

ÁGUA SUBTERRÂNEA



R. Allan Freeze/John A. Cherry



INSTITUTO ÁGUA SUSTENTAVEL

Apoio:



ÁGUA SUBTERRÂNEA



R. Allan Freeze

Departamento de Geologia
Universidade da Columbia Britânica
Vancouver, Canadá

John A. Cherry

Departamento de Ciências da Terra
Universidade de Waterloo
Waterloo, Canadá

***ÁGUA
SUBTERRÂNEA***

Os direitos autorais de todo o material apresentado neste livro digital são propriedade dos autores. A reprodução, adaptação, modificação ou utilização do conteúdo deste livro, parcial ou integralmente, é permitida somente com a autorização prévia dos autores.

Qualquer uso não autorizado de material incluído neste livro pode constituir uma violação das leis de direitos autorais, das leis de marcas comerciais e das leis de privacidade e das leis e regras de comunicação.

F877a Freeze, Allan R.

Águas subterrâneas / Allan R. Freeze, John A. Cherry ;
tradução de Everton de Oliveira ... [et al.] ; Everton de
Oliveira (Coord.). – São Paulo (SP): Everton de Oliveira,
2017.

698 p. : il. ; 30 cm

Traduzido de: Groundwater

ISBN: 978-85-94189-00-4

Inclui bibliografia e índice

1. Águas subterrâneas. 2. Hidrogeologia. 3. Aquíferos.
4. Contaminação de água subterrânea. 5. Hidrogeoquímica.
6. Hidráulica de aquíferos. I. Cherry, John. II. Oliveira,
Everton. III. Título.

CDU: 628.112

Ficha catalográfica elaborada por Marli Machado de Souza – CRB 14/785

Este pode muito bem ser o único livro que iremos escrever. Não podemos guardar nossas dedicatórias, como fazem os escritores de ficção, e ir liberando-as uma por vez. Reconhecemos a influência de toda uma vida de nossos pais, nossas esposas, nossas famílias, nossos professores e nossos estudantes. Este livro é dedicado a todos eles.

Este livro também é dedicado a todos os pagadores de impostos do Canadá e dos Estados Unidos da América, poucos dos quais o lerão, mas que contribuíram para o seu nascimento através de bolsas de estudo durante nossos dias de estudantes e apoio à pesquisa e aos nossos períodos sabáticos em tempos mais recentes.

ÍNDICE

1 Introdução 1

1.1 Água subterrânea, a Terra e o Homem 2

ÁGUA SUBTERRÂNEA E O CICLO HIDROLÓGICO 3

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COMO UM RECURSO 4

CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 5

ÁGUA SUBTERRÂNEA COMO UM PROBLEMA GEOTÉCNICO 6

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E PROCESSOS GEOLÓGICOS 7

1.2 Embasamentos Científicos para o Estudo de Águas Subterrâneas

1.3 Embasamentos Técnicas para o Desenvolvimento de Recursos de Águas Subterrâneas

2 Propriedades e Princípios Físicos 1

2.1 Lei de Darcy 2

2.2 Carga Hidráulica e Potencial de Fluido

ÁGUA SUBTERRÂNEA E O CICLO HIDROLÓGICO

ANÁLISE DO POTENCIAL DE FLUIDO DE HUBBERT

DIMENSÕES E UNIDADES

PIEZÔMETROS E PIEZÔMETROS MULTINÍVEIS

FLUXO ACOPLADO

2.3 Condutividade Hidráulica e Permeabilidade

2.4 Heterogeneidade e Anisotropia da Condutividade Hidráulica

HOMOGENEIDADE E HETEROGENEIDADE

ISOTROPIA E ANISOTROPIA

LEI DE DARCY EM TRÊS DIMENSÕES

ELIPSÓIDE DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

2.5 Porosidade e Índice de Vazio

2.6 Fluxo Insaturado e Nível Freático

TEOR DE UMIDADE
NÍVEL FREÁTICO
CARGAS DE PRESSÕES NEGATIVAS E TENSÍOMETROS
CURVAS CARACTERÍSTICAS DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS INSATURADOS
ZONAS SATURADAS, INSATURADAS E TENSÕES-SATURADAS
NÍVEIS FREÁTICOS INVERTIDOS E SUSPENSOS
FLUXO MULTIFÁSICO

2.7 Aquíferos e Aquitardes

AQUÍFEROS, AQUITARDES E AQUICLUDES
AQUÍFEROS CONFINADOS E LIVRES
SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA

2.8 Fluxo de Estado Estacionário e Fluxo Transiente

2.9 Compressibilidade e Tensão Efetiva

COMPRESSIBILIDADE DA ÁGUA
TENSÃO EFETIVA
COMPRESSIBILIDADE DE UM MEIO POROSO
COMPRESSIBILIDADE DO AQUÍFERO
TENSÃO EFETIVA EM UMA ZONA INSATURADA

2.10 Transmissividade e Armazenamento

ARMAZENAMENTO ESPECÍFICO
TRANSMISSIVIDADE E ARMAZENAMENTO DE UM AQUÍFERO CONFINADO
TRANSMISSIVIDADE E RENDIMENTO ESPECÍFICO EM AQUÍFEROS LIVRES
ARMAZENAMENTO NA ZONA INSATURADA

2.11 Equações de Fluxo de Água Subterrânea

FLUXO SATURADO DE ESTADO ESTACIONÁRIO
FLUXO TRANSIENTE SATURADO
FLUXO TRANSIENTE INSATURADO
PROBLEMAS DE VALORES DE CONTORNO

2.12 Limitações de Abordagem Darciana

CONTINUUM DARCIANO E VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO
VAZÃO ESPECÍFICA, VELOCIDADE MACROSCÓPICA E VELOCIDADE
MICROSCÓPICA
LIMITES SUPERIORES E INFERIORES DA LEI DE DARCY
FLUXO EM ROCHAS FRATURADAS

2.13 Dispersão Hidrodinâmica

3 Propriedades e Princípios Químicos 1

3.1 Água Subterrânea e Seus Constituintes Químicos

ÁGUA E ELETRÓLITOS
CONSTITUINTES ORGÂNICOS
GASES DISSOLVIDOS
UNIDADES DE CONCENTRAÇÃO

3.2 Equilíbrio Químico

LEI DE AÇÃO DAS MASSAS
COEFICIENTES DE ATIVIDADE
EQUILÍBRIO E ENERGIA LIVRE
GASES DISSOLVIDOS

3.3 Associação e Dissociação de Espécies Dissolvidas

A CONDIÇÃO DE ELETRONEUTRALIDADE

DISSOCIAÇÃO E ATIVIDADE DA ÁGUA
ÁCIDOS POLIPRÓTICOS
ÍONS COMPLEXOS
CÁLCULO DE ESPÉCIES DISSOLVIDAS

3.4 Efeitos dos Gradientes de Concentração

3.5 Dissolução e Solubilidade Mineral

SOLUBILIDADE E A CONSTATANTE DE EQUILÍBRIO
EFEITO DA INTENSIDADE IÔNICA
O SISTEMA CARBONATO
O EFEITO DO ÍON COMUM
DESEQUILÍBRIO E ÍNDICE DE SATURAÇÃO

3.6 Processos de Oxidação e Redução

ESTADOS DE OXIDAÇÃO E REAÇÕES REDOX
CONSUMO DE OXIGÊNIO E MATÉRIA ORGÂNICA
CONDIÇÕES REDOX DE EQUILÍBRIO
FATORES MICROBIOLÓGICOS
DIAGRAMAS PE-PH

3.7 Troca de Íons e Adsorção

MECANISMOS
CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA
EQUAÇÕES DA AÇÃO DE MASSAS

3.8 Isótopos Ambientais

CARBONO-14
TRÍTIU
OXIGÊNIO E DEUTÉRIO

3.9 Medida a Campo de Parâmetros Indexadores

4 Geologia da Água Subterrânea 1

4.1 Litologia, Estratigrafia e Estrutura

4.2 Depósitos Fluviais

4.3 Depósitos Eólicos

4.4 Depósitos Glaciais

4.5 Rochas Sedimentares

ARENITOS
ROCHAS CARBONÁTICAS
CARVÃO
FOLHELHO

4.6 Rochas Ígneas e Metamórficas

4.7 Permafrost

5 Redes de Fluxo 1

5.1 Redes de Fluxo por Construção Gráfica

SISTEMAS HOMOGÊNEOS ISOTRÓPICOS

*SISTEMAS HETEROGÊNEOS E A LEI DA TANGENTE
SISTEMAS ANISOTRÓPICOS E A SEÇÃO TRANSFORMADA*

5.2 Redes de Fluxo por Simulação Analógica

*ANALOGIA COM PAPEL CONDUTOR
ANALOGIA POR REDE DE RESISTÊNCIA*

5.3 Rede de Fluxo por Simulações Numéricas

5.4 Redes de Fluxo em Meio Saturado-Não Saturado

5.5 A Superfície de Infiltração e o Fluxo de Dupuit

*FACE DE INFILTRAÇÃO, PONTO DE SAÍDA E SUPERFÍCIE LIVRE
TEORIA DUPUIT-FORCHHEIMER DE UM FLUXO DE SUPERFÍCIE LIVRE*

6 Água Subterrânea e o Ciclo Hidrológico 1

6.1 Fluxo de Água Subterrânea Regional de Estado Estacionário

*ÁREAS DE RECARGA, DESCARGA E DIVISORES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA
EFEITO DA TOPOGRAFIA NO SISTEMA DE FLUXO REGIONAL
EFEITO DA GEOLOGIA NO SISTEMAS DE FLUXO REGIONAL
POÇOS ARTESIANOS DE FLUXO CONSTANTE
MAPEAMENTO DO SISTEMA DE FLUXO*

6.2 Balanço Hídrico em Regime Estacionário

*INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DE SISTEMAS DE FLUXOS REGIONAIS
RECARGA E DESCARGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COMO COMPONENTES
DE UM BALANÇO HÍDRICO*

