

# Índice de materias

Preámbulo . . . . .	V
Coordinadores . . . . .	VI
Prólogo . . . . .	VII
Autores y colaboradores . . . . .	XI

## Sección 1

### CONCEPTOS GEOLÓGICOS BÁSICOS DE APLICACIÓN EN HIDROLOGÍA

1.0 Introducción general de la sección . . . . .	3
--	---

#### Capítulo 1.1

##### Los materiales: rocas plutónicas, volcánicas y metamórficas

1.1 La corteza terrestre . . . . .	5
1.2 Minerales y rocas como elementos constitutivos de la corteza terrestre . . . . .	6
1.3 Clasificación de las rocas . . . . .	7
1.3.1 Rocas eruptivas y plutónicas . . . . .	7
1.3.2 Rocas eruptivas filonianas . . . . .	9
1.3.3 Rocas volcánicas . . . . .	9
1.3.4 Rocas metamórficas . . . . .	11

#### Capítulo 1.2

##### Los materiales: sedimentos y rocas sedimentarias

2.1 Ciclo geológico de los materiales de la corteza terrestre . . . . .	13
2.2 Sedimentos . . . . .	13
2.2.1 Granulometría de las rocas sedimentarias incoherentes o no consolidadas. . . . .	14
2.2.2 Tipos de sedimentos . . . . .	14
2.2.3 Tipos de ambientes sedimentarios. . . . .	14
2.3 Consolidación o litogénesis. Factores de la misma . . . . .	15
2.4 Rocas sedimentarias . . . . .	16
2.4.1 Estructura . . . . .	16
2.4.2 Clasificación de las rocas sedimentarias coherentes . . . . .	16

#### Capítulo 1.3

##### Estratigrafía y geología histórica

3.1 Estratos: definición y características más importantes . . . . .	19
3.1.1 Características sedimentarias. Facies. . . . .	19
3.1.2 Muro, techo y espesor de los estratos. . . . .	20
3.1.3 Rumbo o dirección . . . . .	21
3.1.4 Buzamiento o inclinación de los estratos . . . . .	21
3.1.5 Utilidad del rumbo o dirección y buzamiento . . . . .	22
3.1.6 Asociación de estratos: series y columnas estratigráficas . . . . .	22
3.2 Conceptos fundamentales de la estratigrafía. . . . .	24
3.2.1 Transgresiones y regresiones . . . . .	24
3.2.2 Lagunas estratigráficas . . . . .	24
3.2.3 Concordancias y discordancias . . . . .	24
3.2.4 Los fósiles . . . . .	25
3.2.5 Principios fundamentales de la Geología Histórica . . . . .	25
3.2.6 Correlaciones y cambios de facies. . . . .	26
3.3 Dataciones absoluta y relativa en geología . . . . .	27
3.3.1 Datación absoluta . . . . .	27
3.3.2 Datación relativa . . . . .	31
3.3.3 Eras geológicas . . . . .	31

#### Capítulo 1.4

##### La disposición de los materiales: tectónica

4.1 Modificaciones de la corteza terrestre. . . . .	32
4.1.1 Plasticidad de las rocas . . . . .	32
4.1.2 Movimientos epirogénicos. . . . .	33
4.1.3 Movimientos orogénicos . . . . .	33
4.2 Pliegues . . . . .	35
4.2.1 Terminología de sus elementos . . . . .	36
4.2.2 Clasificación. Tipos más importantes. . . . .	36
4.3 Fallas. Naturaleza . . . . .	39
4.3.1 Terminología de sus elementos . . . . .	39
4.3.2 Clasificación. Tipos más importantes. . . . .	39
4.4 Asociaciones de pliegues y fallas. Estilos tecnológicos generales . . . . .	40
4.4.1 Estilos tectónicos generales . . . . .	40

4.5	Diaclasas. Naturaleza . . . . .	41	1.3.2	Equilibrio de un fluido sometido a la acción de la gravedad . . . . .	67
4.5.1	Origen y significación . . . . .	41	1.3.3	Medición de presiones . . . . .	67
<b>Capítulo 1.5</b>			<b>1.4</b>	Cinemática de fluidos . . . . .	68
<b>Mapas geológicos</b>			1.4.1	Partícula líquida . . . . .	68
5.1	Introducción . . . . .	42	1.4.2	Trayectoria y línea de corriente . . . . .	68
5.2	Componentes de los mapas geológicos. . . . .	42	1.4.3	Movimiento permanente y movimiento variable . . . . .	68
5.2.1	Escala. . . . .	42	1.4.4	Movimiento uniforme . . . . .	68
5.2.2	Datos de base . . . . .	43	1.4.5	Movimiento laminar y movimiento turbulento . . . . .	68
5.2.3	Datos geológicos . . . . .	43	1.4.6	Tubo de flujo . . . . .	68
5.3	Definición y presentación de los mapas geológicos . . . . .	43	<b>1.5</b>	Dinámica de fluidos . . . . .	68
5.4	Clasificación . . . . .	44	1.5.1	Elementos de una sección. . . . .	69
5.4.1	Clasificación por su escala . . . . .	44	1.5.2	Energía . . . . .	69
5.4.2	Clasificación por sus objetivos . . . . .	44	1.5.3	Ecuaciones fundamentales de la hidrodinámica . . . . .	69
5.5	Leyendas de los mapas geológicos . . . . .	46	<b>Capítulo 2.2</b>		
5.5.1	Símbolos litológicos . . . . .	46	<b>Teoría de máquinas de bombeo</b>		
5.5.2	Símbolos tectónicos . . . . .	46	2.1	Elevación de líquidos. Bombas volumétricas de émbolo, rotativas, de engranajes. Ariete hidráulico. Elevadores de agua por aire . . . . .	71
5.5.3	Símbolos estratigráficos . . . . .	46	Bombas de émbolo . . . . .	71	
5.6	Confección e interpretación de mapas geológicos . . . . .	47	Bombas rotativas . . . . .	73	
<b>Apéndice 1.1</b>			Ariete hidráulico . . . . .	74	
<b>Fotogeología</b>			Elevadores de agua por aire. . . . .	75	
A.1.1.1	Introducción . . . . .	49	<b>2.2</b>	Bombas centrífugas axiales y semiaxiales. . . . .	75
A.1.1.2	Fotografías aéreas. Su obtención y presentación . . . . .	49	2.3	Principios de mecánica de fluidos aplicados a las turbo-máquinas y reversibilidad . . . . .	77
A.1.1.3	Estudio de las mismas por estereoscopía . . . . .	52	2.4	Pérdidas en las bombas. Rendimiento manométrico, volumétrico y mecánico. Rendimiento total . . . . .	79
A.1.1.4	Fotointerpretación . . . . .	52	2.5	Relaciones de semejanza en las bombas centrífugas . . . . .	80
<b>Bibliografía</b> . . . . .			2.6	Número de vueltas característico . . . . .	81
			2.7	Clasificación por el número de vueltas característico . . . . .	82
<b>Sección 2</b>			<b>Capítulo 2.3</b>		
<b>ELEMENTOS DE HIDROMECÁNICA</b>			<b>Cálculo de conductos</b>		
<b>Símbolos</b> . . . . .			3.1	Definiciones . . . . .	83
<b>Capítulo 2.1</b>			3.2	Régimen laminar. Número de Reynolds . . . . .	83
<b>Principios básicos</b>			3.3	Fórmulas de pérdida de carga. Fórmula de Pousselle . . . . .	84
1.1	Introducción . . . . .	61	3.4	Régimen turbulento. Rugosidad absoluta y relativa. Tubo liso y rugoso . . . . .	85
1.2	Propiedades físicas de los fluidos . . . . .	61	3.5	Resumen histórico de las fórmulas de pérdida de carga: Darcy, Manning, Bazin, Hazen y Williams, Scimemi, Von Karman, Nikuradse, Colebrook . . . . .	85
1.2.1	Sistema de unidades. . . . .	61			
1.2.2	Peso y masa . . . . .	61			
1.2.3	Compresibilidad . . . . .	63			
1.2.4	Viscosidad . . . . .	63			
1.2.5	Tensión superficial . . . . .	64			
1.2.6	Parámetros adimensionales . . . . .	64			
1.3	Estática de fluidos . . . . .	65			
1.3.1	Ecuaciones fundamentales. . . . .	66			

3.6 Pérdidas de carga secundarias, codos, cambios de sección, válvulas, etc. . . . .	87
3.7 Longitudes equivalentes. Abaco simplificado . . . . .	90
3.8 Perfil piezométrico. Tubos de secciones varias. Tubos en paralelo. Unidades de caudal. . . . .	91
3.9 Diámetro más económico . . . . .	93
 <b>Capítulo 2.4</b>	
<b>Selección de maquinaria de bombeo</b>	
4.1 Curvas características. Caudal-altura, caudal-rendimiento, caudal-potencia. Inestabilidad . . . . .	94
4.2 Curva característica de la tubería de impulsión. Funcionamiento de bombas en serie y en paralelo sobre una misma tubería . . . . .	95
4.3 Tipos de bombas centrífugas. Grado de vacío admisible en la aspiración. Cavitación. . . . .	95
4.4 Accionamiento de bombas centrífugas. Características de los motores. Transformador. Formas de arranque. Energía reactiva. . . . .	97
 <b>Capítulo 2.5</b>	
<b>Dimensionado de una impulsión</b>	
5.1 Consideraciones generales . . . . .	99
5.2 Planteamiento de datos actuales y previsiones futuras. (Ejemplo) . . . . .	100
5.3 Discusión de soluciones. (Ejemplo) . . . . .	101
5.4 Especificaciones para la oferta de bombas. . . . .	104
 <b>Capítulo 2.6</b>	
<b>Dispositivos de aforo</b>	
6.1 Introducción . . . . .	106
6.2 Dispositivos para lámina libre . . . . .	106
6.2.1 Ecuación fundamental . . . . .	106
6.2.2 Orificio de grandes dimensiones . . . . .	107
6.2.3 Otros tipos de orificios . . . . .	108
6.2.4 Compuertas . . . . .	108
6.2.5 Vertederos en pared delgada. . . . .	109
6.2.6 Elección del tipo de vertedero . . . . .	112
6.2.7 Vertederos en pared gruesa . . . . .	113
6.2.8 Aforador Parshall . . . . .	115
6.2.9 Tubo de Pitot. . . . .	116
6.3 Dispositivos para conductos a presión . . . . .	117
6.3.1 Medición con recipientes tarados . . . . .	117
6.3.2 Método de California . . . . .	117
6.3.3 Vertido por un tubo lleno . . . . .	118
6.3.4 Medidores Venturi . . . . .	119
6.3.5 Orificios en tuberías . . . . .	119
6.3.6 Contadores . . . . .	119
<b>Bibliografía</b> . . . . .	121
 <b>Sección 3</b>	
<b>NOCIONES DE ESTADÍSTICA APLICADA A LA HIDROLOGÍA</b>	
Símbolos . . . . .	125
0.1 Introducción general . . . . .	126
 <b>Capítulo 3.1</b>	
<b>Definiciones y conceptos básicos</b>	
1.1 Introducción . . . . .	127
1.2 Estadística descriptiva y estadística matemática . . . . .	127
1.3 La observación de los sucesos . . . . .	127
1.4 La producción de los sucesos . . . . .	128
1.5 Obtención de datos . . . . .	128
1.6 Estudio previo de los datos primarios. . . . .	128
1.7 Elaboración de los datos . . . . .	129
1.8 Distribución estadística de una variable . . . . .	129
1.8.1 Tablas de presentación. Frecuencia . . . . .	129
1.8.2 Representaciones gráficas . . . . .	130
1.9 Parámetros estadísticos de las muestras . . . . .	131
1.9.1 Medidas de posición o tendencia central . . . . .	132
1.9.2 Medidas de dispersión o variabilidad. . . . .	132
1.9.3 Medidas de desviación o asimetría . . . . .	133
1.10 Momentos de las muestras. . . . .	134
1.10.1 Momentos respecto al origen. . . . .	134
1.10.2 Momentos centrales . . . . .	134
1.10.3 Relaciones entre los momentos respecto al origen y los momentos centrales . . . . .	134
1.11 Probabilidad matemática de un suceso. . . . .	135
1.11.1 Valores frontera de la probabilidad. . . . .	135
1.11.2 Probabilidad condicional . . . . .	135
1.11.3 Probabilidad de sucesos mutuamente excluyentes . . . . .	135
1.12 Variables aleatorias . . . . .	135
1.13 Funciones de distribución de una variable aleatoria discreta . . . . .	135
1.13.1 Función de probabilidad . . . . .	136
1.13.2 Función de distribución de probabilidades totales . . . . .	136
1.14 Funciones de distribución de una variable aleatoria continua . . . . .	136
1.14.1 Función de densidad de probabilidad. . . . .	136
1.14.2 Función de distribución de probabilidades . . . . .	136
1.15 Parámetros estadísticos de una población formada por todos los valores posibles de una variable aleatoria con función de distribución de probabilidades conocida . . . . .	137

