

REPUBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y PETROLEOS
INSTITUTO GEOLOGICO NACIONAL

**QUIMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS Y SU IMPORTANCIA
DESDE EL PUNTO DE VISTA DE POTABILIDAD E HIGIENE.**

INFORME No. 1205

CARLOS I. DELGADO
HIDROQUIMICO

BOGOTA, D. E. NOVIEMBRE 28 DE 1956

QUIMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS Y SU IMPORTANCIA DESDE EL PUNTO DE VISTA DE POTABILIDAD E HIGIENE

INTRODUCCION

El agua, considerada como uno de los constituyentes esenciales de la vida en sus tres grandes manifestaciones, animal, vegetal y mineral, ha desempeñado a través de todas las edades un papel definitivo en la evolución física y biológica acaecida sobre la faz de la tierra. Por lo tanto, tiene gran interés respecto al desenvolvimiento de los aspectos inorgánicos y orgánicos, como también en lo concerniente a su aplicación a las actividades humanas.

Es un poderoso vehículo transformador de materia y energía. La historia geológica misma abunda en ejemplos donde el agua ha desempeñado funciones creadoras o de destrucción; formas caprichosas de la corteza terrestre, maravillas naturales labradas en conexión con los movimientos de la misma corteza, por mares antiguos que avanzaron hacia los continentes y que luego retrocedieron dejando sus sedimentos. Procesos de complejidad geoquímica extraordinaria, análisis y síntesis, composición y descomposición, integración y desintegración son fenómenos en los cuales el agua ejerció un papel preponderante.

CICLO DEL AGUA EN LA NATURALEZA

El agua se presenta en la naturaleza en tres estados de agregación: sólido, líquido y gaseoso (vapor de agua). Estos tres estados sufren un complicado y variado ciclo denominado ciclo hidrológico: el sol suministra la energía calórica suficiente para evaporar el agua del mar. El vapor de agua es únicamente 0.62 veces más pesado que igual volumen de aire y consecuentemente se eleva a las regiones superiores de la atmósfera, mezclándose con el aire, debido al fenómeno de difusión. A medida que el vapor asciende, su temperatura disminuye y alcanza una altitud donde el aire se satura de humedad; el vapor entonces se condensa en finas gotas de agua que se unen mutuamente para formar otras mayores y que caen en forma de lluvia o nieve sobre los continentes con energía potencial suficiente para retornar parte de ella hacia el mar. Una cierta cantidad de agua lluvia se evapora directamente al caer a la superficie de la tierra o de los lagos continentales y también por transpiración de las plantas. Otra encuentra a su paso rocas fracturadas, poros, grietas y formaciones permeables don-

de penetra a variables profundidades, entre pocos metros y varios kilómetros, almacenándose en estado frío o termal. Estas aguas subterráneas en parte circulan por grietas, fallas, estratos porosos, etc., y pueden alcanzar nuevamente la superficie, ya sea bajo la influencia de la presión hidrostática, de la temperatura o de gases asociados.

Siendo el agua lluvia el origen de las aguas superficiales y subterráneas es importante describir sus características y propiedades para demostrar hasta qué punto y por qué razones se le ha denominado solvente universal por excelencia.

La atmósfera es esencialmente una mezcla de un volumen de oxígeno por cuatro de nitrógeno y pequeñas cantidades de otros gases, con variada proporción de vapor de agua. Su composición en volumen es la siguiente:

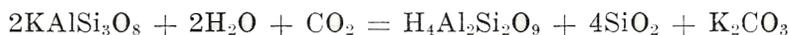
Nitrógeno	78.03%
Oxígeno	20.99
Argón	0.93
Anhídrido carbónico	0.03
Hidrógeno	0.016
Neón	0.0018
Helio	0.0005
Kriptón	0.0001
Xenón	0.000009
Vapor de agua	variable

La composición química del agua lluvia es muy variable; depende entre otros factores de la naturaleza de los terrenos, de las condiciones de clima y vegetación (en países tropicales es frecuente la presencia de ácido nítrico formado por síntesis). También son frecuentes el amoníaco, nitrato de amonio, sustancias orgánicas e inorgánicas, cloruro de sodio; compuestos de azufre y de carbono derivados de los productos de combustión de la hulla en zonas industriales; materia vegetal seca y ya descompuesta, como polen y también microorganismos vivientes cuyo número varía con la altitud, temperatura y localidad.

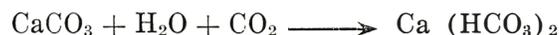
De los gases presentes en el agua lluvia, el nitrógeno, oxígeno y anhídrido carbónico son quizá los más importantes. El agua lluvia contiene en solución alrededor de 0.013% de nitrógeno, 0.0064% de oxígeno y 0.0013% de anhídrido carbónico. El nitrógeno, indispensable para la vida orgánica, es un gas inerte a temperaturas por debajo de 200°C; el oxígeno, en cambio, es apreciablemente soluble en el agua, y su actividad química como agente oxidante es extraordinaria, hasta tal punto de que se considera como un factor esencial en la destrucción de rocas y minerales por desintegración y descomposición química.

Finalmente, el anhídrido carbónico es quizá el más importante de todos, pues este gas disuelto en el agua lluvia es la causa fundamental de la disolución de minerales, precipitación de los mismos y aun de la formación de unidades geológicas superficiales.

Así tenemos, por ejemplo, cómo los silicatos son descompuestos por el agua carbonatada; la reacción es compleja y sufre diferentes etapas intermedias, siendo en ellas las más importantes la hidrólisis y carbonatación:



Otro caso más ostensible es la disolución de las calizas por medio del anhídrido carbónico disuelto, incorporando en el agua el bicarbonato de calcio:



Así podríamos citar infinidad de ejemplos que demuestran que el agua cargada de anhídrido carbónico es un poderoso agente meteorizante capaz de disgregar la mayor parte de las rocas y minerales.

El agua lluvia, por lo tanto, adquiere al caer a la superficie de la tierra propiedades químicas y físicas de tal magnitud y consideración que sólo se explican por la eficaz acción solvente de los gases disueltos, su carácter de agua muy blanda, y su naturaleza ácida y corrosiva.

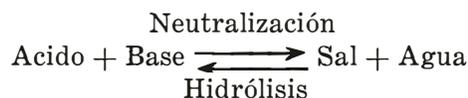
AGUAS SUPERFICIALES

Así se denominan aquellas aguas que corren por la superficie de la tierra y que provienen, ya sea directamente de la precipitación o de manantiales cuyas aguas han sufrido previamente un proceso de percolación al subsuelo. En esta etapa del ciclo hidrológico inicia el agua su actividad química y física propiamente dichas.

La acción química del agua se lleva a cabo por su poder de disolución. Tenemos ahora en contacto una fase sólida y una flúida o dispersa compuesta por agua y gases; las reacciones químicas se suceden en relación con la constitución de las formaciones geológicas encontradas por el agua a su paso; los sólidos disueltos aumentan o disminuyen según sean las reacciones químicas, en su mayoría complicadas, pero que podría resumirse en: 1) Hidratación e hidrólisis; 2) Oxidación y reducción; 3) Carbonatación (acción del anhídrido carbónico) y, finalmente, 4) Disolución.

La hidratación puede considerarse aquí como un simple fenómeno de absorción, sin cambios de estructura, por medio de los granos de rocas o minerales o también, la formación de sales hidratadas como el yeso.

La hidrólisis es en esencia la reacción inversa a la neutralización, esta última consistente en la formación de una sal por medio de un ácido y una base:



Así tenemos que la disolución de una sal en agua será ácida o alcalina según sea el carácter fuerte o débil de los componentes ácido y base. El agua adquiere por lo tanto propiedades de neutralidad, alcalinidad o acidez, y de ellas deriva los distintos valores de pH (concentración de iones hidrógeno). Un agua con pH 7 es neutra y su acción química es débil; en cambio el agua con un pH mayor (alcalina) o menor (ácida) que 7, adquiere mayor capacidad de descomposición y por lo tanto de disolución.

Las reacciones de oxidación y reducción se suceden en la presencia de sustancias orgánicas e inorgánicas. De las primeras tenemos las bacterias, la actividad y respiración de los organismos superiores, y en general,

materia orgánica de origen vegetal o animal. Es del caso anotar que en países como el nuestro, las grandes arterias fluviales y muchos afluentes corren a través de vegetación exuberante donde la actividad biológica es intensa, dando lugar a la acción de bacterias reductoras de sulfatos y nitratos. Los agentes meteorizantes son agentes de oxidación y así tenemos, por ejemplo, la oxidación de compuestos de azufre, caso de común ocurrencia en las aguas de manantiales en el país.