6.3 Fluxo de Águas Subterrâneas Regional Transitório

6.4 Infiltração e Recarga de Água Subterrânea

*A TEORIA DA INFILTRAÇÃO
MEDIDAS NO CAMPO (IN SITU)*

6.5 Hidrologia de Encosta e Geração de Escoamento Superficial

*ESCOAMENTO SUPERFICIAL
FLUXO DE SUBSUPERFÍCIE
INDICADORES QUÍMICOS E ISOTÓPICOS*

6.6 Recessão do Escoamento de Base e Armazenamento de Margens

6.7 Interações Entre as Águas Subterrâneas e Um Lago

6.8 Flutuações nos Níveis da Água Subterrânea

*EVAPOTRANSPIRAÇÃO E CONSUMO FREATOFÍTICO
APRISIONAMENTO DE AR DURANTE A RECARGA
EFEITOS DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA
CARGAS EXTERNAS
INTERVALO DE TEMPO EM PIEZÔMETROS*

7 Evolução Química das Águas Subterrâneas Naturais 1

7.1 Sequências Hidroquímicas e Fácies

*QUÍMICA DA PRECIPITAÇÃO
GÁS CARBÔNICO NO SOLO
EVOLUÇÃO DOS ÍONS MAIORES*

7.2 Métodos Gráficos e Fácies Hidroquímicas

7.3 Água Subterrânea em Terrenos Carbonático

*DISSOLUÇÃO EM SISTEMA ABERTO
SISTEMA FECHADO
DISSOLUÇÃO INCONGRUENTE
OUTROS FATORES
INTERPRETAÇÃO DE ANÁLISES QUÍMICAS*

7.4 Águas Subterrâneas em Rochas Cristalinas

*CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS
EXPERIMENTOS LABORATORIAIS
INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE CAMPO*

7.5 Água Subterrânea em Sistemas Sedimentares Complexos

*ORDEM DE ENCONTRO
COMPOSIÇÃO DA ÁGUA EM DEPÓSITOS GLACIAIS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM ROCHAS SEDIMENTARES ESTRATIFICADAS*

7.6 Interpretação Geoquímica a Partir da Datação com ^{14}C

7.7 Efeitos-Membrana em Bacias Sedimentares Profundas

7.8 Taxas de Processos e Difusão Molecular

8 Avaliação de Recursos Hídricos Subterrâneos 1

8.1 Desenvolvimento dos Recursos Hídricos Subterrâneos

*PROSPECÇÃO, AVALIAÇÃO E EXPLOTAÇÃO
RENDIMENTO DO POÇO, RENDIMENTO DO AQUÍFERO E RENDIMENTO DA BACIA*

8.2 Prospecção de Aquíferos

*MÉTODOS GEOLÓGICOS DE SUPERFÍCIE
MÉTODOS GEOLÓGICOS DE SUBSUPERFÍCIE
MÉTODOS GEOFÍSICOS DE SUPERFÍCIE
MÉTODOS GEOFÍSICOS DE SUBSUPERFÍCIE
PERFURAÇÃO E INSTALAÇÃO DE POÇOS E PIEZÔMETROS*

8.3 A Resposta dos Aquíferos Ideais ao Bombeamento

*FLUXO RADIAL A UM POÇO
A SOLUÇÃO DE THEIS
AQUÍFEROS SEMICONFINADOS
AQUÍFEROS LIVRES
SISTEMAS DE POÇOS MÚLTIPLOS, ENSAIOS DE BOMBEAMENTO ESCALONADO,
ENSAIOS DE RECUPERAÇÃO E POÇO PARCIALMENTE PENETRANTE
AQUÍFEROS COM FRONTEIRAS HIDRÁULICAS
A RESPOSTA DE AQUÍFEROS IDEAIS
O MUNDO REAL*

8.4 Determinação de Parâmetros: Testes de Laboratório

*CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA
POROSIDADE
COMPRESSIBILIDADE
CURVAS CARACTERÍSTICAS DO MEIO NÃO SATURADO*

8.5 Determinação de Parâmetros: Ensaio em Piezômetros

8.6 Determinação de Parâmetros: Testes de Bombeamento

*AJUSTE DE CURVAS DO TIPO DI-LOG
GRÁFICOS SEMILOGARÍTMICOS*

8.7 Estimativa da Condutividade Hidráulica Saturada

8.8 Predição da Produtividade do Aquífero por Simulação Numérica

MÉTODO DE DIFERENÇAS-FINITAS

MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

CALIBRAÇÃO DO MODELO E O PROBLEMA INVERSO

8.9 Previsão da Produção em Aquífero Usando Simulação por Analogia

ANALOGIA ENTRE FLUXO ELÉTRICO E FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

REDE RESISTÊNCIA-CAPACITÂNCIA

COMPARAÇÃO DE SIMULAÇÃO POR ANALOGIA E COMPUTACIONAL

8.10 Rendimento da Bacia

RENDIMENTO SEGURO E RENDIMENTO IDEAL DE UMA BACIA HIDROGEOLÓGICA

RENDIMENTO HIDROLÓGICO TRANSIENTE E O RENDIMENTO DA BACIA

HIDROGEOLÓGICA

8.11 Recarga Artificial e Infiltração Induzida

8.12 Subsidência de Terrenos

MECANISMO DO PROCESSO DE SUBSIDÊNCIA

MEDIÇÕES DE SUBSIDÊNCIA DE TERRENOS EM CAMPO

8.13 Intrusão Salina

9 Contaminação de Água Subterrânea 1

9.1 Padrões de Qualidade da Água

9.2 Processos de Transporte

CONSTITUINTES NÃO REATIVOS EM MEIO HOMOGÊNEO

CONSTITUINTES NÃO REATIVOS EM MEIO HETEROGÊNEO

TRANSPORTE DE CONSTITUINTES REATIVOS

TRANSPORTE EM MEIO FISSURADO

9.3 Comportamento Hidroquímico de Contaminantes

NITROGÊNIO

METAIS TRAÇOS

NÃO METAIS

SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS

9.4 Medição de Parâmetros

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE

DISPERSIVIDADE

PARTICIONAMENTO QUÍMICO

9.5 Fontes de Contaminação

DESCARTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS

DISPOSIÇÃO DE ESGOTO EM SUPERFÍCIE

ATIVIDADES AGRÍCOLAS

VAZAMENTOS E DERRAMAMENTOS DE PETRÓLEO

DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS RADIOATIVOS

DESCARTE DE RESÍDUOS LÍQUIDOS EM POÇOS PROFUNDOS

OUTRAS FONTES

10 Água Subterrânea e Problemas Geotécnicos 1

10.1 Poro-pressões, Escorregamentos e Estabilidade de Taludes

TEORIA DE RUPTURA DE MOHR-COULOMB
MÉTODOS DO EQUILÍBRIO LIMITE NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES
O EFEITO DAS CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS NA ESTABILIDADE DE TALUDES DE SOLO
EFEITO DAS CONDIÇÕES DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA ESTABILIDADE DE TALUDES EM ROCHAS

10.2 Água Subterrânea e Barragens

TIPOS DE BARRAGENS E RUPTURAS DE BARRAGENS
PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE CONCRETO
IMPERMEABILIZAÇÃO E DRENAGEM DAS FUNDAÇÕES DE BARRAGENS
PERCOLAÇÃO EM FLUXO ESTACIONÁRIO ATRAVÉS DE BARRAGENS DE TERRA
FLUXO ESTACIONÁRIO POR BARRAGENS DE TERRA
IMPACTOS HIDROGEOLÓGICOS EM RESERVATÓRIOS

10.3 Entrada de Água Subterrânea em Túneis

UM TÚNEL COMO DRENO EM ESTADO ESTACIONÁRIO OU TRANSITÓRIO
RISCOS HIDROGEOLÓGICOS NA ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS
ANÁLISE PREDITIVA DAS ENTRADAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM TÚNEIS

10.4 Afluxo de Água Subterrânea para Dentro de Escavações

DRENAGEM E DESAGUAMENTO DE ESCAVAÇÕES
ANÁLISE PREDITIVA DO AFLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA DENTRO DE ESCAVAÇÕES

11 Água Subterrânea e Processos Geológicos 1

11.1 Água Subterrânea e Geologia Estrutural

A TEORIA HUBBERT-RUBEY DE FALHAS DE CAVALGAMENTO
PREVISÃO E CONTROLE DE TERREMOTOS

11.2 Água Subterrânea e Petróleo

MIGRAÇÃO E ACUMULAÇÃO DE PETRÓLEO
APRISIONAMENTO HIDRODINÂMICO DO PETRÓLEO
SISTEMA DE FLUXO REGIONAL E ACUMULAÇÃO DE PETRÓLEO
IMPLICAÇÕES PARA A EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO

11.3 Água Subterrânea e Processos Termiais

REGIMES TERMAIS EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NATURAIS SISTEMAS DE FLUXO
SISTEMAS GEOTERMAIS
POSICIONAMENTO DE PLUTÔNIO

11.4 Águas Subterrâneas e Geomorfologia

CARSTES E CAVERNAS
DESENVOLVIMENTO NATURAL DA DECLIVIDADE
PROCESSOS FLUVIAIS
PROCESSOS GLACIAIS

11.5 Águas Subterrâneas e Mineralização Econômica

GÊNESE DOS DEPÓSITOS MINERAIS ECONÔMICOS
IMPLICAÇÕES PARA A EXPLORAÇÃO GEOQUÍMICA

Apêndices

- I Elementos de Mecânica dos Fluidos**
- II Equação para Escoamento Transiente em Meios Saturados Deformáveis**
- III Exemplo de uma Solução Analítica para um Problema de Valor de Contorno**
- IV Equação de Debye-Hückel e Tabela Kielland para Coeficientes de Atividade Iônica**
- V Função Erro Complementar (erfc)**
- VI Desenvolvimento de Equação de Diferenças Finitas para Escoamento Estacionário em Meio Homogêneo Isotrópico**
- VII Solução Analítica de Toth para o Escoamento Subterrâneo Regional**
- VIII Solução Numérica do Problema de Valor de Contorno Representando Infiltração Unidimensional em um Sistema de Escoamento de Águas Subterrâneas com Recarga**
- IX Desenvolvimento da Equação de Diferenças Finitas para o Escoamento Transiente em um Aquífero Heterogêneo, Anisotrópico, Horizontal e Confinado**
- X Derivação da Equação de Advecção-Dispersão para Transporte de Solutos em Meio Poroso**

Referências

Índice

PREFÁCIO

O livro “Águas Subterrâneas” é um clássico. À época de seu lançamento, há aproximadamente quatro décadas, teve um imenso impacto. Juntamente com conceitos estabelecidos, trouxe uma perspectiva que viria a causar uma quase revolução no campo da hidrogeologia, ao introduzir os conceitos de contaminação de aquíferos e incorporar conceitos de várias outras áreas do conhecimento. Foi um marco. Passou com todos os méritos pelos obstáculos que costumam deixar pelo caminho outros livros-texto de ciência básica. A esse momento visionário, documentado com clareza no prólogo da edição original, somou-se o enorme talento descritivo e didático dos autores. E foi esse talento que imprimiu longevidade ao livro e que permitiu que uma tradução como essa fosse lançada tanto tempo depois e com tanto interesse.

