

Cincuenta Años de Progreso en Materia de Purificación del Agua en Estados Unidos*

GORDON M. FAIR

Narra el autor los hechos más salientes del medio siglo de progreso de los servicios de abastecimiento de agua potable ocurridos en el medio siglo que culmina en 1913, o sea, en el lapso de 1863 a 1913, si bien otros acontecimientos y progreso de fecha reciente entran de cuando en cuando en el relato con fines aclaratorios, a modo de contraste o para sacar lecciones necesarias.

En Estados Unidos, el medio siglo que terminó en 1913 fue uno de los períodos de construcción más intensa de obras de abastecimiento de agua. Los servicios públicos aumentaron de menos de 250 a más de 5.000. La construcción de redes de alcantarillado prosiguió al mismo ritmo y las aguas superficiales tuvieron que transportar los crecientes desagües de las ciudades. Las corrientes de agua receptoras fueron contaminándose cada vez más y el número de patógenos entéricos del medio ambiente aumentó en forma constante, en un círculo vicioso del hombre al agua y de nuevo al hombre. Símbolo de pureza y salubridad, el agua se convirtió en temible vehículo de las infecciones entéricas, temible porque ningún otro vehículo del medio circundante transmite la infección al aparato gastrointestinal tan eficazmente como el agua que se bebe. Nunca se sabrá con exactitud cuánto aumentó por esta causa la incidencia de enfermedades y defunciones; pocas ciudades enumeraron la fiebre tifoidea como causa de defunción hasta la década de 1880-1889, en la que se estableció una zona nacional de registro de defunciones. Por coincidencia, 1880 es asimismo el año en que Karl Eberth aisló el bacilo de la tifoidea y culminaron las

investigaciones del Dr. William Budd, quien, desde 1853, se había dedicado al estudio de la fiebre tifoidea.

Los datos existentes indican que, en 1880, la tasa de mortalidad por fiebre tifoidea había alcanzado ya su máximo. A partir de esa fecha, las epidemias de enfermedades transmitidas por el agua siguieron ocurriendo —a menudo con gran ferocidad,—pero la tendencia general de la fiebre tifoidea y las defunciones que causa declinaban en las grandes ciudades. Los registros de las doce ciudades de población más numerosa a fines de dicho período, indican, por ejemplo, que la tasa media anual de defunciones por fiebre tifoidea (1-3) se redujo en cada quinquenio en un 13,3% o sea, desde 59 por 100.000 habitantes (1881-1885) a 26,4 (1906-1910). Causa de este descenso fue el conocimiento de las formas de infección como consecuencia de las investigaciones en materia de bacteriología, y su aplicación a las obras de ingeniería de captación y tratamiento del agua. Tanto en sentido figurado como en la realidad, las ciudades bien situadas se “echaron al monte” para obtener agua de

Profesor de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Harvard, Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos.

* Trabajo presentado el 22 de mayo de 1963, a la Conferencia Anual de la Asociación Americana de Sistemas de Abastecimiento de Agua, celebrada en Kansas City, Missouri, Estados Unidos; y publicado en inglés en el *American Water Works Association Journal*, de julio, 1963.

cuenca poco habitadas (Nueva York, Boston, Baltimore, San Francisco); los centros urbanos de los Grandes Lagos habían llevado la toma de agua de abastecimiento mucho más tierra adentro (Chicago, Cleveland, Buffalo, Milwaukee). Para mayor protección, la mayor ciudad de todas, Chicago, alejó también sus desagües mucho más de las cuencas de toma. Las ciudades situadas en los grandes ríos del país construyeron estaciones depuradoras de estilo inglés (Filadelfia, Pittsburgh), o según métodos de evolución propia (St. Louis y Detroit).

Acontecimientos notables

En materia de tratamiento de agua, entre los acontecimientos notables registrados en aquel período cabe citar los siguientes: la construcción de una estación municipal de filtración en Poughkeepsie, N. Y., por James P. Kirkwood, en 1872, seguida de la adaptación racional del sistema inglés de filtro lento de arena, hecha por Allen Hazen en Albany, en 1899; la terminación de una estación municipal de filtración rápida en Little Falls, N. J., en 1901, según un diseño básico original de George W. Fuller; la construcción de instalaciones de ablandamiento por cal-sosa de aguas duras, en Columbus, Ohio, debida a John H. Gregory en 1908; la aplicación de sulfato de cobre a lagos y embalses para evitar la proliferación de algas, de acuerdo con una recomendación de George T. Moore y Karl F. Kellerman, de la Secretaría de Agricultura de Estados Unidos, en 1904; y la adición constante de lejía en polvo al agua del sistema de abastecimiento "Boonton" de Jersey City, N. J., en 1908, según el consejo de George A. Johnson; y la sustitución de la lejía por cloro líquido, de conformidad con lo indicado en 1910 por el Comandante Darnall, del Cuerpo de Sanidad Militar, de Estados Unidos.

Los estudios básicos, perfeccionamientos y construcciones los llevó a cabo personal procedente, bien de las universidades o de las estaciones de pruebas hidráulicas (4).