La carbonatación, como su nombre lo indica, es la inclusión del anhídrido carbónico en el agua, dando lugar al ácido carbónico hipotético, y, por consiguiente, a la neutralización de las bases. El anhídrido carbónico en el agua es, en consecuencia, muy eficaz para el ataque químico de las sales simples o complejas, como sucede, por ejemplo, en la descomposición de los silicatos.

Todas las reacciones químicas anteriores dan lugar a la incorporación en el agua de sustancias solubles, y a comunicarle un carácter especial de salinidad, que depende de las rocas atravesadas y de las condiciones de clima y vegetación; así tendremos el caso de aguas ácidas o básicas, aguas con un alto o bajo contenido de sales en disolución, con iones, carbonatos, sulfatos, cloruros, etc., y cationes calcio, sodio, magnesio, etc.

AGUAS SUBTERRANEAS

El agua lluvia, al caer a la superficie de la tierra, encuentra los siguientes caminos: una parte corre por la superficie directamente y otra penetra al subsuelo formando el agua subterránea.

Hemos visto ya cómo el agua superficial adquiere sales solubles merced a los agentes de meteorización. El enriquecimiento o alimentación de las aguas subterráneas proviene, en su mayor parte, de estas aguas y de la precipitación atmosférica. Debemos entonces agregar nuevos factores que van a producir cambios fundamentales en la calidad química del agua y aumentar su capacidad disolvente.

Las reacciones químicas ocurrirán ahora en tres medios distintos: sólido (rocas y minerales), líquido (agua) y gaseoso (oxígeno y anhídrido carbónico, principalmente). Contamos entonces con un sistema heterogéneo de fases, en el cual la fase líquido-gas queda definida, según Lindgren, así: "Cada agua natural es un sistema químico de constituyentes balanceados, de electrolitos más o menos disociados, de gases, y sustancias coloidales".

Para el caso nuestro es importante analizar solamente la fase líquido-gas, constituida por el agua subterránea y los gases que encierra.

El agua subterránea circula a través de poros de las rocas, capas permeables colocadas entre otras impermeables, fallas y grietas (ellas suelen alcanzar grandes profundidades), y en consecuencia el agua está sujeta a variaciones de presión, temperatura, concentración de sustancias reaccionantes y tiempo de contacto.

La solubilidad de un gas en un líquido está influenciada por la temperatura y presión. Así tenemos, por ejemplo, el anhídrido carbónico que actúa en dos formas: una parte entra en combinación con el agua para producir una nueva sustancia (ácido carbónico), mientras que la otra se disuelve en el sentido físico como anhídrido carbónico. Es en esta última

forma como podemos aplicar la ley de Henry, que dice: “La masa de un gas disuelto por un volumen dado de un líquido a temperatura constante, es proporcional a la presión”. Al aumentar la solubilidad del anhídrido carbónico aumenta la proporción de ácido carbónico combinado y hace que el agua se acidifique ligeramente y por consiguiente incrementa también su capacidad disolvente.

El oxígeno, llamado gas permanente por existir en solución en la misma forma molecular, aumenta de la misma manera que el anhídrido carbónico su solubilidad respecto a un aumento de presión.

Con relación a la temperatura podemos decir que la solubilidad de un gas en un líquido disminuye sensiblemente con un aumento de temperatura.

De estos dos factores quizá sea más importante el factor presión, limitándonos a casos en que el agua subterránea está sujeta a las presiones atmosférica e hidrostática. La temperatura es, con la presión, un factor definitivo en las aguas termales y mineralizadas.

La concentración de sustancias disueltas en el agua está íntimamente relacionada con los gases disueltos en ella, principalmente anhídrido carbónico y oxígeno. Es probable lograr un equilibrio químico en las sales disueltas en el agua. Muchas de las reacciones químicas (en nuestro caso, reacción de sólidos, o sean rocas y minerales, con el agua y gases disueltos), no proceden instantáneamente hasta compenetrarse, sino que en ellas generalmente interviene el factor “tiempo de contacto”, y la velocidad de reacción es relativamente lenta, logrando, finalmente, un estado de equilibrio, en el cual la reacción se dice ser balanceada o reversible. Volvemos al caso ya mencionado anteriormente de la disolución del carbonato de calcio por medio del agua y anhídrido carbónico, reacción que es reversible en condiciones especiales de temperatura y presión:



En un caso concreto, que veremos más adelante, estudiaremos mejor este tipo de reacción.

La velocidad de una reacción química reversible en sistemas homogéneos y aun en los heterogéneos es proporcional al producto de las masas activas (concentración molecular) de las sustancias reaccionantes (ley de Gulberg y Waage).

Esta misma ley es aplicable, sin ser exactamente cuantitativa, a todas aquellas soluciones de naturaleza iónica, como las soluciones acuosas donde un electrolito en solución moderadamente diluida (caso de las aguas naturales), consiste de un sistema en equilibrio entre la parte de las sustancias no disociadas y sus iones.

La concentración de sustancias solubles en el agua es, por lo tanto, un factor de incremento en la velocidad de las reacciones químicas.

Esta misma ley explica uno de los fenómenos que ocurren en las aguas naturales, como es el de la precipitación. Las aguas naturales disuelven y muchas veces redepositan sales de rocas y minerales.

Tengamos el caso de soluciones saturadas, más exactamente un electrolito que ha alcanzado el límite de solubilidad en el agua, es decir, aquel límite después del cual el agua no disuelve mayor cantidad de sal, a una temperatura dada y constante. Si por cualquier medio se incrementa la con-

centración de sus iones, el equilibrio se afecta, lo que significa que la solución tiende a sobresaturarse, y por lo tanto, algo de sólido se separa de la solución. En la precipitación influye también la presencia de un ion común: se ha demostrado que la solubilidad de una sal, en general, disminuye en la presencia de otro compuesto que tenga un ion común y aumenta en la presencia de un ion no común. Por ejemplo, el yeso puede encontrarse en el agua en la cantidad de 2.000 p. p. m. y aumentar su solubilidad en la presencia de una solución de cloruro de sodio hasta 8.200 p. p. m. Así veremos, al estudiar casos concretos de aguas subterráneas en Colombia, cómo la presencia del ion sulfato se presenta en cantidad relativamente alta en algunas regiones del país.

Otro factor importante en la disolución y precipitación de sales es el pH. Sin entrar a detallar su verdadero significado (de acuerdo con la teoría iónica) podemos decir que el pH es una medida de la acidez, neutralidad y alcalinidad del agua.

Ya hemos visto que las aguas ácidas o alcalinas son poderosos agentes de descomposición química. La mayoría de las aguas naturales tienen valores de pH que fluctúan entre 6 y 8. Casos menores ocurren en aguas procedentes de regiones volcánicas o de depósitos de azufre, con valores muy bajos de pH, es decir muy ácidas, como por ejemplo el río Vinagre, que nace en el volcán Puracé, y que lleva disueltos ácidos sulfúrico y ácido clorhídrico. Otras aguas, como el agua de mar superficial, pueden alcanzar valores de pH comprendidos entre 8.1 y 8.4, y aquellas procedentes de suelos alcalinos (que contengan, por ejemplo, carbonato de sodio) hasta un pH 10.

El pH es un factor regulador de la solubilidad y precipitación de sales. Así, por ejemplo, la solubilidad del hierro aumenta con una disminución de pH. La sílice incrementa su solubilidad al aumentar el pH. La precipitación del hidróxido férrico en aguas ácidas puede ocurrir a un pH 2 a 3.5; en cambio la precipitación del hidróxido ferroso no es completa ni en aguas neutras (pH 7), y es por ello que las aguas naturales, en condiciones reductoras, contienen compuestos ferrosos.

Existen otros factores que podríamos denominar factores geoquímicos, los cuales explican muchos de los fenómenos que ocurren en las aguas subterráneas, como son: profundidad y grado geotérmico y presencia o ausencia de intercambiadores de bases (ablandamiento del agua subterránea por intercambio de bases en contacto con materias que dejan en libertad sodio a cambio de calcio y magnesio).

Estos fenómenos escapan a la naturaleza misma del presente artículo, pues su estudio se reduce a interpretar el carácter químico de las aguas a la luz de las leyes físico-químicas.

BIOQUIMICA DE LAS AGUAS NATURALES

Sería tan extenso entrar a detallar esta parte importante de las aguas, y por ello nos limitaremos a dar algunas ideas generales al respecto.

