INDICE

Prólogo..... 19

Tema 1

CALIDAD Y PROPIEDADES DEL AGUA

Vicenta Muñoz Andrés-Esther Asedegbega Nieto

Introducción..... 27

1. Tipos de aguas por su composición y origen..... 28
   1.1. Agua atmosférica..... 29
   1.2. Aguas continentales..... 29
      1.2.1. Agua superficial..... 30
      1.2.2. Agua subterránea..... 31
   1.3. Compuestos inorgánicos en el agua superficial..... 33

2. Propiedades del agua..... 37
   2.1. Propiedades ácido base..... 37
      2.1.1. Sistema bicarbonato-carbonato..... 38
   2.2. Reacciones de precipitación..... 43
      2.2.1. Dureza del agua. Precipitación-Solubilidad de carbonato cálcico..... 43

2.2.2. Carbonato cálcico disuelto a saturación en agua destilada…… 44
2.2.3. Carbonato cálcico disuelto a saturación en agua destilada en contacto con la atmósfera…….. 47
2.2.4. Estabilidad del agua frente a la formación de precipitados…… 49
2.2.5. *Eliminación de la dureza del agua. Reacciones de precipitación*…… 51
2.2.6. Aplicación…….. 55
2.3. Acciones debidas a cationes de Al, Fe, Mn y sus compuestos hidroxilados…… 60
2.3.1. Acción de los hidróxidos de aluminio y hierro en la remoción de coloides…… 68
2.3.2. Solubilidad de los cationes de hierro en presencia de carbonatos…… 68
2.3.3. Actividad del catión Mn (II)…… 70
2.4. Propiedades redox. Oxidación-reducción del agua y de compuestos disueltos en agua…… 71
2.4.1. Oxidación-reducción de hierro (II-III)…… 75
2.4.2. Solubilidad del hierro (II),(III) en condiciones aerobias y anaerobias…… 77
2.4.3. Oxidación reducción de Mn (II-IV)…….. 79
2.4.4. Presencia de H_2S en el agua…… 80
2.4.5. Compuestos nitrogenados……... 81
2.5. Reacciones de complejación, fotoquímicas y de hidrólisis.. 82
2.5.1. Procesos de complejación…… 82
2.5.2. Reacciones fotoquímicas…… 84
2.5.3. Reacciones de hidrólisis……... 88
2.6. Reacciones de biodegradación en medio acuoso…… 89

3. Medio marino…….. 90
3.1. Propiedades del medio marino…… 91
3.2. Compuestos inorgánicos y orgánicos presentes…….. 94
3.3. Gases disueltos…… 95
3.4. Presencia de N_2, y de la pareja de gases CO_2-O_2 Implicciones en la actividad biológica…… 97

Apéndice Reacciones de oxidación-reducción…… 100

Ejercicios de autoevaluación…… 105

Tema 2

TRATAMIENTO DE LAS CORRIENTES DE AGUA

Vicenta Muñoz Andrés-Esther Asedegbega Nieto

Introducción…….. 111

1 Calidad de las aguas……. 111
1.1. Tratamiento de aguas para consumo urbano…….. 113

2. Depuración de aguas residuales de origen urbano……. 114
2.1. Pretratamiento……. 115
2.2. Tratamiento primario…… 115
2.3. Tratamiento secundario, biológico…… 117
2.3.1. Degradación biológica aerobia……... 118
2.3.2. Degradación biológica anaerobia…….. 123
2.4. Instalaciones para el tratamiento biológico aerobio……. 127
2.5. Consideraciones de diseño en un reactor biológico aerobio de fangos……... 132
2.5.1.Consideraciones cinéticas…… 132
2.5.2. Diseño. Reactor de mezcla total con recirculación de fangos……. 135
2.5.3. Consideraciones de diseño y mantenimiento de reactores de mezcla total basadas en la experiencia de la vida activa de EDARs……... 137
2.5.4. Consideraciones de diseño en un reactor de carrusel…. 142
2.5.5. Instalaciones para el tratamiento biológico anaerobio.. 143
2.6. Eliminación de compuestos de nitrógeno y fosforo……... 146

3. Tratamiento de lodos…….. 151
3.1. Espesado estabilización y/o deshidratación del fango……... 152
3.2. Compostaje……... 154
3.3. Secado de lodo……. 159
3.3.1. Cinética de secado de lodo……... 161
3.3.2. Diseño de horno de secado y requerimiento energético. 164
3.4. Aprovechamiento del fango seco…… 168
3.4.1. Procesos a alta temperatura…… 169
3.4.2. Otros procesos de valorización del fango…… 173