En las universidades, determinados profesores llevaron a los alumnos capacitados a sus laboratorios de investigación y de allí a la profesión. En las estaciones de pruebas, trabajaron conjuntamente hombres jóvenes inspirados por el común deseo de dominar los problemas que iban surgiendo en las colectividades y regiones. La época fue interesante y la labor fructífera. Por consiguiente, de las estaciones de pruebas hidráulicas y de las universidades salieron científicos e ingenieros para formar las juntas estatales de salud que se venían dedicando al control del agua de abastecimiento. Esto condujo a la formación de un cuerpo bien organizado, probo y competente de consultores, administradores y profesores que inculcó a la profesión y al público la urgencia de proseguir las indagaciones sobre la naturaleza del agua, su origen, calidad y tratamiento.

Perspectivas de progreso

Situado en su perspectiva histórica, el medio siglo que comenzó en 1913 y sigue la era del "gran despertar sanitario", se distingue no tanto por sus innovaciones como por la consolidación y ampliación de los conocimientos existentes en materia de tratamiento del agua, y por la aplicación ingeniosa de las enseñanzas y de las invenciones a las necesidades de un continente en rápido desarrollo. No se halló procedimiento alguno de desinfectar mejor el agua; no se diseñó ningún filtro fundamentalmente diferente para trabajos en gran escala; no se dio amplio uso a ningún coagulante nuevo; no se sintetizó ningún algicida de mejor calidad, ni se estableció ningún procedimiento nuevo para controlar el olor y sabor del agua. Tan sólo hubo grandes cambios en materia de desmineralización y remineralización del agua y control de la corrosión de tuberías y estructuras conductoras de agua. Sin embargo, hay que reconocer que, sin confirmación, la innovación no es más que una sombra pasajera y que sin consolidación no hay progreso.

Agua aséptica y de buen sabor

En el quinquenio a que pertenece el año 1913, las doce ciudades más populosas acusaron una tasa media anual de defunciones por fiebre tifoidea de 1,30 por 100.000 habitantes. Luego, en cuatro etapas de cinco años cada una, la tasa bajó a 0,83 por 100.000 habitantes; en otras palabras, a menos de un dieciseisavo de lo que era antes. La referida tendencia al descenso por quinquenio prosiguió a un ritmo de 48,2%, en contraste con el 13,3% ya señalado de los 30 años anteriores de registro. En la actualidad, la tasa anual de defunciones no llega al 0,1 por 100.000 habitantes. La fiebre tifoidea es ahora una enfermedad en vías de desaparición en Estados Unidos y Canadá, así como en otros países avanzados del mundo. Sin embargo, en los que no lo están, las infecciones entéricas siguen causando muertes y sufrimientos.

La disminución de casos de tifoidea se aceleró en Estados Unidos, no sólo porque el agua se filtró en mayor cantidad o se crearon nuevas urbanizaciones en terrenos altos, sino porque se añadió la cloración a los recursos defensivos. Por ejemplo, en 1913, siete de las doce ciudades principales del país iniciaron o perfeccionaron la cloración del agua de sus sistemas de abastecimiento; dos ya lo habían hecho un año o dos antes; una hizo lo mismo un par de años después; tan sólo otras dos (ambas con manantiales montañosos de agua pura) aplazaron la cloración hasta el decenio de 1920-1929. Todas ellas han seguido desde entonces tratando el agua de sus sistemas de abastecimiento. En cuanto a los resultados generales, la desinfección del agua fue magnífica, pero debe recordarse que en este caso, como en muchos otros, el éxito engendra el éxito: la eliminación de la enfermedad es por sí misma vigorizante aun cuando haya de aproximarse a su fin a la manera que una curva se acerca a su asíntota, sin llegar a tocarla. La propia naturaleza tiende a enderezar su curso. También hay que reconocer que las con-

sideraciones de carácter práctico suelen impedir con frecuencia la adquisición de conocimientos necesarios para alcanzar progresos rápidos y significativos.

Estudios de control

No obstante, pueden citarse con orgullo, entre otros, los estudios de Earl B. Phelps y sus colaboradores, del Servicio de Salud Pública de Estados Unidos, los cuales echaron la base de la formulación cuantitativa o matemática de los fenómenos físicos, químicos y biológicos inherentes al tratamiento del agua y al control de su calidad. Dichos estudios continúan dando abundantes frutos en el Centro de Ingeniería Sanitaria "Robert A. Taft", de Cincinnati, Ohio. Por consiguiente, es digno de mención el que, por disposición del Congreso de Estados Unidos, en 1912, las funciones del Servicio de Salud Pública se ampliaron para abarcar (junto con otras obligaciones) la investigación de "las enfermedades del hombre y las condiciones que afectan a la propagación y contagio de las mismas, incluso el saneamiento, la eliminación de aguas servidas y la contaminación, directa o indirecta, de las corrientes de agua y lagos navegables de Estados Unidos" (5).

En respuesta a este mandato, el Servicio de Salud Pública inició un estudio de la contaminación y tratamiento natural del río Ohio, en 1913, bajo la dirección de Wade Hampton Frost y con la ayuda de ingenieros y científicos. Casi todos los estudios subsiguientes de la contaminación han seguido la pauta de esta investigación precursora.