1.15.1 Parámetros de posición o tendencia central . . . . .	137
1.15.2 Parámetros de dispersión o variabilidad . . . . .	138
1.15.3 Parámetros de desviación o asimetría. . . . .	139
1.16 Momentos de una población . . . . .	139
1.16.1 Momentos respecto al origen . . . . .	139
1.16.2 Momentos centrales. . . . .	139
1.17 La estimación estadística . . . . .	139
1.17.1 Estimación de parámetros poblacionales . . . . .	139
1.17.2 Intervalos de confianza . . . . .	140

**Capítulo 3.2****Distribuciones de probabilidad de una variable aleatoria**

2.1 Introducción . . . . .	141
2.2 Distribuciones de probabilidad más usuales. . . . .	141
2.2.1 Distribución binomial . . . . .	141
2.2.2 Distribución de Poisson . . . . .	142
2.2.3 Distribución normal. . . . .	142
2.2.4 Distribución logarítmico-normal. . . . .	146
2.2.5 Distribución gamma . . . . .	148
2.2.6 Distribuciones extremas . . . . .	149
2.2.7 Distribución $\chi^2$ . . . . .	149
2.2.8 Distribución t de Student . . . . .	150
2.2.9 Distribución de Kolmogorof . . . . .	150
2.3 Tests de bondad del ajuste de una muestra a una distribución $\chi^2$ . . . . .	150
2.3.1 Test . . . . .	154
2.3.2 Test de Kolmogorof. . . . .	154
2.4 Métodos de estimación de los parámetros de una distribución . . . . .	158
2.4.1 Método de la máxima verosimilitud . . . . .	159
2.4.2 Método de los momentos o de Pearson . . . . .	160
2.4.3 Método de los mínimos cuadrados. . . . .	160
2.4.4 Método gráfico . . . . .	160
2.4.5 Distribución de los parámetros estimados . . . . .	160
2.5 Intervalos de confianza . . . . .	161

**Capítulo 3.3****Correlación y regresión**

3.1 Introducción . . . . .	164
3.2 Regresión y correlación lineal. . . . .	164
3.2.1 Rectas de regresión . . . . .	164
3.2.2 Coeficiente de correlación. . . . .	166
3.3 Regresión y correlación no lineales. . . . .	168
3.4 Regresión y correlación múltiple . . . . .	168
3.5 Tratamiento de muestras interdependientes . . . . .	169

**Apéndice 3.1  
Series cronológicas**

A.3.1.1 Introducción . . . . .	170
A.3.1.2 Metodología empleada en el estudio de series cronológicas . . . . .	170
A.3.1.3 Métodos de generación de series . . . . .	172
Bibliografía . . . . .	173

**Sección 4****PRINCIPIOS BÁSICOS  
DE QUÍMICA Y RADIOQUÍMICA  
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Símbolos . . . . .	177
0.1 Introducción general . . . . .	179
0.2 Bosquejo histórico. . . . .	179
0.3 Agradecimientos . . . . .	179

**Capítulo 4.1****Elementos de química del agua**

1.1 Introducción . . . . .	180
1.2 El agua como sustancia química pura . . . . .	180
1.3 El agua en la naturaleza como agente físico-químico . . . . .	180
1.3.1 El agua como disolvente . . . . .	180
1.3.2 Forma en que se encuentran las sustancias disueltas . . . . .	181
1.3.3 Expresión de las concentraciones . . . . .	181
1.3.4 Fuerza iónica $\mu$ . . . . .	182
1.3.5 Actividad . . . . .	182
1.3.6 Concentración de hidrogeniones, pH . . . . .	183
1.3.7 Ley de acción de masas . . . . .	183
1.3.8 El producto de solubilidad. Efecto de ion común . . . . .	184
1.3.9 Soluciones saturadas y no saturadas . . . . .	184
1.3.10 Reacciones de oxidación-reducción. Potencial redox . . . . .	185
1.4 Leyes de la disolución de gases . . . . .	186
1.5 Disolución de líquidos . . . . .	187
1.6 Disolución de sólidos. . . . .	187
1.7 Las sustancias coloidales y los geles . . . . .	189
1.8 Mecanismos del ataque químico a los minerales . . . . .	189
1.9 Intercambio iónico . . . . .	190
1.10 Fenómenos osmóticos . . . . .	191
1.11 Química de los iones derivados del ácido carbónico. Alcalinidades . . . . .	191
1.12 La disolución de calizas y dolomías. Agresividad a caliza e incrustabilidad . . . . .	192
1.12.1 Solubilidad del carbonato cálcico y del carbonato magnesico . . . . .	192

1.12.2 pH de equilibrio y CO <sub>2</sub> de equilibrio.	194	3.9 Notas sobre el muestreo de aguas superficiales . . . . .	220
1.12.3 Agresividad a caliza e incrustabilidad.	194		
1.12.4 Validez de los cálculos de agresividad a caliza. . . . .	198		
<b>Capítulo 4.2</b>			
<b>Composición de las aguas subterráneas</b>			
2.1 Introducción . . . . .	200	4.1 Introducción . . . . .	221
2.2 Sustancias que se encuentran disueltas en un agua natural subterránea. Iones fundamentales y menores . . . . .	200	4.2 Modos de expresión de las diferentes características químicas . . . . .	221
2.3 Características químicas de los iones y sustancias disueltas más importantes . . . . .	201	4.3 Clases de análisis químicos. . . . .	223
2.3.1 Aniones y sustancias aniónicas. . . . .	201	4.4 Balance de aniones y cationes en un análisis químico. Errores . . . . .	223
2.3.2 Cationes y sustancias catiónicas. . . . .	203	4.5 Presentación de los análisis químicos . . . . .	224
2.3.3 Principales gases disueltos . . . . .	205	4.6 Cálculos y comprobaciones que pueden realizarse en un análisis químico. . . . .	226
2.3.4 Aniones y sustancias aniónicas menores más importantes . . . . .	206	4.7 Aspectos económicos . . . . .	229
2.3.5 Cationes y sustancias catiónicas menores más importantes . . . . .	206		
2.4 Características físicas . . . . .	206		
2.4.1 Temperatura, θ . . . . .	207	5.1 Introducción . . . . .	230
2.4.2 Conductividad y resistividad, C y ρ . . . . .	207	5.2 Isótopos . . . . .	230
2.4.3 Densidad δ . . . . .	208	5.3 Núcleos radioactivos . . . . .	230
2.4.4 Color . . . . .	209	5.4 Leyes de la desintegración radioactiva. . . . .	231
2.4.5 Turbidez o turbiedad . . . . .	210	5.5 Actividad y unidades. . . . .	232
2.4.6 Materia en suspensión . . . . .	210	5.6 Energía de las radiaciones . . . . .	232
2.4.7 Sabor . . . . .	210	5.7 Interacción entre las radiaciones nucleares y la materia. . . . .	232
2.5 Características químicas y fisiquímicas . . . . .	211	5.8 Detección de las radiaciones . . . . .	233
2.5.1 Concentración de hidrogeniones, pH . . . . .	211	5.9 Medida de la actividad . . . . .	234
2.5.2 Residuo seco y total de sales disueltas, Rs y Sd . . . . .	211	5.10 Unidades, cantidades y dosis de radiación. . . . .	235
2.5.3 Alcalinidades TAC y TA . . . . .	211	5.11 Efectos biológicos de las radiaciones. Irradiación y contaminación . . . . .	235
2.5.4 Acidez . . . . .	212	5.12 Dosis permisibles de radiación y concentraciones máximas permisibles . . . . .	236
2.5.5 Durezas total, permanente y temporal o carbonatada (D <sub>t</sub> , D <sub>p</sub> , D <sub>c</sub> ) . . . . .	212	5.13 Isotopía del agua . . . . .	236
2.5.6 Demanda química de oxígeno (DQO) o materia orgánica (MO) . . . . .	212	5.14 Radioisótopos naturales primarios y sus series radioactivas. Presencia en el agua subterránea . . . . .	238
2.5.7 Demanda bioquímica de oxígeno DBO . . . . .	212	5.15 Radioisótopos naturales de origen cósmico. . . . .	239
2.5.8 Demanda de cloro y break-point . . . . .	213	5.16 Radioisótopos artificiales generados en pruebas nucleares . . . . .	240
	213	5.17 Otros radioisótopos artificiales . . . . .	240
<b>Capítulo 4.3</b>			
<b>Toma de muestras de agua subterránea</b>			
3.1 Introducción . . . . .	214	A.1 Introducción . . . . .	241
3.2 Métodos de toma de muestras en pozos . . . . .	214	A.2 Métodos gravimétricos . . . . .	241
3.3 Representatividad de las muestras de agua tomadas en sondeos y piezómetros . . . . .	216	A.3 Métodos volumétricos o valoraciones . . . . .	241
3.4 Número y frecuencia de las muestras . . . . .	217	A.4 Determinaciones conductivimétricas . . . . .	243
3.5 Envases para el transporte y almacenamiento . . . . .	218	A.5 Determinaciones electrométricas. . . . .	243
3.6 Transporte al laboratorio y almacenamiento. . . . .	218	A.6 Métodos colorimétricos y espectrofotométricos . . . . .	243
3.7 Identificación de las muestras . . . . .	218		
3.8 Determinación en el campo . . . . .	220		
<b>Apéndice 4.1</b>			
<b>Métodos de análisis químicos de aguas</b>			
A.1 Introducción . . . . .	241		
A.2 Métodos gravimétricos . . . . .	241		
A.3 Métodos volumétricos o valoraciones . . . . .	241		
A.4 Determinaciones conductivimétricas . . . . .	243		
A.5 Determinaciones electrométricas. . . . .	243		
A.6 Métodos colorimétricos y espectrofotométricos . . . . .	243		