A própria história desta tradução para o português merece ser registrada neste prefácio, pois foi uma demonstração da sedução e respeito que o livro provoca ainda hoje nos hidrogeólogos do Brasil, tanto naqueles que cresceram sob sua sombra segura na área de hidrogeologia, quanto pelo público mais jovem, que o utiliza para sua formação atual. Foi confiando nisso que optamos pelo convite aberto para a participação em um trabalho em mutirão. Usando os contatos de anos de aulas, cursos e eventos, enviamos uma chamada: “coloque seu nome num clássico”. Em meros dois dias atingimos quase trezentos voluntários. Encerramos então as inscrições pois estas continuavam a chegar em grande quantidade. Contando com o entusiasmo e empenho dos voluntários, os trabalhos andaram céleres e o todo o texto da tradução, sem formatação final, ficou pronto em impressionantes 60 dias, contados a partir do momento em que recebemos o convite inicial dos autores. Uma experiência gratificante, estão todos de parabéns.

A decisão dos autores de permitir que a semente lançada originalmente continue a dar frutos evoluiu para um projeto de distribuição gratuita do livro, com livre acesso,

em arquivos digitais. Esta iniciativa, que contará com a participação de vários hidrogeólogos e aspirantes em traduções para diversas línguas ao redor do mundo, tem tudo para marcar novamente nossa área do conhecimento. Da mesma forma que sua publicação inicial, que ocorreu num momento precioso e ajudou a moldar o futuro das águas subterrâneas como hoje conhecemos.

Agora, em outro momento precioso, com quase o dobro da população mundial de quando o livro foi lançado, com muitas preocupações voltadas para a disponibilidade de água, o estudo da hidrogeologia com foco no uso sustentável das águas subterrâneas deverá ocupar um espaço cada vez maior. Afinal, os aquíferos são os grandes reservatórios de água do planeta e a manutenção e melhora da qualidade das águas sempre fez parte dos objetivos deste livro. Cuidar dos aquíferos e das águas subterrâneas é uma missão do tamanho do cuidado que devemos ter para com as gerações futuras.

Para o bem das águas subterrâneas, esperamos que a tradução deste clássico para o português ajude a marcar esse novo ponto de partida e estenda a longevidade do livro.



Everton de Oliveira

São Paulo, Brasil

PRÓLOGO

Edição em português

A produção do livro “Groundwater”, de Freeze e Cherry, foi publicada em inglês em 1979 e depressa tornou-se reconhecida internacionalmente na educação em hidrogeologia. Ficamos surpresos por este sucesso internacional porque nossa intenção era tão somente a de produzir um livro que nos fosse útil nos cursos que lecionávamos nas universidades no Canadá e para os colegas principalmente dos Estados Unidos, onde nós fizemos nossos cursos de pós-graduação. Posteriormente, ficamos felizes em saber que o livro fora traduzido para o turco e para o chinês e esperamos que o livro tenha sido útil nestes países. E ficamos muito gratos que, em 2016, agora que o livro está fora de catálogo, os editores das versões em inglês e turco tenham nos doado os direitos autorais para que deles façamos o uso que julgarmos adequado.

Estamos encantados que esta edição em português tenha sido produzida e que fique disponível gratuitamente para todos. Estamos contentes que o primeiro grande benefício de nossa posse dos direitos autorais seja o lançamento da edição em português, porque o Brasil é um grande país com muitos problemas de água subterrânea que necessitam de atenção e porque no Brasil existe um número crescente de programas educacionais em água subterrânea e uma comunidade crescente de profissionais em hidrogeologia. Esperamos sinceramente que esta edição em português seja útil.

Gostaríamos de estender nossos agradecimentos aos muitos voluntários brasileiros que participaram da tradução do livro sob a liderança de Everton de Oliveira. Este processo gerou um exemplo através da tradução colaborativa com o envolvimento de tantos brasileiros trabalhando juntos para conseguir entregar o resultado dentro de um prazo tão reduzido.

Edição Original

Percebemos uma tendência no estudo e na prática da hidrologia de água subterrânea. Enxergamos uma ciência que emerge de suas raízes geológicas e de suas aplicações hidráulicas iniciais para uma ciência ambiental completa. Vemos uma ciência que está se tornando de natureza mais interdisciplinar e de maior importância nas preocupações humanas.

Este livro é a nossa resposta a essas tendências. Tentamos oferecer um texto que é adequado ao estudo da água subterrânea durante este período de emergência. Fizemos uma tentativa consciente para integrar geologia e hidrologia, física e química, e ciência e engenharia numa escala muito maior do que foi realizada no passado.

Este livro foi projetado para ser utilizado como livro texto em cursos de introdução à água subterrânea, dos tipos que são normalmente ensinados nos currículos dos primeiros anos dos cursos de graduação em geologia, engenharia geológica ou engenharia civil. Possui consideravelmente mais material do que pode ser coberto num curso de um semestre de duração. Nossa intenção é oferecer uma ampla cobertura dos tópicos de água subterrânea de modo a permitir que os instrutores usem capítulos selecionados ou partes de capítulos como uma estrutura para ser seguida ao longo do semestre. O material remanescente pode servir como base para a sequência em outro curso de graduação ou como curso introdutório de pós-graduação. Reconhecemos que a abordagem multidisciplinar pode criar dificuldades para estudantes com base exclusiva em ciências da terra, mas estamos convencidos de que os benefícios desta abordagem ultrapassam em muito o custo do esforço adicional que ela requer.

O estudo de água subterrânea em nível introdutório requer a compreensão de princípios básicos de geologia, física, química e matemática. Este livro é planejado para estudantes que têm esse conhecimento em nível do primeiro ano da universidade. Formação adicional nestes assuntos é naturalmente desejável. Cálculo elementar é utilizado com frequência em vários capítulos. Embora o conhecimento de tópicos mais avançados de cálculo sejam definitivamente uma vantagem para estudantes que buscam a especialização em água subterrânea. Esperamos que para os estudantes que não possuam esse embasamento este texto sirva como um caminho para o entendimento básico dos princípios físicos do fluxo da água subterrânea. Equações diferenciais foram usadas muito esporadicamente, mas estão incluídas onde achamos que seu uso era essencial. O significado físico das equações e de suas condições de contorno foram considerados primordiais. Para se evitar interrupções matemáticas na apresentação dos conceitos físicos, as deduções detalhadas e os métodos de solução estão restritos aos apêndices do livro.

Até recentemente os cursos de água subterrânea em nível universitário eram vistos somente sob os aspectos geológicos e hidráulicos do assunto. Em resposta à crescente importância da qualidade natural da água subterrânea e da sua contaminação pelo homem, incluímos três capítulos com ênfase essencialmente na parte química.

Assumimos que os leitores são versados nos símbolos químicos usuais e podem escrever e balancear equações de química inorgânica. Baseados nisso, descrevemos os principais princípios de físico-química necessários para uma cobertura introdutória dos aspectos geoquímicos da água subterrânea. Estudantes que desejarem um tratamento mais avançado destes tópicos necessitam de conhecimentos de termodinâmica num nível além do escopo deste livro.

Embora tenhamos tentado oferecer uma ampla cobertura interdisciplinar dos princípios da água subterrânea, não pudemos incluir informações detalhadas sobre aspectos técnicos de tópicos tais como projeto e instalação de poços, operação de bombas, métodos de amostragem de água subterrânea, procedimentos para análises químicas de água subterrânea e testes de permeâmetros e de consolidação. Os princípios destes testes práticos e importantes estão discutidos no texto, mas os aspectos operacionais deverão ser buscados nos muitos manuais e artigos técnicos citados.

Agradecimentos

O manuscrito deste texto foi revisado em sua totalidade por Pat Domenico, Eugene Simpson e Dave Stephenson. Seus comentários e sugestões nos ajudaram imensamente a chegar a versão final. Somos também gratos a Bill Back, Lee Clauton, Shlomo Neuman, Eric Reardon e Leslie Smith, que nos forneceram valiosas revisões de partes do livro. Adicionalmente, solicitamos e recebemos ajuda em seções individuais de Bob Gillham, Gerry Grisak, Bill Matthews, Dave McCoy, Steve Moran, Nari Narasimhan, Frank Patton, John Pickens, Doug Piteau, Joe Poland, Dan Reynolds e Warren Wood. Além destes, seríamos negligentes se não reconhecêssemos a vital influência de nossa longa associação com Paul Witherspoon e Bob Farvolden.

Também temos uma dívida com os muitos estudantes de graduação e pós-graduação em hidrologia de água subterrânea da Universidade da Colúmbia Britânica e da Universidade de Waterloo que identificaram falhas na apresentação e que serviram de cobaias para as séries de exercícios.