4. Tratamientos terciarios..... 173
4.1. Eliminación de material orgánico no biodegradable..... 174
4.2. Eliminación de material inorgánico soluble..... 175
4.2.1. Resinas Cambiadoras de iones..... 175
4.2.2. Procesos utilizando membranas..... 179
4.3. Desinfección del agua..... 182
4.3.1. Cloración..... 182
4.3.2. Ozonización..... 184

5. Tratamiento de aguas residuales industriales..... 185

ANEXO. Conceptos básicos de la Operación de Secado..... 189

Ejercicios de autoevaluación..... 193

Tema 3

GESTIÓN DE AGUAS

Vicenta Muñoz Andrés

1. Gestión del agua..... 197
1.1. Ciclo hidrológico global..... 200
1.2. Ciclo hidrológico de cuenca..... 202

2. Balance hidrológico de cuenca..... 204
2.1. Consumo..... 204
2.2. Entradas-Salidas. Recursos hídricos..... 208

3. Captación de agua de lluvia..... 210
3.1. Elementos de recogida..... 210
3.2. Captación del agua de lluvia en redes urbanas..... 212
3.3. Gestión del agua de lluvia en zonas urbanas..... 216

4. Almacenamiento de agua..... 217
4.1. Acuíferos como elementos de almacenamiento y transporte..... 217
4.1.1. Características físicas de los acuíferos..... 221
4.1.2. Pozos..... 224

4.1.3. Rendimiento del acuífero..... 231
4.1.4. Recarga de acuíferos..... 233
4.2. Embalses y presas..... 236
4.2.1. Almacenamiento en presas..... 239
4.2.2 Almacenamiento en canales. Onda de perturbación..... 242

5. Precipitaciones..... 245
5.1. Características..... 245
5.1.1. Intensidad..... 246
5.1.2. Escorrentía superficial..... 248
5.2. Cuencas. Hidrograma de cuenca..... 249
5.2.1. Hidrograma del canal de salida de una cuenca..... 250
5.2.2. Hidrograma unitario HU..... 253
5.2.3. Construcción de hidrogramas a partir del HU..... 260

6. Masas de agua incorporadas al consumo..... 268
6.1.Tratamiento y reutilización de aguas de procedencia industrial y de procedencia urbana..... 268
6.1.1. Uso para riego..... 270
6.1.2. Reutilización industrial del agua depurada. Aguas de refrigeración..... 272

7. Incorporación de masas de agua obtenidas por desalación. Técnicas..... 274
7.1. Procesos de destilación..... 274
7.2. Procesos de cristalización..... 277
7.3. Procesos de electrodiálisis..... 277
7.4. Proceso de ósmosis inversa..... 278
7.4.1. Flujos a través de la membrana..... 280
7.4.2. Parámetros del proceso..... 281
7.4.3. Pretratamiento..... 285
7.4.4. Acondicionamiento del agua desalada..... 286
7.4.5. Aspectos económicos. Coste del agua..... 287
7.4.6. Problemática en la toma de aguas y en la emisión de salmueras..... 288
7.4.7. Desalación de agua en España..... 293

8. Trasvases..... 296
8.1. Consideraciones..... 296
8.2. Algo de historia..... 301

8.3. Trasvases en España..... 303

Anexo I. Comportamiento de precipitaciones intensas y puntuales. Olas de inundación..... 306
Anexo II. Hidrogramas sintéticos..... 309

Ejercicios de autoevaluación..... 313

Tema 4

SUELO. FORMACION. CONSTITUYENTES. PROPIEDADES

Vicenta Muñoz Andrés-María Pérez Cadenas

1. Suelo. Horizontes..... 319

2. Formación del suelo..... 320
2.1. Factores que intervienen..... 320
2.2. Procesos de formación del suelo..... 322

3. Erosión y degradación del suelo..... 323
3.1 Factores de la erosión..... 324
3.1.1. Erosión del suelo por el agua..... 325
3.1.2. Erosión del suelo por el viento..... 327
3.1.3. Erosión glacial..... 329
3.1.4. Erosión biológica..... 329
3.1.5. Erosión antrópica..... 330
3.2. Modelos para predecir la pérdida de suelo..... 331

4. Fases del suelo. Constituyentes..... 333
4.1. Minerales..... 334
4.1.1. Silicatos..... 336
4.1.2. Alúmino silicatos..... 339
4.2. Materia orgánica..... 346
4.3. Agua edáfica..... 348
4.4. Nutrientes..... 353
4.4.1. Ciclo del nitrógeno..... 355
4.4.2. Ciclo del fósforo..... 357