A.7	Métodos de fotometría de llama. . . . .	244	3.1.3	Descripción del movimiento del agua. . . . .	267			
A.8	Otros métodos . . . . .	244	3.2	Inventario o almacenamiento del agua de la hidrosfera . . . . .	268			
<i>Bibliografía</i>	. . . . .	245	3.3	El flujo o balance hidráulico global . . . . .	270			
<b>Sección 5</b>								
<b>CONCEPTOS BÁSICOS Y DEFINICIONES</b>								
<b>Capítulo 5.1</b>								
<b>Concepto de hidrogeología</b>								
1.1	Concepto de hidrogeología . . . . .	249	3.4	Definiciones de conceptos básicos . . . . .	273			
1.2	Situación de la hidrogeología en el campo de las ciencias . . . . .	250	3.4.1	Infiltración. Humedecimiento del suelo. . . . .	273			
1.3	Evolución de los conceptos hidrogeológicos a lo largo del tiempo. . . . .	251	3.4.2	Embalse subterráneo . . . . .	274			
1.3.1	La utilización de las aguas del subsuelo en las civilizaciones antiguas . . . . .	251	3.4.3	Recarga y descarga natural . . . . .	274			
1.3.2	La civilización greco-romana: primeras interpretaciones científicas . . . . .	251	3.4.4	Escorrentía . . . . .	274			
1.3.3	La Edad Media y el Renacimiento . . . . .	252	3.4.5	Reservas hidráulicas . . . . .	275			
1.3.4	Los fundadores de la Hidrogeología (1600-1860) . . . . .	253	3.4.6	Recursos hidráulicos y caudal seguro. . . . .	276			
1.3.5	La Hidrogeología moderna (1860-1950) . . . . .	253	<i>Bibliografía</i>	. . . . .	279			
1.3.6	La Hidrología subterránea en España. . . . .	255	<b>Sección 6</b>					
1.4	Fuentes de información científica sobre hidrología subterránea . . . . .	256	<b>COMPONENTES PRIMARIOS DEL CICLO HIDROLÓGICO</b>					
1.4.1	Selección de libros de texto . . . . .	256	<b>Símbolos</b> . . . . .					
1.4.2	Publicaciones especializadas . . . . .	257	283					
<b>Capítulo 6.1</b>								
<b>Climatología aplicada de la hidrología</b>								
2.1	Introducción . . . . .	259	1.1	Introducción . . . . .	285			
2.2	Definición de acuífero, acuíclido, acuitardo y acuífugo. . . . .	259	1.2	Radiación . . . . .	285			
2.3	Formaciones geológicas como acuíferos . .	260	1.3	Temperatura . . . . .	285			
2.4	Parámetros hidrológicos fundamentales . .	261	1.4	Duración del día o insolación . . . . .	286			
2.4.1	Porosidad . . . . .	261	1.5	Presión . . . . .	286			
2.4.2	Permeabilidad o conductividad hidráulica . . . . .	262	humedad . . . . .	286				
2.4.3	Transmisividad . . . . .	263	1.6.1	Tensión de vapor . . . . .	286			
2.4.4	Coeficiente de almacenamiento . . . . .	263	1.6.2	Humedad absoluta . . . . .	286			
2.5	Tipos de acuíferos. . . . .	264	1.6.3	Déficit de saturación . . . . .	286			
<b>Capítulo 5.2</b>								
<b>Los acuíferos o embalses subterráneos</b>								
2.1	Introducción . . . . .	259	1.6.4	Humedad específica . . . . .	286			
2.2	Definición de acuífero, acuíclido, acuitardo y acuífugo. . . . .	259	1.6.5	Humedad relativa . . . . .	286			
2.3	Formaciones geológicas como acuíferos . .	260	1.6.6	Proporción de mezcla o relación de humedad . . . . .	286			
2.4	Parámetros hidrológicos fundamentales . .	261	1.6.7	Punto de rocío . . . . .	286			
2.4.1	Porosidad . . . . .	261	1.7	Viento . . . . .	287			
2.4.2	Permeabilidad o conductividad hidráulica . . . . .	262	1.8	Precipitación . . . . .	287			
2.4.3	Transmisividad . . . . .	263	1.9	Medida de las variables meteorológicas . .	287			
2.4.4	Coeficiente de almacenamiento . . . . .	263	1.10	Unidades . . . . .	287			
2.5	Tipos de acuíferos. . . . .	264	1.11	Estaciones climatológicas e instrumentos de medida . . . . .	289			
<b>Capítulo 5.3</b>								
<b>Situación y movimiento del agua en la hidrosfera</b>								
3.1	El ciclo hidrológico: concepto y elementos. .	266	1.11.1	Medida de la radiación . . . . .	289			
3.1.1	Introducción . . . . .	266	1.11.2	Medida de la temperatura . . . . .	289			
3.1.2	Localización, estado y origen del agua en el ciclo hidrológico . . . . .	266	1.11.3	Medida de la insolación . . . . .	290			

1.11.8 Medida de otros tipos de precipitación . . . . .	298	3.6.6 Grado de saturación . . . . .	312
1.12 Redes de observación . . . . .	298	3.6.7 Capacidad de retención específica . . . . .	312
<b>Capítulo 6.2</b>		3.7 Distribución vertical del agua en el suelo . . . . .	312
<b>Elaboración de datos climáticos</b>		3.7.1 Zonas de humedad . . . . .	312
2.1 Introducción . . . . .	299	3.7.2 Estado de presiones del agua en el suelo . . . . .	313
2.2 Reunión de información . . . . .	299		
2.3 Series climáticas . . . . .	299		
2.4 Análisis de datos de una variable meteorológica continua . . . . .	299		
2.5 Análisis de datos de lluvia . . . . .	300	<b>Capítulo 6.4</b>	
2.5.1 Módulo pluviométrico anual medio . . . . .	300	<b>Evaporación y transpiración</b>	
2.5.2 Lluvia media mensual . . . . .	301	4.1 Introducción . . . . .	314
2.5.3 Lluvia diaria. Curvas de altura de lluvia acumulada . . . . .	301	4.2 Evaporación . . . . .	314
2.5.4 Yetograma . . . . .	301	4.2.1 Concepto . . . . .	314
2.5.5 Curvas de intensidad-duración . . . . .	301	4.2.2 Factores que afectan a la evaporación . . . . .	315
2.5.6 Curvas de intensidad-duración-frecuencia . . . . .	302	4.2.3 Unidades e instrumentos para medir la evaporación . . . . .	316
2.6 Estimación de valores de las variables meteorológicas para una zona . . . . .	303	4.2.4 Métodos teóricos para cálculo de evaporación desde superficies de agua libre . . . . .	317
2.6.1 Lluvia media en una zona . . . . .	303	4.2.5 Fórmulas semi-empíricas para cálculo de evaporación desde superficies de agua libre . . . . .	319
2.6.2 Intensidad media de lluvia en una zona . . . . .	304	4.2.6 Reducción de la evaporación . . . . .	320
2.7 Órdenes de magnitud de la lluvia . . . . .	305	4.2.7 Variaciones de la evaporación y órdenes de magnitud . . . . .	320
<b>Capítulo 6.3</b>		4.3 Transpiración . . . . .	321
<b>El agua en el suelo</b>		4.3.1 Concepto . . . . .	321
3.1 Introducción . . . . .	307	4.3.2 Factores que afectan a la transpiración . . . . .	321
3.2 El suelo. Definición. Horizontes . . . . .	307	4.3.3 Medida de la transpiración . . . . .	322
3.3 Material sólido y gaseoso del suelo . . . . .	308	4.3.4 Variaciones de la transpiración . . . . .	322
3.3.1 Textura . . . . .	308		
3.3.2 Estructura . . . . .	309		
3.4 El agua en el suelo . . . . .	309	<b>Capítulo 6.5</b>	
3.4.1 Agua retenida por fuerzas no capilares . . . . .	309	<b>Evapotranspiración</b>	
3.4.2 Agua retenida por fuerzas capilares . . . . .	309	5.1 Introducción . . . . .	323
3.4.3 Agua no retenida por el suelo . . . . .	310	5.2 Concepto de evapotranspiración . . . . .	323
3.5 Humedad del suelo, su medida . . . . .	310	5.3 Unidades y métodos para el cálculo de la evapotranspiración . . . . .	324
3.5.1 Bloques porosos absorbentes . . . . .	310	5.3.1 Métodos teóricos: balance de energía . . . . .	324
3.5.2 Tensiómetros . . . . .	310	5.3.2 Métodos teóricos: perfiles de humedad y velocidad del viento . . . . .	325
3.5.3 Métodos que relacionan conductividad eléctrica del suelo con su contenido de humedad . . . . .	310	5.3.3 Métodos teóricos: flujo turbulento de humedad . . . . .	327
3.5.4 Métodos geofísicos . . . . .	310	5.3.4 Métodos semiempíricos: fórmula de Penman . . . . .	327
3.6 Contenido de humedad en el suelo. Parámetros característicos . . . . .	311	5.3.5 Medidas directas: evapotranspirómetro . . . . .	330
3.6.1 Grado de humedad . . . . .	311	5.3.6 Medidas directas: lisímetros . . . . .	331
3.6.2 Capacidad de campo . . . . .	311	5.3.7 Medidas directas: parcelas y cuencas experimentales . . . . .	331
3.6.3 Humedad equivalente . . . . .	311	5.3.8 Medidas directas: perfiles de humedad del suelo . . . . .	331
3.6.4 Punto de marchitez permanente . . . . .	311		
3.6.5 Agua utilizable por las plantas . . . . .	311		