R. Allan Freeze

Vancouver, Colúmbia Britânica

John A. Cherry

Waterloo, Ontario

ÁGUA SUBTERRÂNEA



INSTITUTO ÁGUA SUSTENTAVEL

Apoio:





Tradutores: Michele Marques, Júlio Vilar, Isabela Elba Marcelo, Marcela Klis Barbato, Jean Junkes; Bruna Soldera (líder de capítulo); Ricardo Hirata (gerente); Everton de Oliveira (coordenador).

1.1 Água subterrânea, a Terra e o Homem

Este livro é sobre água subterrânea. É sobre o ambientes geológicos que controlam a ocorrência das águas subterrâneas. Sobre as leis físicas que descrevem o fluxo das águas subterrâneas. É sobre a evolução química que acompanha seu fluxo. É também sobre a influência do homem no regime natural das águas subterrâneas; e sobre a influência do regime natural das águas subterrâneas sobre o homem.

O termo água subterrânea é normalmente reservado à água subsuperficial que encontra-se abaixo do lençol freático em solos e formações geológicas que estão totalmente saturados. Devemos manter esta definição clássica, mas o fazemos com pleno reconhecimento de que o estudo deve basear-se numa compreensão do regime das águas subterrâneas num sentido mais amplo. Nossa abordagem será compatível com a ênfase tradicional no fluxo superficial e subterrâneo; mas também irá englobar o regime de umidade de solo superficial, não saturado, que desempenha um papel importante no ciclo hidrológico, e incluirá os regimes muito mais profundos e saturados e que tem fundamental influência em muitos processos geológicos.

Vemos o estudo das águas subterrâneas como de natureza interdisciplinar. Há uma tentativa consciente neste texto de integrar a química e física, geologia e hidrologia, e a ciência e engenharia em um grau maior do que foi feito no passado. O estudo das águas subterrâneas é pertinente aos geólogos, hidrólogos, pedólogos, engenheiros agrônomos, silvicultores, geógrafos, ecologistas, engenheiros geotécnicos, engenheiros

de mineração, engenheiros sanitários, analistas de reserva de petróleo e, provavelmente, outros. Esperamos que nosso tratamento introdutório esteja em sintonia com essas amplas necessidades interdisciplinares.

Se este livro tivesse sido escrito uma década atrás, teria tratado quase inteiramente a água subterrânea como um recurso. As necessidades da época teriam ditado essa abordagem, os livros escritos nesse período refletiam essas necessidades. Eles enfatizam o desenvolvimento do abastecimento de água através de poços e do cálculo da produção do aquífero. Os problemas da água subterrânea vistos como tais são aqueles que ameaçam essa produção. Os aspectos de produção das águas subterrâneas ainda são importantes e serão tratados no texto com a deferência que merecem. Mas a água subterrânea é mais do que um recurso. É uma parte essencial do meio ambiente natural; conduz a problemas ambientais e pode, em alguns casos, oferecer um meio para soluções ambientais. Faz parte do ciclo hidrológico e o entendimento do seu papel neste ciclo é obrigatório se forem promovidas análises integradas na consideração dos recursos das bacias hidrográficas, e na avaliação regional da contaminação ambiental. Em um contexto de engenharia, as águas subterrâneas contribuem para problemas geotécnicos, como a estabilidade da inclinação e a subsidência do terreno. A água subterrânea é também uma chave para a compreensão de uma grande variedade de processos geológicos, entre eles a origem de terremotos, a migração e acumulação de petróleo e a origem de certos tipos de jazidas, tipos de solo e formas de relevo.

Os cinco primeiros capítulos deste livro estabelecem as bases físicas, químicas e geológicas para o estudo das águas subterrâneas. Os seis últimos capítulos aplicam esses princípios nas várias esferas de interação entre a água subterrânea, a terra e o homem. Os parágrafos seguintes podem ser vistos como uma introdução a cada um dos capítulos posteriores.

Água Subterrânea e o Ciclo Hidrológico

A infinita circulação de água entre o oceano, a atmosfera e a terra é denominada de ciclo hidrológico. Nosso interesse concentra-se na porção terrestre do ciclo, uma vez que pode ser operacional em uma bacia hidrográfica individual. As Figuras 1.1 e 1.2 fornecem dois diagramas esquemáticos do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica. Eles são introduzidos aqui principalmente para fornecer ao leitor uma introdução esquemática à terminologia hidrológica. A Figura 1.1 é conceitualmente melhor, na medida em que enfatiza os processos e ilustra o conceito de sistema de fluxo do ciclo hidrológico. O esquema de representação da Figura 1.2 é frequentemente utilizado na abordagem de sistemas para modelagem hidrológica. Ele falha ao refletir a dinâmica da situação, mas promove uma clara diferenciação entre os termos que envolvem taxas de movimento (caixas hexagonais) e aqueles que envolvem armazenamento (caixas retangulares).

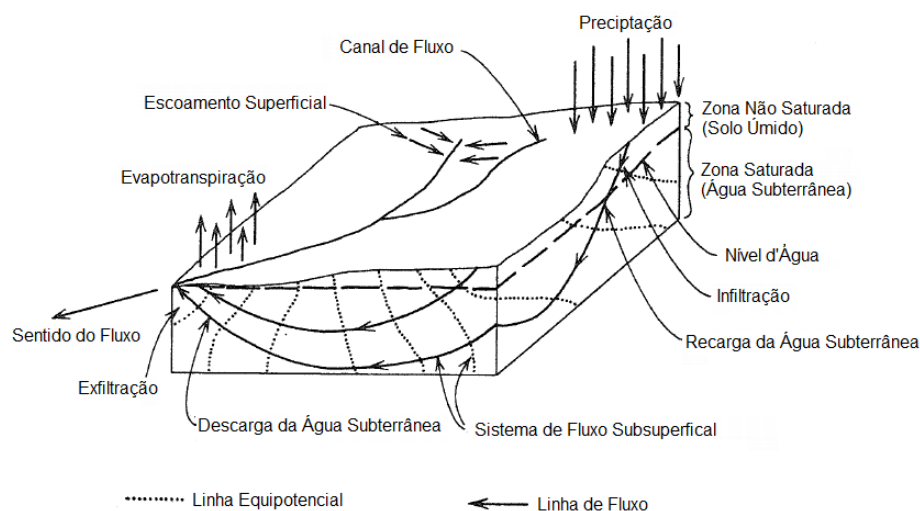


Figura 1.1 Representação esquemática do ciclo hidrológico.

O fluxo de entrada para o sistema hidrológico ocorre em forma de precipitação, sob a forma de chuva ou derretimento da neve. O fluxo de saída ocorre como escoamento e como evapotranspiração, uma combinação de evaporação de corpos d'água superficiais, evaporação das superfícies do solo e transpiração pelas plantas. A precipitação abastece os cursos d'água, tanto pelo escoamento superficial aos canais tributários, como pelas rotas de fluxo subterrâneo, pelo interfluxo e escoamento após a infiltração no solo. A Figura 1.1 deixa claro que uma bacia hidrográfica deve ser considerada como uma combinação tanto da área de drenagem superficial, parcela de solos subsuperficiais, bem como pelas formações geológicas que a sustentam. O processo hidrológico subterrâneo é tão importante quanto o processo superficial. De fato, pode-se argumentar que eles são mais importantes, pois é a natureza dos materiais subterrâneos que controlam as taxas de infiltração e as estas influenciam no tempo e na distribuição espacial do escoamento superficial. No Capítulo 6, examinaremos a natureza dos padrões regionais de fluxo de água subterrânea em alguns detalhes e investigaremos as relações entre infiltração, recarga de água subterrânea, descarga de água subterrânea, fluxo de base e geração de fluxo. No Capítulo 7, veremos a evolução química da água subterrânea que acompanha sua passagem pela porção subsuperficial do ciclo hidrológico.

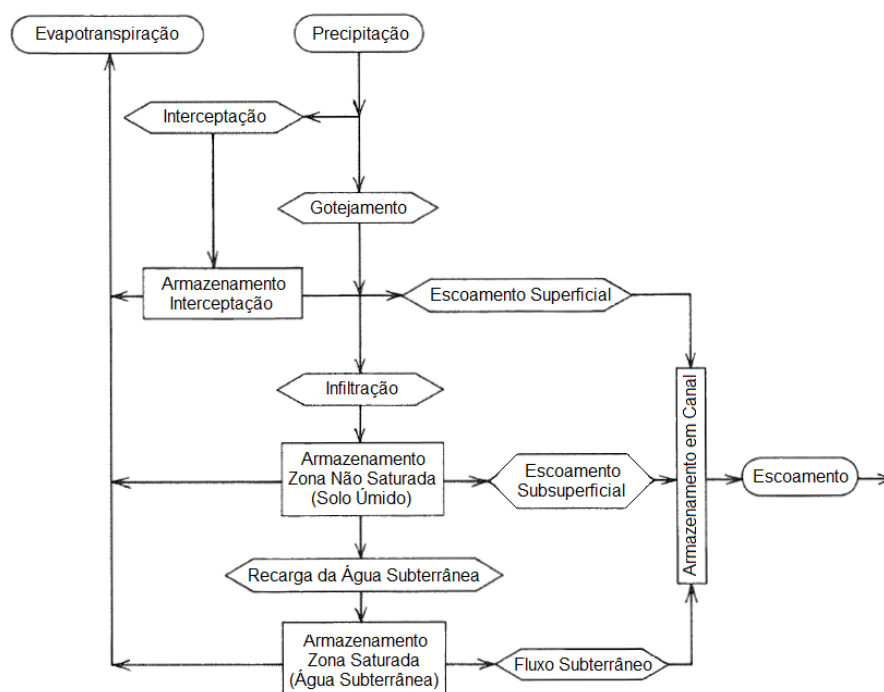


Figura 1.2 Sistemas de representação do ciclo hidrológico.

