

MINERALIZACIÓN DEL AGUA

SUSTANCIAS QUE SE ENCUENTRAN DISUELTAS EN UN AGUA NATURAL SUBTERRANEA. IONES FUNDAMENTALES Y MENORES

En un agua subterránea natural, la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Unos cuantos de estos iones se encuentran presentes casi siempre y su suma representa casi la totalidad de los iones presentes; estos son los iones fundamentales.

Estos iones fundamentales son

Aniones Cationes

Cloruro Cl^- Sodio Na^+

Sulfato SO_4^{2-} Calcio Ca^{2+}

Bicarbonato CO_3H^- Magnesio Mg^{2+}

Es frecuente que los aniones nitrato (NO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}) y el catión potasio (K^+) se consideren dentro del grupo de iones fundamentales aun cuando en general su proporción es pequeña. Otras veces se incluye además el ion ferroso (Fe^{2+}).

Entre los gases deben considerarse como fundamentales el anhídrido carbónico (CO_2) y el oxígeno disuelto (O_2), aunque no es frecuente que se analicen en aguas subterráneas.

Entre las sustancias disueltas poco ionizadas o en estado coloidal son importantes los ácidos y aniones derivados de la sílice (SiO_2).

El resto de iones y sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades notablemente más pequeñas que los anteriores y se llaman iones menores a aquellos que se encuentran habitualmente formando menos del 1% del contenido iónico total y elementos traza a aquellos que aunque presentes están por lo general en cantidades difícilmente medibles por medios químicos usuales.

Los iones menores más importantes son, además de los ya citados NO_3^- , CO_3^{2-} , K^+ y Fe^{2+} , el NO_2^- , F^- , NH_4^+ y Sr^{2+} . Suelen estar en concentraciones entre 0.01 y 10 ppm. En concentraciones entre 0.0001 y 0.1 ppm, suelen estar los iones menores:

aniones: Br^- , S^{2-} , PO_4^{3-} , BO_3H_2^- , NO_2^- , OH^- , I^- , etc.

cationes: Fe^{3+} , Mn^{2+} , NH_4^+ , H^+ , Al^{3+} , etc.

Los iones metálicos derivados del As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U, etc., a veces están en cantidades medibles, pero en general son elementos traza. El resto de posibles iones están casi siempre en cantidades menores que 0.0001 ppm.

Las aguas subterráneas llamadas dulces contienen como máximo 1000 o quizá 2000 ppm de sustancias disueltas; si el contenido es mayor, por ejemplo hasta 5000 ppm se llaman aguas salobres y hasta 40000 aguas saladas. No es raro encontrar aguas que superen los 40000 ppm de sustancias disueltas llegando a veces hasta 300000 ppm. A estas aguas se les llama salmueras y están asociadas con frecuencia a depósitos salinos, aguas de yacimientos petrolíferos o bien aguas muy antiguas situadas a gran profundidad.

CARACTERISTICAS QUIMICAS DE LOS IONES Y SUSTANCIAS DISUELTAS MAS IMPORTANTES

Aniones y sustancias aniónicas

1. ION CLORURO, Cl⁻

a) *Características químicas.* Sales en general muy solubles. Muy estable en disolución y muy difícilmente precipitable. No se oxida ni reduce en aguas naturales.

b) *Concentraciones.* Entre 10 y 250 ppm en aguas dulces. El agua de mar tiene entre 18000 y 21000 ppm. Las salmueras naturales pueden llegar a tener 220000 ppm (saturación).

c) *Nocividad y toxicidad.* Más de 300 ppm comunican sabor salado al agua de bebida, pero no es perjudicial por lo menos hasta algunos miles de ppm. Es esencial para la vida. Contenidos elevados son perjudiciales para muchas plantas y comunican corrosividad al agua.

d) *Análisis en laboratorio.* Valoración con NO_3Ag usando como indicador cromato potásico (viraje de amarillo a naranja).

e) *Análisis de campo.* Igual que en laboratorio, con bureta portátil o cuentagotas.

f) *Toma de muestras.* No se precisan precauciones especiales.