La vida animal y vegetal desempeña un papel muchas veces definitivo en la calidad química del agua. La vida orgánica depende, para su desarrollo, substancialmente de la materia inorgánica con sus elementos: hidrógeno, nitrógeno, carbono, fósforo, azufre, calcio, magnesio y hierro, entre

los más importantes; las plantas y animales pueden considerarse como acumuladores de elementos. La complejidad de las reacciones químicas es extraordinaria, y uno de los fenómenos, por ejemplo, la fotosíntesis, indispensable para las funciones de la materia viva, regula la respiración, es decir, la lenta combustión de la materia orgánica. La descomposición o putrefacción de la materia vegetal terrestre y de los pantanos dan lugar a la formación del *humus*, que es una mezcla compleja de sustancias orgánicas amorfas consistentes en residuos de sustancias vegetales, animales y microbianas. Este humus es prácticamente insoluble en el agua, pero puede dar lugar a soluciones coloidales en combinación con la fracción arcillosa inorgánica del suelo.

Las soluciones coloidales del humus en el agua están cargadas de electricidad negativa y por lo tanto pueden entrar en combinación con electrolitos disueltos, y formar compuestos húmicos, solubles como los alcalinos, poco solubles como los de calcio y magnesio, e insolubles como los aluminicos y férricos; estos últimos pueden llegar a ser solubles con cambios de pH por su carácter anfótero.

Por consiguiente, las aguas cargadas de compuestos húmicos solubles adquieren mayor capacidad de disolución debido al anhídrido carbónico que se desprende del humus durante la actividad microbiana y que actúa como disolvente, aumentando la concentración de iones hidrógeno, y llegando a formar bicarbonatos solubles de calcio y también de hierro y manganeso. Restos de plantas en descomposición (turba) cuyas soluciones orgánicas tienen la propiedad de disolver óxidos y carbonatos de hierro, reducen los compuestos férricos a sales ferrosas solubles (en el estudio concreto de aguas subterráneas en Colombia veremos el por qué el hierro ocurre en forma de solución verdadera y solución coloidal).

En aguas estancadas y en aguas fangosas o de pantano, o en soluciones de turba, se inicia un proceso de putrefacción (destilación lenta debido a la carencia o presencia mínima de oxígeno) de restos vegetales, algas, crustáceos, esporas, granos de polen, etc. y bacterias, dando lugar a la formación de gases como metano (gas de los pantanos), sulfuro de hidrógeno, anhídrido carbónico, amoníaco y otros compuestos orgánicos. Así tenemos el caso muy frecuente de la presencia de gas metano en algunas aguas subterráneas de la Sabana de Bogotá.

BACTERIAS EN EL AGUA

Es prácticamente imposible encontrar aguas naturales exentas de bacterias. La descomposición de la materia orgánica vegetal o animal y la decadencia de plantas acuáticas, algas, y otras formas de vida en medio acuoso dan lugar al crecimiento de bacterias.

Existe la creencia de que la presencia de bacterias se debe exclusivamente a contaminaciones con aguas negras o residuales. Pero ellas existen en las aguas atmosféricas que todavía no han tenido contacto con la superficie de la tierra, en las aguas superficiales y también en las subterráneas que han atravesado centenares de metros de profundidad en capas acuíferas de grava y arena.

Pero es necesario distinguir entre bacterias inofensivas y peligrosas (desde el punto de vista de la salud); protozoos u organismos microscópicos; diatomas y algas.

Como regla general, las bacterias y protozoos son los organismos peligrosos, mientras que las diatomas (bacilariofitos) y algas que comunican un sabor y olor peculiares al agua, no son particularmente nocivas.

Para nuestro estudio podemos dividir las bacterias en tres grandes grupos:

- 1) Bacterias encontradas en las aguas naturales.
- 2) Bacterias encontradas en los suelos.
- 3) Bacterias de origen intestinal (aguas negras).

Las bacterias del grupo 3 son esencialmente peligrosas, y entre ellas resaltan, por su trascendencia para la salud, el grupo *B. Coli*, y las que originan las enfermedades de fiebre tifoidea, cólera, disentería, etc., y que generalmente se atribuyen a bacterias en el agua.

Uno de los grupos de bacterias que ocurren en el agua, y con relativa frecuencia es el denominado *crenothrix* o ferrobacterias encontradas principalmente en aguas que contienen materia orgánica y cantidad apreciable y aun trazas de hierro en solución. Este tipo de bacterias es precisamente una de las causas de corrosión en las redes de distribución y formación de depósitos o precipitados de hierro en mallas y filtros metálicos para pozos de agua subterránea. Además, comunican al agua un olor ferruginoso y muchas veces desagradable, pero tienen la ventaja de no ser peligrosas para la salud.

Las bacterias encontradas en el agua no se ciñen a una determinada condición de crecimiento: mientras que algunas de ellas proliferan más rápidamente a temperaturas más altas, otras lo hacen a bajas temperaturas; cierto grupo es destruido por la simple acción de la luz solar, mientras que otras prosperan bajo las mismas condiciones. Formas inferiores de vida vegetal o animal viven y se nutren de materia orgánica presente en el agua.

Las algas son plantas que contienen clorofila y otras substancias colorantes derivadas de la misma. Muchas de ellas ocurren en la superficie de aguas estancadas. Su color varía desde el azul verdoso, anaranjado, pardo, rojo o violeta. Las algas verdes o plantas microscópicas con clorofila cubren un amplio rango de formas y son usualmente coloreadas de un tinte verdoso. Casi todas las algas crecen, tanto en el verano como en el invierno, y son destruidas en ausencia de la luz solar. Las algas comunican generalmente un gusto que varía en carácter e intensidad, de acuerdo al número de organismos presentes, estado de desarrollo, etc.

Las diatomas son algas unicelulares con membrana altamente silicificada, cuyas especies se multiplican en el agua dulce o salada.

Las bacterias en general, debido a la enorme velocidad de reproducción, tienen una actividad fisiológica tan intensa, que las capacita para tomar parte en reacciones químicas, como sucede, por ejemplo, en los suelos y su presencia en el agua, además de afectar unas de ellas sus condiciones de higiene, otras intervienen en la calidad química misma del agua.

Al estudiar la importancia de la calidad química y bacteriológica del agua veremos cómo influyen las bacterias y demás organismos en sus condiciones de potabilidad.

CALIDAD QUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN COLOMBIA

El aprovechamiento del agua subterránea en Colombia se ha limitado a casos particulares y especialmente a fábricas y haciendas. Considerado como un último recurso para fines domésticos, en regiones semi-áridas o carentes de agua superficial, se ha explotado el agua por el método ya tradicional de los aljibes.

Ultimamente, y teniendo en cuenta la bondad de esta riqueza natural del subsuelo, previos estudios de carácter hidrogeológico e hidroquímico, se inicia una etapa de mayores alcances con miras a aprovechar el agua subterránea para acueductos.

Para efectos de nuestro estudio hemos escogido tres zonas o regiones del país, cuyas aguas subterráneas ofrecen perspectivas muy distintas, en lo que respecta a su calidad química. Nuestra intención es demostrar, hasta donde ello sea posible, que las formaciones geológicas, las condiciones litológicas de sus capas acuíferas, el carácter de la vegetación y el clima son factores definitivos en la calidad química y bacteriológica del agua subterránea. Estas tres regiones del país son:

- 1) Sabana de Bogotá.
- 2) Sabanas de Bolívar.
- 3) Isla de San Andrés. (Archipiélago de San Andrés y Providencia).

1) *Aguas subterráneas en la Sabana de Bogotá.*

Las aguas subterráneas en Bogotá y sus alrededores se han explotado parcialmente y por lo general en capas acuíferas de la llamada Formación Sabana de edad cuaternaria, constituida por sedimentos lacustres (relleno de la Sabana). Es asunto exclusivamente geológico entrar a demostrar cómo se llevó a cabo este relleno en el antiguo lago de la Sabana. Interesa aquí saber únicamente que el fondo está formado por arcillas abigarradas y el relleno fue causado por la acción erosiva de las olas sobre las laderas o sobre la llamada por Forel "zona del litoral", y también por la acción transportadora de los ríos, arroyos y glaciares. Resulta, pues, muy compleja e irregular la litología de estos sedimentos, pero para nuestro caso podemos describirlos así: arcillas de variados colores, arcillas ferruginosas, arenas desde muy finas hasta gruesas, gravas y cascajos, material grueso deltaico y restos vegetales en proceso de carbonización como la turba. Las formaciones rocosas que circundan la Sabana son predominantemente areniscosas y arcillosas y muy diaclasadas, con rellenos y cementaciones silíceas y ferruginosas (hidróxido de hierro).

En estos medios litológicos distintos circula y se alimenta el agua subterránea de la Sabana, y de ellos depende su calidad química.

Los análisis químicos efectuados hasta el presente en aguas procedentes de pozos perforados y aljibes no suministran el conjunto de detalles indispensables para dar una idea completa de la calidad química del agua subterránea. Pero ellos sí pueden darnos una base de discusión como para definir qué substancias predominan y la razón por la cual ellas están presentes.

