

PRIMERA PARTE

INTRODUCCIÓN: LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

1.	EL AGUA SUBTERRÁNEA Y SUS RELACIONES CON LAS ROCAS.....	21
1.1.	HIDROGEOLOGÍA: EL AGUA EN LA NATURALEZA	21
1.2.	EL CICLO HIDROLÓGICO	24
1.3.	RELACIONES ENTRE EL AGUA Y LAS ROCAS	27
1.4.	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO DE LAS ROCAS	29
1.4.1.	Porosidad.....	29
1.4.1.1.	Expresión cuantitativa de la porosidad: porosidad eficaz	30
1.4.1.2.	Factores que influyen en el valor de la porosidad	32
1.4.1.3.	Determinación de la porosidad.....	35
1.4.2.	Permeabilidad	37
1.4.3.	Diferentes comportamientos de las rocas atendiendo a Porosidad y Permeabilidad	38
1.5.	EJERCICIOS	39
	<i>E.1.1. Determinación de la porosidad. Método de saturación</i>	<i>39</i>
2.	INFILTRACIÓN. ACUÍFEROS.....	41
2.1.	DISTRIBUCIÓN VERTICAL DEL AGUA EN EL SUELO.....	41
2.1.1.	Cota piezométrica	43
2.2.	ACUÍFEROS	44
2.2.1.	Tipos de acuíferos: libres y confinados	44
2.2.2.	Funcionamiento de los acuíferos: zonas de recarga y descarga	48
2.3.	PIEZOMETRÍA	51
2.3.1.	Representación cartográfica de la superficie piezométrica	51

	Pág.
2.3.2. Determinación de la cota piezométrica y trazado de isopiezas	51
2.3.3. Morfología de la superficie piezométrica	54
2.4. RELACIONES ENTRE LOS ACUÍFEROS Y LAS CORRIENTES SUPERFICIALES	55
3. NOCIONES DE HIDROSTÁTICA E HIDRODINÁMICA: EL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	61
3.1. CONDICIONES HIDROSTÁTICAS	61
3.1.1. Expresión cuantitativa de cota piezométrica (en condiciones hidrostáticas).....	63
3.2. CONDICIONES HIDRODINÁMICAS	65
3.2.1. Flujo permanente, flujo transitorio, flujo uniforme	65
3.2.2. Regímenes de flujo. Velocidad crítica	66
3.2.3. Teorema de Bernouilli: concepto cuantitativo de cota piezométrica y de potencial hidráulico en condiciones hidrodinámicas	68
3.2.4. Consecuencias del teorema de Bernouilli: cota piezométrica (carga hidráulica) y potencial hidráulico.....	71
3.2.4.1. Energía por unidad de volumen: presión	71
3.2.4.2. Energía por unidad de peso: cota piezométrica (carga hidráulica).....	71
3.2.4.3. Energía por unidad de masa: potencial hidráulico.....	72
3.2.5. El flujo en condiciones reales: pérdida de carga y gradiente hidráulico.....	72
3.3. EL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS: SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES Y LÍNEAS DE FLUJO	74
3.4. EJERCICIOS	76
E.3.1. Cota piezométrica (condiciones hidrostáticas)	76
E.3.2. Cota piezométrica (condiciones hidrodinámicas) y potencial hidráulico (de fuerzas).....	78
4. LA LEY DE DARCY. TRANSMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO.....	81
4.1. EXPERIMENTO Y LEY DE DARCY	81
4.1.1. Coeficiente de permeabilidad y permeabilidad intrínseca	83
4.1.2. Velocidad de Darcy y velocidad real.....	84
4.1.3. Cuestiones relativas al gradiente hidráulico	85

