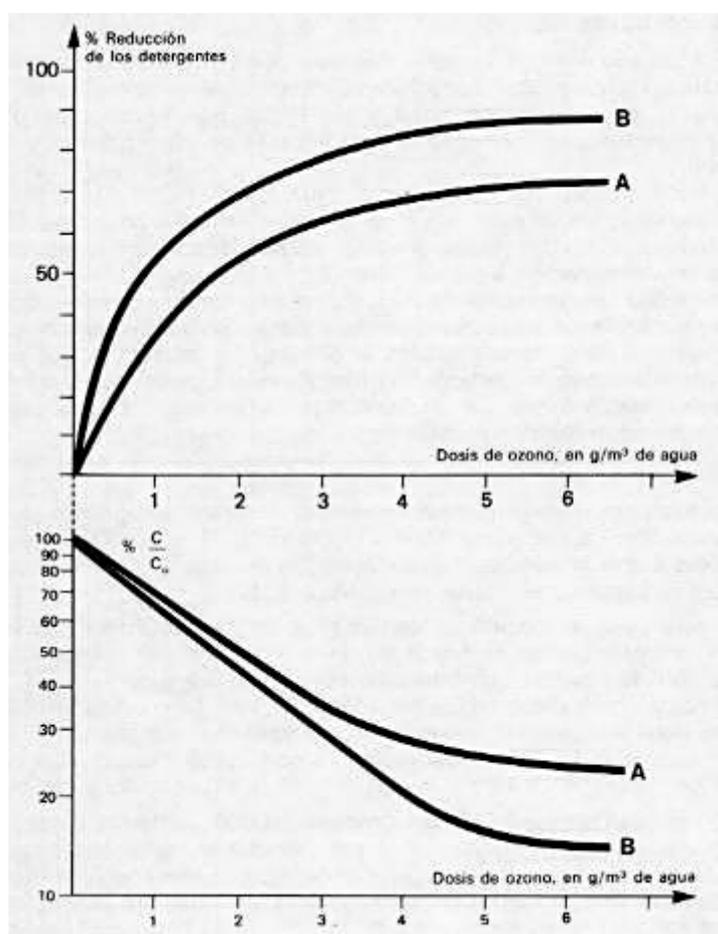


Fig. 428.

No influyen sobre la dosis de ozono ni el tiempo de contacto ni la inyección en varias fases.

La adición de cloro antes de la ozonización no reduce la cantidad de ozono que debe dosificarse.

- *Acción del carbón activo:* el carbón activo elimina los detergentes duros por adsorción. Su poder de retención es mucho más elevado para los detergentes que para los fenoles (2 a 5 veces, según los carbones), para una misma concentración

final en el equilibrio. Se utiliza, generalmente, carbón activo en polvo inyectado en la fase de decantación en la que el pH no desempeña un papel importante. Pueden conseguirse reducciones del 50 % del contenido en detergentes con dosis de 12,5 a 25 g/m³ de agua, según la naturaleza de los detergentes y el tipo de decantador utilizado (estático o de lecho de fangos concentrados en carbón).

Aunque teóricamente pueden obtenerse reducciones superiores al 90 % con carbón activo en polvo, en la práctica no es necesario llegar a estos resultados, los cuales, por otra parte, exigirían el empleo de dosis muy fuertes (40 a 80 g/m³), no económicas. Cuando el contenido en detergentes es muy fuerte, debe recurrirse a una filtración sobre carbón activo en grano.

- *Acción combinada del ozono y del carbón activo:* Puede ser interesante combinar el carbón activo en polvo con el ozono si los contenidos en detergentes presentan puntas de fuerte concentración o si se quiere llegar a un contenido residual muy pequeño (el umbral de percepción es aproximadamente 0,01 mg/l).

Este esquema de tratamiento sólo puede admitirse si no se necesitan dosis fuertes de carbón activo en polvo durante períodos largos. En caso contrario, es más económico el empleo único de carbón activo en grano.

En realidad, las combinaciones carbón activo-ozono no se justifican generalmente por la sola presencia de detergentes en el agua, sino por la presencia simultánea de otros contaminantes o microcontaminantes.

D. Pesticidas

El tratamiento clásico por floculación-decantación y filtración es ineficaz para el conjunto de pesticidas, a excepción del DDT que se elimina parcialmente.

La filtración lenta tiene un efecto limitado sobre algunos pesticidas. Como tampoco elimina todos los fenoles ni todos los detergentes, no puede considerarse como un procedimiento moderno de afino.