4.5. Aire edáfico..... 361

5. Propiedades físicas del suelo..... 362
5.1. Granulometría. Tamaño de partícula, distribución..... 362
5.2. Textura..... 364
5.3. Flujo de aire y agua en el suelo..... 368

6. Interacción fase mineral–fase acuosa..... 369
6.1. Coloides. Potencial zeta..... 370
6.2. Fenómenos interfásicos en el suelo. Adsorción, naturaleza, propiedades, consecuencias..... 376
6.3. Isotermas de adsorción..... 377
6.4. Diversos procesos de adsorción en los suelos..... 379
6.5. Reparto entre fases..... 382
6.6. Intercambio iónico..... 385

Ejercicios de autoevaluación..... 389

Tema5

CONTAMINACIÓN DEL SUELO ORIGEN E INCIDENCIA

Vicenta Muñoz Andrés-María Pérez Cadenas

Introducción..... 395

1. Contaminantes inorgánicos: metales..... 395
1.1. Fenómenos de movilidad-retención..... 396

2. Contaminantes orgánicos..... 399
2.1. Fenómenos de movilidad-retención..... 401
2.2. Fenómenos de degradación de la materia orgánica..... 402

3. Características de acidez-alcalinidad del suelo..... 405
3.1. Acidez–basicidad del suelo. Medida..... 405
3.2. Intercambio catiónico e intercambio aniónico en el suelo.. 406
3.3. Sucesos que afectan a la acidez del suelo..... 409
3.4. Consecuencias de la acidez de un suelo..... 413

3.5. Tratamiento a suelos ácidos…… 413

4. Degradación del suelo por acumulación de sales…… 414
4.1. Causas de la salinidad y consecuencias……... 414
4.2. Medida de la salinidad…… 416
4.3. Acción sobre los suelos salinos…….. 418

Ejercicios de autoevaluación…….. 420

Tema6

REMEDIACIÓN DE SUELOS. El TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS

Vicenta Muñoz Andrés- Jesús Álvarez Rodríguez

Introducción…….. 425

2. Control de suelos contaminados: confinamiento y sellado……... 428
2.1. Aislamiento……... 429
2.2. Sellado por estabilización…… 432
2.3.Sellado por solidificación……... 432
2.4. Sellado por vitrificación…… 434

3. Movilización y tratamiento de suelos por electroremediación…. 435
3.1. Descripción……... 435
3.2. Fundamentos……... 438
3.2.1. Electromigración…….. 438
3.2.2. Electroósmosis…….. 439
3.2.3. Difusión……... 440
3.2.4. Electroforesis…….…… 441
3.2.5. Flujo total……... 441
3.3. Reacciones en los electrodos…… 441
3.4. Consideraciones de diseño…… 443

4. Procesos térmicos de eliminación……... 444

5. Tratamientos químicos del suelo……. 449

6.Tratamiento de suelos por extracción……. 452

6.1. Aireación…….. 452
6.2. Arrastre…….. 452
6.2.1. Equilibrio entre fases en los procesos de arrastre de compuestos orgánicos mediante corriente de aire…… 453
6.3. Succión…….. 456
6.4. Inyección de aire a presión……... 459
6.5. Inyección de vapor……... 460
6.5.1. Equilibrio entre fases en los procesos de arrastre de compuestos orgánicos mediante corriente de vapor de agua.. 462
6.6. Lavado……... 463

7. Tratamientos biológicos de recuperación de suelos…… 476
7.1. Biorremediación……. 476
7.1.1 Acción de microorganismos, sobre compuestos orgánicos…… 477
7.1.2. Acción de microorganismos sobre metales, movilizar e inmovilizar…… 479
7.2. Técnicas de bioremediación……. 484
7.2.1. Bioventing…….. 484
7.2.2. Biosparging…… 485
7.2.3. Landfarming…….. 485
7.2.4. Biopilas…….. 486
7.2.5. Compostaje…… 487
7.2.6. Biorreactores de lodos…….. 488
7.3. Fitorremediación de suelos contaminados…….. 488
7.3.1. *Fitoestabilización*…… 490
7.3.2. *Fitoextracción-fitoacumulación*…….. 491
7.3.3. *Rizofiltración*…… 491
7.3.4. *Fitodegradación*…… 492
7.3.5. *Fitovolatilización*…… 492

Ejercicios de autoevaluación……. 493

GLOSARIO…… 495

BIBLIOGRAFÍA……. 503

SOLUCIONARIO……... 507

TEMA 1

CALIDAD Y PROPIEDADES DEL AGUA

Vicenta Muñoz Andrés

Esther Asedegbega Nieto

INTRODUCCIÓN

El agua se encuentra en múltiples lugares: en la atmósfera, en las gotas de lluvia, en el mar, en lagos y ríos, en corrientes subterráneas, en el suelo, cristalizada en minerales o formando parte de seres vivos. En raras ocasiones se haya agua completamente pura. Las sustancias que le acompañan dependen del lugar geográfico donde se encuentra: el agua de mar tiene una gran concentración en sales, y el agua de los glaciares contiene la menor cantidad de sustancias extrañas.