	Pág.
4.2. VALIDEZ DE LA LEY DE DARCY: RÉGIMEN DE FLUJO.....	86
4.3. VALIDEZ DE LA LEY DE DARCY: CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. TRANSMISIVIDAD	87
4.3.1. Homogeneidad.....	88
4.3.2. Anisotropía	88
4.3.2.1. Coeficiente de permeabilidad para flujo perpendicular a la estratificación.....	88
4.3.2.2. Coeficiente de permeabilidad para flujo paralelo a la estratificación: Transmisividad	91
4.3.2.3. Coeficiente de anisotropía.....	93
4.4. COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES ANTE LA CESIÓN O ADMISIÓN DE AGUA: COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO	94
4.4.1. Coeficiente de almacenamiento específico (S_s)	94
4.4.2. Coeficiente de almacenamiento (S).....	96
4.4.2.1. Coeficiente de almacenamiento de acuíferos confinados.....	96
4.4.2.2. Coeficiente de almacenamiento de acuíferos libres.....	97
4.5. EJERCICIOS	98
<i>E.4.1. Régimen laminar y régimen turbulento: aplicabilidad de la ecuación de Darcy</i>	<i>98</i>
<i>E.4.2. Flujo horizontal en materiales homogéneos: evaluación del caudal de flujo</i>	<i>99</i>
<i>E.4.3. Flujo vertical en materiales homogéneos: evaluación de la permeabilidad.....</i>	<i>101</i>
<i>E.4.4. Flujo paralelo a la estratificación en materiales anisótropos</i>	<i>104</i>
<i>E.4.5. Flujo perpendicular a la estratificación en materiales anisótropos</i>	<i>106</i>
<i>E.4.6. Coeficiente de almacenamiento específico</i>	<i>110</i>
<i>E.4.7. Coeficiente de almacenamiento en acuíferos libres y confinados.....</i>	<i>110</i>
5. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD: TRAZADORES Y MÉTODOS DE LABORATORIO	113
5.1. TRAZADORES	113
5.1.1. Método de dilución	116
5.2. MÉTODOS DE LABORATORIO	122
5.2.1. Determinación del coeficiente de permeabilidad con ensayos en permeámetros	123

	Pág.
5.2.1.1. Permeametría de carga constante	124
5.2.1.2. Permeametría de carga variable.....	127
5.2.1.3. Permeametría de volumen de agua constante.....	128
5.2.2. Determinación del coeficiente de permeabilidad utilizando fórmulas empíricas	129
5.2.3. Determinación del coeficiente de permeabilidad con el método gráfico de Breddin	130
5.3. EJERCICIOS	131
<i>E.5.1. Trazadores: método de dilución</i>	<i>131</i>
<i>E.5.2. Permeametría de carga constante</i>	<i>133</i>
<i>E.5.3. Permeametría de carga variable</i>	<i>137</i>
<i>E.5.4. Estimación del coeficiente de permeabilidad con el método gráfico de Breddin</i>	<i>138</i>
6. ECUACIÓN DIFERENCIAL DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. SOLUCIONES: MODELOS, REDES DE FLUJO Y SOLUCIONES ANALÍTICAS.....	141
6.1. SOLUCIONES DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	143
6.1.1. Modelos.....	143
6.1.2. Soluciones gráficas: redes de flujo	145
6.1.2.1. Refracción de las líneas de flujo.....	147
6.1.3. Soluciones analíticas aplicables a casos particulares.....	149
6.2. METODOLOGÍA Y EQUIPAMIENTO DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO	151
6.2.1. Medidas en el pozo de bombeo y en piezómetros	152
6.2.2. Medida del caudal.....	153

SEGUNDA PARTE

HIDRÁULICA SUBTERRÁNEA: HIDRÁULICA DE POZOS

7. SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DE FLUJO EN RÉGIMEN PERMANENTE: FÓRMULAS DE DUPUIT	161
7.1. MORFOLOGÍA CILÍNDRICA: FLUJO EN DOS DIMENSIONES.....	161
7.2. MORFOLOGÍA RADIAL: FLUJO HACIA UN POZO DE BOMBEO	164
7.2.1. Flujo hacia un pozo de bombeo en un acuífero libre.....	164