También merece mención el hecho de que, en enero de 1913, el Cirujano General del Servicio de Salud Pública nombró una comisión compuesta de quince personas "prominentes en la ciencia sanitaria", "para recomendar normas relativas a la pureza del agua potable suministrada por sistemas ordinarios de abastecimiento en el comercio interestatal". Conocidas como las "Normas del Tesoro", cuando el Servicio de Salud

Pública dependía de la Secretaría del Tesoro, se han convertido desde entonces en las "Normas para Agua Potable", del Servicio de Salud Pública, y fueron objeto de la tercera revisión, en 1962. Por el mero hecho de haberlas, la aplicación de dichas normas alcanza substancialmente, a todo sistema organizado de abastecimiento de agua de la nación.

En cierto sentido, el estudio de los agentes patógenos, que ha cobrado nuevo impulso desde la inauguración del Centro "Taft" (6), promete resultar tan importante para hacer frente a los problemas futuros de la contaminación del agua por dichos agentes como lo fueron los postulados de Koch para demostrar la integridad científica de la bacteriología médica. Por tales medios será posible, con el tiempo, llegar a una explicación de lo que el autor ha denominado "el enigma de los virus entéricos" (7), en su relación con el agua.

En vista de que hay indicios de que la transmisión de virus—tales como el de la poliomiélitis—al ambiente puede ser de una magnitud cinco veces menor que la de agentes bacterianos patógenos, tales como la *Salmonella typhosa*, cabe esperar que sólo cuando haya una contaminación de efecto catastrófico, como la ocurrida en Nueva Delhi, India, en 1955-1956, llegará una enfermedad vírica, como la hepatitis infecciosa, a invadir una colectividad mediante el agua de su sistema de abastecimiento. La aparición, aparentemente rara y restringida, de disentería amibiana transmitida por el agua, tal vez se explique por parecidas razones numéricas.

Progreso de la cloración

La historia de la cloración del agua en Estados Unidos es de sobra conocida (8). A ningún otro medio de tratamiento se ha dedicado tanto espacio en las publicaciones de la Asociación durante los últimos 50 años, ni ningún otro método de tratamiento ha llegado a ser el tema central de informes de

comités y grupos de trabajo tan a menudo y durante tanto tiempo.

Si bien parece considerable la investigación de esta materia, la química de la cloración del agua, así como sus efectos biológicos, no están en modo alguno claramente determinados. Tal vez convenga recordar la lenta evolución de la desinfección eficaz y aceptable del agua por medio del cloro. A partir de la idea de utilizar los residuos de cloro como medida de control, la cloración del agua pasó al tratamiento con cloroamoníaco y a la supercloración hasta el cloro residual libre. Los objetivos eran: eficacia de la desinfección, evitar y eliminar olores y sabores, y control del lodo y formaciones de algas. Sin embargo, el progreso encontró obstáculos por falta de datos científicos. El método científico avanzó poco hasta las últimas décadas. Sólo entonces especialistas competentes en física y química y bioquímicos expertos en enzimas empezaron a dedicarse al estudio a fondo de la cloración, mediante la medición e interpretación de la cinética y termodinámica de las reacciones de soluciones de cloro, acuosas, diluidas, con compuestos y células vivas halladas, tanto en el agua de los sistemas de abastecimientos como en las aguas residuales. Se obtuvieron entonces muchos resultados útiles de los trabajos de Cincinnati, de A. T. Palin, en Inglaterra, y de las investigaciones de la Universidad de Harvard, iniciadas durante la Primera Guerra Mundial y que han proseguido desde aquella época. Fueron asimismo objeto de atención los halógenos distintos del cloro y se sabe mucho acerca de su relativa utilidad.

Se examinó el ozono, de antiguo popular en Francia, con vistas a su uso después de la guerra y durante el decenio de 1930-1939, cuando surgió el interés en el control de olores y sabores relacionados con la cloración marginal.

Sin embargo, los defensores del ozono y de la desinfección por plata coloidal no pudieron demostrar su utilidad en Estados Unidos. Después de la Segunda Guerra Mundial, el

bióxido de cloro tuvo mejor suerte como oxidante y desinfectante; pero el rendimiento de la mayoría de los oxidantes antes de la cloración—entre ellos, el permanganato potásico—no resultó ser superior al de dosis elevadas de cloro; de ahí la recomendación de Sir Alexander Houston de que el cloro, de aplicarse, debía hacerse implacablemente. La luz ultravioleta, como el ozono, ejerció un atractivo periódico especialmente antes del decenio de 1920-1929. Las vibraciones ultrasónicas fueron después de 1945 objeto de consideración pasajera como desinfectantes y coadyuvantes de la coagulación, para la cual también el cloro había sido aplicado con algún éxito.

Entre las principales fallas de la cloración se encontraban los olores y sabores producidos por los residuos de cloro, por el plancton destruido por ésta, o por los compuestos formados con cloro, o cuyo calor o sabor fueron acentuados por él. Especial preocupación suscitaron los sabores medicinales o parecidos al yodoformo causados por residuos minúsculos ($\mu\text{g./l.}$) de sustancias fenólicas debidas a la formación de clorofenoles.