<b>Capítulo 6.6</b>	
<b>Infiltración</b>	
6.1 Introducción . . . . .	342
6.2 Concepto de infiltración . . . . .	342
6.3 Factores que afectan a la infiltración . . . . .	343
6.3.1 Características del terreno o medio permeable . . . . .	343
6.3.2 Características del fluido que se infiltra . . . . .	344
6.4 Unidades y métodos para determinar la capacidad de infiltración . . . . .	344
6.4.1 Infiltrómetros . . . . .	344
6.4.2 Análisis de hidrogramas en cuencas pequeñas . . . . .	345
6.4.3 Lisímetros . . . . .	347
6.5 Índices de infiltración . . . . .	347
6.5.1 Índice $\Phi$ . . . . .	347
6.5.2 Índice W . . . . .	347
6.6 Volumen de agua infiltrada . . . . .	348
6.7 Órdenes de magnitud . . . . .	348
<b>Bibliografía . . . . .</b>	<b>349</b>
<b>Sección 7</b>	
<b>ELEMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE</b>	
<b>Símbolos . . . . .</b>	<b>353</b>
0.1 Introducción . . . . .	354
<b>Capítulo 7.1</b>	
<b>Aforos en cursos de agua</b>	
1.1 Conocimiento del régimen de un río . . . . .	355
1.1.1 Semimódulos . . . . .	355
1.1.2 Métodos de ajuste de alturas caudales	356
1.2 Medición de niveles-tiempos . . . . .	357
1.3 Escalas o limnímetros . . . . .	357
1.4 Limnógrafos . . . . .	357
1.4.1 El limnograma . . . . .	357
1.4.2 Clases de limnógrafos . . . . .	358
1.5 Molinetes . . . . .	362
1.6 Práctica de aforos directos. . . . .	363
1.6.1 Aforos con molinete . . . . .	363
1.6.2 Aforos químicos . . . . .	364
1.6.3 Aforos con trazadores radioactivos	368
1.6.4 Aforo con flotadores . . . . .	369
1.7 Emplazamiento de estaciones de aforos . . . . .	369
1.8 Clases de estaciones de aforos . . . . .	370
1.8.1 Estaciones de cauce natural . . . . .	370
1.8.2 Tramo canalizado con vertedero simple . . . . .	371
1.8.3 Tramo canalizado con vertederos múltiples . . . . .	372
1.8.4 Estaciones de resalto . . . . .	373
1.8.5 Utilización de centrales hidroeléctricas . . . . .	374
1.8.6 Observaciones finales . . . . .	374
<b>Capítulo 7.2</b>	
<b>Tratamientos de datos de aforo</b>	
2.1 Establecimiento de una red de aforos. . . . .	375
2.2 Presentación de datos . . . . .	376
2.3 Curva de caudales clasificados . . . . .	376
2.4 Distribución de frecuencia de las aportaciones . . . . .	380
2.5 Curvas de aportaciones mensuales . . . . .	381
2.6 Contraste de datos de aforo . . . . .	382
2.7 Métodos para completar datos inexistentes.	383
<b>Capítulo 7.3</b>	
<b>Análisis de hidrogramas</b>	
3.1 Componentes del yetograma . . . . .	385
3.2 La forma del hidrograma . . . . .	386
3.2.1 Influencia de la lluvia en la forma del hidrograma . . . . .	386
3.2.2 Hidrograma unitario . . . . .	388
3.2.3 Estimación de los principales elementos del hidrograma unitario cuando no se dispone de datos reales . . . . .	390
3.3 Separación de componentes de escorrentía de origen subterráneo . . . . .	392

3.3.1 Curva de agotamiento del hidrograma . . . . .	392	
3.3.2 Análisis de la curva de agotamiento . . . . .	394	
3.4 Factores que afectan la forma del hidrograma . . . . .	396	
<b>Capítulo 7.4</b>		
<b>Regulación</b>		
4.1 Conceptos generales . . . . .	399	
4.2 Técnicas de generación de datos. . . . .	399	
4.3 Utilización de la curva de aportaciones acumuladas. Garantía de suministro . . . . .	400	
4.4 Utilización de la curva de desviaciones acumuladas . . . . .	401	
4.5 Curva volumen de embalse-caudal regulado. . . . .	402	
4.6 Método de Becerril . . . . .	403	
4.7 Regulación de una cuenca para usos múltiples . . . . .	404	
4.8 Criterios de valoración de soluciones . . . . .	405	
<b>Capítulo 7.5</b>		
<b>Aplicaciones de los computadores electrónicos a la hidrología</b>		
5.1 Introducción . . . . .	406	
5.2 Conceptos generales sobre el tratamiento de la información con ordenador. . . . .	406	
5.2.1 Recepción de datos . . . . .	406	
5.2.2 Almacenamiento en memoria . . . . .	407	
5.2.3 Proceso de la información . . . . .	407	
5.2.4 Transmisión de los resultados . . . . .	408	
5.2.5 Sistemas operativos . . . . .	409	
5.3 Aplicación de los ordenadores a la hidrología . . . . .	409	
5.4 Aplicaciones a organización y control de datos hidrológicos . . . . .	409	
5.4.1 Descripción . . . . .	409	
5.4.2 Ejemplo de organización de datos. . . . .	410	
5.5 Mecanización de métodos de cálculo generales . . . . .	411	
5.6 Análisis de sistemas hidrológicos . . . . .	411	
5.6.1 Concepto de sistema, métodos de análisis de sistemas . . . . .	412	
5.6.2 Métodos de optimización directa . . . . .	413	
5.6.3 Métodos de simulación. . . . .	421	
<b>Apéndice 7.1</b>		
<b>Práctica de aforos con molinete y químicos</b>		
A.1.1 Aforo con molinete . . . . .	423	
A.1.2 Aforo químico en régimen constante . . . . .	430	
A.1.3 Aforo químico por el método de integración. . . . .	431	
<b>Apéndice 7.2</b>		
<b>Modelo matemático de simulación para el estudio de la planificación hidráulica de la cuenca del río Llobregat</b>		
A.2.1 Introducción . . . . .	433	
A.2.2 Objetivos . . . . .	433	
A.2.3 Modo de operar . . . . .	434	
A.2.4 Análisis de resultados . . . . .	436	
A.2.5 Análisis del papel de los acuíferos subterráneos . . . . .	441	
Bibliografía . . . . .	442	
<b>Sección 8</b>		
<b>TEORÍA ELEMENTAL DEL FLUJO DEL AGUA EN LOS MEDIOS POROSOS</b>		
<i>Símbolos</i> . . . . .	445	
0.1 Introducción general . . . . .	447	
0.2 Breve nota histórica . . . . .	447	
0.3 Agradecimientos . . . . .	448	
<b>Capítulo 8.1</b>		
<b>Principios generales del movimiento del agua en medios porosos. Ley de Darcy</b>		
1.1 Introducción . . . . .	449	
1.2 Porosidad . . . . .	449	
1.3 Velocidad del agua en los medios porosos . . . . .	450	
1.4 Estática y dinámica en los medios porosos. Gradiante hidráulico . . . . .	451	
1.5 La ley de Darcy . . . . .	453	
1.6 Ámbito de validez de la ley de Darcy . . . . .	453	
1.7 Permeabilidad o conductividad hidráulica . . . . .	454	
1.8 Dimensiones y unidades de los parámetros hidráulicos subterráneos . . . . .	456	
1.9 Homogeneidad, heterogeneidad, isotropía y anisotropía . . . . .	457	
1.10 Generalización de la ley de Darcy. . . . .	460	
1.11 Tensiones efectivas y presión neutra . . . . .	460	
1.12 Esfuerzos de circulación del agua subterránea . . . . .	461	
1.13 Flujos subterráneos que no siguen la ley de Darcy . . . . .	462	
1.14 El flujo subterráneo en medios permeables por fisuración . . . . .	462	
<b>Capítulo 8.2</b>		
<b>Valores y determinación de la porosidad y de la permeabilidad</b>		
2.1 Introducción . . . . .	464	
2.2 Aspectos teóricos de la porosidad . . . . .	464	

2.3 Efecto de las arcillas y de la compactación en la porosidad . . . . .	465	4.6 Puntos singulares en los sistemas de flujo . . . . .	496
2.4 Curvas granulométricas . . . . .	465	4.7 Transformación de la ecuación del flujo para acuíferos libres. Aproximaciones de Dupuit-Forchheimer . . . . .	497
2.5 Valores de la porosidad de materiales naturales . . . . .	466		
2.6 Determinación de la porosidad . . . . .	468		
2.6.1 Determinación de la porosidad total . . . . .	468		
2.6.2 Determinación de la porosidad eficaz en el laboratorio . . . . .	469		
2.6.3 Determinación de la porosidad eficaz en el campo . . . . .	470	5.1 Introducción . . . . .	501
2.7 Valores de la permeabilidad de terrenos naturales . . . . .	471	5.2 Leyes del flujo bidimensional. Función potencial y función de corriente . . . . .	501
2.8 Determinación de la permeabilidad . . . . .	473	5.3 Principios de construcción de las redes de flujo en medios homogéneos e isótropos . . . . .	503
2.8.1 Determinación de la permeabilidad en el campo . . . . .	473	5.4 Cálculo de los caudales en una red de flujo . . . . .	506
2.8.2 Determinación de la permeabilidad en el laboratorio. Permeámetros . . . . .	474	5.5 Cálculo de las presiones en una red de flujo . . . . .	508
2.8.3 Fórmulas de cálculo de la permeabilidad . . . . .	476	5.6 Sistemas horizontales de superficie libre . . . . .	509
2.8.4 Utilización de gráficos . . . . .	479	5.7 Redes de flujo en medios homogéneos anisótropos . . . . .	509
		5.8 Redes de flujo en medios heterogéneos . . . . .	511
		5.9 Redes de flujo en sistemas radiales . . . . .	512
		5.10 Análisis del régimen variable con redes de flujo . . . . .	513
		5.11 Introducción al método de relajación . . . . .	514
<b>Capítulo 8.3</b>			
<b>Ecuaciones diferenciales del flujo subterráneo</b>			
3.1 Introducción . . . . .	480		
3.2 Potencial de fuerzas y potencial de velocidades . . . . .	480		
3.3 Superficies equipotenciales, trayectorias y líneas de corriente . . . . .	481	<b>Capítulo 8.6</b>	
3.4 Ecuación de la conservación de masa en régimen estacionario . . . . .	482	<b>Oscilaciones de los niveles piezométricos del agua subterránea y sus causas</b>	
3.5 El coeficiente de almacenamiento específico en acuíferos elásticos . . . . .	484	6.1 Introducción . . . . .	516
3.6 Ecuación de la conservación de masa en régimen no estacionario. Coeficiente de almacenamiento del acuífero cautivo . . . . .	486	6.2 Tipos de oscilaciones piezométricas del agua subterránea . . . . .	516
3.7 El coeficiente de almacenamiento en acuíferos libres . . . . .	488	6.3 Oscilaciones rápidas de tipo periódico . . . . .	517
		6.3.1 Oscilaciones debidas a los cambios de presión atmosférica. Eficiencia barométrica . . . . .	517
		6.3.2 Oscilaciones debidas a los cambios de nivel de aguas superficiales. Eficiencia de las mareas . . . . .	519
		6.3.3 Oscilaciones debidas a la evapotranspiración . . . . .	521
		6.4 Oscilaciones rápidas no periódicas . . . . .	523
		6.5 Variaciones del nivel piezométrico originadas por extracciones de agua subterránea . . . . .	525
		6.6 Variaciones en la superficie del terreno a causa de bombeos en los acuíferos . . . . .	525
		6.7 Oscilaciones de los niveles piezométricos debidas a las variaciones en la recarga por la precipitación. Efectos estacionales . . . . .	528
		6.8 Oscilaciones de los niveles piezométricos en acuíferos recargados por un río . . . . .	531
		6.9 Fluctuaciones de gran período y tendencia de los niveles piezométricos . . . . .	532
<b>Capítulo 8.4</b>			
<b>Resolución de las ecuaciones diferenciales del flujo y problemas asociados</b>			
4.1 Introducción . . . . .	489		
4.2 Resolución de las ecuaciones diferenciales del flujo subterráneo . . . . .	489		
4.3 Condiciones iniciales y condiciones de contorno . . . . .	492		
4.4 Justificación de la existencia de la superficie de rezume o de goteo . . . . .	495		
4.5 Tipos de enlace de la superficie libre con los límites físicos del medio . . . . .	496		