Las aguas subterráneas de la Sabana de Bogotá son blandas, y sus valores fluctúan entre 14.3 p. p. m. y 89.5 p. p. m. como CaCO_3 . El carácter de dureza de las aguas lo suministran la presencia de carbonatos y bicarbonatos de calcio y de magnesio, y estas sales son incorporadas por el agua, principalmente en la presencia de formaciones calcáreas y dolomíticas que sólo afloran ocasionalmente.

El contenido de sólidos totales disueltos es muy bajo; así tenemos aguas hasta con 47 mg/l. o p. p. m., valor muy bajo si se compara con la mayoría de las aguas naturales y aun con las mismas aguas subterráneas. Experimentalmente se ha comprobado que las aguas subterráneas, cuyas capas acuíferas están constituídas por arenas y cascajos, como sucede por ejemplo en los alrededores de los cuarteles de Usaquén, el agua es muy blanda y de contenido muy bajo en sustancias disueltas. Aquí se presenta un cono de deyección compuesto de cantos rodados de arenisca, cascajos, arenas finas y de vez en cuando lentes de arcilla. Se trata, pues, de material ya consolidado y resistente al ataque químico del agua.

En cambio, en capas acuíferas predominantemente arcillosas y con cantidades menores de arenas y gravillas finas, como es el caso de todo el interior de la Sabana donde se depositaron estos sedimentos finos, el agua adquiere un grado de dureza mayor y un contenido más elevado de sustancias disueltas.

Las aguas subterráneas de la Sabana son generalmente ácidas (pH 6 a 6.8), y esta acidez se deriva del anhídrido carbónico libre y disuelto, presente casi siempre en exceso y proveniente de la atmósfera y de descomposiciones orgánicas, principalmente; también influye en la acidez la presencia de sustancias orgánicas derivadas del ácido húmico y descomposición de turba. La acidez de estas aguas y el anhídrido carbónico libre en exceso son la causa principal de su poder de corrosión, de la rápida obstrucción de filtros metálicos y tuberías de hierro.

Pero el factor más importante que afecta notoriamente la calidad química de estas aguas subterráneas es la presencia del hierro. Es casi de conocimiento común el hecho de que una agua extraída de un pozo o aljibe, dentro del área de la Sabana, sale inicialmente incolora y cristalina, pero al cabo de unas horas se torna amarillenta, opalescente y, finalmente, adquiere una apariencia fuertemente turbia. El hierro soluble en forma de bicarbonato ferroso se oxida al contacto del aire, y parte de él se precipita en forma de hidróxido férrico coloidal.

Hemos señalado ya que las formaciones rocosas de la Sabana son bastante ferruginosas (compuestos férricos y precipitaciones de compuestos hidrolizados en forma de hidróxido férrico), lo mismo que los sedimentos sueltos, principalmente arcillas, en las cuales el hierro se presenta en forma coloidal. Estos compuestos insolubles de hierro, oxidados y precipitados, se vuelven solubles después de una serie de etapas intermedias en las cuales actúan como agentes disolventes varias sustancias:

- 1) Presencia o ausencia de oxígeno y anhídrido carbónico en el agua. El hidróxido ferroso, o hierro ferroso, que es más estable que el hidróxido férrico aun en pH 7, se disuelve con bastante facilidad en el agua que contiene anhídrido carbónico, formando bicarbonato ferroso; en cambio, el hidróxido férrico es básicamente débil y, por lo tanto, las sales férricas se hidrolizan en las aguas naturales con la formación de dicho hidróxido.

2) Los compuestos férricos insolubles, que han sido arrastrados junto con los sedimentos arcillosos de la Sabana, en contacto con compuestos húmicos solubles y en un medio acuoso, se vuelven solubles merced al anhídrido carbónico desprendido durante la actividad microbiana, formándose el bicarbonato ferroso (acción de bacterias reductoras).

3) Estos compuestos férricos, en contacto con soluciones orgánicas de restos de plantas en descomposición (turba), son reducidos a compuestos ferrosos, dando sales ferrosas solubles.

Estas son las causas principales por las cuales el hierro entra en dos formas de solución: en solución simple (bicarbonato ferroso soluble) o en soluciones coloidales en compuestos húmicos coloidales.

De acuerdo con los análisis químicos efectuados hasta el presente, se ha observado que el contenido de hierro es menor en la zona del litoral o límite de la Sabana, donde predomina el material más grueso y aumenta progresivamente hacia el centro de la misma, donde los sedimentos son precisamente arcillosos y existen capas acuíferas con restos vegetales en descomposición (turbas). Por la complejidad misma de los sedimentos no es posible generalizar esta observación, pues en el mismo centro de la Sabana pueden encontrarse grandes bancos de arenas muy finas y en distancias relativamente cortas intercalarse potentes lentes de arcilla que naturalmente van a influir en el mayor o menor contenido de hierro en el agua.

Gases. Entre los gases presentes en el agua subterránea de la Sabana tenemos, entre otros, el anhídrido carbónico, ya sea de origen atmosférico, o como producto en la combustión lenta de la materia vegetal en descomposición y por la acción de los microorganismos sobre el humus.

También existen, pero en escala menor, los gases amoníaco y metano, ambos derivados de la putrefacción de restos vegetales en principio de carbonización, lo cual ha sido constatado en multitud de pozos cuyos perfiles estratigráficos indican la presencia de turba en capas acuíferas.

Teniendo en cuenta las anteriores apreciaciones sobre la calidad química de las aguas subterráneas de la Sabana de Bogotá, podemos deducir de que aquellas que contienen una excesiva cantidad de hierro no son potables y requieren para su uso, y aun para fines industriales, un tratamiento previo que consistiría en: oxidación fuerte por medio de cloro para llevar las sales solubles de hierro a forma férrica y precipitarse como hidróxido de hierro, ayudado con la adición de coagulantes como cal, luego sedimentación y finalmente filtración. (Véase esquema adjunto de lo que sería el tratamiento de estas aguas en su forma más simple para fines caseros: aireación y filtración utilizando caliza como medio filtrante).

2) *Aguas subterráneas en las Sabanas de Bolívar.*

Desafortunadamente para nuestro estudio, los datos referentes a análisis químicos efectuados en pozos de agua en los Departamentos de Bolívar y Córdoba no son suficientes, pues en zonas tan extensas como las Sabanas de Bolívar son relativamente muy pocos los pozos perforados y construidos técnicamente. Los aljibes, en cambio, son numerosos, de poca profundidad y rudimentarios.

Sin embargo, hemos seleccionado algunas poblaciones de los Departamentos de Bolívar y Córdoba que ofrecen perspectivas para el aprovechamiento de aguas subterráneas y cuya calidad está íntimamente relacionada con las formaciones geológicas presentes y las condiciones climatéricas.

Estas poblaciones son: Sincelejo, Corozal, Jan Jacinto, San Juan, Ovejas y Cereté.

Toda la región que comprende estas poblaciones pertenece a las Sabanas de Bolívar y del Sinú, influenciadas por las condiciones climatéricas del litoral, con una temperatura media de 27 a 28 grados centígrados, y con dos estaciones o estados del tiempo: seco con mediana o fuerte evaporación, según sean las condiciones del suelo y de la vegetación; y húmedo, caracterizado por fuertes y abundantes lluvias.

Estos dos estados del tiempo influyen notoriamente en el descenso o ascenso (oscilación) del nivel de aguas subterráneas, produciendo, en estratos acuíferos constituídos principalmente por formaciones rocosas o sedimentos arcillosos y calcáreos, una mayor concentración de sales en esta zona de oscilación. De allí el caso frecuente encontrado en Sincelejo y otras poblaciones, de aljibes de pocos metros de profundidad que han captado la capa acuífera más superficial y encontrado aguas duras o cargadas de sales solubles, principalmente sulfatos o cloruros.

Sincelejo. Las formaciones geológicas que se presentan en esta zona son: estratos de areniscas con intercalaciones de conglomerados y de lentes o estratos de arcilla frecuentemente muy potentes. El conjunto en general está atravesado por grietas finas que han sido rellenadas posteriormente por material calcáreo. Según las observaciones, parece que el contenido de arcilla disminuye desde Sincelejo en dirección a Corozal. Esto último es importante para la calidad química de las aguas subterráneas, pues en esta zona de Sincelejo, e inmediatamente hacia el norte, predominan las arcillas, y las areniscas mismas casi siempre tienen material arcilloso.