- *Acción del cloro, del dióxido de cloro y del permanganato potásico:* el cloro y los peróxidos no actúan sobre los pesticidas duros. El permanganato ataca parcialmente a algunos (como el lindane). Por el contrario, hay herbicidas (compuestos orgánicos) que se degradan fácilmente con el cloro, el dióxido de cloro y el permanganato. Estos oxidantes no son suficientemente eficaces frente al conjunto de pesticidas presentes en las aguas de superficie
- *Acción del ozono:* unos pesticidas son poco sensibles al ozono (Dieldrine, HCH, ...); otros, organoclorados, como el Aldrine, se destruyen con dosis de 1 a 3 g/m³, si su contenido corresponde al que generalmente se encuentra en las aguas de superficie.
- *Acción del carbón activo:* El verdadero procedimiento de eliminación de los pesticidas consiste en el empleo de carbón activo, tanto si se utiliza en forma de polvo, como en grano. Ni el pH, ni la temperatura, parecen afectar de forma marcada al grado de eliminación.
- Con carbón activo en polvo, utilizado en una dosis máxima de 20 g/m³, se eliminan los sabores producidos por la mayoría de los pesticidas normales. Con algunos productos (DDT), se obtiene ya una buena reducción con una dosis de 5 g/m³, y en el caso del Aldrine y el Dieldrine, se obtiene una reducción del 99 % con una dosis de 10 g/m³.

- Con carbón activo en grano, se llegan a reducir los pesticidas hasta un contenido de trazas.

E. Metales pesados

Acción de los coagulantes: la coagulación con sulfato de aluminio sólo elimina muy bien la plata, el plomo y el cobre, reduce aproximadamente en un 50 % el contenido de vanadio y de mercurio, y reduce sólo en un 10 % el de cinc. Por lo que se refiere al níquel, al cobalto, al manganeso y al cromo, no experimentan reducción alguna mediante el tratamiento de coagulación.

- *Acción del carbón activo en polvo:* las dosis que normalmente se utilizan (20 g/m³) son poco eficaces para la eliminación de metales pesados. Sería necesario adoptar dosis de tratamiento mucho mayores.
- *Acción de la filtración a través de arena:* cuando, mediante la coagulación con sulfato de aluminio, se obtiene una reducción correcta, la filtración a través de arena lleva a contenidos prácticamente nulos por lo que respecta a la plata, el mercurio y el cobre. Por el contrario, el manganeso, el cromo, el cadmio, el vanadio y el cobalto no varían prácticamente. Por último, el contenido en cinc y en níquel se reduce sobre todo en presencia de cloro.
- *Acción de la filtración a través de carbón activo en grano:* después de una filtración a través de carbón activo en grano, se obtiene una reducción suficiente de los iones indeseables o tóxicos. La plata y el mercurio se eliminan por completo, y los contenidos de plomo, cobre... son inferiores al nivel aconsejado por a reglamentación en vigor.
- *Acción de la cloración:* en unión de la coagulación, la filtración a través de arena y la filtración a través de carbón activo en grano, la cloración mejora la eliminación de metales pesados, especialmente cuando la dosis de cloro utilizada es ligeramente superior a la correspondiente al punto crítico.

F. Conclusión

Se deduce de todo lo expuesto que la eficacia del tratamiento clásico y de la filtración lenta en la eliminación del conjunto de microcontaminantes es muy limitada.

El medio más eficaz de lucha es el carbón activo, que puede emplearse unido o no al ozono.

- El carbón activo solo no es suficiente para eliminar todo tipo de contaminación (algunos cuerpos lo atraviesan sin ser adsorbidos). La elección entre el carbón en polvo y el carbón en grano, así como la del tipo que debe utilizarse está relacionada con la naturaleza de la microcontaminación, con las exigencias que se fijen en el agua tratada, y con las posibilidades de regeneración del carbón.
- Con el ozono solo se consiguen resultados que no pueden obtenerse con el carbón activo, especialmente en su acción desinfectante.

La combinación de estos dos productos parece ser actualmente la mejor solución en un proceso de afino; deberá estudiarse con la mayor atención, en cada caso, en función de las condiciones técnicas y económicas.

Cuando una estación de tratamiento está equipada con una desinfección por ozono y una instalación de afino con filtros de carbón activo, no pueden darse unas reglas generales sobre la colocación de estos filtros con relación a los ozonizadores.

Puede parecer conveniente la colocación de los filtros de carbón activo después de la ozonización, con el fin de retenerlos productos de oxidación que resulten de la acción del ozono y prolongar la duración de vida del carbón; sin embargo, es más razonable, desde el punto de vista sanitario, situar la ozonización al final de la cadena de tratamiento, especialmente cuando se quiere asegurar con la esterilización la eliminación de los virus. Una tercera solución consiste en intercalar la filtración sobre carbón activo entre dos inyecciones de ozono.