**Capítulo 8.7****Superficies piezométricas**

7.1	Introducción . . . . .	534
7.2	Determinación de los niveles piezométricos . . . . .	535
7.3	Trazado de las curvas isopiezas . . . . .	537
7.4	Tipos de superficies piezométricas . . . . .	539
7.5	Interpretación cualitativa de superficies piezométricas . . . . .	540
7.6	Ejemplos de superficies piezométricas. . . . .	545
7.7	Ánálisis cuantitativo de superficies piezométricas . . . . .	548
7.8	Método del balance para el cálculo de la recarga y de la porosidad eficaz. . . . .	550
7.9	Mapas derivados de las superficies piezométricas . . . . .	552

**Capítulo 8.8****Capilaridad y flujo multifase**

8.1	Introducción . . . . .	553
8.2	Tensión superficial . . . . .	553
8.3	Capilaridad . . . . .	554
8.4	Capilaridad en los medios porosos . . . . .	556
8.5	Velocidad de ascenso capilar . . . . .	557
8.6	Formas de agua en el suelo . . . . .	558
8.7	Introducción al flujo multifase . . . . .	559
8.8	Flujo simultáneo de dos fluidos inmiscibles.	559
8.9	Imbibición . . . . .	561
8.10	Desplazamiento de un fluido por otro inmiscible con él . . . . .	561
8.11	Efecto de los cambios de granulometría del medio . . . . .	563
8.12	Efecto de las diferencias de densidad . . . . .	563

**Capítulo 8.9****Movimiento del agua en los medios porosos no saturados y teoría de la infiltración**

9.1	Introducción . . . . .	565
9.2	Succión e histéresis . . . . .	565
9.3	Potencial en los medios no saturados . . . . .	567
9.4	Ley de Darcy y permeabilidad en los medios porosos no saturados . . . . .	568
9.5	Ecuación de la continuidad . . . . .	570
9.6	Valores de los parámetros que definen el flujo del agua en medios no saturados . . . . .	570
9.7	Consideraciones sobre el flujo en medios no saturados inertes y en medios no saturados activos. Efectos osmóticos . . . . .	571
9.8	Consideraciones sobre el flujo en fase vapor. . . . .	572
9.9	Teoría elemental de la infiltración . . . . .	573

**Capítulo 8.10****Movimiento del agua en los medios permeables por fisuración**

10.1	Introducción . . . . .	576
10.2	Comportamiento hidráulico de las rocas fracturadas . . . . .	576
10.3	Heterogeneidad y anisotropía en los medios fracturados . . . . .	578
10.4	Movimiento del agua en los terrenos fracturados . . . . .	579

**Apéndice 8.1****Principios básicos sobre las ecuaciones diferenciales**

A.1.1	Introducción y definiciones . . . . .	581
A.1.2	Interpretación geométrica elemental del origen de las ecuaciones diferenciales. . . . .	581
A.1.3	Principios de la resolución de las ecuaciones diferenciales . . . . .	582
A.1.4	Las condiciones en el origen y las condiciones de contorno . . . . .	583
A.1.5	Problemas de contorno con valores y funciones propias (autovalores y autofunciones). . . . .	584
A.1.6	Notas sobre algunos de los métodos de resolución directa de ecuaciones diferenciales, de mayor interés en hidráulica subterránea. . . . .	584
A.1.6.1	Métodos directos simples . . . . .	584
A.1.6.2	Métodos de separación de variables. . . . .	584
A.1.6.3	Métodos de las transformadas integrales lineales . . . . .	586
A.1.6.4	Transformadas de Laplace. . . . .	586
A.1.6.5	Transformadas finitas de Fourier . . . . .	588
A.1.7	Notas sobre algunos de los métodos de resolución indirecta de ecuaciones diferenciales, de más interés en hidráulica subterránea. . . . .	589
A.1.7.1	Método de superposición . . . . .	589
A.1.7.2	Método de las imágenes . . . . .	589
A.1.7.3	Método de las funciones de Green. . . . .	590
A.1.8	Métodos numéricos y gráficos de resolución. . . . .	591
A.1.9	La función delta de Dirac . . . . .	591

**Apéndice 8.2****Principios de teoría vectorial de campos**

A.2.1	Magnitudes escalares y vectoriales . . . . .	593
A.2.2	Representación analítica de vectores. Representación de Hamilton . . . . .	593
A.2.3	Operaciones con vectores . . . . .	593
A.2.4	Campos escalares y campos vectoriales . . . . .	594
A.2.5	Superficies equipotenciales . . . . .	594
A.2.6	Función potencial. Campos derivados de potencial . . . . .	594

A.2.7	Operador (Nabla). Operadores gradiente, divergencia, rotacional y laplaciana . . . . .	595	1.5	Magnitudes de uso frecuente en el estudio de una captación. Captaciones completas e incompletas . . . . .	620
A.2.8	Los operadores diferenciales. Su invariancia.	596	1.6	Concepto de régimen permanente y régimen no permanente . . . . .	624
A.2.9	Propiedades y significado físico del gradiente. Líneas de campo. . . . .	596	1.7	Efectos de la anisotropía y heterogeneidad de los acuíferos reales . . . . .	625
A.2.10	Integral de un vector a lo largo de una línea y de una superficie. Circulación y flujo . .	597	1.8	Concepto de caudal específico y eficiencia de un pozo . . . . .	626
A.2.11	Teoremas de Gauss-Ostrogradski y de Stokes. Propiedades y significado de la divergencia y del rotacional . . . . .	597	1.9	Campos de bombeo . . . . .	627
A.2.12	Tubos de flujo . . . . .	598	1.10	Efectos de los límites de los acuíferos. . . .	627
A.2.13	Trayectorias y líneas de corriente . . . . .	598	1.11	Ensayos de bombeo y puntos de observación.	627
A.2.14	Expresión de los operadores Grad, div, rot y $\nabla^2$ en coordenadas cilíndricas y esféricas.	598	1.12	Fórmulas básicas . . . . .	628
<b>Apéndice 8.3</b>					
<b>Funciones de variable compleja y métodos de la teoría de funciones</b>					
A.3.1	Resumen de las propiedades de los números complejos . . . . .	600	2.1	Introducción e hipótesis de base. . . . .	630
A.3.2	Números complejos conjugados y funciones armónicas conjugadas . . . . .	601	2.2	Pozo en un acuífero cautivo. Régimen estacionario . . . . .	630
A.3.3	La transformación conforme . . . . .	603	2.2.1	Pozo en el centro de una isla circular y en un acuífero infinito. . . . .	631
A.3.4	Formas simples de transformación conforme . . . . .	603	2.2.2	Casos en que el nivel es variable en el contorno . . . . .	632
A.3.5	Transformación de la hodógrafa de velocidades . . . . .	604	2.2.3	Pozo excéntrico en una isla circular . . . . .	633
A.3.6	Las funciones de Zhukovsky . . . . .	605	2.3	Pozo en un acuífero cautivo. Régimen no permanente . . . . .	634
A.3.7	La transformación de Schwarz-Christoffel . . . . .	605	2.4	Pozo en un acuífero semiconfinado. Régimen estacionario . . . . .	636
<i>Bibliografía</i>	. . . . .	606	2.5	Pozo en un acuífero semiconfinado. Régimen no permanente . . . . .	639
<b>Sección 9</b>					
<b>HIDRÁULICA DE CAPTACIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA</b>					
<i>Símbolos</i>	. . . . .	614	2.6	Pozo en un acuífero libre sin recarga. Régimen permanente. . . . .	640
0.1	Objetivos del tema . . . . .	617	2.6.1	Formulación general. . . . .	640
0.2	Introducción general . . . . .	617	2.6.2	Fórmulas para el cálculo de la altura de la superficie de rezume . . . . .	643
<b>Capítulo 9.1</b>					
<b>Conceptos fundamentales de la hidráulica de captaciones de agua</b>					
1.1	Introducción . . . . .	619	2.6.3	Corrección de Jacob . . . . .	644
1.2	Recapitulación de conceptos fundamentales.	619	2.7	Pozo en un acuífero libre sin recarga. Régimen no estacionario . . . . .	644
1.3	Recapitulación de parámetros fundamentales de la hidráulica subterránea . . . . .	619	2.8	Pozo en un acuífero libre recargado uniformemente. Régimen estacionario . . . . .	645
1.4	Captaciones de agua subterránea. Embudo de bombeo . . . . .	620	2.9	Pozo en un acuífero semilibre. Régimen estacionario . . . . .	647
<b>Capítulo 9.3</b>					
<b>Aspectos prácticos de la teoría general de la hidráulica de pozos completos con caudal constante y en régimen estacionario</b>					
3.1	Introducción . . . . .	648			
3.2	Pozo en un acuífero cautivo, en régimen permanente . . . . .	648			
3.2.1	Cálculo de los descensos . . . . .	648			
3.2.2	Cálculo de caudales y del caudal específico . . . . .	649			