Las arcillas, en estos climas cálidos y en tiempos secos, se contraen enormemente bajo la influencia del fuerte calor solar y luego en épocas de lluvia absorben grandes volúmenes de agua antes de que ellas adquieran cierto grado de humedad. El agua penetra entonces por estos intersticios de la arcilla y es retornada o evaporada nuevamente al presentarse un fuerte calor del sol, pero al cabo de muchos días. El agua tiene entonces tiempo suficiente para disolver sales solubles que se encuentran en las arcillas, entre otras: ácido silícico hidratado, sales de aluminio, sulfatos de hierro, magnesio, calcio, sodio y cloruro de sodio. Al evaporarse el agua alcanzan estas sales el límite de solubilidad y, por lo tanto, se separan de la solución y se precipitan, principalmente, sulfatos, carbonatos y cloruros, quedando estas sales atrapadas en parte en las arcillas, y el resto puede llegar por percolación hasta las capas acuíferas subyacentes.

Es esta la causa principal de por qué en Sincelejo y sus alrededores las aguas subterráneas (se entiende en pozos relativamente poco profundos) están cargadas con sales, especialmente sulfatos y cloruros, entre los cuales estos últimos predominan en esta zona; así, tenemos valores que fluctúan entre 1140 mg/l. de cloruros en un pozo de 60 metros de profundidad y predominantemente arcilloso con menor cantidad de arena. En cambio en la Aguada Salitral, alimentada por agua subterránea proveniente de areniscas cuyo nivel afloró a la superficie, se encontró un valor de 159,7 mg/l. de cloruros.

La presencia de grietas en las areniscas, rellenas con material calcáreo afectan también la dureza del agua. Así tenemos, por ejemplo, el pozo Bl-93 en el Barrio San Francisco, cuyo perfil estratigráfico indica el predominio de areniscas y gravillas y menor cantidad de arcillas; dio un grado de dureza de 21.8 grados alemanes (390 p. p. m., como carbonato de calcio), explicable únicamente por la presencia de carbonato de calcio disuelto en el agua carbonatada.

Corozal. Las formaciones geológicas que se presentan en Corozal son muy semejantes a las de Sincelejo, con la diferencia de que el material arcilloso es mucho menor. Predominan las areniscas, en algunos lugares algo ferruginosas, con concreciones calcáreas, intercalaciones de arcillas, conglomerados de gravillas (litas y cuarzo), y también una red de fisuras rellenas secundariamente con carbonato de calcio precipitado.

Químicamente el agua subterránea de esta zona es mejor que la de Sincelejo. Naturalmente, hay que hacer la salvedad de que en pozos o aljibes poco profundos las aguas tienen un alto contenido de sólidos disueltos, principalmente sulfatos y cloruros, y son duras. Esto se debe, además de ser muy superficiales, a que las capas acuíferas contienen carbonato de calcio de las areniscas y también material arcilloso. Hay casos, por ejemplo, en los aljibes Bl-12 y Bl-13, que tienen 3152 y 2246 mg/l. de sólidos totales disueltos, respectivamente. En el aljibe Bl-3, en cambio, practicado sobre areniscas algo ferruginosas, el contenido de sólidos totales disminuye a un valor de 972 mg/l. y el hierro aumenta hasta 1 mg/l.

Los pozos Bl-2 y Bl-14, con 60 metros de profundidad cada uno, suministran agua con valores muy aceptables desde el punto de vista químico: dureza total, 6.52 grados alemanes (116.7 p. p. m. como carbonato de calcio); sólidos totales disueltos, 211 mg/l. en el pozo Bl-2 y en el Bl-14, dureza total, 12.1 (216.5 p. p. m., como carbonato de calcio), y sólidos totales disueltos, 150 mg/l.

Indudablemente, las aguas subterráneas de esta zona de Corozal, captadas en capas acuíferas con areniscas de grano y medio a grueso e intercalaciones de gravillas, ofrecen perspectivas favorables respecto a sus condiciones químicas de potabilidad.

Ovejas. En la zona más cercana a Ovejas vuelve el predominio de las arcillas con intercalaciones de calizas arenosas y de areniscas; en cambio, hacia el norte, esta arcilla disminuye y aumentan notoriamente las areniscas y conglomerados poco coherentes (valle de Platanalquito). Las aguas subterráneas encontradas en esta última zona responden a la naturaleza misma de los estratos acuíferos y, en consecuencia, son blandas y de condiciones químicas y físicas muy aceptables, lo que comprueba, una vez más, que la ausencia de arcillas y de material calcáreo en los estratos acuíferos favorece eficazmente la potabilidad de las aguas.

San Jacinto y San Juan. En esta zona, ocupada por las dos poblaciones y sus alrededores, el marcado predominio de las arcillas y de materiales arcillosos con intercalaciones de areniscas de espesor relativamente reducido, no favorecen, como ya hemos visto, la calidad química de las aguas subterráneas. Las arcillas contienen numerosas diseminaciones de cristales de yeso; esta sal es más soluble en presencia de aguas que contengan cloruro de sodio, y así tenemos en los análisis efectuados valores hasta

de 600 mg/l. de sulfatos y 138.4 hasta 623.9 mg/l. de cloruros. Por lo tanto, le comunican al agua un sabor algo salobre o ligeramente amargo.

Las observaciones anteriores han sido hechas con base en aljibes o pozos poco profundos. Seguramente en captaciones de agua realizadas en material cuaternario, que de acuerdo con los estudios hidrogeológicos existe en una zona intermedia entre San Jacinto y San Juan, es posible encontrar agua subterránea de calidad química aceptable.

Cereté. Esta población está localizada sobre el río Sinú. Las vegas del río dejaron sedimentos cuaternarios con evidencias de que contengan material suelto hasta incluir cascajos, especialmente en la zona de influencia del río. Las aguas subterráneas encontradas en esta zona se alimentan en parte con el agua del mismo río Sinú, infiltrada a través de un filtro natural, lo cual favorece la calidad química de estas aguas. Lo anterior está comprobado por medio de varios análisis químicos llevados a cabo en aguas de algunos aljibes; son blandas y con bajo contenido de sólidos totales disueltos. Seguramente con los pozos ya construídos, que cumplen todas las exigencias de la técnica moderna y que son utilizados para el actual acueducto de Cereté, la calidad del agua, desde el punto de vista químico, será inobjetable.

Como el caso de Cereté hay varias poblaciones en el país que han aprovechado, al menos para el consumo particular o en fábricas, estas aguas subterráneas captadas en antiguos cauces o terrazas de los ríos, cuyas capas acuíferas están constituídas especialmente por arenas y cascajos, naturalmente siempre y cuando las condiciones de carácter hidrogeológico lo permitan.

3) *Aguas subterráneas en la Isla de San Andrés.*

En el Informe número 1.167: "Aprovechamiento del depósito de agua subterránea dulce en la Isla de San Andrés", del Instituto Geológico Nacional, por W. Diezemann, se estudian ampliamente las condiciones químicas del agua subterránea de la isla, condiciones que son muy distintas a las que ya hemos señalado anteriormente; y como se trata de un estudio comparativo, según sean los diversos factores locales que influyen en la calidad química de las aguas subterráneas, citaremos algunos apartes del mencionado informe:

"El subsuelo de la Isla de San Andrés está formado exclusivamente por estratos sedimentarios y calcáreos. . ." El suelo de la Isla es bastante permeable. . . El agua lluvia eroda la superficie por acción química y mecánicas y forma cuevas irregulares. . . ; por el proceso de disolución química la caliza entra en solución en el agua formando grietas y cavernas".

"El agua lluvia dispone entonces, para su penetración al subsuelo, de fáciles medios de infiltración: grietas, dolinas, sistema tubular de las rocas, poros de material suelto en las fajas de talud o de los conos de deyección. Esta fácil infiltración da origen a un depósito de agua subterránea dulce. Por otra parte, el agua de mar penetra, por los flancos de la isla, al fondo de ésta. En tales condiciones, el agua subterránea proveniente de la infiltración de la precipitación flota sobre el agua subterránea salada, en virtud de la diferencia de pesos específicos, pues el agua de mar,

por el alto contenido de salinidad, es más densa que el agua dulce; pero entre las dos se forma una zona de mezcla normalmente muy reducida y se establece un equilibrio hidráulico”.

Según los apartes anteriores, el agua subterránea dulce de la Isla de San Andrés está influenciada por el agua de mar, ya sea directamente por medio de grandes o pequeños sistemas de grietas o cavernas, o indirectamente manteniendo un equilibrio hidrostático con el agua subterránea dulce.

Otro factor también definitivo en la calidad química de estas aguas es la presencia del carbonato de calcio, constituyente litológico principal de toda la isla.

Por lo tanto analizaremos estos dos factores para demostrar hasta qué punto influyen en la calidad química del agua subterránea.

