

Índice general

Capítulo 1 EL AGUA COMO RECURSO

1. Introducción	19
2. Ciclo del agua	21
3. Principales usos del agua.....	24
4. Clasificación de las masas de agua	30
4.1. Aguas superficiales	31
4.1.1. Clasificación de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los recursos naturales.....	31
4.1.2. Clasificación de zonas húmedas	32
4.1.3. Zonificación de ríos.....	33
4.2. Aguas subterráneas.....	35
5. Cuencas hidrográficas y acuíferos	37
6. Potencial de abastecimiento	41
Bibliografía	44

Capítulo 2 CARACTERIZACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA

1. Calidad natural del agua	47
2. Características del agua	50
2.1. Parámetros microbiológicos	52
2.1.1. Escherichia Coli	52
2.1.2. Enterococo	52
2.1.3. Clostridium perfringens.....	53
2.2. Parámetros químicos	53
2.2.1. Antimonio (Sb).....	53

2.2.2.	Arsénico (As).....	54
2.2.3.	Benceno	54
2.2.4.	Benzo(α)pireno	55
2.2.5.	Boro (B)	55
2.2.6.	Bromato.....	55
2.2.7.	Cadmio (Cd).....	56
2.2.8.	Cianuro	56
2.2.9.	Cobre (Cu)	56
2.2.10.	Cromo (Cr)	57
2.2.11.	1,2-Dicloroetano	57
2.2.12.	Fluoruro.....	57
2.2.13.	Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HPA).....	58
2.2.14.	Mercurio (Hg)	58
2.2.15.	Microcistina	59
2.2.16.	Níquel (Ni)	59
2.2.17.	Nitratos	59
2.2.18.	Nitritos	60
2.2.19.	Plaguicidas	60
2.2.20.	Plomo (Pb).....	61
2.2.21.	Selenio (Se)	61
2.2.22.	Trihalometanos (THMs).....	61
2.2.23.	Tricloroeteno + tetracloroeteno	62
2.3.	Parámetros químicos que se controlan según las especificaciones del producto.....	62
2.3.1.	Acrilamida	62
2.3.2.	Epiclorhidrina.....	63
2.3.3.	Cloruro de vinilo.....	63
2.4.	Parámetros indicadores	63
2.4.1.	Bacterias coliformes.....	63
2.4.2.	Aluminio (Al)	64
2.4.3.	Amonio.....	64
2.4.4.	Carbono orgánico total.....	64
2.4.5.	Cloro combinado residual y cloro libre residual	65
2.4.6.	Cloruros.....	65
2.4.7.	Color.....	66
2.4.8.	Conductividad.....	66
2.4.9.	Hierro (Fe)	67
2.4.10.	Manganeso (Mn).....	67
2.4.11.	Olor y sabor.....	67
2.4.12.	Oxidabilidad.....	68
2.4.13.	pH.....	71
2.4.14.	Sodio (Na)	72
2.4.15.	Sulfatos	72
2.4.16.	Turbidez	72
2.5.	Temperatura	73

3. Índices de calidad	76
3.1. ISQA (Índice Simplificado de la Calidad del Agua).....	76
3.2. IAQA (Índice Automático de Calidad del Agua)	76
3.3. ICG (Índice de Calidad General).....	77
3.4. IPP (Índice de Potabilidad Potencial).....	77
3.5. Índices biológicos	77
4. Indicadores de calidad para la clasificación del estado ecológico.....	77
Bibliografía	79

Capítulo 3

ORIGEN Y EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN

1. Procesos de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.....	83
2. Contaminantes y efectos	84
2.1. Compuestos orgánicos sintéticos	85
2.2. Metales y sus compuestos	88
2.3. Materias en suspensión	90
2.4. Nutrientes	91
2.5. Sustancias con requerimiento de oxígeno	92
2.6. Contaminación microbiana	93
3. Actividades contaminantes.....	94
3.1. Características de la contaminación agraria	95
3.1.1. Contaminación agrícola y forestal	95
3.1.2. Contaminación ganadera.....	97
3.2. Contaminación urbana	98
3.3. Contaminación industrial.....	99
3.3.1. Industrias agroalimentarias.....	101
3.3.1.1. Industrias azucareras.....	102
3.3.1.2. Industrias lácteas.....	102
3.3.1.3. Industrias cárnicas.....	103
3.3.1.4. Industrias oleícolas y almazaras	104
3.3.2. Industrias del papel	106
3.3.3. Centrales térmicas.....	107
3.3.4. Explotaciones mineras.....	108
3.3.4.1. Minería del carbón.....	108
3.3.4.2. Minería metálica	109
3.3.4.3. Extracción de áridos	109
4. Parámetros indicadores de contaminación	110
4.1. Condiciones térmicas.....	111