La brillante labor de J. R. Baylis (9) en Chicago, C. H. Spaulding (10), en Springfield, Ill. y G. R. Spaulding (11), en New Milford, N. J., estableció la prueba odorífera inicial, como medio de evaluar cuantitativamente la intensidad relativa de los olores y el uso satisfactorio del polvo de carbón activado como adsorbente económico de sustancias inconvenientes. Se indicó que la capacidad de equilibrio de distintos carbones vegetales y otros adsorbentes puede identificarse mediante la isoterma de Freundlich, estrictamente empírica, y la isoterma de Langmuir, que tiene alguna base teórica.

A medida que tocaba a su fin el medio siglo, el posible abandono del polvo de carbón para volver a los lechos de carbón granular suscitó el interés en la cinética de los procesos de adsorción. Como se verá más adelante, estos estudios se debieron a la

preocupación por las sustancias contaminadoras de origen orgánico—tales como los detergentes espumosos—vertidas en las corrientes de agua receptoras por los desagües domésticos e industriales, así como la creciente concentración de sustancias residuales persistentes en general.

Debido a que la cloración en todo el país ha convertido en inocua el agua de bebida, el viajero no necesita hoy pedir agua mineral en Estados Unidos. Sin embargo, el visitante extranjero perito en gustos se preguntará cómo los norteamericanos pueden beber el agua provenientes de algunos de los sistemas de abastecimiento de ciudades incluso importantes. El europeo continental insiste en que el agua tenga buen sabor y se mete en infinitas complicaciones para conseguir una fuente clara, pura y agradable, la que luego intenta poner a salvo de toda contaminación. Sin embargo, los datos sobre las enfermedades entéricas en dicho continente indican que no siempre tiene éxito.

Tratamiento corriente

En el decenio de 1920-1929, se estaban construyendo instalaciones de tratamiento más o menos corriente a lo largo de los grandes ríos del país. Se contaba con amplia experiencia. Los archivos de los diseñadores y fabricantes de equipo contenían soluciones convenientes de los problemas comunes, y las instalaciones habían llegado a ser tan semejantes que era posible hacer comparaciones estadísticas de rendimiento de centrales, sin que para ello hubiera grandes obstáculos en cuanto a diferencias importantes en el sistema y diseño hidráulicos (12).

De la conveniencia a lo convencional no hay más que un fácil paso y la profesión se estaba encasillando en instituciones de su propia hechura las cuales, por desgracia, se fundaban a veces en observaciones inadecuadas o carecían de pleno respaldo científico.

Eran particularmente dudosas tres prácticas. La primera por orden de tratamiento

corriente del agua (y no necesariamente de importancia) era la superposición de la coagulación química a la sedimentación, sin diferenciar la serie de componentes del proceso: es decir, la mezcla de la substancia química con el agua (dispersión), la precipitación de la substancia química o partícula (nucleación), haciendo que las partículas crecieran (floculación) y la eliminación de las partículas por sedimentación o filtración (separación de fases).

La segunda práctica discutible era el abandono de la limpieza mecánica y de aire por el lavado a contracorriente de alta velocidad de filtros rápidos, basada en la observación visual del movimiento de arena (13) en vez de determinar la eficacia de la limpieza.

La tercera práctica era el uso repetido de lechos de arena profundos donde apenas se asignaba labor alguna a buena parte del medio filtrante. No se pusieron en duda los hábitos convencionales vigentes hasta que, en Sacramento (California), se le asignó a la floculación una función única en el proceso de coagulación; hasta que el lavado de filtros rápidos fue reexaminado de nuevo experimentalmente en Baltimore, Detroit y Chicago, y hasta que se aplicó a la filtración de agua el principio de distribución local. Entonces hubo renovados progresos y, a fines del medio siglo, la investigación estaba de nuevo en pleno auge. Fueron entonces condenados los hábitos convencionales y los aspectos de diseño adquirieron dinamismo por la aplicación de un criterio racional.

Coagulación

A partir del decenio de 1920-1929, la aplicación de nuevas teorías de coagulación mejoró la economía de ésta. La prueba de floculación (14), junto con las determinaciones del pH, se tornaron actividades habituales (15-16). Para acelerar y perfeccionar la coagulación se recurrió a coadyuvantes, tales como la arcilla coloidal, la sílice activada y los polielectrólitos. Las

teorías de von Smoluchowski (17) fueron extraídas de revistas publicadas en 1916 y 1917, y expresadas en términos de ingeniería durante el decenio de 1940-1949 por T. R. Camp (18) y sus alumnos del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Como tan frecuentemente ocurre cuando falta la investigación fundamental, la práctica se anticipó a la teoría; W. F. Langelier y C. G. Hyde habían instalado floculadores mecánicos en la estación depuradora de agua de Sacramento, en 1921, después de la floculación de suspensiones en el laboratorio (14, 19). Con el tiempo, el hecho de poder aglomerar flocúlos mediante el contacto interfacial controlado llegó a ser una característica central de las instalaciones de coagulación y, además, este procedimiento se incorporó a las unidades de contacto de sólidos (20), las cuales diferían mucho en sutileza mecánica e hidráulica, y poco en el principio fundamental, de otros procedimientos por lo demás acreditados de antiguo. Al cabo del tiempo, las diversas operaciones de la coagulación se hacían con habilidad tal que aguas de una sola unidad de turbiedad, y hasta menos, se sababan habitualmente a los filtros. Hasta fecha muy reciente, la economía de este perfeccionismo químico no ha sido puesta en duda y sometida a una investigación operacional con el fin de dar calidad óptima al sistema de tratamiento.

Filtración

Lo que permitió incrementar hasta treinta veces el rendimiento del filtro de agua americano con respecto a su antecesor el filtro inglés, fue, no sólo la limpieza preliminar del agua por medio de coagulantes, sino también la rapidez y escasez de mano de obra con que el primero puede ser limpiado *in situ*. A principios de siglo, los lechos de arena—de unas 30 pulgadas de profundidad, de conformidad con el uso del filtro lento—se limpiaban por contracorriente a través del filtro, obligando al lecho expandido a limpiarse por autofricción. La autofricción se

producía agitando el lecho de arena por procedimientos mecánicos o haciendo pasar aire comprimido a su través, de ordinario antes del lavado a contracorriente, pero a veces durante éste. En ambos casos, los granos de arena eran agitados hasta que se limpiaban por frotación mutua.

Casi a principios del medio siglo, se tropezó con repetidas dificultades de funcionamiento, en especial en cuanto al desplazamiento de gravilla y arena gruesa debajo de las capas filtradoras de arenas más finas. Según noticias, esto fue resuelto acelerando la subida del agua de lavado de unas 10 a unas 24 pulgadas por minuto. No es preciso reiterar la falsedad fundamental de este procedimiento. En lugar de ponerse a meditar sobriamente, los ingenieros y operadores norteamericanos lo adoptaron con entusiasmo. Si bien la utilidad de los retropropulsores de agua para promover la limpieza por autofricción había sido estudiada por De Berard (21) antes de 1910, el lavado de superficie, como ahora se llama, no vino en auxilio de las exhaustas instalaciones de lavado a contracorriente de alta velocidad hasta la década de 1930-1939 (22). Sin embargo, en el extranjero la fricción por chorro de aire siguió siendo el procedimiento de limpieza elegido, con éxito manifiesto y mucha economía de agua y así continúa en la actualidad.

Entre las prácticas de las que la profesión fue liberada, poco a poco, por operadores de criterio claro y diseñadores ingeniosos, se encontraba la cómoda preferencia por los lechos de 30 pulgadas de arena no uniformes (más tarde también de antracita machacada) y al constante ritmo de filtración de 2 g.p.m./p². (galones por minuto por pie cuadrado) de superficie del lecho. Cuando resultó económico, el ritmo de filtración se duplicó o triplicó para mantener el equilibrio con la creciente eficacia del tratamiento previo por coagulación (23). En Detroit, las unidades de filtración de una central depuradora bastante grande fueron diseñadas para descargar a cualquier ritmo que per-

mitiera la carga de agua existente (24). A fin de evitar que las unidades funcionaran al principio sin control alguno, las tuberías y compuertas del effuente se ajustaron para conseguir el control necesario. Además, la producción de las instalaciones se mantuvo relativamente constante, mediante la adecuada elección del número de unidades y el debido intervalo entre las fechas de limpieza.

Dentro del marco de referencia de los estudios de Iwasaki (25) e Ives (26) y retrocediendo en la historia hasta la ley de desinfección de Chick, se reconoció con mayor claridad que antes el hecho de que la cantidad de tratamiento realizada por un filtro va disminuyendo progresivamente a medida que el agua desciende a través del lecho; que buena parte del trabajo se efectúa en la superficie del filtro, menos en las primeras cinco pulgadas, y poco o nada cerca del fondo; que la falta de equilibrio queda acentuada por la estratificación del lecho, y que, en arenas no uniformes, el material más fino situado en la parte superior es substancialmente más eficaz que el material grueso del fondo, el cual es sólo ligeramente más pequeño que el de las capas granulares de apoyo y no produce purificación alguna.

Rendimiento decreciente

La forma de contrarrestar la ley del rendimiento decreciente en los primeros filtros pasó a ser materia interesante de especulación. El cambio del sentido de la corriente fue una solución clara para los filtros estratificados. Se pusieron en funcionamiento, con resultado satisfactorio, los lechos de grava de esta clase, diseñados por Pirnie para la deferrización de aguas subterráneas en Long Beach, N. Y., y se construyeron en el extranjero filtros de arena con corriente hacia arriba. Sin embargo, se descubrió que la capas superiores de los lechos de arena se obturaban y elevaban hacia la capa de agua situada encima, al terminar una fase, cuando se creaba un diferencial de carga elevada dentro del lecho. Por lo tanto, la corriente

en un sólo sentido fue substituida por la corriente en sentido doble. Comprendía el sentido ascendente hacia un desagüe o sistema colector situado a una altura conveniente dentro de la propia arena, y el sentido descendente a través de las capas superiores tendidas en la parte superior del dispositivo. Los colectores intermedios servían, a la inversa, para lanzar chorros de agua en el lecho humedecido durante el lavado a contracorriente, como una especie de lavado superficial.

Para permitir la utilización de gránulos de filtro uniformes, Camp (27) volvió a colocar tuberías perforadas, enterradas en grava selecta que iba reduciéndose hasta arena gruesa, como apoyo de la propia arena filtrante, con un fondo falso hecho de chapas porosas. De esta forma, la profundidad del lecho podía ajustarse al tamaño de la arena, de conformidad con los principios establecidos por Allen (28) y Armstrong (29) en Baltimore y Toronto: para conseguir un rendimiento igual, cuanto más gruesa sea la arena mayor ha de ser la profundidad.

El método más satisfactorio de cambiar la estratificación por tamaño, a fin de distribuir la carga de trabajo verticalmente a través del filtro, fue la creación de la estratificación por densidades. Se colocó una capa de material grueso pero ligero, tal como la antracita machacada, sobre un medio más pesado pero substancialmente más fino, tal como la arena de cuarzo. El peso específico de la antracita se aproxima a 1,5, y el de la arena, es generalmente superior a 2,5; por consiguiente, sus pesos relativos en el agua guardan una proporción de 1:3. Según demostraron Fair y Geyer (30), el grado de expansión de un lecho humedecido es el mismo para las partículas de igual velocidad de sedimentación. Por consiguiente, se descubrió que los gránulos de antracita pueden tener un tamaño doble del de los de arena, sin riesgo de que la integridad de los primeros quede destruida en una capa que se eleva por encima de la arena durante la expansión del lecho, y vuelve a sedimentarse en su sitio

sobre la arena rápidamente depositada cuando se corta el agua del lavado. En un filtro de capa doble de esta clase, a la capa gruesa superior compete la labor más tosca, mientras que la capa fina del fondo hace la limpieza o pulido.

Mediante la debida selección de materiales granulares—naturales o artificiales—es posible simular en las unidades de corriente hacia abajo un filtro de corriente ascendente estratificado por densidad, con cualquier coeficiente Hazen de no uniformidad que se desee. Está a la vista la época en que se podrán utilizar—no sólo en experimentos de laboratorio hechos con *ballotini**, como en la actualidad, sino también en trabajos futuros—gránulos de material sintético fabricados por las industrias plásticas y de cerámica en constante evolución.

Intercambio de iones y control de la corrosión

Hacia 1940, hubo mucho interés en el ablandamiento del agua tanto para uso doméstico como industrial. Resultó que la economía de jabón (31) calculada, compensaba el costo de la cal y la sosa o de las permutitas y las resinas del intercambio de iones. La revolución científica y tecnológica puesta en marcha por la Segunda Guerra Mundial produjo muchos cambios: los detergentes sintéticos reemplazaron a los jabones; la propulsión diesel-eléctrica substituyó a la de vapor; se eliminaron pequeñas y dispersas centrales de energía eléctrica para colectividades o industrias en favor de centrales gigantescas, capaces de enviar a sus calderas agua libre de sustancias minerales. Sin embargo, aquí y allá se empezaron a utilizar sustancias de intercambio—actuando no necesariamente como agentes de intercambio de iones, sino también como adsorbentes y, con menos frecuencia, como catalizadores—para eliminar el hierro y el manganeso, ácido

* Término italiano; literalmente, "bolitas".

sulfídrico y fluoruros, así como para otros fines.

Hubo perfeccionamientos interesantes en materia de control de la calidad del agua encaminados a la protección de metales en contacto con el agua y la tierra, más particularmente las tuberías de acueductos. Para la protección interna de éstas y otras estructuras metálicas, el interés se concentró en los metales inoxidable, en materiales no metálicos, revestimiento de materiales metálicos y no metálicos, la eliminación de oxígeno, bióxido de carbono y otros gases, y el depósito de capas protectoras formadas por las materias arrastradas por el agua misma.

Para la defensa exterior de tuberías y la protección interna de depósitos reguladores y cisternas elevadas, empezó a utilizarse la protección catódica. Se inició la investigación de la estabilización química del agua mediante el pH y el ajuste de la alcalinidad de las aguas al equilibrio del carbonato cálcico. John R. Baylis (32), W. F. Langelier (33), y otros (34) determinaron el llamado pH_s de distintas aguas. Si bien hay razones para creer que las relaciones de equilibrio establecidas hasta la fecha son demasiado simples, la idea era magnífica. Para el control definitivo de la corrosión, los químicos proseguirán investigando nuevas formas de lograr el equilibrio entre los metales y el agua, y los ingenieros medirán la capacidad de transporte de las líneas conductoras de aguas "estabilizadas".

Desalinación

Hacia el fin de este histórico período de 50 años, el progreso de la urbanización y el crecimiento de la población pusieron en primer plano el problema de la desalinación del agua salobre y marina. Las dos formas de convertir el agua salada en potable—extracción del agua y extracción de la sal—vienen siendo objeto de estudios detenidos en laboratorios de investigación, unidades piloto e instalaciones experimentales de grandes

dimensiones. El agua se extrajo sobre todo mediante separación térmica (ebullición y congelación), y la sal por medio de electrodiálisis, en un cierto número de variantes. En general, se convino que el costo de producción es factor decisivo en la desalinación. Un estudio a fondo del efecto de ésta en la economía del agua, hecho por Wolman (35), tocó una cuerda sensible de la ingeniería dedicada al abastecimiento de agua. En realidad, a esta profesión le queda aún mucho que aprender acerca de las propiedades físicas y químicas más salientes del agua (36).

Profilaxis

Un historiador, que estudiara retrospectivamente este período de 50 años, podría muy bien elegir como uno de sus rasgos característicos, el interés de las autoridades de salud pública en añadir sustancias de efectos fisiológicos, como yoduros y fluoruros, al agua que acuse deficiencia de ellas. La sustitución del agua por la sal de mesa como vehículo de los yoduros necesarios dejó a dicho producto químico fuera de discusión. Sin embargo, todavía resuena en nuestros oídos el fragor levantado con motivo de la fluoración del agua para controlar la caries dental. No obstante, a fines del período, más de 50 millones de norteamericanos bebían agua que, o bien contenía fluoruros naturales en la cantidad recomendada, o había sido complementada con ellos hasta la concentración óptima. La profesión a cargo del abastecimiento de agua, prudentemente prefirió limitarse a cooperar con las autoridades de salud pública, y a que dichas sustancias se añadiesen en la cantidad exacta (37).

Fuentes y recursos

Alguna ansiedad surgida al paso de los años se debió al fracaso de los ingenieros hidráulicos y hombres de ciencia en proteger las fuentes de los abastecimientos públicos

de agua contra la contaminación, con tanto vigor como se habían visto obligados a hacerlo antes de que los medios de tratamiento resultaran tan eficaces como en la actualidad. Alardear de la perfección de la técnica actual de tratamiento del agua requiere un valor que sólo puede nacer de la ignorancia. Porque siempre que el hombre modifica el medio en que vive, rompe su equilibrio ecológico, el cual se va haciendo cada vez más frágil a medida que los habitantes del mundo aumentan en detrimento de sus recursos y de su medio físico. A veces, este desequilibrio puede terminar en desastre.

Un ejemplo elocuente a este respecto, es la de creciente eutrofia de los lagos. El hombre excreta varios gramos diarios de fósforo y nitrógeno (más nitrógeno que fósforo). Los detergentes sintéticos añaden más fósforo al medio circundante, y estos elementos no son eliminados en cantidad suficiente de las aguas residuales en las instalaciones actuales de tratamiento. El consiguiente enriquecimiento de los alimentos del plancton destruirá, en definitiva, la ecología y reservas naturales de los lagos. Sin embargo, los ingenieros hidráulicos han prestado poca atención a hechos de esta clase.

También es importante la aparición, en fuentes de agua potable de sustancias químicas, muchas de las cuales recién sintetizadas. Y es poco lo que se sabe acerca de su posible toxicidad, especialmente en lo que respecta a su efecto a largo plazo en una población que va envejeciendo. Hay otros ejemplos. Pero lo más importante es tener en cuenta que las fuentes de agua potable constituyen uno de los recursos más vitales del hombre.

Investigaciones operacionales

El desarrollo de los recursos hidráulicos y el control de la calidad del agua—preventivo y correctivo—requiere la identificación y evaluación numérica de muchos factores, así como la aplicación de éstos a sistemas viables, ajustados a los objetivos que se persiguen. La calidad óptima del agua de estos sistemas se logra mediante la investigación operacional, uno de los medios más poderosos facilitados por la convergencia de las matemáticas y la economía aplicadas, y que ha resultado eficaz gracias a los computadores de alta velocidad. Con respecto a las centrales depuradoras de agua, el análisis de sistemas puede limitarse al establecimiento de un equilibrio económico entre las operaciones de las unidades que integran las instalaciones; pero puede ir mucho más lejos hasta abarcar las fuentes disponibles de agua de abastecimientos públicos y puede extenderse hasta el desarrollo de los recursos regionales de abastecimiento de agua y la explotación óptima de los mismos.

Conclusión

Al período histórico del abastecimiento de agua aquí analizado corresponde la decisión de un gran jurista muy apreciado, el magistrado Holmes, Presidente del Tribunal Supremo. En la sentencia que dictó en el caso del río Delaware, figuran estas palabras, muy citadas y que, sin embargo, nunca dejan de conmover a las personas relacionadas con el abastecimiento de agua: "Un río es algo más que una cosa deleitable: es un tesoro. Facilita un elemento vital que debe racionarse entre aquellos que tienen derechos sobre él."

REFERENCIAS

- (1) Fuller, G. W.: Historic review of the development of sanitary engineering in the United States during the past 150 years—Water works, *Trans. Am. Soc. Civil Eng.*, 92:1209, 1928.
- (2) Whipple, G. C.: *Typhoid Fever*. John Wiley & Sons, New York, 1908.
- (3) Gorman, A. E. y Wolman, A.: Waterborne outbreaks in the United States and Canada

- and their significance, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 31:225, (fbro.) 1939.
- (4) Greeley, S. A.: Testing stations for sanitary engineering—An outstanding achievement, *Trans. Am. Soc. Civil Eng.*, CT, 574, 1951.
 - (5) Williams, R. C.: *The United States Public Health Service, 1798 to 1950*, Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, 1951.
 - (6) Kabler, P. W., y col.: *Pathogenic bacteria and viruses in water supply. Fifth San. Eng. Conf.*, Universidad de Illinois, (eno.) 1963.
 - (7) Fair, G. M.: *Water pollution research and the revolution in science and technology*. Primera Conferencia Internacional sobre Investigaciones de la Contaminación del Agua, Londres, Inglaterra, (sbre.) 1962.
 - (8) Wolman, A.; Donaldson, W. y Enslow, L. H.: Recent progress in the art of water treatment, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 22:1160, (sbre.) 1930.
 - (9) Baylis, J. R.: *Elimination of taste and odor from water*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1935.
 - (10) Spaulding, C. H.: Quantitative Determination of Odor in Water, *Am. Jour. Pub. Health*, 21:1038, 1931.
 - (11) Spalding, G. R.: Activated Char as a Deodorant in Water Purification, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 22:646, (mayo) 1930.
 - (12) Streeter, H. W.: Studies of the Efficiency of Water Purification Processes, *USPHS Bull. No. 172*, 1927.
 - (13) Ellms, J. W.: *Water Purification*, McGraw-Hill Book Co., New York, (Segunda edición, 1928) pág. 373.
 - (14) Langelier, W. F.: Coagulation of water with alum by prolonged agitation, *Eng. News-Record*, 86:924, 1921.
 - (15) Theriault, E. J. y Clark, W. M.: An Experimental Study of the Relation of Hydrogen Ion Concentration to the Formation of Flocc in Alum Solutions, *Pub. Health Rep.*, 38:181, 1923.
 - (16) Miller, L. B.: On the Composition of the Precipitates from Partly Alkalinized Alum Solutions, *Pub. Health Rep.*, 38:1995, 1923.
 - (17) Von Smoluchowski, M.: Investigation of a Mathematical Theory of the Kinetics of Coagulation of Colloid Suspensions, *Z. Physik. Chem.*, 92:129, 1917.
 - (18) Camp, T. R.: Flocculation and Flocculation Basins, *Trans. Am. Soc. Civil Eng.*, 120:1, 1955.
 - (19) Hyde, C. G. y Ludwig, W. F.: Some New Features in the Design of Vertical Flocculation Units, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 36:151, (fbro.) 1944.
 - (20) Kalinske, A. A.: Settling Rates of Suspension in Solids Contact-Units, *Proc. Am. Soc. Civil Eng.*, 79-186, 1953.
 - (21) Babbitt, H. E.: Washwater Salvage of Champaign-Urbana, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 2:393, 1915.
 - (22) Baylis, J. R.: Experiences in Filtration, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 29:1010, (jul.) 1937.
 - (23) ———: Experiences with High Rate Filtration, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 42:687 (jul.) 1950.
 - (24) Sawyer, A. W.: Functional Design of the Wayne County Filtration and Pumping Plant, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 51:761 (jun.) 1959.
 - (25) Iwasaki, T.: Some Notes on Sand Filtration, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 30:1591, (obre.) 1937.
 - (26) Ives, K. J.: Rational Design of Filters, *Proc. Inst. Civ. Engrs.*, 16:189, 1960.
 - (27) Camp, T. R.: Experimental Study of Porous Plates for Use in Filter Bottoms for Rapid Filters, *J. NEWWA*, 49:1, 1935.
 - (28) Allen, L. F.: Filter Sand Experiments, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 27:205, (fbro.) 1935.
 - (29) Armstrong, J. W.: Filter Sand, *Jour. Am. Water Works Ass.*, (sbre.) 1931.
 - (30) Fair, G. M. y Geyer, J. C.: *Water Supply and Waste Water Disposal*, John Wiley & Sons, New York, 1954, pág. 677.
 - (31) Larson, T. E.: Interpretation of Soap-Savings Data, *Jour. Am. Water Works Ass.*, (mzo.) 1948.
 - (32) Baylis, J. R.: Treatment of Water to Prevent Corrosion, *Jour. Am. Water Works Ass.*, (fbro.) 1935.
 - (33) Langelier, W. F.: The Analytical Control of Anticorrosion Water Treatment, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 28:1500, (obre.) 1936.
 - (34) Larson, T. E. y Buswell, A. M.: Calcium Carbonate Saturation Index and Alkalinity Interpretation, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 34:1667, (nbre.) 1942.
 - (35) Wolman, A.: Impact of Desalinization on the Water Economy, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 53:119 (fbro.) 1961.
 - (36) National Academy of Sciences: Desalinization research and the water problem, National Research Council, *Pub. No. 941*, 1962.
 - (37) Task Group Report: Status of Fluoridation in the United States and Canada, 1961, *Jour. Am. Water Works Ass.*, 55:571, (mayo) 1963.