Las propiedades del agua provienen de su estructura. Los dos átomos de hidrógeno y el átomo de oxígeno se unen de acuerdo a una hibridación sp^3, formando un ángulo de 104,5 grados, ligeramente inferior a 109,5° correspondiente a la geometría del enlace modelo. La distancia entre H—O es de 0,1 nm. La molécula es fuertemente polar (cada hidrógeno δ +0,41, el oxígeno δ –0,82) con un momento bipolar de 1,85 D y por ello cada átomo de hidrógeno de una molécula tiene la posibilidad de interaccionar con un átomo de oxígeno de otra diferente -lo que se ha dado en llamar puentes de hidrógeno-. La distancia del enlace O-H en una molécula es de 0,096 nm, entre el oxígeno y el hidrógeno enlazados por el puente de hidrógeno es de 0,17 nm, y la distancia entre los oxígenos de dos moléculas de agua unidas por puentes de hidrógeno es de 0,27 nm. Ello provoca que su estado a temperatura ambiente sea líquido, en cambio moléculas semejantes como H_2S, NH_3, CH_4 se hallan en fase gas en las mismas condiciones ambientales. Es especialmente importante el hecho de que su densidad, que está muy influenciada por la temperatura, presenta un máximo a 3,98°C, la cual es superior a la densidad en su estado sólido. Esto permite que en el fondo de ríos y lagos la temperatura del agua sea superior a la temperatura de la capa externa helada, lo que, además de facilitar el deshielo, permite conservar la vida en el periodo invernal.

Las entalpias de fusión y vaporización, así como el calor específico, son elevados, lo que hace que actúe como un regulador térmico:

reservorio de frío en las zonas heladas, y atempere cambios de temperatura. El mar, por tener una masa elevada, modifica lentamente y en pocos grados su temperatura en una localización determinada. Otras propiedades físicas presentan valores anómalos respecto a compuestos que deberían ser afines. Esto se observa en la constante dieléctrica, que, debido a la polaridad de la molécula, le confiere propiedades de disolvente o en la viscosidad que es baja, lo que facilita la sedimentación de partículas y el desplazamiento de organismos en su seno. Asimismo, el movimiento de pequeños insectos sobre su superficie viene propiciado por la alta tensión superficial, que influye a su vez en la formación de gotas.

Las reacciones químicas del agua provienen de su capacidad de actuar como ácido y como base, como oxidante y como reductor, dependiendo del medio puede intervenir como disolvente e incluso como agente dispersante de coloides, como agente acomplejante y como soporte de procesos fotoquímicos; la propiedad más importante está en relación con el mantenimiento de la vida y es su intervención como transportador de oxígeno (y CO_2) en el medio acuático.

El agua tiene unas características organolépticas: color, turbidez, sabor, temperatura, olor, que resultan modificadas por pequeñas cantidades de sustancias presentes. El agua para consumo requiere poseer las propiedades organolépticas adecuadas, mantener las sustancias que la acompañan en ciertos límites regulados por la legislación vigente y carecer de actividad patógena. De todo ello es sumamente cuidadosa la normativa vigente.

1. TIPOS DE AGUAS POR SU COMPOSICIÓN Y ORIGEN

Se puede reunir en tres grandes grupos los diferentes tipos de aguas, cada uno de ellos con composición y características peculiares que le confieren propiedades diferentes: agua atmosférica, agua continental, y medio marino.

1.1. Agua atmosférica

El agua en fase vapor, que se halla en la atmósfera, puede pasar a estado líquido en forma de diminutas gotas que forman un aerosol en el aire. La formación de gotas está favorecida por la presencia de partículas sólidas que proceden de la erosión del suelo, de emisiones antropogénicas, de emisiones volcánicas o de sales marinas expulsadas. El tamaño de las gotas (10-50 μm) hace que posean una gran superficie en relación con el volumen total de agua suspendida, lo que facilita el intercambio de sustancias, en primer lugar, la disolución de los gases atmosféricos -N_2, O_2, CO_2- y de otros que pueden estar presentes. Son importantes los óxidos de nitrógeno y de azufre, procedentes principalmente de combustiones, que aportan acidez al agua, y también otros ocasionales como HCl o NH_3. Las partículas sólidas, frecuentemente son de naturaleza calcárea, silícica y principalmente arcillosa.