Antes de encerrar esta sessão, vale a pena olhar para alguns dados que refletem a importância quantitativa das águas subterrâneas em relação a outros componentes do ciclo hidrológico. Nos últimos anos tem se prestado considerável atenção ao conceito de balanço hídrico mundial (NACE, 1971; LVOVITH, 1970; SUTCLIFFE, 1970) e a estimativa mais recente destes dados enfatiza a natureza oblíqua das águas subterrâneas na hidrosfera. Com referência à Tabela 1.1, se nós removermos da consideração os 94% da água da terra que resta nos oceanos e mares com níveis elevados de salinidade, então as águas subterrâneas representam dois terços dos recursos de água doce do mundo. Se nos limitarmos à consideração aos recursos de água doce utilizáveis (não se inclui as calotas e geleiras), as águas subterrâneas respondem por quase o volume total. Mesmo se considerarmos somente o regime mais ativo de águas subterrâneas que Lvovitch (1970) estima em $4 \times 10^6 \text{ km}^3$ (ao invés de $60 \times 10^6 \text{ km}^3$ da Tabela 1.1), a divisão de água doce chega a: água subterrânea 95%; lagos, pântanos, reservatórios e canais fluviais 3.5%; umidade do solo 1.5%.

Tabela 1.1 - Estimativa do balanço hídrico no mundo

Parâmetro	Área de Superfície (km ²) x 10 ⁶	Volume (km ³) x 10 ⁶	Volume (%)	Profundidade Equivalente (m)*	Tempo de Residência
Oceanos e Mares	361	1370	94	2500	~ 4000 anos
Lagos e Reservatórios	1,55	0,13	< 0,01	0,25	~ 10 anos
Rios	< 0,1	< 0,01	< 0,01	0,007	1 - 10 anos
Pântanos	< 0,1	< 0,01	< 0,01	0,003	~ 2 semanas
Solo Úmido	130	0,07	< 0,01	0,13	2 semanas - 1 ano
Água Subterrânea	130	60	4	120	2 semanas - 10000 anos
Calota Polares e Geleiras	17,8	30	2	60	10 - 100 anos
Água atmosférica	504	0,01	< 0,01	0,025	~ 10 dias
Água Biosférica	< 0,10	< 0,01	< 0,01	0,001	~ 1 semana

Fonte: Nace, 1971.

*Calculado como se o armazenamento fosse uniformemente distribuído sobre toda a superfície da Terra.

Esta superioridade volumétrica, entretanto, é atenuada pelos tempos médios de residência. A água de rios tem um tempo de giro na ordem de duas semanas. Águas subterrâneas por outro lado movem-se lentamente e seu tempo de residência em décadas, séculos e até mesmo milhares de anos não são incomuns. Os princípios estabelecidos no Capítulo 2 e as considerações sobre os fluxos regionais do Capítulo 6 irão esclarecer os controles hidrogeológicos sobre o movimento em larga escala das águas subterrâneas.

A maioria dos textos hidrológicos contém discussões detalhadas do ciclo hidrológico e do balanço de água global. Wisler e Brater (1959) e Linsley, Kohler e Paulhus (1975) são referências amplamente utilizadas para introdutórios textos hidrológicos. Um texto recente publicado por Eagleson (1970) atualiza a ciência em um nível mais avançado. O extenso Manual de Hidrologia Aplicada editado por Chow (1964a) é uma referência valiosa.

A história do desenvolvimento do pensamento hidrológico é um estudo interessante. Chow (1964b) fornece uma discussão concisa; o livro de estudo de Biswas (1970) fornece uma riqueza de detalhes das contribuições dos primeiros filósofos egípcios, gregos e romanos através do nascimento da hidrologia científica na Europa ocidental nos séculos XVIII e XIX.

Águas Subterrâneas como um Recurso

A primeira motivação para o estudo das águas subterrâneas tem tido tradicionalmente sua importância como um recurso. Para os Estados Unidos, a importância do papel das águas subterrâneas como componente do uso racional das águas pode ser obtida a partir dos estudos estatísticos do levantamento Geológico dos Estados Unidos, como relatado mais recentemente para o ano de 1970 por Murray e Reeves (1972) e resumido por Murray (1973).

A Tabela 1.2 documenta o crescimento da utilização da água nos Estados Unidos durante o período de 1950-1970. Em 1970 a nação usou 1400×10^6 m³/dia, sendo que destes 57% foi uso industrial e 35% irrigação. As águas superficiais corresponderam a 81% do total dos usos e as subterrâneas 19%. A Figura 1.3 ilustra o papel das águas subterrâneas em relação às águas superficiais nas quatro principais áreas de uso para o período de 1950-1970. As águas subterrâneas são menos importantes no uso industrial, mas fornece uma percentagem significativa da oferta para o uso doméstico, tanto rural como urbana, e também para a irrigação.

Os dados da Tabela 1.2 e Figura 1.3 obscurecem algumas variações regionais marcantes. Cerca de 80% do uso total da irrigação ocorre em 17 estados a oeste, enquanto que 84% da utilização industrial está concentrada nos estados a leste. As águas subterrâneas são mais amplamente utilizadas a oeste, onde é responsável por 46% do abastecimento público e 44% do uso industrial (ao contrário de 29% e 16% respectivamente, a leste).

Tabela 1.2 - Uso da água nos Estados Unidos, 1950 – 1970

	m ³ / dia x 10 ⁻⁶					Percentual de uso em 1970
	1950	1955	1960	1965	1970	
Consumo total de água	758	910	1023	1175	1400	100
Tipos de Consumo						
Abastecimento Público	53	64	80	91	102	7
Uso Rural	14	14	14	15	17	1
Uso na Irrigação	420	420	420	455	495	35
Uso Industrial	292	420	560	667	822	57
Fonte de Captação						
Água Subterrânea	130	182	190	227	262	19
Água Superficial	644	750	838	960	1150	81

Fonte: Murray, 1973.

*1 m³ = 10³ L = 264 U.S. gal.

No Canadá o uso rural e municipal da água subterrânea foi estimado por Mayboom (1968) em 1.71×10^6 m³/ dia, ou 20% do consumo total rural e municipal. O uso da água subterrânea é consideravelmente inferior ao dos Estados Unidos mesmo considerando-se a proporção populacional entre os dois países. Um exame mais detalhado mostra que o desenvolvimento rural do uso das águas subterrâneas no Canadá está relativamente no mesmo nível que o desenvolvimento rural nos Estados Unidos, mas o uso municipal é significativamente menor. As diferenças mais marcantes estão no uso para irrigação e no uso industrial, onde o consumo total relativo de água no Canadá é muito menor do que nos Estados Unidos, e o componente de água subterrânea deste uso é extremamente pequeno.

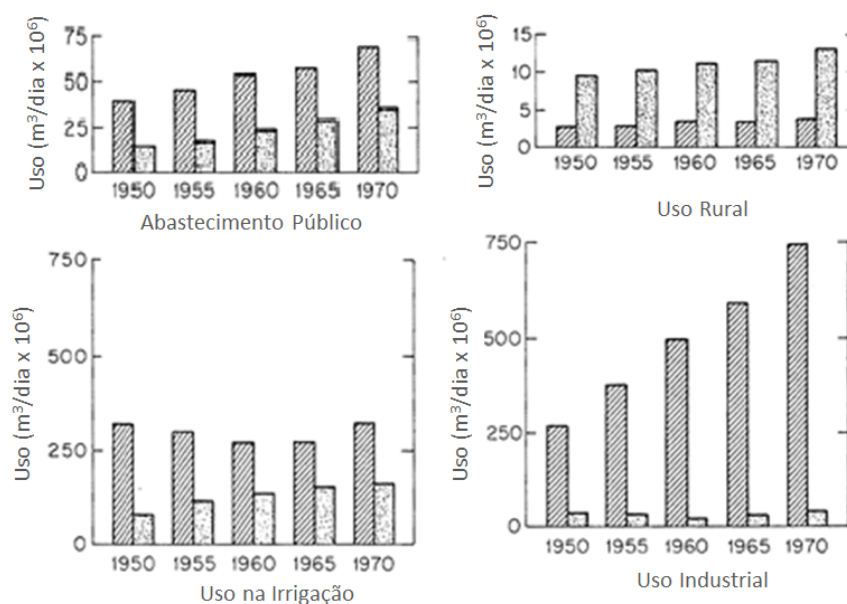


Figura 1.3 Água Superficial (traço fino) e água subterrânea (pontilhada) uso nos Estados Unidos, 1950-1970 (depois de Murray, 1973).

McGuinness (1963), citando um comitê de estudo dos Estados Unidos, forneceu previsões futuras para os requisitos nacionais de água nos Estados Unidos. Sugere-se que as necessidades de água irão chegar a 1700×10^6 m³/dia em 1980 e 3360×10^6 m³/dia até o ano 2000. A obtenção destes níveis de produção representaria uma significativa aceleração da taxa de aumento do consumo de água delimitado na Tabela 1.2. O valor para o ano 2000 começa a aproximar-se do potencial total de recursos hídricos da nação, cuja estimativa é cerca de 4550×10^6 m³/dia. Se os requisitos forem cumpridos é amplamente aceito que os recursos de águas subterrâneas terão que fornecer uma maior proporção da oferta total. McGuinness observa que para as previsões acima se a contribuição percentual de água subterrânea aumentar de 19% para 33% o uso da água subterrânea teria que aumentar em relação aos atuais 262×10^6 m³/dia para 705×10^6 m³/dia em 1980 e 1120×10^6 m³/dia para o ano 2000. Ele observa que as propriedades desejáveis para águas subterrâneas como clareza, pureza bacteriana, temperatura constante, e qualidades químicas, podem incentivar a necessidade de desenvolvimento em larga escala, mas alerta que a água subterrânea, especialmente quando grandes quantidades são solicitadas, é inerentemente mais difícil e dispendioso se localizar, avaliar, desenvolver e gerir se comparado as águas superficiais. Ele observa que a água subterrânea é uma fase integral do ciclo hidrológico. Considerar as águas subterrâneas e águas superficiais como dois recursos independentes faz parte do passado. Planejamento de recursos hídricos deve ser realizado com a constatação de que águas subterrâneas e águas superficiais tem a mesma origem.