	Pág.
7.2.2. Flujo hacia un pozo de bombeo en un acuífero confinado	167
7.3. APLICACIÓN DE LAS FÓRMULAS DE DUPUIT: RELACIONES ENTRE EL DESCENSO Y EL CAUDAL	169
7.3.1. Acuífero libre	170
7.3.1.1. Relación entre el descenso y el caudal: curva característica .	170
7.3.1.2. Caudal específico	171
7.3.2. Acuífero confinado	171
7.3.2.1. Relación entre el descenso y el caudal: curva característica .	172
7.3.2.2. Caudal específico	173
7.4. VALIDEZ DE LAS FÓRMULAS DE DUPUIT	173
7.4.1. Pozos incompletos	176
7.5. EJERCICIOS	178
<i>E.7.1. Evaluación del caudal que circula hacia una zanja de drenaje</i>	<i>178</i>
<i>E.7.2. Evaluación del descenso producido a una determinada distancia del pozo de bombeo en un acuífero libre</i>	<i>179</i>
<i>E.7.3. Estimación aproximada de la transmisividad a partir del caudal específico en un acuífero confinado.....</i>	<i>179</i>
<i>E.7.4. Estimación del caudal de un pozo completo a partir de los datos de un bombeo en un pozo de penetración parcial.....</i>	<i>181</i>
8. ENSAYOS DE BOMBEO EN RÉGIMEN PERMANENTE. MÉTODO DE THIEM	183
8.1. ACUÍFERO CONFINADO	183
8.2. ACUÍFERO LIBRE.....	186
8.3. MÉTODO GRÁFICO DE RESOLUCIÓN DE ENSAYOS DE BOMBEO EN RÉGIMEN PERMANENTE.....	190
8.4. EJERCICIOS	191
<i>E.8.1. Ensayos de bombeo en régimen permanente.....</i>	<i>191</i>
9. ENSAYOS DE BOMBEO EN RÉGIMEN TRANSITORIO. (I) MÉTODO DE THEIS	195
9.1. REQUISITOS QUE DEBEN CUMPLIR EL ACUÍFERO Y EL BOMBEO.....	195
9.2. LA ECUACIÓN DE THEIS	198
9.3. ENSAYOS DE BOMBEO EN RÉGIMEN TRANSITORIO: MÉTODO GRÁFICO DE THEIS	201
9.4. EJERCICIOS	203

	Pág.
<i>E.9.1. Ensayos de bombeo en régimen transitorio. Método gráfico de Theis.....</i>	203
<i>E.9.2. Utilización de las ecuaciones de Theis para predecir la respuesta del acuífero a un bombeo (acuífero confinado).....</i>	207
<i>E.9.3. Utilización de las ecuaciones de Theis para predecir la respuesta del acuífero a un bombeo (acuífero libre).....</i>	208
10. ENSAYOS DE BOMBEO EN RÉGIMEN TRANSITORIO. (II) MÉTODO DE JACOB.....	209
10.1. LA ECUACIÓN SIMPLIFICADA DE JACOB	209
10.2. MÉTODOS DE APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN SIMPLIFICADA DE JACOB.....	210
10.2.1. Control de descensos en un mismo punto a lo largo del tiempo	211
10.2.2. Control de descensos en distintos puntos en el mismo instante	214
10.2.3. Control de descensos en distintos puntos en diferentes tiempos	217
10.3. POSIBILIDADES DE ESTIMACIÓN DEL RADIO DE INFLUENCIA DEL BOMBEO	219
10.4. EJERCICIOS	220
<i>E.10.1. Ensayos de bombeo en régimen transitorio. Método gráfico de Jacob (I): control de descensos en un mismo punto a lo largo del tiempo.....</i>	220
<i>E.10.2. Ensayos de bombeo en régimen transitorio. Método gráfico de Jacob (II): control de descensos en distintos puntos en diferentes tiempos</i>	223
<i>E.10.3. Aplicación de la ecuación de Jacob a la evaluación de descensos producida por el bombeo (ejemplo nº 1).....</i>	226
<i>E.10.4. Aplicación de la ecuación de Jacob a la evaluación de descensos producida por el bombeo (ejemplo nº 2).....</i>	226
11. ACUÍFEROS SEMICONFINADOS.....	229
11.1. FLUJO HACIA UN ACUÍFERO SEMICONFINADO PROCEDENTE DE UN ACUÍFERO LIBRE.....	229
11.2. LA FÓRMULA DE HANTUSH.....	231
11.2.1. Ensayos de bombeo en régimen transitorio en un acuífero semiconfinado. Método de Hantush y Jacob	233
11.3. EJERCICIOS.....	235
<i>E.11.1. Ensayo de bombeo en régimen transitorio en acuífero semiconfinado. Método gráfico de Hantush (o de Walton-Hantush)</i>	235