4.2. Condiciones de oxigenación.....	112
4.3. Salinidad.....	112
4.4. Estado de acidificación.....	113
4.5. Condiciones en cuanto a nutrientes.....	113
4.6. Transparencia.....	113
4.7. Contaminantes específicos	113
Bibliografía	114

Capítulo 4

CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

1. Contaminación de las aguas superficiales: aspectos básicos de la autodepuración de un cauce	119
2. Dispersión y evolución de los vertidos.....	125
3. Caudales ecológicos.....	126
3.1. Métodos para el cálculo de caudales ecológicos.....	128
4. Procesos de eutrofización	130
5. Índices bióticos.....	134
5.1. Índices de contaminación	137
5.2. Índices que estudian la estructura de la comunidad biológica.....	138
6. Estrategias para combatir la contaminación	142
Bibliografía	148

Capítulo 5

CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

1. Aspectos básicos de la contaminación de acuíferos	155
2. Focos potenciales de contaminación	161
2.1. Lixiviación de nitratos	163
2.2. Lixiviación de plaguicidas y compuestos orgánicos.....	166
2.3. Metales pesados.....	167
2.4. Salinización y sobreexplotación.....	168
3. Estrategias para la prevención y el control de la contaminación.....	170
3.1. Caracterización, evaluación y seguimiento del estado de las aguas subterráneas.....	170
3.2. Ordenación espacial de actividades y establecimiento de perímetros de protección	173
3.3. Medidas de protección frente a la contaminación puntual.....	174
3.4. Medidas de protección frente a la contaminación difusa.....	176
3.5. Medidas de recuperación de acuíferos contaminados	176
Bibliografía	177

Capítulo 6

CALIDAD DE LAS AGUAS PARA CONSUMO HUMANO

1. Criterios de calidad y estándares.....	183
1.1. Calidad de las aguas continentales superficiales destinadas a la producción de agua potable.....	184
1.2. Calidad de las aguas destinadas a consumo humano	186
2. Vigilancia sanitaria.....	191
3. Normativa española y comunitaria.....	191
3.1. Normativa de la Comunidad Europea	194
3.2. Normativa española.....	195
Bibliografía	206

Capítulo 7

ANÁLISIS DE AGUAS

1. Metodología del análisis de aguas.....	209
2. Toma de muestra.....	210
3. Preparación, transporte y almacenamiento.....	211
4. Tratamientos previos	212
5. Medida	216
6. Métodos de análisis físico-químicos	216
6.1. Métodos espectroscópicos	216
6.1.1. Espectroscopia ultravioleta-visible.....	221
6.1.2. Espectroscopia de fluorescencia.....	223
6.1.3. Espectroscopia de absorción atómica	225
6.1.4. Espectroscopia infrarroja	229
6.1.5. Espectroscopia de emisión.....	231
6.2. Métodos electroquímicos	232
6.2.1. Conductimetría.....	232
6.2.2. Potenciometría	233
6.2.3. Electroodos selectivos.....	234
6.2.3.1. Electrodo de membrana de vidrio	235
6.2.3.2. Electrodo de membrana líquida	237
6.2.3.3. Electrodo de membrana sólida no orgánica.....	238
6.2.3.4. Sondas para determinación de gases.....	238
6.2.3.5. La célula de Mackereth para la determinación de oxígeno	239
6.3. Métodos cromatográficos	239
6.3.1. Cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC).....	241
6.3.2. Cromatografía de gases	242

6.3.3. Cromatografía plana	243
6.3.4. Cromatografía iónica	244
6.4. Espectrometría de masas	244
7. Métodos de análisis microbiológicos	244
7.1. Recuento directo tras siembra en soporte sólido.....	246
7.2. Estimación estadística tras siembra en medio de cultivo líquido	246
Bibliografía	255

Capítulo 8

GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA

1. Introducción	259
2. Captación	261
2.1. Captaciones superficiales	261
2.1.1. Presas de fábrica	262
2.1.1.1. Presas de gravedad	262
2.1.1.2. Presas de gravedad aligeradas o contrafuertes.....	263
2.1.1.3. Presas de muro curvo	263
2.1.2. Presas de materiales sueltos.....	263
2.1.2.1. Tierra.....	263
2.1.2.2. Escollera.....	263
2.1.2.3. Tierra-Escollera.....	263
2.1.3. Presas mixtas.....	264
2.1.4. Presas especiales.....	264
2.2. Captaciones subterráneas	265
2.2.1. Suelos	265
2.2.2. Zonas del subsuelo.....	265
2.2.3. Acuíferos	266
2.2.4. Pozos	267
2.3. Captación de agua del mar (Desalación)	269
2.3.1. M.S.F.	270
2.3.2. M.E.D.	271
2.3.3. V.C	272
2.3.4. Electrodialisis	272
2.3.5. Ósmosis inversa	273
2.3.5.1. Pretratamiento	273
2.3.5.2. Bombas de alta presión	273
2.3.5.3. Membranas	273
2.3.5.4. Postratamiento.....	274

3. Conducciones (aducción)	274
3.1. Tipos de conducciones	274
3.1.1. Canales	274
3.1.2. Conducciones forzadas o a presión.....	274
3.2. Elevaciones	274
4. Tratamiento.....	275
5. Depósitos de regulación	276
5.1. Tipos de depósitos reguladores.....	277
6. Distribución	278
6.1. Tipos de redes de distribución	279
7. Saneamiento	281
7.1. Alcantarillado	281
7.1.1. Tipos de sistemas.....	281
7.1.1.1. Sistema unitario.....	282
7.1.1.2. Sistema separativo.....	282
7.1.1.3. Sistema pseudoseparativo.....	283
7.1.1.4. Sistema doblemente separativo.....	283
7.1.1.5. Sistema restringido	283
7.1.2. Instalaciones complementarias en las redes de alcantarillado ..	283
7.1.2.1. Aliviaderos de crecida.....	283
7.1.2.2. Depósitos de retención o tanques de tormenta	283
7.1.2.3. Estaciones de bombeo.....	283
7.1.2.4. Sifones	284
7.1.2.5. Pozos de registro.....	284
7.1.2.6. Imbornales.....	284
7.1.2.7. Cámaras de descarga	286
7.2. Depuración	286
7.2.1. Pretratamiento.....	287
7.2.1.1. Desbaste	287
7.2.1.2. Desarenado-desengrase	288
7.2.2. Tratamiento primario.....	289
7.2.2.1. Decantadores circulares.....	289
7.2.2.2. Decantador rectangular.....	289
7.2.3. Tratamientos físico-químicos.....	290
7.2.3.1. Coagulación-floculación	290
7.2.3.2. Neutralización.....	290
7.2.4. Tratamiento biológico.....	291

7.2.4.1. Fangos activados	291
7.2.4.2. Lechos bacterianos	292
7.2.4.3. Biodiscos o biocilindros	292
7.2.5. Eliminación de nutrientes	293
7.2.5.1. Eliminación de nitrógenos	293
7.2.5.2. Eliminación de fósforo	294
7.2.6. Tratamiento de fangos	294
7.2.6.1. Espesamiento	294
7.2.6.2. Estabilización o digestión	294
7.2.6.3. Deshidratación	296
Bibliografía	296

Capítulo 9

PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE CONSUMO

1. Introducción	299
2. Coagulación y floculación	300
2.1. Coagulación	303
2.2. Floculación	303
2.3. Tipos de coagulantes	304
2.3.1. Derivados del aluminio	304
2.3.2. Derivados del hierro	304
2.4. Tipos de floculantes	305
2.4.1. Polielectrolitos aniónicos	305
2.4.2. Polielectrolitos catiónicos	305
2.4.3. Polielectrolitos no iónicos	305
3. Sedimentación	306
3.1. Mecanismos de sedimentación	306
3.1.1. Sedimentación de partículas discretas	306
3.1.2. Sedimentación de partículas floculantes	309
3.1.3. Sedimentación por zonas o impedida	310
3.2. Tipos de decantadores	310
3.2.1. Decantadores estáticos	310
3.2.2. Decantadores por contacto de fangos	312
3.2.2.1. Decantadores de recirculación de fangos	312
3.2.2.2. Decantadores de lecho de fangos	312
3.2.3. Decantadores lamelares	313

4. Flotación	314
4.1. Flotación DAF	315
5. Filtración	316
5.1. Tipos de filtración.....	316
5.1.1. Filtración lenta	316
5.1.2. Filtración rápida	317
5.2. Clases de filtros.....	320
5.2.1. Características de un filtro (rápido)	320
6. Desinfección	322
6.1. Cloro.....	322
6.1.1. Reacciones del cloro.....	323
6.1.1.1. Reacciones de oxidación	324
6.1.1.2. Reacciones de cloración	325
6.1.2. Demanda de cloro	326
6.1.3. Cloraminas	328
6.1.4. Hipoclorito sódico	330
6.1.5. Dióxido de cloro.....	330
6.1.6. Compuestos organoclorados	331
6.1.7. Equipos e instalaciones de cloración	332
6.2. Ozono.....	333
6.2.1. Ozonizadores tubulares.....	334
6.2.2. Características y aplicaciones del ozono	335
7. Tratamientos especiales	337
7.1. Adsorción	338
7.1.1. Carbón activo.....	338
7.1.1.1. Carbón activo en polvo (C.A.P.).....	339
7.1.1.2. Carbón activo granular (C.A.G.).....	339
7.2. Ósmosis inversa	340
7.3. Intercambio iónico.....	340
7.3.1. Desendurecimiento.....	341
7.3.2. Descarbonatación por resinas.....	341
7.4. Métodos químicos.....	341
8. Instalaciones de tratamiento	342
8.1. Tipos de instalaciones	342
8.2. Características y dosis de los reactivos utilizados	344

9. Tratamiento de fangos	345
9.1. Esquema de tratamiento.....	346
9.1.1. Mezcla.....	346
9.1.2. Espesamiento	346
9.1.3. Deshidratación	347
9.1.3.1. Filtros prensa	347
9.1.3.2. Filtros banda.....	347
9.1.3.3. Centrifugación	347
Bibliografía	349

Capítulo 10

GESTIÓN Y CONTROL DE LA CALIDAD

1. Introducción	353
2. Organización de la gestión del agua.....	354
3. Calidad de las aguas superficiales	357
3.1. Aguas potables para el consumo humano	357
3.2. Aguas para el baño.....	359
3.3. Vida piscícola	361
4. Calidad aguas subterráneas.....	362
5. Sistemas de Control	362
5.1. Sistema automático de información hidrológica (S.A.I.H.)	363
5.2. Sistema automático de información de calidad de las aguas (S.A.I.C.A.)..	366
6. Redes de control.....	367
6.1. Red I.C.A.	368
6.2. Red de alerta	369
6.3. Redes de control de aguas subterráneas	372
7. Control en los sistemas de abastecimiento	375
7.1. Directrices de la Organización Mundial de la Salud.....	375
7.2. Control en empresas abastecedoras. Canal de Isabel II.....	379
Bibliografía	381

1. CALIDAD NATURAL DEL AGUA

Es difícil definir la calidad del agua, cuando en el propio ciclo del agua ésta actúa como elemento de transporte de nutrientes y como red de drenaje, lo cual ya implica modificaciones de lo que sería el agua pura; si además tenemos en cuenta que cada cuenca tiene sus propias características geológicas, climáticas e hidrológicas llegamos a la conclusión de que han de existir diferentes calidades del agua. Sin embargo estas diferencias debidas al efecto de la propia naturaleza son pequeñas comparadas con las que puede provocar la actividad del hombre, modificando de forma importante la composición química, temperatura, etc., del agua.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el agua puede destinarse a diferentes usos, según los cuales la calidad requerida de la misma varía:

- Utilización fuera del lugar donde se encuentra: agua potable, usos domésticos, urbanos e industriales o riego.
- Utilización del curso o masa de agua para actividades recreativas: baño, remo, pesca, etc.
- Utilización como medio acuático: para acoger especies animales y vegetales.

El estado natural en el que se encuentre el agua es lo que se puede definir como calidad natural del agua, es decir la cantidad en que se encuentran ciertos parámetros físicos, químicos y biológicos en el agua de forma natural, cuando no ha habido intervención humana. Los límites que se establezcan para estos parámetros (niveles paramétricos) dependerán del uso o actividad a que se destine el agua. Puede decirse que existen aguas de calidad natural que son aptas para unos usos pero no para otros, es decir que cumplen unos estándares de calidad y otros no.

La falta de calidad del agua destinada a un determinado uso puede ser debida a causas naturales o artificiales; cuando se ve afectada por las actividades del hombre, tiene lugar el fenómeno de la contaminación.

En términos generales puede decirse que el medio acuático está contaminado cuando la composición o el estado del agua están modificados, directa o indirectamente, por el hombre, de modo que se presta menos fácilmente a todas o algunas de las utilidades para las que podría servir en su estado natural. Las posibles causas y efectos de estas modificaciones se resumen en las tablas 2.1 y 2.2.

TABLA 2.1.

FUENTES, CARACTERÍSTICAS GENERALES Y EFECTOS PRINCIPALES DE LOS CONTAMINANTES (The Open University, 1975)			
Tipo de contaminante	Naturaleza	Fuentes comunes	Efectos
1. Sólidos en suspensión	Suelos, minerales y subproductos industriales.	Erosión, inundaciones, etc., efluentes de plantas de celulosa y otras.	Obstrucción o relleno de corrientes, lagos, embalses y canales; aumento del costo de depuración; corrosión de equipos; interferencia de procesos de manufacturación; reducción de la vida animal y vegetal.
2. Color	Agua caliente vertida a ríos y lagos.	Plantas de energía, fábricas de acero, refinerías, unidades de refrigeración.	Reducción del oxígeno disuelto y consiguiente descomposición lenta o incompleta de los contaminantes y daño a la vida acuática.
3. Compuestos inorgánicos	Sal común, ácidos, sales metálicas, etc.	Minería, procesos industriales, depósitos naturales.	Interferencia en procesos de fabricación; efectos tóxicos más o menos aparentes sobre el hombre y la vida silvestre; mal olor, mal sabor, corrosión de equipos.
4. Nutrientes	Compuestos de fósforo y de nitrógeno.	Aguas residuales urbanas e industriales; granjas (fertilizantes).	Crecimiento excesivo de la vida vegetal acuática, aumento de la demanda de oxígeno, mal sabor y mal olor.
5. Residuos que demandan oxígeno	Materias orgánicas putrescibles reducidas normalmente por bacterias aerobias, que requieren oxígeno disuelto.	Residuos domésticos; industriales de la alimentación.	Daño a la pesca; el consumo total del oxígeno causa la acción de bacterias anaerobias, que resulta en malos olores y colores.
6. Compuestos orgánicos tóxicos	Detergentes, pesticidas, subproductos industriales.	Efluentes domésticos e industriales, granjas.	Amenaza a la pesca y vida silvestre; posibles riesgos a largo plazo para el hombre, por ingestión.
7. Contaminantes biológicos	Agentes de enfermedades (bacterias, virus).	Residuos humanos y animales; ciertas industrias (por ejemplo, mataderos).	Necesidad de tratamiento intenso del agua para hacerla potable; pérdida a la industria pesquera y especialmente marisquera; reducción del uso recreativo.

TABLA 2.2.
Operaciones que afectan a la calidad del agua (Stumm, W. y E., 1972)

REDUCIENDO LA ESTABILIDAD ECOLÓGICA
Por aumento del flujo de energía: • Vertido de nutrientes para autótrofos o heterótrofos • Desestratificación, dragado de sedimentos • Vertidos de calor • Provocación de turbulencia
Por explotación de los terrenos adyacentes: • Cultivos, pastoreo • Fertilización, riego • Deforestación • Conversión de pastizales en tierras de cultivo • Aplicación de herbicidas y plaguicidas
Por reducción de la estructura: • Uso de alguicidas • Destrucción de nichos • Perturbaciones físicas ocasionales (avenidas, descargas de calor) • Explotación excesiva • Vertidos de compuestos químicos • Interferencia de la quimiostasis
PROMOVIENDO LA ESTABILIDAD ECOLÓGICA
Por restauración del equilibrio fotosíntesis-respiración: • Reducción de las descargas de residuos • Reducción de la biomasa • Reducción del tiempo relativo de residencia, o eliminación de nutrientes • Ordenación piscícola • Aireación
Por gestión orientada a la conservación: • Repoblación forestal • Restricción de monocultivos • Zonificación del entorno manteniendo las zonas adyacentes al agua con baja productividad neta libres de fertilizantes • Control de la erosión
Por fomento de la complejidad biológica: • Establecimiento de nichos ecológicos • Introducción de algunas poblaciones y organismos • Mantenimiento de una biomasa relativamente alta, compatible con el flujo de energía • Mantenimiento de la estratificación • Recolección selectiva

2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA

Los parámetros más significativos que permiten la estimación de las calidades del agua y la definición de los correspondientes estándares se dividen según el anexo I del Real Decreto 140/2003 de 7 de febrero, en parámetros microbiológicos, parámetros químicos, parámetros químicos que se controlan según las especificaciones del producto y parámetros indicadores. Según el tipo de agua que se analice y del uso a que se vaya a destinar, algunos de ellos adquirirán más importancia, mientras otros la perderán.

En la siguiente tabla (Water Quality Assesment, UNESCO, OMS y UNEP) se muestra la importancia relativa de diversos parámetros para la evaluación de la calidad del agua según diferentes usos.

TABLA 2.3.

INDICADORES PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AGUA					
	Estado ecológico	Pesquerías	Fuente de agua potable	Baño	Riego
Variables generales					
Temperatura	•••	•••		•	
Color	••		••	••	
Olor			••	••	
Sólidos en suspensión	•••	•••	•••	•••	
Turbidez/transparencia	•	••	••	••	
Conductividad	••	•	•		•
Sólidos disueltos totales		•	•		•••
pH	•••	••	•	•	••
Oxígeno disuelto	•••	•••	•		•
Dureza		•	••		
Clorofila	•	••	••	••	
Nutrientes					
Amonio	•	•••	•		
Nitrato/nitrito	••	•	•••		
Fósforo/fosfato	••				
Materia orgánica					
Carbono orgánico total	••		•	•	
DQO	••	••			

TABLA 2.3. (Continuación)

INDICADORES PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AGUA					
	Estado ecológico	Pesquerías	Fuente de agua potable	Baño	Riego
DBO	•••	•••	••		
Iones principales					
Sodio	•		•		•••
Potasio	•				
Calcio	•				
Magnesio	••		•		
Cloro	••		•		•••
Sulfato	•		•		
Elementos traza					
Metales pesados		••	•••		•
Arsénico y selenio		••	••		•
Contaminantes orgánicos					
Aceite e hidrocarburos		•	••	••	•
Pesticidas		••	••		
Tensoactivos		•	•	•	
Indicadores microbiológicos					
Coliformes fecales			•••	•••	•••
Coliformes totales			•••	•••	•
Patógenos			•••	•••	•

•, ••, •••: importancia relativa de los parámetros según el uso del agua.

Los parámetros que se utilizan para definir la calidad de un agua son los mismos que ocasionan la contaminación (cuando superan ciertos niveles) y tienen una estrecha relación con el origen o fuentes de contaminación.

Nota: En la breve descripción que se hace a continuación de cada uno de los parámetros se indica la técnica que se ha recomendado para su análisis hasta la entrada en vigor del citado RD 140/2003. La descripción detallada de las diferentes técnicas que pueden utilizarse se hará en el capítulo 7. Sólo en aquellos casos en que la técnica de análisis es específica del parámetro se incluye en este tema su explicación.