3.2.3 Influencia del radio del pozo en el caudal obtenido . . . . .	650	4.5 Pozo en un acuífero semiconfinado en régimen no permanente . . . . .	676	
3.2.4 Estimación del caudal específico a partir de la transmisividad del acuífero . . . . .	651	4.5.1 Método de coincidencia de Walton-Hantush . . . . .	676	
3.2.5 Perfil de descensos . . . . .	652	4.5.2 Métodos logarítmicos . . . . .	679	
3.2.6 Análisis de datos de ensayos de bombeo . . . . .	652	4.6 Pozo en un acuífero libre en régimen no permanente . . . . .	681	
3.3 Pozo en acuífero semiconfinado en régimen permanente . . . . .	654	<b>Capítulo 9.5</b>		
3.3.1 Cálculo de los descensos . . . . .	654	<b>Superposición de efectos e interferencia de pozos completos</b>		
3.3.2 Cálculo de caudales y del caudal específico . . . . .	655	5.1 La ley de superposición. . . . .	684	
3.3.3 Perfil de descensos . . . . .	655	5.2 Cálculo de los descensos . . . . .	684	
3.3.4 Análisis de los datos de bombeo. Método de coincidencia de curvas . . . . .	656	5.2.1 En un punto cualquiera . . . . .	684	
3.4 Pozos en acuíferos libres en régimen permanente . . . . .	658	5.2.2 En los pozos de bombeo . . . . .	685	
3.4.1 Cálculo de los descensos . . . . .	658	5.2.3 Descensos en áreas de bombeo uniforme . . . . .	685	
3.4.2 Cálculo de caudales y del caudal específico . . . . .	660	5.3 Superposición de efectos en acuíferos libres. . . . .	686	
3.4.3 Perfil de descensos de la superficie libre . . . . .	661	5.4 Cálculo de los caudales, conocidos los descensos en un campo de bombeo . . . . .	687	
3.4.4 Análisis de datos de ensayos de bombeo . . . . .	662	5.5 Consideraciones acerca de la distancia óptima entre pozos. . . . .	688	
<b>Capítulo 9.4</b>		5.6 Par de pozos de bombeo de igual caudal. . . . .	689	
<b>Aspectos prácticos de la teoría general de la hidráulica de pozos completos con caudal constante y en régimen no estacionario</b>		5.7 Pozo de recarga y pozo de bombeo de igual caudal . . . . .	690	
4.1 Introducción . . . . .	664	<b>Capítulo 9.6</b>		
4.2 Pozo en acuífero cautivo en régimen no permanente. Método de Theis. . . . .	664	<b>Recuperación de niveles después del cese del bombeo en un pozo</b>		
4.2.1 Cálculo de los descensos . . . . .	664	6.1 Introducción y formulación general. . . . .	691	
4.2.2 Cálculo de los caudales y del caudal específico . . . . .	665	6.2 Cálculo de las características de un acuífero cautivo a partir de los datos de recuperación . . . . .	692	
4.2.3 Perfiles de descensos . . . . .	666	6.3 Recuperación en acuíferos semiconfinados y libres . . . . .	694	
4.2.4 Curvas de descensos-tiempos . . . . .	666	6.4 Evolución de niveles en el campo de bombeo . . . . .	695	
4.2.5 Análisis de ensayos de bombeo . . . . .	667	6.5 Anomalías en la recuperación . . . . .	695	
4.3 Pozo en un acuífero cautivo en régimen no permanente. Aproximación logarítmica de Jacob . . . . .	670	<b>Capítulo 9.7</b>		
4.3.1 Cálculo de los descensos . . . . .	670	<b>Pozos en acuíferos limitados.</b>		
4.3.2 Cálculo de los caudales y del caudal específico . . . . .	671	<b>Teoría de las imágenes</b>		
4.3.3 Perfiles de descensos . . . . .	671	7.1 Introducción . . . . .	698	
4.3.4 Curvas de descensos-tiempos. . . . .	673	7.2 Principio físico de la teoría de las imágenes . . . . .	698	
4.3.5 Análisis de ensayos de bombeo . . . . .	673	7.2.1 Acuífero con un borde rectilíneo impermeable . . . . .	698	
4.3.6 Empleo del método de Theis y de la aproximación logarítmica de Jacob . . . . .	675	7.2.2 Acuífero con un borde rectilíneo de recarga . . . . .	699	
4.3.7 Descenso medio en un período de tiempo . . . . .	675	7.3 Pozo en las proximidades de un río . . . . .	699	
4.4 Otros métodos de valoración de caudales específicos y ensayos de bombeo . . . . .	676	7.3.1 Cálculo de caudales y descensos . . . . .	699	
		7.3.2 Curvas de descensos, tiempos y perfiles de descensos . . . . .	702	

<b>7.3.3 Ensayos de bombeo . . . . .</b>	704	<b>9.5.4 Notas sobre los efectos de los pozos incompletos en las curvas de descensos-tiempos . . . . .</b>	761
<b>7.4 Pozo en las proximidades de un borde impermeable . . . . .</b>	704	<b>9.6 Valoración de ensayos de bombeo con pozos incompletos . . . . .</b>	763
<b>7.4.1 Cálculo de caudales y descensos . . . . .</b>	704	<b>9.6.1 Régimen permanente. Perfiles de descensos-distancia . . . . .</b>	763
<b>7.4.2 Curvas de descensos-tiempos y perfiles de descensos . . . . .</b>	705	<b>9.6.2 Régimen variable. Curvas de descensos-tiempos . . . . .</b>	763
<b>7.4.3 Ensayos de bombeo . . . . .</b>	706	<b>9.6.3 Recuperación en los pozos incompletos . . . . .</b>	765
<b>7.5 Presencia de barreras en caso de acuífero semiconfinado . . . . .</b>	707		
<b>7.6 Présencia de varias barreras . . . . .</b>	707		
<b>7.7 Barreras reales . . . . .</b>	716		
<b>7.8 Distancias a los límites en acuíferos cautivos . . . . .</b>	716		
<b>7.8.1 Un solo límite . . . . .</b>	716		
<b>7.8.2 Varias barreras . . . . .</b>	719		
<b>7.9 Localización del pozo imagen. . . . .</b>	719		
<b>7.10 Líneas de recarga de longitud finita y semi-infinita . . . . .</b>	720		
<b>7.11 Volumen de agua tomada de un río por recarga inducida . . . . .</b>	721		
<b>7.12 Influencia de los límites en los ensayos de recuperación . . . . .</b>	724		
<b>7.12.1 Límite de recarga . . . . .</b>	724		
<b>7.13 Pozo en el centro de un recinto circular con límites impermeables . . . . .</b>	726		
<b>Capítulo 9.8</b>		<b>Capítulo 9.10</b>	
<b>Efectos de drenaje diferido y problemas asociados a los acuíferos libres</b>		<b>Acuíferos semiconfinados. Casos complejos</b>	
<b>8.1 Introducción . . . . .</b>	728	10.1 Consideraciones generales . . . . .	767
<b>8.2 Efectos del drenaje diferido en acuíferos libres . . . . .</b>	728	10.2 Pozo en un acuífero semiconfinado por dos acuitardos en régimen permanente . . . . .	767
<b>8.3 Efecto del descenso de la superficie freática . . . . .</b>	735	10.3 Pozo en un acuífero semiconfinado debajo de dos acuíferos en régimen permanente . . . . .	770
<b>8.4 Tendencias modernas respecto al drenaje diferido . . . . .</b>	740	10.4 Sistema de dos acuíferos separados por un acuitardo, con un pozo que penetra uno de los acuíferos. Régimen variable . . . . .	770
		10.5 Acuífero entre un estrato impermeable y un acuitardo a su vez limitado por otro estrato impermeable. Régimen variable . . . . .	774
		10.6 Efectos en los niveles en acuíferos separados del de bombeo . . . . .	775
<b>Capítulo 9.9</b>		<b>Capítulo 9.11</b>	
<b>Pozos incompletos</b>		<b>Pozos en acuíferos reales</b>	
<b>9.1 Introducción . . . . .</b>	741	11.1 Introducción . . . . .	776
<b>9.2 Pozos incompletos en régimen permanente . . . . .</b>	742	11.2 Pozos en acuíferos anisótropos . . . . .	776
<b>9.2.1 Descenso en el pozo . . . . .</b>	743	<b>11.2.1 Anisotropía en un plano vertical . . . . .</b>	776
<b>9.2.2 Cálculo del caudal . . . . .</b>	748	<b>11.2.2 Anisotropía en un plano horizontal . . . . .</b>	778
<b>9.2.3 Descensos en piezómetros . . . . .</b>	749		
<b>9.3 Efectos de la estratificación en pozos incompletos . . . . .</b>	751	11.3 Pozos en acuíferos estratificados . . . . .	779
<b>9.4 Pozos asimilables a un sumidero puntual . . . . .</b>	754	<b>11.3.1 Régimen permanente . . . . .</b>	779
<b>9.5 Pozos incompletos en régimen no permanente . . . . .</b>	755	<b>11.3.2 Régimen variable . . . . .</b>	781
<b>9.5.1 Formulaciones generales . . . . .</b>	755	11.4 Acuíferos heterogéneos . . . . .	783
<b>9.5.2 Descenso en el pozo y caudal de bombeo . . . . .</b>	759	11.5 Efectos de la existencia de heterogeneidades en los niveles semiconfinantes . . . . .	785
<b>9.5.3 Descenso en puntos de observación . . . . .</b>	761	11.6 Acuíferos de espesor variable . . . . .	785
		11.7 Pozo en un acuífero inclinado con superficie piezométrica horizontal . . . . .	786
		11.8 Efectos de cambios en las propiedades del acuífero en las inmediaciones del pozo . . . . .	787
		11.9 Acuíferos cautivos que pasan a libres . . . . .	788
		11.10 Cambios de las propiedades del medio permeable . . . . .	789
<b>Capítulo 9.12</b>			
<b>Pozos en acuíferos con flujo natural</b>			
<b>12.1 Introducción . . . . .</b>	791		
<b>12.2 Acuífero cautivo en régimen permanente . . . . .</b>	791		