No Capítulo 8, serão discutidas as técnicas de avaliação dos recursos hídricos subterrâneos: problemas geológicos da exploração do aquífero, métodos de campo e laboratório para medição de parâmetros e estimação, simulação do bom desempenho, produção do aquífero e exploração das águas subterrâneas em nível de bacia hidrográfica.

Contaminação das Águas Subterrâneas

Se as águas subterrâneas continuarem a desempenhar um papel importante no potencial de recursos hídricos no mundo, então terão que ser protegidas contra a crescente ameaça de contaminação subterrânea. O crescimento da população e da produção industrial e agrícola desde a segunda guerra mundial, juntamente com as crescentes exigências para o desenvolvimento energético, começaram pela primeira vez na história do homem a produzir quantidades de resíduos superiores às que o ambiente pode facilmente absorver. A escolha de um método de descarte de resíduos tornou-se um caso de escolher o jeito menos censurável a partir de um conjunto de alternativas questionáveis. Conforme ilustrado esquematicamente na Figura 1.4, não existem métodos de descarte de lixo em grande escala, atualmente praticáveis que não tenham o potencial de grave poluição de alguma parte de nosso ambiente natural. Embora tenha havido uma crescente preocupação com a poluição do ar e da água superficial, esta ação ainda não englobou o ambiente subterrâneo. Na verdade, as pressões para reduzir a poluição superficial são em parte responsáveis pelo fato de que aqueles no campo de gerenciamento de resíduos estão começando a cobiçar o ambiente subterrâneo para o descarte de resíduos. Duas das técnicas de descarte que estão sendo utilizadas e que são vistas com mais otimismo para o futuro são a injeção de resíduos líquidos em poços profundos e utilização de aterro sanitário para descarte de resíduos sólidos. Ambas as técnicas podem levar à poluição subterrânea. Além disso, a poluição subterrânea pode ser causada por vazamento de lagoas que são largamente utilizadas como componentes de amplos sistemas de descarte de resíduos e por lixiviação de resíduos animais, fertilizantes e pesticidas utilizados na atividade agrícola.

No Capítulo 9, será abordado a análise da contaminação das águas subterrâneas. Será tratado os princípios e processos que nos permitem analisar os problemas gerais de disposição de resíduos municipais e industriais, bem como alguns problemas especiais associados às atividades agrícolas, derramamentos de petróleo, atividades de mineração e resíduos radioativos. Também será discutido a contaminação de água subterrânea devido a fonte costeira por intrusão salina. Em todos estes problemas, considerações físicas de fluxo de água subterrânea devem ser associados com as propriedades químicas e aos princípios introduzidos no Capítulo 3; e a associação deve ser realizada à luz dos conceitos de evolução geoquímica natural discutidos no Capítulo 7.

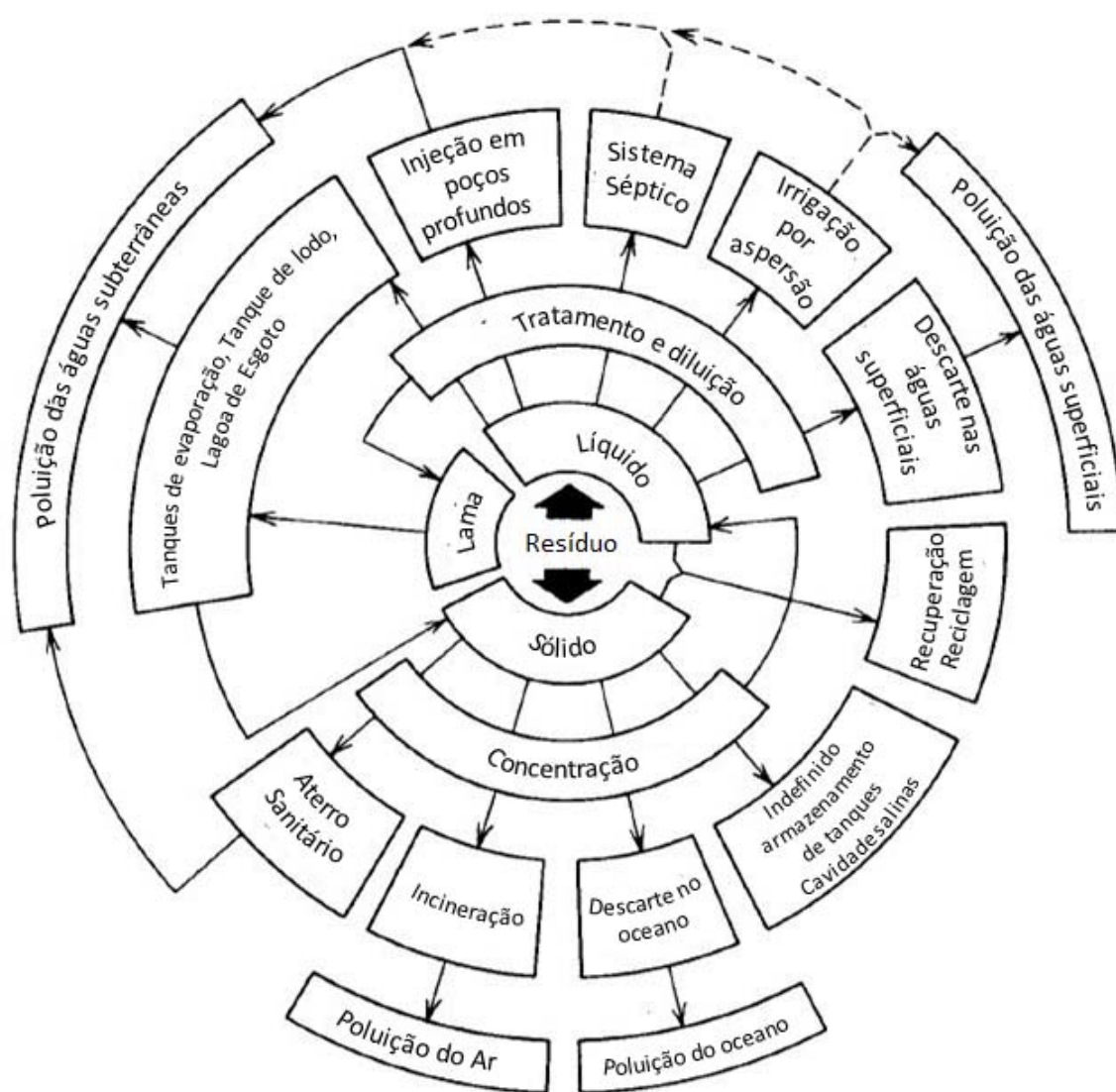


Figura 1.4 Espectro de alternativas de descarte de resíduos.

Água Subterrânea como um problema Geotécnico

A água subterrânea nem sempre é uma bênção. Durante a construção do túnel de San Jacinto na Califórnia, a condução pelo túnel neste aqueduto de vários milhões de dólares foi obstruída durante muitos meses devido as inesperadas inundações de água subterrânea de um sistema altamente fraturado.

Na Cidade do México durante o período 1938-1970, houve subsidência de terrenos em várias partes da cidade, estas chegaram a 8,5 m. Recalques diferenciais ainda representam graves problemas para projetos de engenharia. A causa primária da subsidência é agora reconhecida como sendo a retirada excessiva de água subterrânea dos aquíferos.

Na barragem de Jerome, em Idaho, a barragem "falhou", não por debilidade estrutural da própria barragem, mas pela simples razão de que a represa não seguraria a água. Os sistemas de fluxos de águas subterrâneas estabelecidos nas formações rochosas adjacentes ao reservatório forneceram vazamentos de tal eficiência que a represa teve de ser abandonada.

Na barragem de Revelstoke, na Columbia Britânica, vários anos de investigações geológicas exploratórias foram realizados em um deslizamento de terra antigo, que foi identificado no reservatório várias milhas acima do local da barragem. O receio estava na possibilidade de que o aumento das pressões da água subterrânea no deslizamento causado pelo represamento do reservatório pudesse reativar a instabilidade do talude. Um evento deste tipo causou quase 2.500 mortes em 1963, no infame desastre do reservatório Vaiont na Itália. Na cidade de Revelstoke, um programa massivo de drenagem foi realizado para assegurar que a experiência de Vaiont não fosse repetida.

No Capítulo 10 exploraremos a aplicação dos princípios do fluxo de água subterrânea para esses e outros tipos de problemas geotécnicos. Alguns dos problemas, como vazamento em barragens e entradas de água em túneis e minas a céu aberto, surgem como consequência de taxas excessivas e quantidades de fluxo de água subterrânea. Para outros, como a subsidência de terrenos e a instabilidade de taludes, a influência surge da presença de pressões excessivas de fluidos nas águas subterrâneas e não da taxa de fluxo propriamente dita. Em ambos os casos, a construção de rede de fluxos, a qual é introduzida no Capítulo 5, é uma poderosa ferramenta analítica.

Águas Subterrâneas e Processos Geológicos

Há poucos processos geológicos que não ocorrem na presença de água subterrânea. Por exemplo, existe uma estreita inter-relação entre os sistemas de fluxos de águas subterrâneas e o desenvolvimento geomorfológico de formas de relevo, quer seja pelos processos fluviais e processos glaciais ou pelo desenvolvimento natural do talude. A água subterrânea representa importante controle no desenvolvimento de ambientes cársticos.

A água subterrânea desempenha papel significativo na concentração de certos depósitos minerais economicamente importantes e na migração e acumulação de petróleo.

Talvez o papel geológico mais espetacular desempenhado pelas águas subterrâneas resida no controle que as pressões de fluidos exercem sobre os mecanismos de falha e de empurrão. Um interessante resultado desta interação é a sugestão de que pode ser possível controlar os terremotos em falhas ativas manipulando as pressões de fluido naturais nas zonas de falha.

No Capítulo 11, aprofundaremos o papel das águas subterrâneas como agente em vários processos geológicos.

1.2 Embasamentos Científicos para o Estudo de Águas Subterrâneas

O estudo de águas subterrâneas requer conhecimentos em diversos princípios básicos de geologia, física, química e matemática. Por exemplo, o fluxo de águas subterrâneas em um ambiente natural é fortemente dependente da configuração tridimensional dos depósitos geológicos através dos quais ocorre esse fluxo. O especialista em águas subterrâneas deve, portanto, possuir embasamento técnico e experiência na interpretação de evidências geológicas e facilidade em visualizar ambientes geológicos. O especialista também deve possuir experiência em sedimentação e estratigrafia e, ainda, uma boa compreensão dos processos que conduzem à deposição de estruturas ígneas vulcânicas e intrusivas. Também deve estar familiarizado com conceitos básicos da geologia estrutural, capazes de reconhecer e prever a influência de falhas e dobras em sistemas geológicos. É de considerável importância que, para o estudante de águas subterrâneas, o entendimento da natureza dos depósitos superficiais e formas de relevo sejam compreendidos. Uma grande proporção do fluxo de água subterrânea e uma porcentagem significativa de desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos ocorrem nos depósitos superficiais não consolidados, criados por processos geológicos fluviais, lacustres, glaciais, deltaicos e eólicos. Em dois terços do norte da América do Norte, a compreensão da ocorrência e fluxo das águas subterrâneas baseia-se quase integralmente na compreensão da geologia glacial dos depósitos do Pleistoceno.

A geologia nos fornece um conhecimento qualitativo da estrutura deste fluxo, entretanto, são a física e a química que fornecem as ferramentas para uma análise quantitativa. O fluxo de água subterrânea funciona como um campo condutor, como é o caso do calor e da eletricidade, e uma anterior exposição a esses campos mais clássicos são bons contribuintes para a análise do fluxo de águas subterrâneas. Em relação às diversas "leis" que convergem sobre a dinâmica deste fluxo, há uma em especial que é baseada em uma vertente específica da Física, mais conhecida como mecânica dos fluidos. Além de compreensões das propriedades básicas da mecânica dos fluidos e sedimentos, as habilidades com suas dimensões também ajudarão o aluno compreender com mais clareza a dinâmica das águas subterrâneas. O Apêndice I explana uma revisão dos elementos da mecânica dos fluidos. No caso do leitor não sentir facilidade com conceitos como densidade, pressão, energia, trabalho, estresse, é recomendável que prossiga primeiramente para o referido Apêndice, antes de avançar para o Capítulo 2. Caso sinta necessidade em aprofundar-se neste tema, mecânica dos fluidos, Streeter (1962) e Yennard (1961) são literaturas recomendadas; Albertson e Simons (1964) disponibilizam uma breve e útil recapitulação. Para temas específicos como fluxos de águas subterrâneas através de meios porosos, um maior aprofundamento pode ser encontrado nas literaturas de Scheidegger (1960) e Collins (1961), e especialmente em Bear (1972).

A análise da evolução natural da química e dos contaminantes nas águas subterrâneas requer um embasamento em princípios físico-químicos e também princípios relacionados à química inorgânica. Há muito tempo esses princípios têm feito parte da metodologia da geoquímica e, nas últimas décadas, tem se tornado comum em estudos relacionados a água subterrânea. Os isótopos estáveis e radioativos que ocorrem naturalmente neste ambiente, por exemplo, são utilizados para determinação da idade da água subterrânea.

A hidrologia das águas subterrâneas é uma ciência quantitativa, portanto não deveria haver surpresa ao descobrir que a matemática é uma de suas principais e mais importantes vertentes. Seria quase impossível, e consideravelmente insensato, ignorar as ferramentas matemáticas para compreensão de sua dinâmica. Os modelos matemáticos, cujos estudos de águas subterrâneas são baseados, refletem os conceitos dos primeiros pesquisadores nas áreas de matemática, sendo essas originalmente desenvolvida para resolução de problemas de fluxo de calor, eletricidade e magnetismo. Com a vinda das tecnologias digitais, computadores e sua globalização, muitos dos importantes recentes estudos basearam-se em abordagens matemáticas com conceitos muito diferentes, mais conhecidos como métodos numéricos. Embora nesta introdução nem os métodos analíticos clássicos nem os métodos numéricos sejam profundamente detalhados, a principal intenção foi contextualizar, de forma introdutória, temas suficientes para ilustrar alguns dos conceitos mais importantes para o estudo de águas subterrâneas.

Este texto não é, certamente, o primeiro a ser escrito sobre o tema de águas subterrâneas. Há muitos outros materiais, anteriores a este, que auxiliem no estudo sobre esse tema. Por exemplo, Todd (1959) tem sido uma bibliografia básica e introdutória na engenharia aplicada a hidrologia. Em relação às bibliografias sobre a geologia, há uma grande ênfase neste assunto por David e De Wiest (1966). Para um texto totalmente comprometido com os aspectos de avaliação de recursos hídricos subterrâneos, não há melhores referências bibliográficas do que Walton (1970) e Kruseman e De Ridder (1970). Uma literatura mais recente escrita por Domenico (1972), difere de seus predecessores na medida em que apresenta a teoria básica no contexto da modelagem de sistemas hidrológicos. Entre os melhores textos estão os de Schoeller (1962), Bear, Zaslavsky e Irmay (1968), Custodio e Llamas (1974) e o tratado russo de Polubarinova-Kochina (1962). Há diversas outras ciências da terra que envolvem o fluxo de fluidos através de meios porosos. Existe uma estreita relação entre hidrologia de águas subterrâneas, física do solo, mecânica do solo, mecânica de rochas e engenharia de reservatórios de petróleo. Estudantes de águas subterrâneas encontrarão muito interesse em livros didáticos relacionados a essas áreas, como os de Baver, Gardner e Gardner (1972), Kirkham e Powers (1972), Scott (1963), Jaeger e Cook (1969) e Pirson (1958).

1.3 Embasamentos Técnicas para o Desenvolvimento de Recursos de Águas Subterrâneas

As duas primeiras seções deste capítulo fornecem uma introdução aos tópicos que planejamos abordar neste texto. É igualmente importante que seja estabelecido também o que não pretendemos abranger neste primeiro momento. Como a maioria das ciências aplicadas, o estudo das águas subterrâneas pode ser dividido em três grandes aspectos: ciência, engenharia e tecnologia. Este livro coloca uma grande ênfase sobre os princípios científicos; isso inclui e muito, de certa forma, a maneira de análise associada à engenharia; a tecnologia, não é relacionado em nenhum sentido.

Em relação aos assuntos técnicos que não serão discutidos detalhadamente estão: métodos de perfuração, concepção, construção e manutenção de poços, registro e amostragem geofísicos. Todos esses temas são conhecimentos necessários para embasamento do especialista em águas subterrâneas de forma completa, entretanto são tratados de forma mais aprofundada em outras literaturas específicas, além de serem aprendidas de melhor forma por meio da experiência prática.

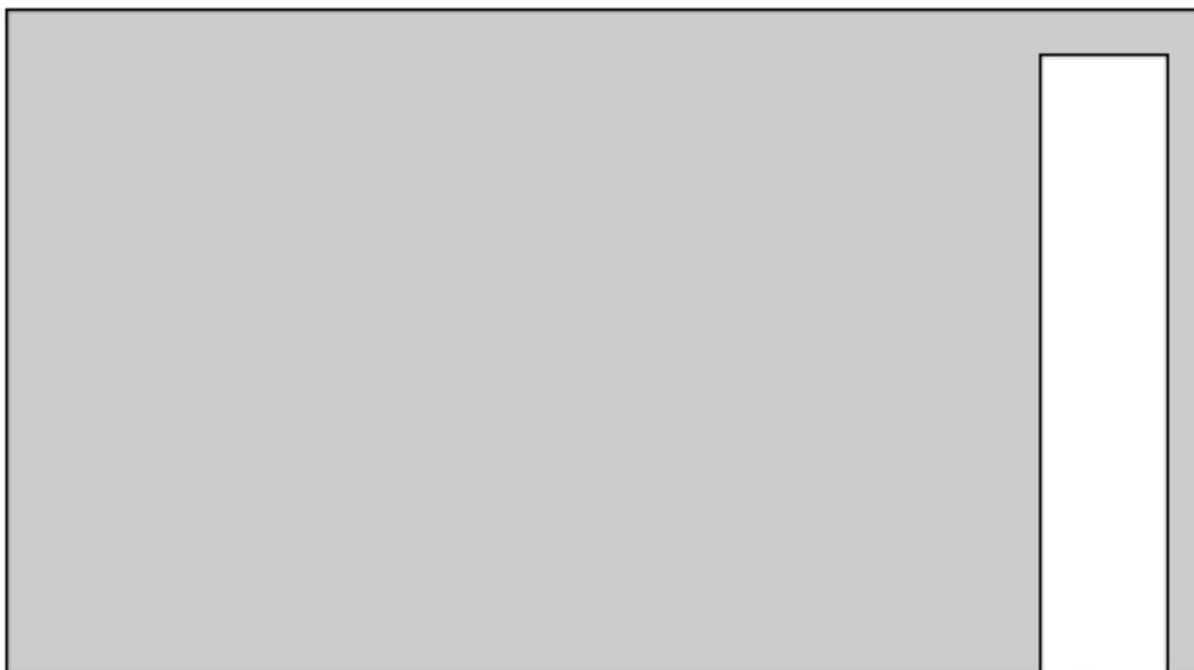
Existem diversas bibliografias (BRIGGS e FIEDLER, 1966; GIBSON e SINGER, 1971; CAMPBELL e LEHR, 1973; U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1973a, 1976) que nos proporciona descrições técnicas sobre os vários tipos de equipamentos para perfuração de poços de águas subterrâneas. Neles também possuem informações sobre o projeto e configuração de perfis de poços, a seleção e instalação de bombas e construção e manutenção de poços.