2. ION SULFATO, SO₄²⁻

a) *Características químicas.* Sales moderadamente solubles a muy solubles, excepto las de Sr (60 ppm) y de Ba (2 ppm). Es difícilmente precipitable químicamente ya que las sales solubles de Sr y Ba son muy escasas en la naturaleza, pero puede separarse de la solución por concentración si existe una evaporación importante.

b) *Concentraciones.* Entre 2 y 150 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a 5000 ppm en aguas salinas si existe Ca y hasta 200000 si está asociado a Mg y Na en ciertas salmueras. El agua del mar contiene alrededor de 3000 ppm.

c) *Nocividad y toxicidad.* Las aguas selenitosas (elevado contenido en sulfato) no quitan la sed y tienen sabor poco agradable y amargo. Por sí mismo o si va asociado a Mg o Na en cantidades importantes puede comunicar propiedades laxantes. En cantidades elevadas puede ser perjudicial a las plantas. Más de algunos centenares de ppm perjudican a la resistencia del hormigón y cemento.

d) *Análisis en laboratorio.* Puede realizarse por valoración complexométrica pero se precisa cierta práctica en determinar el punto de viraje. El método mejor es el gravimétrico pero es engorroso y largo y por eso es de uso restringido.

e) *Análisis de campo.* No realizado habitualmente, excepto por turbidimetría.

f) *Toma de muestras.* No se precisan precauciones especiales.

3. IONES BICARBONATO Y CARBONATO, CO_3H^- y CO_3^{2-}

a) *Características químicas.* Estos iones comunican alcalinidad al agua en el sentido que dan capacidad de consumo de ácido al producir una solución tampón. Se pueden precipitar con mucha facilidad como CO_3Ca .

b) *Concentraciones.* El ion bicarbonato varía entre 50 y 350 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a veces hasta 800 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 100 ppm. El ion carbonato está en concentraciones mucho menores que el ion bicarbonato y si el pH < 8.3 se le considera cero. En aguas alcalinas con pH > 8.3 puede haber cantidades importantes, hasta 50 ppm en algunas aguas naturales. El agua del mar tiene menos de 1 ppm.

c) *Nocividad y toxicidad.* No presenta problemas de toxicidad. Las aguas bicarbonatadas sódicas son malas para riego, debido a la fijación del Na en el terreno y creación de un medio alcalino.

d) *Análisis en laboratorio.* Se determinan en función de la alcalinidad del agua.

e) *Análisis de campo.* Se realiza a veces determinando la alcalinidad del agua.

f) *Toma de muestras.* Debe realizarse con cuidado para evitar la pérdida de CO_2 . Debe protegerse de cambios de temperatura y analizar lo antes posible. Las botellas deben ir bien cerradas y llenas a tope. En general los valores de CO_3H^- medidos en laboratorio son algo menores que los reales.

4. ION NITRATO, NO_3^-

a) *Características químicas.* Sales muy solubles y por lo tanto es muy difícilmente precipitable.

b) *Concentraciones.* Normalmente entre 0.1 y 10 ppm pero en aguas polucionadas puede llegar a 200 ppm y en algún caso hasta 1000 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 1 ppm o menos.

c) *Nocividad y toxicidad.* Concentraciones elevadas en agua de bebida puede producir cianosis en los niños y comunican corrosividad (oxidaciones) al agua y producen interferencias en fermentaciones.

d) *Análisis en laboratorio.* No siempre se determina pues en general es escaso y su análisis es complicado y lento. Se determina colorimétricamente a través del ácido fenildisulfónico.

e) *Análisis de campo.* No suele realizarse.

f) *Toma de muestras.* No se precisan precauciones especiales excepto quizás en aguas que contienen NH_4^+ para evitar su oxidación y que aparezca como NO_3^- .

5. SILICE, SiO_2

a) *Características químicas.* La hidroquímica del silicio no está del todo aclarada pero se cree que la mayoría de la sílice está como SiO_4H_4 , en parte disuelta y en parte coloidal, y sólo una pequeña parte está ionizada (SiO_4H_3^-) a pH normales.

b) *Concentraciones.* La mayoría de las aguas naturales tienen entre 1 y 40 ppm en SiO_2 pudiendo llegar hasta 100, en especial en aguas bicarbonatadas sódicas. En aguas muy básicas se puede llegar a 1000 ppm.

c) *Nocividad y toxicidad.* El mayor inconveniente está relacionado con su incrustabilidad en calderas y calentadores.

d) *Análisis en laboratorio.* Se suele realizar por colorimetría por el método llamado del azul de molibdeno (silicomolibdato) con un error menor del 2%. El método gravimétrico se emplea poco.

e) *Análisis de campo.* No realizado habitualmente.

f) *Toma de muestras.* Conviene evitar cambios de pH importantes, y utilizar botellas de plástico o vidrio Pirex. Los vidrios normales pueden aportar algo de sílice soluble si no se los mantiene antes uno o dos días con agua destilada.

Cationes y sustancias catiónicas

1. ION SODIO, Na^+

a) *Características químicas.* Solubilidad muy elevada y muy difícil de precipitar.

b) *Concentraciones.* Entre 1 y 150 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de ppm. El agua del mar tiene alrededor

de 10000 ppm, las salmueras naturales pueden llegar a tener 100000 ppm, siendo un límite que rara vez se sobrepasa el de 500 meq/l (= 110000 ppm).

c) *Nocividad y toxicidad.* Las aguas con concentraciones elevadas en sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la permeabilidad del suelo; son especialmente nocivas si las concentraciones de Ca y Mg son bajas.

d) *Análisis en laboratorio.* Actualmente se determina habitualmente mediante un fotómetro de llama con un error menor del 1 a 3%, pero se precisa disponer de este instrumento el cual es caro.

e) *Análisis de campo.* No se realiza.

f) *Toma de muestras.* No se precisan precauciones especiales.

2. ION POTASIO, K⁺

a) *Características químicas.* Solubilidad muy elevada y difícil de precipitar.

b) *Concentraciones.* Entre 0.1 y 10 ppm en aguas dulces. Extraordinariamente se pueden tener algunos cientos de ppm y sólo muy raramente se pueden tener algunos cientos de ppm y sólo muy raramente se puede tener salmueras de hasta 100000 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 400 ppm.

c) *Nocividad y toxicidad.* No presenta problemas especiales a las concentraciones habituales y es un elemento vital para las plantas.

d) *Análisis en laboratorio.* Actualmente se la determina con cierta frecuencia por fotometría de llama con un error menor del 3 ó 10%.

e) *Análisis de campo.* No se realiza.

f) *Toma de muestras.* No se precisan precauciones especiales.

3. ION CALCIO, Ca⁺⁺

a) *Características químicas.* Sales de moderadamente solubles a muy solubles. Es muy fácil de precipitar como CO₃Ca.

b) *Concentraciones.* Entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a 600 ppm en aguas selenitosas. El agua del mar contiene alrededor de 400 ppm. Excepcionalmente se puede tener 50000 ppm en salmueras de Cl₂Ca.

c) *Nocividad y toxicidad.* El mayor inconveniente va asociado al aporte de dureza y producción de incrustaciones.

d) *Análisis de laboratorio.* Valoración complexométrica con ácido etilendiaminotetracético (EDTA). También puede realizarse por fotometría de llama pero es poco usual.

e) *Análisis de campo*. Se realiza a veces por valoración complexométrica utilizando bureta o cuentagotas.

f) *Toma de muestras*. Evitar el escape de gases, llenando bien la botella y cerrándola. Evitar cambios de temperatura.

4. ION MAGNESIO, Mg⁺⁺

a) *Características químicas*. Propiedades similares a las del ion calcio pero más soluble y algo más difícil de precipitar.

b) *Concentraciones*. Entre 1 y 100 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a veces a algunos miles de ppm en aguas salinas o salmueras. El agua del mar contiene 1200 ppm.

c) *Nocividad y toxicidad*. Propiedades laxantes y da sabor amargo al agua de bebida si hay algunos centenares de ppm. Contribuye a la dureza del agua.

d) *Análisis en laboratorio*. Valoración complexométrica con EDTA indirecta (Mg = dureza - Ca), rara vez realizada directamente.

e) *Análisis de campo*. Se determina como dureza menos calcio.

f) *Toma de muestras*. En principio las mismas precauciones indicadas para el Ca⁺⁺.

Principales gases disueltos

1. ANHIDRIDO CARBONICO, CO₂

a) *Características químicas*. Es un gas relativamente soluble y que al hidrolizarse produce ácido carbónico parcialmente disociado.

b) *Concentraciones*. Frecuentemente se sitúa entre 1 y 30 ppm, correspondiendo los valores más bajos a aguas en contacto fácil con la atmósfera.

c) *Nocividad y toxicidad*. Las aguas con un exceso de CO₂ son agresivas y las que pierden CO₂ pueden convertirse en incrustantes. Aguas con más de 20 ppm de CO₂ libre pueden ser agresivas para el hormigón.

d) *Análisis en laboratorio*. Se determina la alcalinidad TAC y el pH.

e) *Análisis de campo*. Se realiza por cálculo si se ha determinado la alcalinidad TAC y el pH, o directamente con sosa cáustica, utilizando una bureta o cuentagotas.

f) *Toma de muestras*. Evitar el escape de gases llenando bien la botella y cerrándola. Evitar cambios de temperatura y analizar pronto.

2. OXIGENO DISUELTO, O₂

a) *Características químicas.* Produce un medio oxidante y juega un papel de gran importancia en la solubilización o insolubilización de iones que cambian con facilidad de valencia así como en la actividad de los microorganismos.

b) *Concentraciones.* La concentración a saturación del oxígeno en el agua en contacto con el aire es del orden de 10 ppm. La mayoría de las aguas subterráneas tienen entre 0 y 5 ppm, frecuentemente por debajo de 2 ppm.

c) *Nocividad y toxicidad.* El mayor problema que presenta el oxígeno disuelto en el empleo del agua es que produce corrosividad. Su ausencia puede ser origen de malos gustos.

d) *Análisis de laboratorio.* Se determina por el método de Winkler o su modificación de Alsterberg.

e) *Análisis de campo.* No se realiza habitualmente por ser engorroso excepto si se dispone de un medidor electrométrico.

f) *Toma de muestras.* Es preciso utilizar botellas especiales que permiten cerrar sin dejar gas en su interior (botella Winkler) y la muestra no debe agitarse en la toma. Analizar lo antes posible pues puede consumirse durante el almacenamiento, en especial si la iluminación es suficiente.

Aniones y sustancias aniónicas menores más importantes

1. FLUORURO, F⁻

a) *Características químicas.* Solubilidad en general limitada y al parecer contribuye ligeramente a la alcalinidad del agua pues se hidroliza ligeramente.

b) *Concentraciones.* Frecuentemente entre 0.1 y 1 ppm, pudiendo llegar a veces hasta 10 y raramente a 50 en aguas muy sódicas con muy poco Ca. El agua del mar tiene entre 0.6 y 0.7 ppm. Las aguas de zonas áridas pueden tener cantidades elevadas.

c) *Nocividad y toxicidad.* Parece jugar un papel muy importante en la conservación de la dentadura, creando problemas cuando está tanto por exceso como por defecto.

d) *Análisis.* Sólo se determina algunas veces.

2. BROMURO, Br⁻

a) *Características químicas.* Su comportamiento es similar al del ion Cl⁻.

b) *Concentraciones.* En general menos de 0.01 ppm en aguas dulces. El agua del mar tiene 65 ppm.

c) *Nocividad y toxicidad.* En las concentraciones usuales no ocasiona ningún problema.

d) *Análisis*. Rara vez se analiza.

3. IONES DERIVADOS DEL BORO

a) *Características químicas*. Contribuye algo a la alcalinidad.

b) *Concentraciones*. En general menos de 0.1 ppm pero a veces puede llegar a 10 y excepcionalmente a 30. El agua del mar contiene 4.6 ppm en B. Puede ser elvado en aguas antiguas y termales.

c) *Nocividad y toxicidad*. En pequeñas cantidades ya es nocivo para las plantas pero no en el agua de bebida.

d) *Análisis*. Se determina raras veces, excepto en aguas para riego, sospechosas de tener cantidades nocivas, en especial en zonas áridas.

4. SULFURO Y GAS SULFHIDRICO, S^{2-} y SH_2

a) *Características químicas*. El S^{2-} se hidroliza con facilidad a SH^- y SH_2 , estando en equilibrio con fase gas y el SH_2 se hidroliza a SH^- y S^{2-} .

b) *Concentraciones*. Generalmente muy por debajo de 1 ppm, aunque en aguas de medios muy reductores con reducción de sulfato, se puede llegar a veces hasta a 100 ppm. Extraordinariamente el contenido en SH_2 puede llegar a 1000 ppm en aguas relacionadas con yacimientos de petróleo.

c) *Nocividad y toxicidad*. Comunica muy mal olor, fácilmente detectable incluso a 1 ppm o menos. Es corrosivo, en especial para aleaciones de Cu.

d) *Análisis*. Se determina oxidando con un exceso de iodo que pasa a I^- .

5. FOSFATO, PO_4^{-3}

a) *Características químicas*. Aunque presente sales solubles, la mayoría lo son muy poco. Se hidroliza con facilidad y contribuye a la alcalinidad del agua.

b) *Concentraciones*. En general entre 0.01 y 1 ppm pudiendo llegar a 10 ppm y excepcionalmente a 50.

c) *Nocividad y toxicidad*. En las concentraciones usuales, no origina problemas.

d) *Análisis*. No es frecuente determinarlo. Se determina colorimétricamente, con buena precisión.

Cationes y sustancias catiónicas menores más importantes

1. ION MANGANESO, Mn^{++}

- a) *Características químicas.* El manganeso tiene un comportamiento similar al Fe.
- b) *Concentraciones.* En general por debajo de 0.2 ppm, rara vez por encima de 1 ppm. Es más abundante en aguas ácidas.
- c) *Nocividad y toxicidad.* Al oxidarse forma manchas negruzcas y favorece el crecimiento de ciertas bacterias.
- d) *Análisis.* Se le determina sólo cuando se sospecha su existencia.

2. ION AMONIO Y AMONIACO DISUELTO, NH_4^+ y NH_3

- a) *Características químicas.* Son oxidados con gran facilidad y son fácilmente retenidos por el terreno por cambio de bases.
- b) *Concentraciones.* En general menos de 0.1 ppm pero en casos muy excepcionales puede llegar a 400 ppm. El agua del mar tiene entre 0.005 y 0.05 ppm, a veces hasta 0.35
- c) *Nocividad y toxicidad.* En las concentraciones usuales no es origen de problemas pero a concentraciones mayores puede llegar a dar olor amoniacal. Suele ser índice de contaminación.
- d) *Análisis.* Se determina por el método de Nessler.

3. ION ESTRONCIO, Sr^{++}

- a) *Características químicas.* Es similar al Ca pero sus sales son menos solubles.
- b) *Concentraciones.* En general entre 0.01 y 1 ppm, a veces hasta 20. El agua marina tiene 13 ppm. Algunas salmueras pueden llegar a tener, extraordinariamente 1000 ppm.
- c) *Nocividad y toxicidad.* En las bajas concentraciones normales no es nocivo ni molesto.
- d) *Análisis.* Se le determina por fotometría de llama, pero se hace pocas veces.

4. ION LITIO, Li^+

- a) *Características químicas.* Sales muy solubles y es poco retenido por el terreno.
- b) *Concentraciones.* Entre 0.001 y 0.5 ppm, a veces hasta 1 ppm pudiendo llegar en algunas salmueras hasta 10 ppm.
- c) *Nocividad y toxicidad.* En las bajas concentraciones usuales no es nocivo ni crea problemas.
- d) *Análisis.* Se le determina por espectrometría de absorción atómica y con menos precisión por fotometría de llama, pero se hace pocas veces.

5. IONES DERIVADOS DEL ALUMINIO (ALUMINA, Al_2O_3)

- a) *Características químicas.* El aluminio es muy difícil de poner en solución y queda fuertemente retenido en las arcillas.
- b) *Concentraciones.* En general entre 0.005 y 0.3 ppm pudiendo llegar muy extraordinariamente a 100 ppm en aguas muy ácidas.
- c) *Nocividad y toxicidad.* No presenta problemas especiales.
- d) *Análisis.* Rara vez se determina y su análisis es complicado.

En las aguas dulces las sales minerales más abundantes son los carbonatos, los sulfatos y los cloruros. Los cationes de mayor importancia son el calcio (64%), el magnesio (17%), el sodio (16%) y el potasio (3%).

El calcio juega un papel fundamental, ya que determina dos diferentes tipos de agua: **aguas duras**, cuando la concentración de calcio es inferior a 25 mg por litro; **aguas blandas**, cuando la concentración de calcio es inferior a 9 mg por litro.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica es la capacidad de un agua para conducir electricidad; se mide como la conductividad que existe entre dos electrodos paralelos de 1 cm² de superficie cada uno y separados 1 cm situados en el seno del agua a medir de forma que el medio se pueda considerar infinito.

Se expresa en microsiemens /cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

$1\mu\text{S}/\text{cm} = 10^{-6} \text{ S}/\text{cm}$

Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Mineralización:

Menor de 100 Muy débil

100 - 200 Débil

200 - 700 Media

700 a 1000 Importante

Más de 1000 Excesiva

Fuente: M. Espigares García, M. Fernández – Creuhet Navajas. Estudio Sanitario del Agua. 1995.

DUREZA

Se define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio expresadas ambas en miligramos por litro de carbonato cálcico (mg/L). Para calcular la dureza a partir de las concentraciones de calcio y magnesio, debemos convertir primero estas concentraciones a miliequivalentes por litro (meq/L). Esta conversión en términos de concentración permite considerar juntos al calcio y al magnesio.