12. INTERFERENCIA DE EFECTOS DE BOMBEO. MÉTODO DE LAS IMÁGENES	239
12.1. FLUJO EN UN CAMPO DE POZOS EN RÉGIMEN PERMANENTE	239
12.1.1. Acuífero confinado.....	239
12.1.2. Acuífero libre.....	243
12.2. FLUJO EN UN CAMPO DE POZOS EN RÉGIMEN TRANSITORIO	244
12.3. MÉTODO DE LAS IMÁGENES.....	245
12.4. EJERCICIOS	252
<i>E.12.1. Cálculo del descenso producido por la interferencia del bombeo en dos pozos.....</i>	<i>252</i>
<i>E.12.2. Descenso producido por el bombeo en un pozo cercano a dos bordes del acuífero, rectilíneos y perpendiculares: un borde impermeable y un borde de recarga</i>	<i>252</i>
13. ENSAYOS DE RECUPERACIÓN.....	257
13.1. METODOLOGÍA DEL ENSAYO.....	257
13.2. ENSAYOS DE RECUPERACIÓN QUE NO SE AJUSTAN AL MODELO TEÓRICO	261
13.2.1. Ensayos en los que la recta de recuperación corta al eje de abscisas en un valor de $(t/t') > 1$	262
13.2.2. Ensayos en los que la recta de recuperación corta al eje de ordenadas en un valor de descenso residual no nulo	265
13.3. EJERCICIOS	266
<i>E.13.1. Cálculo de la transmisividad y del coeficiente de almacenamiento a partir de los datos de un ensayo de recuperación</i>	<i>266</i>
14. EFICIENCIA DE POZOS	271
14.1. COMPONENTES DEL DESCENSO EN EL POZO DE BOMBEO: EFICIENCIA.....	271
14.2. ENSAYOS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA SIN CONOCER T y S	273
14.2.1. Ensayos de bombeo con caudales crecientes	274
14.2.2. Método de escalones independientes.....	276
14.3. BREVE REFERENCIA A LOS MÉTODOS DE DESARROLLO DE POZOS.....	277
14.4. EJERCICIOS	279

<i>E.14.1. Estimación de la eficiencia de un pozo en un ensayo de bombeo con caudales crecientes.....</i>	279
<i>E.14.2. Estimación de la eficiencia de un pozo mediante el método de escalones independientes</i>	282

TERCERA PARTE

OTRAS CUESTIONES DE HIDRÁULICA SUBTERRÁNEA: CONTROL FORONÓMICO DE MANANTIALES Y MODELOS MATEMÁTICOS

15. MANANTIALES: DATOS FORONÓMICOS	285
15.1. HIDROGRAMA DE UN MANANTIAL.....	287
15.2. EL AGOTAMIENTO: MODELO DE MAILLET	288
15.2.1. Caracterización del agotamiento.....	291
15.2.1.1. Influencia de las características del acuífero en el coeficiente de agotamiento.....	294
15.2.1.2. Volumen de agua almacenada susceptible de ser drenada y porosidad	294
15.3. OTROS MODELOS DE AGOTAMIENTO: EL MODELO DE TISON	297
15.4. LA CURVA DE DESCENSO	299
15.5. ANÁLISIS GLOBAL DE LOS DATOS FORONÓMICOS DE UN MANANTIAL: ANÁLISIS CORRELATORIO Y ESPECTRAL.....	303
15.5.1. Análisis en el dominio temporal: análisis correlatorio.....	304
15.5.1.1. Correlograma simple	304
15.5.1.2. Correlograma cruzado	306
15.5.1.3. Clasificación de sistemas kársticos.....	308
15.6. EJERCICIOS	310
<i>E.15.1. Estudio del agotamiento.....</i>	310
<i>E.15.2. Estudio de la curva de descenso.....</i>	312
16. ELEMENTOS BÁSICOS DE MODELOS MATEMÁTICOS DIGITALES.....	317
16.1. MODELO DE DISCRETIZACIÓN (DIFERENCIAS FINITAS).....	318
16.1.1. Régimen permanente.....	319
16.1.2. Régimen transitorio.....	323
16.1.2.1. Método explícito	323

	Pág.
16.1.2.2. Método implícito.....	325
16.1.2.3. Método de Crank-Nicholson.....	326
16.2. CONSTRUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DEL MODELO	327
16.3. EJERCICIOS	329
<i>E.16.1. Resolución de un modelo en diferencias finitas utilizando el método de triangularización de Gauss.....</i>	329
<i>E.16.2. Resolución de un modelo en diferencias finitas utilizando el método de diagonalización de Gauss-Jordan.....</i>	332
<i>E.16.3. Resolución de un modelo en diferencias finitas utilizando el método iterativo de Gauss-Seidel.....</i>	334
BIBLIOGRAFÍA.....	337
ANEXOS.....	341
Anexo A1. TRATAMIENTO DE DATOS.....	343
Anexo A2. MEDIDA DE CAUDAL EN ENSAYOS DE BOMBEO.....	351
Anexo A3. TABLAS DE LA FUNCIÓN DE POZO.....	352
Anexo A.4. TABLAS DE VALORES DE $W(u, r/B)$ (FUNCIÓN DE POZO PARA ACUÍFEROS SEMICONFINADOS).....	354