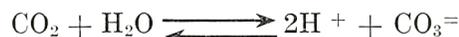
La presencia de cloruros indudablemente es un factor determinante: en el lado occidental de la isla, o sea donde está el mar abierto, varios aljibes y cavernas tienen un contenido de cloruros comprendido entre 700 mg/l. y 12425 mg/l., lo cual explica la influencia del agua de mar que no depende muchas veces de la distancia al mar, sino de los medios distintos que el agua encuentra a su paso, los cuales ofrecen mayor o menor resistencia a la entrada del agua salada.

En cambio, en los lados Noreste y Este de la isla, por ser una zona de sedimentación, donde el mar es poco profundo y por la protección del arrecife que merma considerablemente el poder de impulsión de las olas y por lo tanto reduce la capacidad de abrasión y de penetración del agua de mar, se encuentran aguas subterráneas cuyo contenido de cloruros disminuye considerablemente. Los análisis químicos realizados en esta zona indican una merma muy apreciable en el contenido de cloruros con valores aceptables que fluctúan entre 35.5 mg/l. y 347.9 mg/l., lo cual demuestra que estas aguas subterráneas no están influenciadas directamente por el agua de mar.

El carbonato de calcio influye en la calidad química del agua subterránea en la siguiente forma: la solubilidad del carbonato de calcio en el agua depende del contenido de anhídrido carbónico de la fase gaseosa en equilibrio con la fase líquida. La disolución del carbonato de calcio en equilibrio con sus iones está representada por la siguiente ecuación:



El anhídrido carbónico disuelto en el agua forma el ácido carbónico hipotético, produciendo iones en equilibrio con la parte no disociada así:



Los iones hidrógeno producidos en la disociación del ácido carbónico se combinan en gran parte con los iones carbonato para producir iones bicarbonato poco disociados:



Esta última fase de la reacción altera el equilibrio del carbonato de calcio, por lo cual se disuelven mayores cantidades de esta substancia

umentando la concentración de iones de calcio y produciendo el bicarbonato de calcio soluble. La reacción finalmente puede presentarse así:



Por lo tanto, el anhídrido carbónico libre y disuelto en el agua desempeña un papel regulador en el equilibrio total del sistema. La concentración total del anhídrido carbónico está determinada por la siguiente ecuación:

$$C_{\Sigma\text{CO}_2} = C_{\text{CO}_2} (\text{libre}) + C_{\text{HCO}_3^-} + C_{\text{CO}_3^{2-}} = C = \text{concentración.}$$

Cualquier cambio producido en la concentración del anhídrido carbónico total altera el equilibrio, produciendo un reajuste de todas las constantes de concentración.

El agua subterránea dulce de la Isla de San Andrés disuelve entonces el carbonato de calcio, produciendo bicarbonato de calcio soluble. Esta es la causa de la mediana dureza de las aguas. Así, por ejemplo, tenemos valores de dureza comprendidos entre 16.2 grados alemanes (289.9 mg/l. como carbonato de calcio) y 22.4 grados alemanes (400.9 mg/l. como carbonato de calcio).

Las aguas subterráneas que han asimilado el calcio en forma de bicarbonato pueden nuevamente redepositar carbonato de calcio al entrar en función factores físicos, químicos o biológicos. Un cambio de presión, por ejemplo, hace que el anhídrido carbónico disuelto y combinado se escape en parte a la atmósfera, eliminando del sistema el carbonato de calcio. La vida orgánica desempeña también un papel semejante: plantas acuáticas u organismos que adquieren anhídrido carbónico del agua o del bicarbonato de calcio (asimilación o respiración), pueden también precipitar carbonato de calcio. La reacción es, en estos últimos casos, así:



Estos cambios son favorables para el agua subterránea dulce de la isla, hasta tal punto de que regulan la dureza con límites completamente aceptables desde el punto de vista de potabilidad.

Resumiendo, podemos decir que las aguas subterráneas de la Isla de San Andrés, situadas en la parte oriental de ella, son, desde el punto de vista químico, aceptables para el consumo humano. Respecto a la pureza bacteriológica citaremos la parte pertinente del informe 1167:

“Debido a que el espejo de agua subterránea en la Isla de San Andrés es en general muy superficial y el agua lluvia penetra a través de grietas y dolinas, existe el peligro de contaminación bacteriológica, pues el agua, al entrar al subsuelo arrastra consigo materias mineral y orgánica desde la superficie, sin que éstas tengan filtración alguna... En estos casos es desde todo punto de vista necesario someter el agua de las captaciones a desinfección por medio de clorinación u otros medios que existen para el efecto. En esta forma se asegura la pureza bacteriológica del agua para el consumo humano”.

IMPORTANCIA DE LA CALIDAD QUÍMICA Y BACTERIOLOGICA
DEL AGUA Y CONDICIONES DE POTABILIDAD

Considerada el agua como un elemento de vital importancia en el desarrollo normal y funcional de todos los organismos superiores, la calidad química y bacteriológica de esta sustancia natural ha ocupado siempre un puesto preferencial en la preocupación del hombre por suministrar agua potable que satisfaga todas las exigencias que ella debe tener, sin detrimento para la salud de los consumidores.

Cada país ha tratado de adoptar una serie de códigos y sistemas, con variaciones secundarias pero acordes la mayoría en el aspecto substancial del problema.

Colombia, por ejemplo, en su Decreto número 1371 de 1953 (Código Sanitario Nacional) define el agua potable así:

“Agua potable es aquella que es apta para el consumo humano; libre de contaminaciones físicas, químicas y bacteriológicas”.

Da a continuación los diferentes requisitos o standars adoptados:

a) *Físicos*: Turbidez: no mayor de 10 p. p. (escala sílicea).

Color: no mayor de 20 p. p. m. (escala de cobalto).

b) *Químicos*:

Arsénico (As)	< 0.05 p. p. m.
Selenio (Se)	< 0.05
Plomo (Pb)	< 0.1
Fluoruros (F ⁻)	< 1.5
Vanadio (V)	< 1.0
Boro (B)	< 1.0
Cobre (Cu)	< 3.0
Zinc (Zn)	< 15.0
Hierro y Manganeso (Fe + Mn)	< 0.3
Magnesio (Mg)	< 125.0
Cloruros (Cl ⁻)	< 250.0
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	< 250.0
Fenoles	< 0.001
Sólidos totales	< 1.000.0
Dureza total: Según los métodos de tratamiento.	
pH	7 a 10.6

c) *Bacteriológicos*:

El agua para el consumo humano debe estar libre de bacterias patógenas. Como índice de contaminación se tomará el grupo de bacterias coliforme, y su presencia se averiguará por los métodos tipos universalmente aceptados.

Los anteriores standars son similares a los de Estados Unidos (U. S. Public Health Service Drinking water standars-1946), y también de Europa en general. Heinrich Kruse dice en su libro *Wasser* lo siguiente respecto a un agua potable:

“El agua debe ser transparente, incolora e inodora. Hasta donde sea posible, libre de gérmenes totales y principalmente B. Coli. No debe contener substancia química alguna en cantidad que perjudique la salud. Condiciones ideales de dureza, de 6 a 8 grados de dureza alemanes. Ausencia de substancias que por ebullición formen incrustaciones perjudiciales para usos domésticos o industriales. No debe tener substancias que le comuniquen un carácter corrosivo, como exceso de anhídrido carbónico libre o de hierro total”.

Las condiciones anteriores, exigidas para que una agua pueda considerarse como potable, deben entenderse como condiciones ideales, es decir, concretándonos al caso de Colombia, no en todas las regiones del país se presentan aguas abundantes superficiales o subterráneas que ofrezcan la máxima garantía de pureza con el menor costo de tratamiento. Se han dado casos muy frecuentes de aprovechar un solo recurso existente y de tolerar un amplio límite de substancias químicas disueltas, por no existir otra fuente de aprovisionamiento. En consecuencia, esos valores ideales adquieren cierta elasticidad y se convierten en valores máximos aceptables, acondicionados a las circunstancias del suministro y al efecto perjudicial que esas substancias puedan tener para la salud.

Estas substancias de carácter químico y físico son:

Dureza: La dureza está constituida por la presencia de carbonatos y bicarbonatos de calcio y de magnesio (dureza temporal) y, sulfatos y cloruros principalmente, que constituyen la dureza permanente. El grado de dureza total, o sea la suma de las durezas temporal y permanente, puede definirse así:

Grados alemanes	p. p. m. Como CaCO ₃	Carácter.
De 0 – 4	.0 – 71.6	muy blanda.
4 – 8	71.6 – 143.2	blanda.
8 – 12	143.2 – 214.8	medianamente dura.
12 – 18	214.8 – 322.2	casi dura.
18 – 30	322.2 – 537.0	dura.
sobre 30	sobre 537.	muy dura.