Las primitivas gotas de agua tienden a crecer hasta llegar a un tamaño aproximado de 1 mm, ya transformadas en gotas de lluvia, al caer arrastran o disuelven las sustancias presentes, con ello su concentración de minerales aumenta y tanto más en zonas próximas a la costa y a núcleos urbanos. Los óxidos de nitrógeno y azufre se disuelven y acidifican el agua, pueden pasar a grados superiores de oxidación y constituyen los ácidos nítrico y sulfúrico constituyentes principales de la lluvia ácida. Si las gotas o la niebla ácida alcanzan una zona en cuya atmosfera hay presente NH_3, se forman aerosoles persistentes de $(NH_4)_2SO_4$ y NH_4NO_3.

1.2. Aguas continentales

Se entiende por tales a las masas de aguas estáticas y corrientes del interior y costeras hasta el límite territorial en contacto con el mar. Se distinguen entre las superficiales y las subterráneas.

1.2.1. Agua superficial

La composición del agua superficial es muy variada y diferente dependiendo de la situación geográfica: difiere en lagos alimentados por hielos y aguas de montaña, alimentados por ríos o alimentados por aguas subterráneas. En los ríos depende del tramo: en el nacimiento, donde su velocidad es elevada, la erosión y el arrastre de elementos de tamaño considerable es importante; en el tramo medio reúne junto a las partículas que transporta las que recibe de otros afluentes, moltura las partículas arrastradas, y se produce la disolución y suspensión de materiales; en la zona final se observa mayor sedimentación de materiales finos debido al descenso de la velocidad, y es frecuente el curso del río menos lineal, en meandros. Por último, en la desembocadura se produce una interrelación con el agua de mar de propiedades muy diferentes al agua de río, ésta, dulce, con material arcilloso y orgánico suspendido y de menor densidad, se pone en contacto con agua de alta concentración de sales y muy densa. Ambas aguas no se mezclan de inmediato, pudiendo haber dos lenguas de agua, dulce en superficie y de agua salada en profundidad, que coexisten en un tramo, e incluso puede que el último tramo sea únicamente de agua salada (las rías). Si la corriente fluvial arrastra una alta cantidad de coloides, la alta concentración de sales puede provocar la precipitación de dichos coloides que, en función del caudal del río y de la intensidad de las corrientes litorales marinas, pueden ser o no arrastrados provocando desembocaduras muy diferentes (rías gallegas, estuario de Lisboa, delta del Ebro).

La cantidad de minerales que transporta una corriente superficial depende de la naturaleza del terreno donde se produce la escorrentía -mayor o menor pendiente, más o menos permeable-; de la estación del año, propia de precipitaciones o de evaporación. Los minerales que contiene pueden estar en suspensión, como coloides o solubilizados (las sales solubilizadas dan lugar a los iones carbonato, bicarbonato, sulfato, cloruro, sodio, potasio, calcio, magnesio, aluminio, manganeso, hierro).

Además, hay una serie de compuestos orgánicos en la corriente debidos a la propia vida que mantienen los ríos, al arrastre de restos

agrícolas, de pesticidas, por deposición atmosférica, y por vertidos urbanos (industriales).

La concentración de oxígeno (y CO_2) que mantiene un agua natural depende de la temperatura, de la superficie en contacto con el aire y de la turbulencia de la corriente que altera la relación superficie interfásica aire-agua/volumen de la masa de agua. Esto es singularmente importante en lagos, de relación área/volumen baja, aireados únicamente por acción del viento. Por el contrario, el agua está muy oxigenada en los rápidos en los que se aumenta la aireación. Para provocar aireación se introducen obstáculos en los cauces normales como un represado que obliga a un pequeño salto en el flujo del agua. Hay que tener en cuenta la difusibilidad de los gases: flujo molecular de un compuesto en una fase debido a un gradiente de concentración de dicho compuesto en la fase. El oxígeno, como cualquier otro gas, difunde peor en el agua que en el aire, y el coeficiente de difusión depende de la turbulencia, el cual es mayor en los ríos y menor en los lagos. De acuerdo con la ley segunda de Fick:

$$\frac{dC}{dt} = D\frac{dC^2}{dL^2} \qquad [1.1]$$

El oxígeno es consumido por diversos vegetales y animales acuáticos, y por bacterias en la degradación de materia orgánica. La mayor o menor presencia, e incluso ausencia de O_2, modifica el potencial red-ox del agua; cuanto mayor sea la vida animal y vegetal en el agua, mayor requerimiento de oxígeno existe. Únicamente la fotosíntesis de algas u otros vegetales reduce el CO_2 y proporciona oxígeno, lo que ocurre sólo en la zona en la que penetra la luz. De nuevo los lagos, por tener una relación área superficial/ profundidad menor que los ríos, tienen menor posibilidad de vida aerobia y pueden contener bacterias anaerobias.