12.3	Acuífero cautivo de espesor constante en régimen variable . . . . .	792	15.9	Gráficos de descenso específico-tiempo . . . . .	845
12.4	Acuífero libre en régimen permanente . . . . .	793	15.10	Efecto del relleno en los pozos . . . . .	845
12.5	Régimen no permanente . . . . .	794	<b>Capítulo 9.16</b>		
12.6	Pozo de recarga y pozo de bombeo en un acuífero con flujo natural . . . . .	797	<b>Captaciones de agua horizontales.</b>		
<b>Capítulo 9.13</b>			<b>Drenes y galerías. Régimen estacionario</b>		
<b>Bombeos en pozos de gran diámetro</b>			16.1	Introducción . . . . .	846
13.1	Consideraciones generales . . . . .	799	16.2	Líneas de drenaje totalmente penetrantes de gran longitud, con extracción de un caudal constante en régimen estacionario . . . . .	847
13.2	Bombeo en un pozo de gran diámetro construido en un material muy poco permeable.	799	16.2.1	Acuífero cautivo y régimen estacionario . . . . .	847
13.3	Bombeo en un pozo de gran diámetro construido en un material permeable . . . . .	800	16.2.2	Acuífero libre . . . . .	848
13.4	Influencia en la recuperación. . . . .	803	16.2.3	Acuífero semiconfinado . . . . .	849
<b>Capítulo 9.14</b>			16.2.4	Régimen estacionario con recarga uniforme. Acuífero entre dos ríos . . . . .	850
<b>Bombeos a caudal variable y discontinuo</b>			16.2.5	Presencia de límites en el acuífero. . . . .	853
14.1	Introducción . . . . .	805	16.3	Líneas de drenaje parcialmente penetrantes y de gran longitud, con extracción de un caudal constante en régimen estacionario . . . . .	853
14.2	Bombeos a caudal variable. Cálculo de descensos . . . . .	805	16.4	Dren horizontal de gran longitud y pequeño diámetro . . . . .	854
14.3	Aplicación a ensayos de bombeo en acuífero cautivo . . . . .	809	16.5	Drenes en acuíferos con flujo natural . . . . .	857
14.4	Caudal variable por descenso de nivel en el pozo . . . . .	812	16.6	Líneas de drenaje totalmente penetrantes de longitud finita . . . . .	859
14.5	Ensayos de recuperación en pozos bombeados a caudal variable . . . . .	813	<b>Capítulo 9.17</b>		
14.6	Extracción o introducción instantánea de agua en un pozo. Cuchareo . . . . .	815	<b>Captaciones de agua horizontales en régimen no permanente</b>		
14.7	Bombeos intermitentes. Bombeos cíclicos. .	818	17.1	Introducción . . . . .	861
14.8	Pozos con bombeo a descenso constante. Pozos surgentes. . . . .	822	17.2	Líneas de drenaje de gran longitud con extracción de un caudal constante y en régimen no estacionario . . . . .	861
<b>Capítulo 9.15</b>			17.3	Líneas de drenaje de gran longitud a descenso constante . . . . .	863
<b>Pozos reales. Eficiencia de un pozo y curvas características</b>			17.4	Régimen dinámico del agua subterránea entre dos zanjas paralelas . . . . .	865
15.1	Introducción . . . . .	825	17.5	Problemas relacionados con acuíferos libres. . . . .	870
15.2	Origen del descenso observado en los pozos de bombeo . . . . .	825	17.6	Fluctuaciones periódicas de nivel en líneas de drenaje de gran longitud . . . . .	873
15.3	Ánalisis del descenso en los pozos . . . . .	826	17.7	Caudales y régimen de base de ríos y fuentes . . . . .	874
15.3.1	Fórmula básica . . . . .	826	<b>Capítulo 9.18</b>		
15.3.2	Realización de los ensayos . . . . .	827	<b>Captaciones de drenes radiales y líneas de pozos puntuales</b>		
15.3.3	Valoración de los resultados . . . . .	829	18.1	Introducción . . . . .	876
15.3.4	Discusión de la ecuación de descenso . . . . .	834	18.2	Caudales y descensos en un sistema de zanjas radiales en régimen estacionario. . . . .	877
15.4	Eficiencia de un pozo . . . . .	838	18.3	Pozos de drenes radiales . . . . .	878
15.5	Curvas características . . . . .	839	18.4	Líneas de pozos . . . . .	880
15.6	Curvas características en ausencia de pérdidas en el pozo . . . . .	839			
15.7	Curvas características en pozos reales . . . . .	840			
15.8	Anomalías en las curvas características . . . . .	842			

**Capítulo 9.19****Introducción a la hidráulica de captaciones en medios fracturados y al análisis estadístico de datos de caudales de pozos**

19.1	Introducción . . . . .	882	21.5	Representación gráfica de los resultados . . . . .	920
19.2	Relación entre el acuífero fracturado y el pozo . . . . .	882	21.6	Valoración de los ensayos de bombeo . . . . .	921
19.3	Productividad de los pozos en rocas fracturadas . . . . .	889	21.6.1	Principios generales . . . . .	921
19.4	Validez de los ensayos de bombeo en pozos en rocas fracturadas . . . . .	891	21.6.2	Valoración de datos en régimen estacionario . . . . .	921
19.5	Efectos de capacidad en las grietas grandes . . . . .	893	21.6.3	Valoración de los descensos obtenidos en un punto de observación (régimen no estacionario) . . . . .	923
19.6	Efectos hidráulicos del desarrollo por acidificación en los terrenos calcáreos . . . . .	893	21.6.4	Valoración de los descensos en función del tiempo y de la distancia . . . . .	927
19.7	Análisis estadístico de datos de caudales de pozos . . . . .	894	21.6.5	Valoración de los ensayos de recuperación . . . . .	929
19.8	Profundidad óptima de los pozos en rocas fracturadas y variación de la permeabilidad en profundidad . . . . .	900	21.6.6	Comentarios a la valoración de los datos de descensos medidos en el pozo de bombeo . . . . .	929
			21.6.7	Comentarios a las mediciones en puntos de observación en acuíferos superpuestos y en el propio acuífero . . . . .	930
			21.7	Reproductividad de los ensayos de bombeo . . . . .	930
			21.8	Ánalysis de ensayos de bombeo con calculadoras . . . . .	930

**Capítulo 9.20****Preparación y ejecución de ensayos de bombeo**

20.1	Introducción . . . . .	903	A.1.1	Introducción . . . . .	931
20.2	Tipos de ensayos de bombeo y de aforos de pozos . . . . .	903	A.1.2	Funciones de error . . . . .	931
20.3	Selección del lugar del ensayo del bombeo . . . . .	904	A.1.3	Funciones de Bessel . . . . .	931
20.4	Conocimiento geológico del área afectada por el bombeo . . . . .	904	A.1.4	Función de pozo para acuífero confinado . . . . .	933
20.5	Características del pozo de bombeo . . . . .	905	A.1.5	Función de pozo para acuífero semiconfinado . . . . .	935
20.6	Piezómetros y pozos de observación . . . . .	906	A.1.6	Función Gamma . . . . .	935
20.7	Selección de la maquinaria y del caudal de bombeo . . . . .	907	A.1.7	Función M . . . . .	936
20.8	Medida y ajuste del caudal de bombeo . . . . .	909			
20.9	Vertido del agua extraída . . . . .	910			
20.10	Medida de los niveles piezométricos . . . . .	910			
20.11	Duración de los ensayos . . . . .	911			
20.12	Plan del bombeo y de las mediciones . . . . .	912			
20.13	Partes de bombeo . . . . .	913			
20.14	Observaciones previas . . . . .	914			
20.15	Consideraciones generales . . . . .	914			

**Capítulo 9.21****Valoración de ensayos de bombeo en pozos a caudal constante**

21.1	Introducción . . . . .	916	A.3.1	Método de la tangente o de Chow . . . . .	954
21.2	Corrección de los datos de descensos . . . . .	916	A.3.2	Cálculo de la transmisividad conociendo el caudal específico o el descenso en un momento dado de un bombeo a caudal constante (método de Ogden) . . . . .	956
21.2.1	Correcciones por influencias externas . . . . .	916	A.3.3	Método del cociente . . . . .	958
21.2.2	Correcciones por influencias internas . . . . .	917	A.3.4	Método semilogarítmico de análisis de ensayos de bombeo en acuíferos semiconfinados en régimen no permanente (método de Hantush) . . . . .	960
21.3	Variaciones en el acuífero capaces de producir anomalías en los ensayos de bombeo . . . . .	918			
21.4	Fiabilidad de los valores de los descensos . . . . .	919			

**Apéndice 9.1****Funciones matemáticas sencillas de uso frecuente en hidráulica de captaciones de agua**

A.1.1	Introducción . . . . .	931
A.1.2	Funciones de error . . . . .	931
A.1.3	Funciones de Bessel . . . . .	931
A.1.4	Función de pozo para acuífero confinado . . . . .	933
A.1.5	Función de pozo para acuífero semiconfinado . . . . .	935
A.1.6	Función Gamma . . . . .	935
A.1.7	Función M . . . . .	936

**Apéndice 9.2****Tablas de las funciones de uso más frecuente en la hidráulica de captaciones de agua****Apéndice 9.3****Métodos especiales de análisis de datos de ensayos de bombeo en pozos completos**

A.3.1	Método de la tangente o de Chow . . . . .	954
A.3.2	Cálculo de la transmisividad conociendo el caudal específico o el descenso en un momento dado de un bombeo a caudal constante (método de Ogden) . . . . .	956
A.3.3	Método del cociente . . . . .	958
A.3.4	Método semilogarítmico de análisis de ensayos de bombeo en acuíferos semiconfinados en régimen no permanente (método de Hantush) . . . . .	960

A.3.5	Método de superposición para el análisis de ensayos de bombeo en acuíferos semiconfinados en régimen no permanente (método de Hantush) . . . . .	962
<b>Apéndice 9.4</b>		
<b>Demostración de la validez de la fórmula de Dupuit para el cálculo de los caudales</b>		
<b>Apéndice 9.5</b>		
<b>Método gráfico para analizar los datos de ensayos de bombeo escalonados</b>		
<b>Apéndice 9.6</b>		
<b>Determinación de la permeabilidad mediante ensayos en sondeos de pequeño diámetro y catas en el terreno</b>		
A.6.1	Generalidades . . . . .	969
A.6.2	Ensayos Lefranc . . . . .	969
A.6.3	Ensayos Lugeon . . . . .	970
A.6.4	Método de Gilg-Gavard. . . . .	971
A.6.5	Ensayos del United States Bureau of Reclamation y otros . . . . .	972
A.6.6	Ensayos varios . . . . .	974
A.6.7	Ensayos de producción . . . . .	977
A.6.8	Comentarios acerca de los ensayos de permeabilidad piezométricos . . . . .	980
<b>Apéndice 9.7</b>		
<b>Determinación de la porosidad de un ensayo de bombeo</b>		
<b>Apéndice 9.8</b>		
<b>Consideraciones sobre la respuesta de los piezómetros</b>		
<b>Apéndice 9.9</b>		
<b>Sistemas de medición del nivel piezométrico en los sondeos y captaciones de agua</b>		
A.9.1	Introducción . . . . .	988
A.9.2	Casos que pueden presentarse. . . . .	988
A.9.3	Sistemas de medición . . . . .	989
A.9.3.1	Sistemas manuales eléctricos . . . . .	989
A.9.3.2	Sistemas manuales acústicos . . . . .	990
A.9.3.3	Sistemas manuales manométricos de presión (línea de aire) . . . . .	991
A.9.3.4	Sistemas manuales de flotador o por pérdida de tensión . . . . .	992
A.9.3.5	Otros sistemas manuales . . . . .	993
A.9.3.6	Sistemas automáticos no inscriptores o limnímetros. . . . .	993
A.9.3.7	Sistemas automáticos inscriptores o limnígrafos . . . . .	994
<b>Bibliografía</b>	. . . . .	995

## Sección 10

### HIDROGEOQUÍMICA

<i>Símbolos</i> . . . . .	1005
0.1 Introducción general . . . . .	1007
0.2 Breve bosquejo histórico . . . . .	1007