Las condiciones ideales de dureza serían de acuerdo con la tabla anterior 8 grados alemanes (143.2 como carbonato de calcio), pero en muchas partes del mundo existen valores muy por encima de 30 grados alemanes (537 como carbonato de calcio), que le comunican al agua un sabor peculiar sin ser desagradable. Es muy discutible que las aguas muy duras sean una de las causas de la enfermedad denominada coto o bocio (degeneración de la glándula tiroides por falta de yodo).

Cloruro de sodio: Esta sal está casi siempre presente en todas las aguas naturales; el promedio tomado por el hombre es de 15 a 20 gramos por día, mientras que la cantidad necesaria para el mantenimiento de la salud es probablemente más bajo que 4 gramos por día. Se ha considerado que hasta 1400 mg/l. de esta sal no le comunican al agua un carácter nocivo, excepto que el gusto salino es apreciado por algunos consumidores.

Otros cloruros como los de calcio y magnesio se presentan en menor frecuencia y ellos pueden incrementar en cantidad en aguas mezcladas con el agua de mar.

La presencia de *nitratos*, principalmente de sodio o de potasio, generalmente son *índice de contaminación* (aguas negras o estiércol), puesto que ellas pueden derivarse de la oxidación de la materia orgánica nitrogenada de origen animal. Estos nitratos en pequeñas dosis son medicinales (diuréticos). Se recomienda generalmente un límite máximo de 20 mg/l.; en mayores dosis pueden ser tóxicos o irritantes; la enfermedad cianosis suele presentarse especialmente en los niños en cantidad superior a 1000 mg/l.

Los *sulfatos* de sodio, potasio y magnesio, generalmente se presentan en cantidades apreciables en aguas mineralizadas y pueden servir para fines medicinales. En las aguas naturales se hallan en menor proporción, presentándose casos, sin embargo, de aguas hasta con más de 1000 mg/l. de estos sulfatos, que para ciertos organismos producen un efecto laxante. La presencia de sulfatos en cantidad de 72 mg/l. sería el caso ideal, pero este valor puede subir considerablemente (600 mg/l. sería un límite máximo aceptado), sin notorio perjuicio para la salud. Como en todos estos casos, es importante, como ya ha ocurrido en muchas partes del mundo, investigar prácticamente el efecto nocivo de ciertas sales presentes en el agua en cantidades excesivas.

Los sulfatos y bicarbonatos de calcio y de magnesio constituyen la dureza permanente y temporal de las aguas naturales. El calcio es el más abundante constituyente mineral del cuerpo humano y en adecuadas dosis es esencial en el crecimiento y en la salud (mínimo promedio diario es posiblemente 1 a 2 gramos). Las aguas duras, como es natural, contienen estas sales de calcio en mayor cantidad. No hay evidencia de que las aguas duras tengan un efecto nocivo para la salud. En cambio, las aguas excesivamente duras (superior a 30 grados alemanes o 537 mg/l. como carbonato de calcio) pueden afectar los riñones, producir dispepsia, etc., esto último sin ser una regla absolutamente general.

Puede decirse que aguas moderadamente duras son bastante aceptables para la salud y para el desarrollo físico normal. Las aguas duras pueden llegar a producir una indisposición temporal debido al cambio en carácter del agua usada, puesto que los mismos síntomas se han presentado aun en aguas blandas y muy blandas (defecto de sales minerales).

Entre los elementos metálicos quizás sean los más importantes y de mayor ocurrencia el hierro y manganeso. Ellos se presentan generalmente asociados en las aguas naturales y en cantidades reducidas. El hierro, como ya lo hemos explicado, se presenta en muchas aguas subterráneas y especialmente en las de la Sabana de Bogotá en proporción muy superior a lo normal. Este exceso de hierro en el agua es desde todo punto de vista perjudicial, no solamente por la apariencia fuertemente turbia y amarillenta que adquiere, sino también por el efecto altamente perjudicial de corrosión en tuberías, etc., debido en parte al crecimiento de bacterias del grupo ferro-bacterias. Estas bacterias tienen el poder de asimilar hierro del agua misma o de las tuberías con las cuales está en contacto. Las aguas ferruginosas invariablemente contienen este tipo de bacterias y el crecimiento de ellas da lugar, con el transcurso del tiempo, a un proceso continuo, de asimilación, oxidación, y acumulación de depósitos e incrustaciones de hi-

dróxido de hierro. Este caso se presenta en la red de distribución en el acueducto de El Centro (Barrancabermeja). La presencia de materia orgánica y de anhídrido carbónico libre en exceso son coadyuvantes en la proliferación de estas bacterias. El manganeso tiene un comportamiento similar al hierro y estas dos sustancias no deben exceder de 0.3 mg/l. en las aguas potables. Recientes investigaciones han demostrado que excesivas dosis de hierro (6.7 gramos por litro) son muy perjudiciales para los organismos infantiles.

Existen otras sustancias, pero cuya presencia es muy rara en las aguas naturales, como plomo, zinc, arsénico, vanadio, etc.; ellas pueden hallarse, en cantidades mayores que trazas, en aguas subterráneas provenientes de zonas mineras (Mine Waters), como un resultado de la acción química de las aguas sobre los minerales presentes.

Entre las sustancias gaseosas son importantes el anhídrido carbónico, oxígeno y amoníaco. Ya hemos visto el origen y algunos de los efectos del anhídrido carbónico en las aguas subterráneas. Sin embargo, es necesario anotar el efecto corrosivo y solvente del anhídrido carbónico presente en el agua, sobre ciertos metales y aleaciones principalmente hierro, acero, hierro galvanizado (Fe-Zn) y bronce, que son precisamente los constituyentes de la mayoría de las tuberías de conducción, redes de distribución, etc.

Los factores que intervienen en la corrosión son:

1) *Oxígeno*, está disuelto en variadas cantidades en la mayoría de las aguas naturales y actúa como agente oxidante formando óxidos y carbonatos básicos. Sin embargo, este gas no es la causa principal de corrosión y puede ser común tanto en aguas corrosivas como en no corrosivas; de allí que muchas veces el mismo oxígeno es introducido en el agua por aireación y el anhídrido carbónico eliminado para prevenir la corrosión. En cambio, en calderas que trabajan a alta presión, el agua de alimentación es desoxigenada por ser este gas el causante de la misma.

2) *Acidez*. Es el factor determinante de la corrosión; así tenemos aguas con valores bajos de pH que, debido a la presencia de ácido carbónico disuelto u otros ácidos, son invariablemente corrosivas.

3) *Alcalinidad*. La alcalinidad debida al bicarbonato de calcio presente en el agua relacionado al anhídrido carbónico libre en equilibrio evita la corrosión.

4) *Constituyentes minerales u orgánicos*. La corrosión es acentuada por un elevado contenido de sólidos totales disueltos y de materia orgánica.

5) Corrientes eléctricas producidas por *pares metálicos* en contacto con el agua, la descomponen produciendo hidrógeno y oxígeno naciente de alto poder de reacción.

6) Por último tenemos la acción biológica de las bacterias, principalmente ferrobacterias y sulfobacterias. Las primeras actúan en presencia del oxígeno (bacterias eróbicas) y las segundas en su ausencia (bacterias anaeróbicas o reductoras).

El gas amoníaco puede presentarse en aguas subterráneas o superficiales, originado ya sea por descomposición o putrefacción de materia vegetal, de la vida normal de animales y vegetales y de plantas acuáticas. Puede ser también un producto de la actividad microbiana y generalmente

es aceptado también, junto con otras materias nitrogenadas, como evidencia de contaminación en las aguas crudas.

APARIENCIA FISICA DEL AGUA POTABLE

El agua debe estar libre de materia visible en suspensión. Aguas con materia en suspensión no son necesariamente nocivas, pero no son puras; si a ello añadimos la presencia de algas, diatomas, pequeños crustáceos u otras formas de vida vegetal o animal, el agua adquiere entonces un aspecto desagradable.

Las aguas coloreadas son objeccionables desde todo punto de vista, y el color puede ser debido a materia vegetal o mineral disuelta, o en suspensión en forma de partículas casi microscópicas. En la misma forma podemos decir del olor y el gusto que en muchos casos son difíciles de investigar en su verdadero origen. Así, por ejemplo, un agua que tenga sabor y olor agradables debido a la presencia de algas aromáticas, ellas mismas pueden suministrar un olor a pescado, si estos organismos están en mayor abundancia. La descomposición de la materia orgánica vegetal o animal, la decadencia de plantas acuáticas, algas y otras formas de vida en abundante cantidad, suministran diversidad de olores y sabores. Estos pueden ser agradables pero nocivos, sin peculiaridad alguna, y no peligrosos, lo que es más frecuente, desagradables hasta pútridos, que dan un índice de alto grado de contaminación y consecuentemente son aguas peligrosas.