1.2.2. Agua subterránea

En cuanto al agua que se infiltra en el suelo, parte permanece incorporada al medio edáfico y parte se infiltra hasta alcanzar un soporte impermeable; ésta última es la capa de saturación en la que el

agua rellena los poros. La zona de infiltración donde aire y agua comparten los poros se denomina zona vadosa, y el límite superior de la zona saturada es el nivel freático. El agua en el transcurso de su viaje hacia zonas impermeables recoge las sustancias solubles o coloides y arrastra otras de carácter tanto mineral como orgánico.

El número de elementos, generalmente en estado iónico, que pueden contener las aguas de acuífero es elevado, pero en concentraciones importantes se contabilizan: Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} y K^{+}, como cationes y como aniones: HCO_3^-, CO_3^{2-}, Cl^-, SO_4^{2-} y NO_3^-. Sus concentraciones dependen del agua de infiltración y de la interacción con las rocas, así en terrenos yesíferos abunda el ion sulfato, en terrenos calizos el ion bicarbonato y el ion calcio, y en terrenos con infiltración de aguas de mar cloruros y sodio. El ion nitrato frecuentemente se halla en cantidades importantes, que pueden considerarse contaminantes, debido al aporte de fertilizantes usados en exceso en prácticas agrarias. La presencia de ion nitrito es indicativo de contaminación orgánica.

Otros elementos a tener en cuenta son los cationes de aluminio, manganeso y hierro cuando se hallan en exceso, y en especial la presencia de arsénico.

Respecto a los gases disueltos, fijamos la atención en CO_2 y O_2. Ambos se introducen disueltos en el agua de escorrentía. El CO_2 puede aumentar su concentración a niveles de saturación por disolución de rocas y por la degradación de materia orgánica. El oxígeno se consume en reacciones red-ox y en actividad microbiológica, y su concentración puede ser muy variable -en acuíferos libres puede mantenerse elevada, en acuíferos confinados puede reducirse y dar lugar a ambientes anóxicos, con la correspondiente reducción de nitratos y sulfatos y la presencia de cationes en estado reducido-.

En la zona saturada el agua puede moverse a una velocidad lenta de unos metros al día. La velocidad depende del gradiente de altura hidráulica o carga de presión, y de la conductividad. Esta última viene influenciada por el tamaño de partículas del sedimento y, en especial, por el mezclado de partículas pequeñas (arcillas) con partículas grandes (arenas), ya que las pequeñas taponan el hueco dejado entre partículas grandes. Si la porosidad efectiva -volumen de poros

interconectados/volumen de sedimentos- es baja la velocidad será mayor porque el área a atravesar es menor.

Se insistirá en la composición de las sustancias que acompañan al agua al tratar sobre sus propiedades.

1.3. Compuestos inorgánicos en el agua superficial

De los compuestos solubilizados los más abundantes son compuestos inorgánicos, en especial aniones y cationes, que provienen del suelo y se hallan en mayor o menor cantidad en función de la disponibilidad en el suelo próximo y de la solubilidad de los mismos. Se puede distinguir entre iones mayoritarios y minoritarios y, además, habría que considerar los elementos traza.

Se describen a continuación algunos iones mayoritarios.

Calcio, es la causa principal de la dureza del agua (la dureza debida a calcio y magnesio se mide en mg equivalentes de $CaCO_3$ por litro); este catión está asociado principalmente a los iones carbonato-bicarbonato y entra en la constitución de rocas ígneas: plagioclasa, piroxenos, anfíboles, en rocas sedimentarias: calcita, aragonito, dolomita, yeso y anhidrita, y en arcillas como la montmorillonita; existe en todo tipo de suelos, salvo en los formados estrictamente por sílice como el cuarzo y sedimentos de diatomeas. Es un catión de cambio, es decir, puede intercambiarse con otros cationes en la interrelación suelo-agua y, por tamaño y carga, tiende a expulsar a otros cationes de los sitios de adsorción como los alcalinos.

Magnesio (asociado a la clorofila), forma parte de minerales constituyentes de rocas ígneas: plagioclasa, piroxenos, anfíboles y micas, y de minerales constituyentes de rocas metamórficas como cloritas y serpentinas. En rocas sedimentarias se encuentra como carbonato en magnesita, asociado a calcio en dolomita y como hidróxido en brucita; los hidróxidos se forman por precipitación del carbonato previamente solubilizado. Como catión de intercambio es de tamaño y carga similar al calcio y, como él, se retiene en arcillas. El magnesio no escasea en el agua, tan solo escasea en suelos ácidos, a los que se incorpora como dolomita para su corrección.

Sodio, está muy ligada su concentración a la de ion cloruro (complejo iónico Na-Cl). Es el más abundante de los alcalinos. Son fuente del sodio, ciertos feldespatos, evaporitas y el espray de gotas de agua de mar producido en la costa. El suelo se puede enriquecer en este ion si la evaporación del agua es muy intensa y el aporte escaso, con ello se saliniza el suelo y más si el agua de riego es rica en sales o si se producen vertidos de sal común por diversas causas, como en medios urbanos en invierno para reducir o evitar cubiertas de hielo en calles y caminos, y en la desalación de aguas salobres interiores si el concentrado en sales revierte al suelo. El sodio no es reactivo, no tiene características redox ni precipita con los aniones comunes; puede proceder a intercambio iónico en minerales con carga negativa, aunque en general el proceso es el inverso y se ve expulsado por cationes de mayor carga.

Potasio, nutriente de plantas y animales: se halla en menor concentración que el sodio, y proviene de ciertos minerales (micas y algunos feldespatos y es importante en illita) y de los detritus de animales. Suele estar en carencia y se adiciona como abono a los cultivos. Este catión, al contrario que el sodio, se mantiene en solución aun si la evaporación es rápida e intensa. Es posible su retención en arcillas, hay una retención rápida de K^+ como **catión de intercambio** y sucede una retención lenta y más eficaz si su introducción se realiza en el interior de las capas de arcilla, K^+ **fijado**. Si en el aporte como abono se halla en exceso, las plantas lo acumulan, y, posteriormente, se devuelve al suelo a través de los restos vegetales. Este "K^+ orgánico" es de nuevo retenido por las arcillas con facilidad y con ello se cierra un cierto ciclo del potasio.

Bicarbonato, este anión está asociado al carbonato y al CO_2 en disolución. Su concentración depende de la presencia de rocas calcáreas que introducen anión carbonato, de la aireación del agua para introducir CO_2, y del consumo o expulsión del mismo por los organismos imbuidos en el medio. Su concentración está directamente relacionada con el pH del medio y contribuye a su estabilización, y tan sólo se transforma a carbonato en medios muy alcalinos. Se relaciona con la presencia de cationes de calcio y magnesio.

Cloruro, por su presencia en el agua es el siguiente anión en importancia, después del bicarbonato-carbonato. Este elemento se halla como anión cloruro tanto en agua como en suelo. Se encuentra en

evaporitas y es reenviado a la atmosfera desde emisiones marinas. Por otra parte, se adiciona en fertilizantes como KCl. Es soluble, móvil, en cierto modo inerte, no precipita en reacciones redox ni participa en la formación de complejos. En arcillas es uno de los aniones más desplazados por otros aniones, y en suelos muy áridos permite la deposición de sodio como NaCl. Se usa como elemento traza en el balance de materia en corrientes y en la medida de evapotranspiración.

Sulfato, los minerales que contienen azufre como sulfato son evaporitas, yeso y anhidrita. En otras rocas, ígneas o sedimentarias, el azufre se halla como sulfuro de metales diversos, principalmente FeS. Los sulfuros son muy insolubles, y en contacto con el aire pueden oxidarse a sulfatos, algunos de los cuales son solubles y otros son insolubles como sulfato de bario, sulfato de plomo y sulfato cálcico. Un aporte de azufre sucede al descomponerse la materia orgánica, o bien en forma reducida, o bien en forma oxidada, dependiendo de las condiciones del medio. En la combustión de materiales fósiles -petróleo, gas, carbón- que contienen azufre, en la erupción de volcanes y en la tostación de piritas se desprende SO_2 que se oxida hasta ácido sulfúrico que forma aerosoles en la atmósfera. Estos aerosoles son responsables de la lluvia ácida que puede provocar la destrucción de ecosistemas.

En disolución, el azufre se puede hallar como S^{2-} en condiciones anaerobias y como SO_4^{2-} en condiciones aerobias. En ausencia de oxígeno, el SO_4^{2-} actúa como oxidante de la materia orgánica pasando a H_2S, tóxico para la vida. La oxidación de piritas (sulfuros) en el suelo origina un consumo elevado de oxígeno y proporciona acidez al agua, liberando, además cationes metálicos. A dicha oxidación se le suma, si el pH se rebaja hasta 4, la oxidación realizada por la bacteria Thibacillus Ferrooxidans, oxidación de cinética rápida lo que favorece la mayor acidez del medio. Como consecuencia, las corrientes de aguas de drenaje en minas son muy ácidas y con un alto contenido en cationes. Es importante el número de cationes que tan sólo están disueltos como tales en condiciones muy ácidas, de lo contrario precipitan como hidróxidos o como carbonatos. En su fluir, estas aguas ácidas se ponen en contacto con otros materiales, y los cationes pueden ser adsorbidos o intercambiados en otros minerales; su contacto con materiales como calcitas provoca una bajada de acidez, se produce una precipitación de hidróxidos-óxidos de

diversos cationes y una incorporación de $Ca^{2+}, Mg^{2+} y HCO_3^-$ en el medio.

Nitratos-fosfatos, tienen características, junto al potasio, de nutrientes esenciales, y se expondrán en otro apartado.

Cationes en disolución, relativamente abundantes y con un comportamiento en cierto modo semejante, son hierro, aluminio y manganeso.

Hierro, forma parte de la hemoglobina y los cloroplastos, y es el segundo elemento metálico más numeroso -le supera el aluminio-. Se encuentra en rocas ígneas en los dos estados: Fe (II) y Fe (III). En condiciones reductoras se halla como pirita, carbonato, óxido e hidróxido (ver apartado 2.3.). En disolución se encuentra en el estado (III) sólo a pH extremadamente ácido y en condiciones aerobias, mientras que en condiciones anaerobias se halla en estado (II).

Manganeso, metal de transición semejante al hierro, puede hallarse en diferentes estados de oxidación. Como Mn (II) forma parte de rocas ígneas y de otras sedimentarias, impureza en dolomitas y en disolución en condiciones anaerobias -es más soluble y más estable a la oxidación que el Fe (II)-. En condiciones oxidantes el Mn (IV) precipita como MnO_2 insoluble. Constituye un cierto ciclo, ya que permanece en las plantas concentrado y éstas en su descomposición lo aportan al suelo, del que posteriormente lo tomarán; en épocas de gran degradación, otoño, su concentración en el suelo aumenta, y disminuye en la época de crecimiento de vegetales.

Aluminio, tercer elemento en abundancia. No se le conoce papel biológico y puede ser tóxico para plantas en elevadas concentraciones; su concentración aumenta en vertidos antropogénicos. En disolución tan sólo se halla a pH muy ácidos, por tanto, está presente en el agua edáfica en suelos muy ácidos.

El hierro y el aluminio tienen ciertas características comunes, como la posibilidad de formar diversos oxo-hidroxo complejos en función del pH, que se expondrán en apartados posteriores.

2. PROPIEDADES DEL AGUA

2.1. Propiedades ácido-base

La acidez de un agua, capacidad de neutralizar oxidrilos, se debe fundamentalmente a la presencia de CO_2 y sus compuestos derivados, $CO_2, H_2CO_3, HCO_3^-, CO_3^{2-}$. La presencia de CO_2 atmosférico provoca su disolución en el agua. El contenido máximo en CO_2 en equilibrio aire-agua depende de la temperatura y de la presión, y viene definido por la ley de Henry.

Presión de CO_2 en la fase gas = K_H Concentración de CO_2 en la fase líquida.

Naturalmente, K_H depende de la temperatura. A 25°C, la saturación aire-agua destilada lleva la concentración de CO_2 a $1 \cdot 10^{-5}$mol L^{-1}.

En agua tienen lugar una serie de reacciones a partir de CO_2 disuelto:

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \underset{H^+}{\rightleftharpoons} HCO_3^- \underset{H^+}{\rightleftharpoons} CO_3^{2-} \qquad [1.2]$$

La disolución de CO_2 en agua provoca un cierto contenido de acidez que puede ser estimado a partir de las constantes de disociación del ácido carbónico. En agua destilada y aireada el pH es de 5,67 debido a la presencia de CO_2 y HCO_3^-. En el agua atmosférica, en presencia de óxidos de azufre y de nitrógeno, el pH se reduce y se llega a rebajar a 3. Otros compuestos que aportan acidez en el agua, que son menos importantes y no siempre están presentes, son: H_2S,$H_2PO_4^-$, ácidos orgánicos, ácidos húmicos y fúlvicos, estos en especial en el agua edáfica.

Unido al fenómeno de acidez está el de alcalinidad, propiedad de aceptar protones. En el agua natural los iones responsables de la alcalinidad son OH^-, CO_3^{2-} y HCO_3^- y, en menor medida, otros como el amoniaco y los aniones correspondientes a la disociación de los ácidos fosfóricos, silícico, bórico, y de los fúlvicos y húmicos.