#### Capítulo 10.1

##### Apote de sales y fenómenos modificadores

1.1 Introducción . . . . .	1008
1.2 Sales solubles que pueden ser aportadas por los diferentes tipos de rocas . . . . .	1008
1.2.1 Rocas ígneas y ataque de los silicatos.	1008
1.2.2 Rocas metamórficas . . . . .	1009
1.2.3 Rocas sedimentarias . . . . .	1010
1.3 Origen y propiedades geoquímicas de las sustancias disueltas en las aguas subterráneas . . . . .	1010
1.3.1 Aniones . . . . .	1011
1.3.2 Cationes . . . . .	1012
1.3.3 Gases disueltos . . . . .	1012
1.4 Los fenómenos modificadores. . . . .	1012
1.4.1 Reducción de sulfatos y de hierro .	1013
1.4.2 Intercambio iónico . . . . .	1013
1.4.3 Fenómenos de oxidación-reducción .	1015
1.4.4 Concentraciones y precipitaciones. .	1015
1.4.5 Efecto combinado de los efectos modificadores . . . . .	1016
1.4.6 Hidrogeoquímica en rocas carbonatadas . . . . .	1016
1.5 Efectos de los fenómenos químicos en las permeabilidades . . . . .	1018

#### Capítulo 10.2

##### Evolución geoquímica de las aguas en los acuíferos

2.1 Introducción . . . . .	1019
2.2 La adquisición de sales durante la infiltración . . . . .	1019
2.2.1 Concentración del agua de lluvia .	1019
2.2.2 Incremento de salinidad . . . . .	1020
2.3 El agua freática en las zonas de regadío .	1021
2.4 El movimiento del agua subterránea y su composición química . . . . .	1022
2.5 Evolución de la composición química de un agua de circulación regional . . . . .	1023
2.6 Acción de los fenómenos modificadores en zonas costeras . . . . .	1024
2.7 Interés de algunas relaciones entre iones disueltos. Índices hidrogeoquímicos . . . . .	1024
2.8 Relaciones entre geología, litología y composición de las aguas subterráneas . . . . .	1027

2.8.1 Relaciones litología-composición de las aguas subterráneas . . . . .	1027	3.6 Mapas hidrogeoquímicos . . . . .	1046
2.8.2 Relaciones geología-geomorfología-composición de las aguas subterráneas. Tiempo de permanencia . . . . .	1027	3.7 Empleo de los diagramas y gráficos . . . . .	1047
2.8.3 Variaciones laterales y verticales de la composición química del agua. Estratificación hidroquímica . . . . .	1027	3.8 Clasificación de las aguas . . . . .	1058
2.8.4 Estudio en laboratorio de las relaciones roca-agua . . . . .	1029	3.8.1 Objeto . . . . .	1058
2.8.5 Interés y significado de los elementos menores y de los elementos traza . . . . .	1030	3.8.2 Clasificaciones simples . . . . .	1058
2.9 Variaciones temporales en la composición del agua subterránea. . . . .	1031	3.8.3 Clasificaciones geoquímicas . . . . .	1059
2.10 Clasificación de las aguas subterráneas por su origen y tiempo de contacto con el acuífero. Origen de las salmueras naturales . . . . .	1032	3.9 Clasificación mediante diagramas y planos . . . . .	1063
2.11 Determinación de parámetros hidrológicos a partir de datos químicos . . . . .	1034	<b>Capítulo 10.4</b>	
2.11.1 Notas generales . . . . .	1034	<b>Temperatura del agua.</b>	
2.11.2 Determinación de la infiltración por balance de cloruros . . . . .	1034	<b>Aguas minerales y aguas termales</b>	
2.11.3 Separación de la componente subterránea en el análisis de hidrogramas . . . . .	1035	4.1 Introducción . . . . .	1064
2.11.4 Determinación del caudal de fuentes salinas sumergidas . . . . .	1036	4.2 Aguas minerales en general y sus tipos . . . . .	1064
2.11.5 Estudio de mezclas de aguas . . . . .	1036	4.3 Notas históricas sobre las aguas minerales y termominerales . . . . .	1065
2.11.6 Balances químicos . . . . .	1036	4.4 Efectos medicinales . . . . .	1065
<b>Capítulo 10.3</b>		4.5 La temperatura de las aguas subterráneas . . . . .	1066
<b>Técnicas de estudio</b>		4.5.1 Origen . . . . .	1066
3.1 Introducción . . . . .	1037	4.5.2 Fluctuaciones en la temperatura del agua . . . . .	1066
3.2 Representación gráfica de las características químicas y su utilidad . . . . .	1037	4.5.3 Aporte de calor interno. Gradiente geotérmico . . . . .	1069
3.3 Diagramas hidroquímicos . . . . .	1037	4.6 Relación entre el gradiente geotérmico y la temperatura del agua subterránea . . . . .	1069
3.3.1 Diagramas columnares. Diagramas de Collins . . . . .	1037	4.7 Áreas geotérmicas y sistemas geotérmicos e hidrotermales . . . . .	1071
3.3.2 Diagramas triangulares. Diagrama de Piper . . . . .	1038	4.8 Geoquímica de las áreas geotérmicas e hidrotermales . . . . .	1073
3.3.3 Diagramas circulares . . . . .	1041	4.9 Indicadores geoquímicos de la temperatura profunda . . . . .	1074
3.3.4 Diagramas poligonales y radiales. Diagrama de Stiff modificado . . . . .	1041	4.10 Formaciones asociadas a las aguas minerales y termominerales . . . . .	1075
3.3.5 Diagramas de columnas verticales. Diagrama de columnas verticales logarítmicas de Schoeller-Berkaloff . . . . .	1042	4.11 Composición de las aguas minerales y origen de las sales disueltas . . . . .	1075
3.3.6 Diagramas bidimensionales de dispersión . . . . .	1044	<b>Apéndice 10.1</b>	
3.4 Diagramas de frecuencias . . . . .	1045	<b>Datos geoquímicos</b>	
3.5 Análisis químicos representados en función de variables no químicas . . . . .	1046	A.1.1 Composición de las rocas de la corteza terrestre . . . . .	1078
3.5.1 Hidrogramas . . . . .	1046	A.1.2 Composición del agua del mar . . . . .	1078
3.5.2 Curvas de relación de calidad química con otras variables hidrológicas . . . . .	1046	A.1.3 El agua de lluvia . . . . .	1078
3.5.3 Perfiles geoquímicos . . . . .	1046	A.1.4 Aporte de sales por el polvo atmosférico . . . . .	1082
		A.1.5 Los ciclos geoquímicos . . . . .	1082
		<b>Apéndice 10.2</b>	
		<b>Flujo térmico en los acuíferos</b>	
		A.2.1 Planteamiento de la ecuación de la continuidad en un medio permeable con agua en movimiento y sometida al gradiente geotérmico . . . . .	1084
		A.2.2 Acuífero horizontal con flujo constante y temperatura uniforme en su sección y en régimen permanente. . . . .	1085

A.2.3	Acuífero inclinado con flujo constante, temperatura uniforme en su sección y en régimen permanente . . . . .	1086
<b>Apéndice 10.3</b>		
<b>Energía geotérmica</b>		
A.3.1	Prospección y exploración de sistemas geotérmicos . . . . .	1088
A.3.2	Producción de energía geotérmica . . . . .	1089
A.3.2.1	Situación actual y costes . . . . .	1089
A.3.2.2	Aspectos técnicos . . . . .	1090
A.3.2.3	Sistemas de producción de energía. . . . .	1091
A.3.3	Otros usos de la energía geotérmica . . . . .	1091
A.3.4	Obtención de productos químicos . . . . .	1091
<i>Bibliografía</i> . . . . .		1091
<b>Sección 11</b>		
<b>RELACIÓN ENTRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LAS AGUAS SUPERFICIALES</b>		
<i>Símbolos</i> . . . . .		1099
<b>Capítulo 11.1</b>		
<b>Los manantiales</b>		
1.1	Introducción . . . . .	1101
1.2	Clasificación de los manantiales . . . . .	1101
1.2.1	Criterios de clasificación . . . . .	1101
1.2.2	Tipos representativos de manantiales. . . . .	1102
1.3	Causas de la fluctuación del caudal de los manantiales . . . . .	1105
1.4	Expresiones matemáticas del caudal de descarga de un acuífero en régimen no influenciado . . . . .	1106
1.4.1	Generalidades . . . . .	1106
1.4.2	Acuífero libre con desagüe a nivel variable . . . . .	1107
1.4.3	Acuífero cautivo o acuífero libre, de espesor considerable y desagüe a nivel constante . . . . .	1109
1.4.4	Relaciones entre el volumen de agua de un embalse subterráneo y su caudal de descarga . . . . .	1112
1.4.5	Hidrogramas compuestos correspondientes a la descarga conjunta de varios embalses subterráneos . . . . .	1114
1.5	Expresiones matemáticas del caudal de descarga de un acuífero en régimen influenciado . . . . .	1115
1.5.1	Ecuación general . . . . .	1115
1.5.2	Aplicación a acuífero libre con simetría paralela . . . . .	1115

## Capítulo 11.2

### Relaciones entre las escorrentías superficial y subterránea

2.1	Introducción . . . . .	1120
2.1.1	Generalidades . . . . .	1120
2.1.2	Definiciones y conceptos básicos . . . . .	1120
2.2	Tipos de conexión hidráulica entre los ríos y los acuíferos de su cuenca . . . . .	1121
2.3	Influencia de las características geológicas de la cuenca en el régimen de un río . . . . .	1122
2.4	El almacenamiento de agua en las riberas . . . . .	1124
2.5	Estimación del componente subterráneo en la escorrentía total de una tormenta . . . . .	1129
2.5.1	Métodos basados en la descomposición del hidrograma. . . . .	1129
2.5.2	Métodos basados en el estudio de la composición química de las aguas. . . . .	1131
2.6	Relación entre la escorrentía subterránea y los niveles piezométricos de la cuenca . . . . .	1132
2.7	Métodos de estimación de la escorrentía subterránea anual . . . . .	1134
2.7.1	Separación de los componentes en el hidrograma . . . . .	1134
2.7.2	Ánálisis de la duración de caudales . . . . .	1138
2.7.3	Métodos geohidrometeorológicos . . . . .	1138
2.8	Interés práctico de la determinación de la escorrentía subterránea . . . . .	1139

## Capítulo 11.3

### Modificaciones introducidas por la acción del hombre en las relaciones aguas superficiales-aguas subterráneas

3.1	Introducción . . . . .	1140
3.2	Influencia de las obras hidráulicas en el régimen de las aguas subterráneas. . . . .	1140
3.2.1	Modificaciones debidas a cambios en el régimen de los caudales del río. . . . .	1141
3.2.2	Modificaciones debidas a cambios en el nivel de ríos y lagos . . . . .	1141
3.3	Influencia de los bombeos o recargas en el régimen de ríos y manantiales . . . . .	1143
3.3.1	Consideraciones generales . . . . .	1143
3.3.2	Variación del caudal del río debida a la recarga o descarga inducida mediante pozos en los sistemas acuífero-río . . . . .	1144
3.3.3	Variaciones del caudal de un manantial debidas a los bombeos . . . . .	1151
3.3.4	Problemas debidos a los excedentes de riego . . . . .	1152
<i>Bibliografía</i> . . . . .		1154