Ya hemos hablado en capítulo anterior sobre las bacterias en el agua, restando solamente adicionar algunos apartes sobre las de carácter nocivo.

Aguas potables que no contengan colibacterias son de mayor confianza para la salud de los consumidores. Aguas contaminadas pero previa y eficazmente tratadas, son potables siempre y cuando hayan sido examinadas bacteriológicamente antes y después del tratamiento. Es posible que enfermedades como la tifoidea, disentería amibiana, etc., sean producidas por agentes distintos al agua, pero hay que tener siempre presente que las aguas con cualquier grado y clase de contaminación, presencia de materia visible en suspensión, color, olor y sabor desagradables, pueden suministrar un medio de cultivo propicio para el desarrollo de toda clase de gérmenes y bacterias de origen intestinal y de otras igualmente nocivas, hasta tal punto de producir efectos fatales, que en el menor de los casos serían aislados y de fácil solución, y en otros, afectar toda una comunidad (epidemias y endemias) de consecuencias funestas. De allí la razón de la importancia definitiva en la calidad química y bacteriológica de las aguas potables.

Hemos considerado de importancia anexar al presente estudio algunas instrucciones referentes a la forma de tomar muestras de agua para análisis químicos, con el fin de que los resultados obtenidos respondan más exactamente a la realidad, pues de ellos dependen, esencialmente, la interpretación de la calidad química del agua, el sistema de tratamiento a

seguir para lograr agua potable o para usos industriales, además de ser una ayuda eficaz en la localización de cualquier grado de contaminación de las aguas crudas y tratadas. El examen bacteriológico, finalmente, suministrará los datos referentes al tipo e intensidad de la contaminación.

CARLOS I. DELGADO D.,
Hidroquímico.

BIBLIOGRAFIA

1. DIEZEMANN y DELGADO.—“Consideraciones hidrogeológicas sobre el posible abastecimiento de agua subterránea para las poblaciones de Sincelejo, Morroa, Los Palmitos, Ovejas, Carmen, San Jacinto y San Juan Nepomuceno, en el Departamento de Bolívar”. Informe número 1095 del Instituto Geológico Nacional.
2. DIEZEMANN y DELGADO.—“Aprovechamiento del depósito de agua subterránea dulce en la Isla de San Andrés”. Informe número 1167 del Instituto Geológico Nacional.
3. DIEZEMANN W.—“Aguas subterráneas en Bogotá y sus alrededores”. Informe número 707 del Instituto Geológico Nacional.
4. DIEZEMANN y LOPEZ C.—“Posibilidades para la construcción de un acueducto de agua subterránea en el Municipio de Corozal (Departamento de Bolívar)”. Informe número 883 del Instituto Geológico Nacional.
5. DIEZEMANN y LOPEZ C.—“Aprovechamiento de aguas subterráneas en los cuarteles de Montería y en las poblaciones de Garzones, Cereté, San Pelayo y Lórica (Departamento de Córdoba)”. Informe número 1018 del Instituto Geológico Nacional.
6. LINDGREN.—“Mineral Deposits”.
7. EDWIN WINDE TAYLOR.—“The Examination of Waters and Water Supplies”.
8. K. RANKAMA y TH. SAHAMA.—“Geoquímica”.
9. HEINRICH KRUSE.—“Wasser”.
10. Das Gas und Wasserfach (1951).—“Das Wasser”.
11. TRUELSEN u. SCHNEIDER.—“Die Wasserschliessung”.
12. “Standard Methods for the Examination of Water, Sewage and Industrial Wastes”.

ANEXOS

I

MANERA DE TOMAR LAS MUESTRAS DE AGUA PARA LOS ANALISIS QUIMICOS

Generalidades.

Resultados exactos de los análisis químicos se obtienen solamente cuando se toman las muestras de agua en debidas condiciones. Para cada examen se necesitan por lo menos dos litros de agua. Los recipientes deben ser de vidrio y completamente limpios, lavándose previamente con el agua a analizar y provistos con tapas de vidrio esmerilado. A falta de **tapas de vidrio**, se pueden utilizar de corcho o de caucho previamente lavadas con agua caliente y sujetándolas por medio de una cuerda al cuello de la botella.

Cada muestra de agua debe estar provista de rótulos con los siguientes datos:

1. Fecha y hora de la toma.
2. Origen de la muestra: arroyo, río, estanque, lago, manantial, represa, o dique, pozo, aljibe, cisterna, red de distribución municipal o acueducto.
3. Naturaleza del agua y sitio de la toma, por ejemplo: agua cruda bombeada a presión y en la tubería antes de filtrarse; o agua clarificada tomada después de la filtración.
4. Características de la muestra en el lugar de toma, a saber: temperatura, turbidez, color, olor, sabor, sedimento.
5. Usos del agua a analizar: agua potable, agua para lavanderías, para acondicionamiento, para calderas, usos sanitarios, etc.

Manera de tomar el agua en los grifos de las tuberías.

Se acopla en el grifo un tubo de caucho de unos 40 centímetros de longitud; antes de tomar la muestra se deja salir el agua por el tubo, aproximadamente 10 minutos. Sin interrumpir el desagüe se coloca el tubo de caucho hasta el fondo de la botella, de tal manera que ésta se llene lentamente, evitando de este modo la salida de los gases disueltos. Después de que el agua ha corrido unos 5 minutos por el cuello de la botella, se retira lentamente el tubo de caucho y enseguida se tapa evitando la formación de burbujas de aire.

Manera de tomar el agua en sitios sin grifo.

En estos casos, para tomar el agua es aconsejable emplear un embudo grande en el extremo del cual se coloca un tubo de caucho. Por lo demás, se procede exactamente como en el caso anterior.

Manera de tomar la muestra en aguas abiertas, corrientes o estancadas.

En estos casos, la botella se tapa ligeramente con un corcho amarrado con una cuerda y con un sobrepeso para sumergirla a unos 50 centímetros de profundidad. En esta profundidad se hala de la cuerda que sustenta el corcho y la botella se llena de agua; se saca entonces y una vez en la superficie, se debe tapar inmediatamente.

Manera de tomar el agua para la determinación del anhídrido carbónico corrosivo, según Heyer.

Se debe utilizar una botella de unos 200 cc. de capacidad. El procedimiento es exactamente el descrito para los casos anteriores, pero colocando antes, previo lavado de la botella, la cantidad de polvo de mármol que para estos casos se señala. La botella, una vez llena y tapada, se debe agitar varias veces. La determinación se hace después de 4 días de tomada la muestra.

II

DATOS PARA EL ANALISIS QUIMICO DEL AGUA

REMITENTE
(Oficina, firma, persona, etc.).

AGUA TOMADA EL
(Fecha y hora).

AGUA TOMADA POR
(Nombre).

MUNICIPIO

LUGAR DE TOMA
(Lago, río, arroyo, pozo (qué profundidad), etc.).

CLASE DE AGUA
(Agua cruda, agua tratada, agua de calderas, etc.).

DATOS TOMADOS EN EL CAMPO

TEMPERATURA °C

TURBIDEZ
(Por ejemplo: clara, casi transparente, débil o fuertemente opalescente, débil o fuertemente turbia, opaca, etc.).

COLOR
(Incolora, blancuzca, amarillo, verde, gris, pardo, negruzco claro u oscuro).

OLOR
(Sin olor peculiar, débil o fuertemente aromático, terroso, humedad, desagradable, fétido, materias fecales, carbonoso, pútrido, etc.).

SABOR
(Sin sabor peculiar, débil o fuertemente insípido, salado, ácido, alcalino, amargo, dulce, etc.).

SEDIMENTO
(Con o sin sedimento, caracteres físicos del sedimento, color, forma (algáceo, flucoideo, grano fino o grueso), cantidad (muy poco, poco, mucho, etc.).

¿QUE APLICACIONES VA A TENER EL AGUA?

MINISTERIO DE MINAS Y PETROLEOS
INSTITUTO GEOLOGICO NACIONAL
SECCION DE HIDROGEOLOGIA

ESQUEMA DE UNA PLANTA ELEMENTAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS CON ALTO CONTENIDO DE HIERRO

NOVIEMBRE DE 1.956

PLANCHA 1 de 1

INFORME Nº 1.205

AUTOR: CARLOS I. DELGADO D.
HIDROQUIMICO

DIB. A. CORTES POSADA
CARTOGRAFO

REVISO:

