

Sumário

Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações

Módulo 1 - A Água Subterrânea	3
Capítulo 1.1 - Evolução Histórica do Conhecimento	5
1.1.1 Introdução	5
1.1.2 A Hidrogeologia no Mundo	6
1.1.3 A Hidrogeologia no Brasil	9
Referências	10
Capítulo 1.2 - Importância da Água Subterrânea	13
1.2.1 Introdução	13
1.2.2 Gestão de Ofertas versus Demandas	13
1.2.3 A Gestão Integrada das Águas	14
1.2.4 Poço Bem Construído versus Buraco	16
1.2.5 O Preço da Água Gratuita	17
1.2.6 As Funções dos Aquíferos na Gestão Integrada	19
1.2.7 Recarga, Armazenamento e Descarga	20
1.2.8 Planejamento e Gestão	22
1.2.9 Potenciais de Águas Subterrâneas no Brasil	23
1.2.10 Considerações Finais	27
Referências	27
Capítulo 1.3 - A Água Subterrânea no Brasil	31
1.3.1 Introdução	31
1.3.2 Mapa Hidrogeológico do Brasil.	31
1.3.3 Províncias Hidrogeológicas do Brasil	38
Referências	47

Módulo 2 - Água Subterrânea em Meios Porosos Homogêneos	51
Capítulo 2.1 - Ocorrência das Águas Subterrâneas	53
2.1.1 Introdução	53
2.1.2 Origem e Circulação - Ciclo Hidrológico	53
2.1.3 Equação do Balanço Hídrico	54
2.1.4 Distribuição Vertical da Água no Subsolo	58
2.1.5 Geologia da Água Subterrânea	62
2.1.6 Água Subterrânea em Zonas Costeiras	70
Exercícios Propostos	73
Referências	74
Capítulo 2.2 - Movimento das Águas Subterrâneas	77
2.2.1 Introdução	77
2.2.2 Lei de Darcy	77
2.2.3 Equação de Bernoulli e Potencial Hidráulico	83
2.2.4 Anisotropia e Heterogeneidade	84
2.2.5 Equação da Continuidade (Conservação da Massa d'Água)	85
2.2.6 Equação Geral do Fluxo Subterrâneo	85
2.2.7 Redes de Fluxo	88
Exercícios Propostos	88
Referências	91
Anexos	91
Módulo 3 - Água Subterrânea em Meios Heterogêneos	95
Capítulo 3.1 - Conceitos de Análise Estrutural Aplicados à Hidrogeologia de Terrenos	
Cristalinos	97
3.1.1 Introdução	97
3.1.2 Conceitos Clássicos da Hidrogeologia do Cristalino e Problemas Inerentes	97
3.1.3 Conceitos Básicos de Análise Estrutural - A Deformação Frágil	99
3.1.4 Cronologia e Nível Crustal da Deformação	104
3.1.5 O Contexto Tectônico Regional e suas Implicações: o Exemplo da	105

Borborema	
3.1.6 Neotectônica e a Evolução Crustal Holocênica	107
3.1.7 Implicações do Contexto Tectonoestrutural para a Hidrogeologia de Terrenos Cristalinos	108
3.1.8 Efeito da Exumação e do Intemperismo sobre a Permo-Porosidade das Rochas	113
3.1.9 Modelos de Ocorrência de Água Subterrânea em Terrenos Cristalinos	115
3.1.10 Observações Finais	117
3.1.11 Agradecimentos	117
Referências	117
Capítulo 3.2 - Hidrogeologia dos Meios Fissurados	121
3.2.1 Introdução	121
3.2.2 Análise da Fissura Elementar	121
3.2.3 Características do Meio	123
3.2.4 Fatores que Influem nas Características Hidrodinâmicas do Aquífero “Fissural”	124
3.2.5 Origem e Mecânica da Deformação Ruptural	130
3.2.6 Fluxo em Meio Fissurado	137
3.2.7 Locação de Poços	141
Referências	150
Capítulo 3.3 - Hidrogeologia de Meios Cársticos	153
3.3.1 Introdução	153
3.3.2 Caracterização do Aquífero Cárstico	153
3.3.3 Estudo Hidrogeológico em Aquífero Cárstico	161
3.3.4 Exploração das Águas Subterrâneas em Carste	166
3.3.5 Aspectos Ambientais em Zonas Cársticas	169
Referências	172
Módulo 4 - Pesquisa de Água Subterrânea	177
	179
Capítulo 4.1 - Metodologia Básica de Pesquisa de Água Subterrânea	
4.1.1 Introdução	179
4.1.2 Tipos de Estudos na Pesquisa de Água Subterrânea	179
4.1.3 Levantamentos Preliminares	181
4.1.4 Caracterização Geológica e Geométrica dos Aquíferos	182
4.1.5 Caracterização Hidrogeológica Quantitativa	185

4.1.6 Caracterização Hidrogeológica Qualitativa	202
4.1.7 Produtos e Resultados	202
4.1.8 Aspectos sobre Gestão de Aquíferos	204
Referências	206
Capítulo 4.2 - Métodos Geofísicos	209
4.2.1 Introdução	209
4.2.2 Métodos de Campos Naturais	210
4.2.3 Métodos de Campos Artificiais	216
4.2.4 Levantamentos Aerogeofísicos	247
4.2.5 Quantificação em Geofísica	250
Referências	252
Capítulo 4.3 - Métodos Isotópicos	255
4.3.1 Introdução	255
4.3.2 Fundamentos Teóricos e Definições	255
4.3.3 Isótopos Estáveis	255
4.3.4 Oxigênio-18 e Deutério	256
4.3.5 Isótopos Instáveis	259
4.3.6 Carbono-14 e Trítio	259
4.3.7 Modelos de Interpretação	263
4.3.8 O Uso de Isótopos Ambientais na Hidrogeologia	264
Exercícios Propostos	269
Referências	270
Capítulo 4.4 - Sensoriamento Remoto	273
4.4.1 Introdução	273
4.4.2 Evolução do Conhecimento	273
4.4.3 Conceitos e Fundamentos Básicos	274
4.4.4 Características das Imagens Orbitais	277
4.4.5 Pré-Processamento de Imagens Orbitais	278
4.4.6 Realce de Imagens Digitais	280
4.4.7 Classificação de Imagens Digitais	287
4.4.8 Interpretação de Padrões de Drenagem	288
4.4.9 Considerações Finais	290
4.4.10 Estudo de Caso	290
Referências	292
Capítulo 4.5 - Geoprocessamento em Ambiente SIG Aplicado à Hidrogeologia	293

4.5.1 Introdução	293
4.5.2 O Que é um SIG?	293
4.5.3 Componentes de um SIG	294
4.5.4 Estrutura de um SIG	296
4.5.5 Como os Objetos do Mundo Real são Representados no SIG	297
4.5.6 Como Funciona um SIG	298
4.5.7 Características Básicas dos Dados Espaciais	298
4.5.8 Tipos de Dados em um SIG	299
4.5.9 Exemplos de Aplicação	302
4.5.10 Considerações Finais	317
Referências	318
Módulo 5 - Qualidade das Águas Subterrâneas	323
Capítulo 5.1 - Noções de Hidroquímica	325
5.1.1 Introdução	325
5.1.2 Análises de Água	325
5.1.3 Caracterização da Qualidade das Águas	330
5.1.4 Princípios de Classificação das Águas	340
5.1.5 Padrões de Qualidade das Águas	343
5.1.6 Padrões de Referência de Qualidade Ambiental	347
Referências	357
Capítulo 5.2 - Geoquímica das Águas Subterrâneas	359
5.2.1 Introdução	359
5.2.2 Conceitos Fundamentais	359
5.2.3 Fundamentos da Hidrogeoquímica	362
5.2.4 Mineralização das Águas Subterrâneas	372
5.2.5 Interpretação dos Dados de Qualidade da Água	375
5.2.6 Hidrogeoquímica de Climas Tropicais	378
Exercícios Propostos	379
Referências	379

Capítulo 5.3 - Contaminação das Águas Subterrâneas	381
5.3.1 Introdução	381
5.3.2 Fundamentos Básicos	381
5.3.3 Comportamento Hidroquímico de Contaminantes	389
5.3.4 Transporte de Massa	391
5.3.5 Estudo de Caso	401
Exercícios Propostos	402
Referências	402
Capítulo 5.4 - Vulnerabilidade à Poluição de Aquíferos	405
5.4.1 Introdução	405
5.4.2 Evolução do Conceito de Vulnerabilidade	405
5.4.3 O Comportamento de Contaminantes e a Vulnerabilidade de Aquíferos	407
5.4.4 Os Métodos de Cartografia da Vulnerabilidade	412
5.4.5 Limitações do Uso dos Mapas de Vulnerabilidade de Aquíferos	414
5.4.6 A Vulnerabilidade em um Programa de Gestão de Recursos Hídricos	418
5.4.7 O Futuro dos Métodos de Vulnerabilidade de Aquíferos	422
Referências	423
Módulo 6 - Exploração das Águas Subterrâneas	427
Capítulo 6.1 - Projeto e Construção de Poços	429
6.1.1 Introdução.	429
6.1.2 Tipos de Poços	429
6.1.3 Métodos de Perfuração.	431
6.1.4 Projeto de Poços Tubulares	436
6.1.5 Reabilitação e Manutenção de Poços Tubulares	448
6.1.6 Contribuições da Indústria do Petróleo à Engenharia de Perfuração	450
Referências	457
Capítulo 6.2 - Perfilagem Geofísica Aplicada à Água Subterrânea	459
6.2.1 Introdução	459
6.2.2 Obtenção dos Perfis	460
6.2.3 Equipamentos Essenciais para a Obtenção de um Perfil	460
6.2.4 A Malha API para Registro das Curvas dos Perfis	460

6.2.5 O Meio Ambiente de uma Ferramenta de Perfilagem	460
6.2.6 Propriedades Físicas das Rochas	463
6.2.7 Propriedades Elétricas das Rochas	464
6.2.8 Propriedades Acústicas das Rochas	467
6.2.9 Propriedades Radioativas das Rochas	468
6.2.10 Principais Tipos de Perfis Geofísicos	470
6.2.11 Raios Gama Convencional (RG ou GR)	471
6.2.12 Potencial Espontâneo (SP)	473
6.2.13 Elétricos Convencionais (ES)	478
6.2.14 Indução	480
6.2.15 Micro Elétrico	485
6.2.16 Perfil Sônico	486
6.2.17 Cáliper ou Calibre do Poço	491
6.2.18 Desvio ou Inclinação do Poço	493
6.2.19 Temperatura	494
6.2.20 Interpretação Final dos Perfis Geofísicos de Poços	495
6.2.21 Estudo de Caso de Interpretação Preliminar	499
6.2.22 Estudo de Caso de Interpretação de Detalhe	502
6.2.23 Usos, Limitações e Vantagens dos Perfis Geofísicos de Poços	503
6.2.24 Considerações Finais	504
Referências	505
Capítulo 6.3 - Testes de Bombeamento em Poços Tubulares	507
6.3.1 Introdução	507
6.3.2 Classificação de Testes de Bombeamento	507
6.3.3 Sistemas de Bombeamento	509
6.3.4 Medição de Nível d'Água	509
6.3.5 Medição de Vazões	511
6.3.6 Planejamento e Execução dos Testes	517
6.3.7 Controle de Interferências	518
6.3.8 Condições e Normas de Execução	520
6.3.9 Registro dos Dados	521
Referências	522
Anexos	523
Capítulo 6.4 - Análise de Fluxo para Poços em Meios Homogêneos	527
6.4.1 Introdução	527
6.4.2 Características e Parâmetros Físicos de Aquíferos e Poços	528
6.4.3 Fluxo Radial para Poços	531
6.4.4 Fluxo para Poços em Regime Estacionário	533
6.4.5 Fluxo para Poços em Regime Transiente	541

6.4.6 Análise de Fluxo para Poços de Grande Diâmetro	555
6.4.7 Penetração Parcial em Poços	556
6.4.8 Fronteiras Hidráulicas - Teoria das Imagens	557
Exercícios Propostos	565
Referências	567
Anexos	569
Capítulo 6.5 - Análise de Fluxo para Poços em Meios Heterogêneos	575
6.5.1 Introdução	575
6.5.2 Conceitos Básicos	575
6.5.3 Modelagem de Sistemas de Fraturas	581
6.5.4 Geometria Fractal Aplicada	588
Exercícios Propostos	595
Referências	595
Capítulo 6.6 - Eficiência Hidráulica de Poços	599
6.6.1 Aspectos Gerais	599
6.6.2 Rebaixamento em um Poço Bombeado	599
6.6.3 Conceito de Raio Crítico	601
6.6.4 Decomposição das Perdas de Carga em Poços	602
6.6.5 Cálculo dos Rebaixamentos Parciais - Aquífero Confinado	604
6.6.6 Eficiência Hidráulica de Poços	605
6.6.7 Análise de Sensibilidade dos Fatores Influentes na Eficiência	606
6.6.8 Determinação da Equação Característica de Funcionamento do Poço através de	
Teste de Produção Escalonado	608
6.6.9 Determinação da Perda de Carga Laminar na Zona de Transição do Pré-Filtro	
(B2 Q)	610
6.6.10 Custo da Água Produzida	612
6.6.11 Aplicação do Método de Análise	612
Referências	616
Capítulo 6.7 - Capacidade de Produção de Poços	617
6.7.1 Introdução	617
6.7.2 Conceitos Básicos	617
6.7.3 Avaliação de Vazões de Exploração de Poços Tubulares em Meios Homogêneos	622
6.7.4 Avaliação de Baterias de Poços	625
6.7.5 Avaliação de Vazões de Exploração de Poços Tubulares em Meios Heterogêneos	634
6.7.6 Poços de Grande Diâmetro - Método de Porchet	637
Referências	639

Anexos	641
Capítulo 6.8 - Sistemas de Bombeamento	645
6.8.1 Introdução	645
6.8.2 Conceitos Básicos	645
6.8.3 Tipos de Bombas	650
6.8.4 Dispositivos de Acionamento e Proteção	654
6.8.5 Seleção da Bomba	655
6.8.6 Manutenção	655
Exercícios Propostos	656
Referências	656
Módulo 7 - Planejamento e Gerenciamento das Águas Subterrâneas	659
Capítulo 7.1 - Avaliação de Recursos Hídricos Subterrâneos	661
7.1.1 Introdução	661
7.1.2 Evolução do Conhecimento	661
7.1.3 Reservas versus Recursos de Água Subterrânea.	661
7.1.4 Reservas de Água Subterrânea	662
7.1.5 Recursos de Água Subterrânea	662
Referências	669
Capítulo 7.2 - Monitoramento em Água Subterrânea	673
7.2.1 Introdução	673
7.2.2 Conceitos e Objetivos do Monitoramento	673
7.2.3 Implantação de Redes de Monitoramento	674
7.2.4 Monitoramento do Estado Quantitativo	677
7.2.5 Monitoramento do Estado Qualitativo	677
7.2.6 Controle de Qualidade e Interpretação dos Dados	681
7.2.7 Armazenamento dos Dados - Sistemas de Informações	682
7.2.8 Considerações Finais	683
Referências	684
Capítulo 7.3 - Aplicações de Modelos em Hidrogeologia	687
7.3.1 Introdução	687
7.3.2 Tipos de Modelo	687
7.3.3 Modelo Conceitual	689
7.3.4 Obtenção de Dados	691

7.3.5 Condições de Contorno	693
7.3.6 Método das Diferenças Finitas	694
7.3.7 Noções de Modelos de Transporte de Poluentes	699
7.3.8 Método de Elementos Finitos	700
7.3.9 Estudo de Caso - Aquífero Cabeças no Vale do Gurgueia-PI	702
7.3.10 Considerações Finais	704
Referências	705
Capítulo 7.4 - Cartografia Hidrogeológica	709
7.4.1 Introdução	709
7.4.2 Conceituação de Mapa Hidrogeológico	709
7.4.3 Escalas e Elementos dos Mapas Hidrogeológicos	710
7.4.4 Tipos de Mapas	712
7.4.5 Legenda para Mapas Hidrogeológicos	715
7.4.6 Exemplos de Mapas Hidrogeológicos	721
Referências	723
Capítulo 7.5 - Uso e Gestão de Água Subterrânea	725
7.5.1 Introdução	725
7.5.2 Os Diversos Tipos de Uso	726
7.5.3 Potencialidade Hídrica Mundial e o Uso da Água Subterrânea	727
7.5.4 Reutilização da Água	730
7.5.5 Recarga Artificial	731
7.5.6 Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos	732
Referências	741
Capítulo 7.6 - Sistemas de Informações em Água Subterrânea	743
7.6.1 Introdução	743
7.6.2 Conceitos Básicos sobre Sistemas de Informações	743
7.6.3 Conceitos em Bancos de Dados	743
7.6.4 Sistemas de Informações sobre Recursos Hídricos	744
7.6.5 Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - Siagas	747
7.6.6 O Siagas e a Gestão das Águas Subterrâneas	758
7.6.7 Extração de Conhecimento em Bases de Dados - Processo KDD	758
Referências	760
Apêndices	763
Apêndice 1 - Noções de Cálculo Aplicado	763

A.1.1 Funções de Duas ou Mais Variáveis	763
A.1.2 Limites e Continuidade (vizinhança em um espaço de duas ou mais dimensões)	764
A.1.3 Derivadas Parciais	766
A.1.4 Diferenciabilidade e Diferenciais	767
A.1.5 Plano Tangente e Normal a uma Superfície	769
A.1.6 Derivada Dirigida e Gradiente	771
A.1.7 Integrais Duplas (área sob uma curva e a integral definida)	774
A.1.8 Integrais Triplas	777
A.1.9 Elementos de Análise Vetorial	779
A.1.10 Integrais de Linhas	780
A.1.11 Áreas de Superfície e Integrais de Superfície	784
A.1.12 Divergência e Rotacional (CURL) de um Campo Vetorial no R^3	787
A.1.13 Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valor de Contorno	789
Referências	792
<hr/>	
Apêndice 2 - Noções de Geoestatística Aplicada	793
A.2.1 Introdução	793
A.2.2 Descrição Univariada	793
A.2.3 Descrição Bivariada	798
A.2.4 Descrição Espacial	801
Referências	812