Ainda no tema de registro e amostragem geofísicos, cujo padrão de referência na indústria petrolífera foi onde surgiu a maior parte das técnicas, é de Pirson (1963). Patten e Bennett (1963) discutem as várias técnicas, em especial, sobre a exploração da água subterrânea. Daremos uma breve menção à perfuração subterrânea e à exploração de poços no capítulo 8.2, entretanto caso o leitor se interesse por mais exemplos para contextualizar-se em relatos de avaliação de recursos de água subterrânea, deve direcionar-se à Walton (1970).

Há um outro aspecto do estudo da água subterrânea, cujo teor é técnico porém em um sentido diferente, não abordado neste texto. Referimo-nos ao tema da legislação das águas subterrâneas. O desenvolvimento e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos devem ter lugar garantido no âmbito da conservação, estabelecidos pela legislação em vigor. Essa legislação é geralmente estabelecida a nível estadual e federal, cujo resultado na América do Norte assemelha-se a diversas emendas legais, direitos e estatutos. Piper (1960) e Dewsnut et al. (1973) avaliaram esse panorama nos Estados Unidos. Thomas (1958) chamou a atenção para alguns dos paradoxos que surgem dos conflitos entre a hidrologia e a legislação.

Leituras sugeridas

- CHOW, V. T. 1964. Hydrology and its development. Handbook of Applied Hydrology, ed. V. T. Chow. McGraw-Hill, New York, pp. 1.1-1.22.
- McGUINNESS, C. L. 1963. The role of groundwater in the national water situation. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1800.
- MURRAY, C.R. 1973. Water use, consumption, and outlook in the U.S. in 1970. J. Amer. Water Works Assoc., 65, pp. 302-308.
- NACE, R. L., ed. 1971. Scientific framework of world water balance. UNESCO Tech. Papers Hydrol., 7, 27 pp.



Apêndice I

Tradutores: Alexandre Alves, Ana Célia Garcia, Arthur Nanni, Eduardo Figueira da Silva, Erich Kellner, Maria Neta, Murilo de Carvalho Vicente; Edson Wendland (líder de capítulo); Ricardo Hirata (gerente); Everton de Oliveira (coordenador)

Apêndice I Elementos de Mecânica dos Fluidos

A análise do escoamento das águas subterrâneas exige uma compreensão de elementos da Mecânica dos fluidos. Albertson e Simons (1964) fornecem uma breve e útil revisão desses elementos; Streeter (1962) e Yennard (1961) são textos clássicos. Nosso objetivo aqui é simplesmente introduzir as propriedades básicas dos fluidos: densidade, peso específico, compressibilidade e viscosidade; e examinar os conceitos de pressão do fluido e carga de pressão.

Um exame dos princípios da mecânica dos fluidos deve começar, em geral, com uma revisão da mecânica dos materiais. A tabela A1.1 fornece uma lista das propriedades mecânicas da matéria, juntamente com suas unidades dimensionais no sistema métrico SI, que possui dimensões básicas como: massa, comprimento e tempo; e unidades básicas no SI: quilograma (kg), metro (m) e segundo (s). Todas as outras propriedades são medidas em unidades derivadas deste conjunto básico. Algumas dessas propriedades são tão amplamente encontradas, e suas dimensões básicas tão complexas que o SI cunhou nomes especiais para suas unidades derivadas. Conforme apontado na Tabela A1.1, força e peso são medidos em Newton (N), pressão e tensão em N/m^2 ou Pascal (Pa), e trabalho e energia em Joule (J).

Tabela A1.1 Definições, Dimensões e Unidades SI para propriedades mecânicas básicas

Propriedade	Símbolo	Definição	Unidade SI	Símbolo SI	Unidade de Dimensão	
					Derivada	Básica
Massa	M		quilograma	kg		kg
Comprimento	l		metro	m		m
Tempo	t		segundo	s		s
Área	A	$A = l^2$				m^2
Volume	V	$V = l^3$				m^3
Velocidade	v	$v = l/t$				m/s

Apêndice I

Aceleração	a	$a = l/t^2$				m/s^2
Força	F	$F = M \cdot a$	Newton	N	N	$kg.m/s^2$
Peso	w	$w = M \cdot g$	Newton	N	N	$kg.m/s^2$
Pressão	p	$p = F/A$	Pascal	Pa	N/m^2	$kg/m.s^2$
Trabalho	W	$W = F \cdot l$	Joule	J	N.m	$kg.m^2/s^2$
Energia		Trabalho realizado	Joule	J	N.m	$kg.m^2/s^2$
Massa específica	ρ	$\rho = M/V$				kg/m^3
Peso específico	γ	$\gamma = w/V$			N/m^3	$kg/m^2.s^2$
Tensão	σ, τ	Resposta Interna para p externo	Pascal	Pa	N/m^2	$kg/m.s^2$
Deformação	ϵ	$\epsilon = \Delta V/V$				Adimensional
Módulo de Young	E	Lei de Hooke			N/m^2	$kg/m.s^2$

A Tabela A1.2 fornece uma análise do sistema internacional (SI) de algumas propriedades de fluidos e termos de águas subterrâneas que ocorrem neste texto. Cada uma delas é descrita mais detalhadamente no Capítulo 2.

Grande parte da tecnologia associada ao desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos na América do Norte ainda utiliza o sistema FPS (pé-libra-segundo).

Tabela A1.2 Definições, dimensões, e unidades SI para propriedades de fluidos e termos de águas subterrâneas

Propriedade	Símbolo	Definição	Unidade SI	Símbolo SI	Unidade de Dimensão	
					Derivada	Básica
Volume	V	$V = l^3$	litro ($= m^3 \times 10^{-3}$)	ℓ	ℓ	m^3
Vazão	Q	$Q = l^3/t$			ℓ/s	m^3/s
Pressão do fluido	p	$p = F/A$	Pascal	Pa	N/m^2	$kg/m.s^2$
Carga de pressão	h					m

Apêndice I

Viscosidade Dinâmica	μ	Lei de Newton	centipoise ($= N.s \times 10^{-3}$)	cP	cP, N.s/m ²	
Viscosidade Cinemática	ν	$\nu = \mu / \rho$	centistoke ($= m^2/s \times 10^{-6}$)	cSt	cSt	m ² /s
Compressibilidade	α, β	$\alpha = 1/E$			m ² /N	m.s ² /kg
Condutividade Hidráulica	K	Lei de Darcy			cm/s	m/s
Permeabilidade	k	$k = K.\mu/\rho.g$			cm ²	m ²
Porosidade	n					Adimensional
Armazenamento específico	S_s	$S_s = p.g.(\alpha +$				1/m
Armazenamento	S	$S = S_s.b^*$				Adimensional
Transmissividade	T	$T = K.b^*$				m ² /s

b^* , espessura do aquífero confinado (ver Seção 2.10)

A Tabela A1.3 fornece um conjunto de fatores para converter unidades FPS em unidades SI.

Tabela A1.3 Fatores de conversão do Sistema de Unidades FPS (pé-libra-segundo) para o Sistema de Unidades SI

	Multiplicar	para	obter em
Comprimento	ft	$3,048 \times 10^{-1}$	m
	ft	$3,048 \times 10$	cm
	ft	$3,048 \times 10^{-4}$	km
	mi	$1,609 \times 10^3$	m
	mi	1,609	km
Área	ft ²	$9,290 \times 10^2$	m ²
	mi ²	2,590	km ²
	acre	$4,047 \times 10^3$	m ²
	acre	$4,047 \times 10^{-3}$	km ²
Volume	ft ³	$2,832 \times 10^{-2}$	m ³

Apêndice I

	U.S.gal	$3,785 \times 10^{-3}$	m^3
	U.K.gal	$4,546 \times 10^{-3}$	m^3
	ft^3	$2,832 \times 10$	ℓ
	U.S.gal	3,785	ℓ
	U.K.gal	4,546	ℓ
Velocidade	ft/s	$3,048 \times 10^{-1}$	m/s
	ft/s	$3,048 \times 10$	cm/s
	mi/h	$4,470 \times 10^{-1}$	m/s
	mi/h	1,609	km/h
Aceleração	ft/s^2	$3,048 \times 10^{-1}$	m/s^2
Massa	lb_m^*	$4,536 \times 10^{-1}$	kg
	slug*	$1,459 \times 10$	kg
	ton	$1,016 \times 10^3$	kg
Força e peso	lb_f^*	4,448	N
	poundal	$1,383 \times 10^{-1}$	N
Pressão e Tensão	psi	$6,895 \times 10^{-3}$	Pa ou N/m^2
	lb_f/ft^2	$4,788 \times 10$	Pa
	poundal/ ft^2	1,488	Pa
	atm	$1,013 \times 10^5$	Pa
	in Hg	$3,386 \times 10^3$	Pa
	mb	$1,000 \times 10^2$	Pa
Trabalho e Energia	ft- lb_f	1,356	J
	ft-poundal	$4,214 \times 10^{-2}$	J
	Btu	$1,055 \times 10^{-3}$	J
	caloria	4,187	J
Massa específica	lb/ft^3	$1,602 \times 10$	kg/m^3
	slug/ ft^3	$5,154 \times 10^2$	kg/m^3
Peso específico	lb_f/ft^3	$1,571 \times 10^2$	N/m^3

Apêndice I

Vazão	ft ³ /s	$2,832 \times 10^{-2}$	m ³ /s
	ft ³ /s	$2,832 \times 10$	ℓ/s
	U.S.gal/min	$6,309 \times 10^{-5}$	m ³ /s
	U.K.gal/min	$7,576 \times 10^{-5}$	m ³ /s
	U.S.gal/min	$6,309 \times 10^{-2}$	ℓ/s
	U.K.gal/min	$7,576 \times 10^{-2}$	ℓ/s
Condutividade Hidráulica (ver também Tabela 2.3)	ft/s	$3,048 \times 10^{-1}$	m/s
	U.S.gal/dia/ft ²	$4,720 \times 10^{-7}$	m/s
Transmissividade	ft ² /s	$9,290 \times 10^{-2}$	m ² /s
	U.S.gal/dia/ft	$1,438 \times 10^{-7}$	m ² /s

* Um corpo cuja massa é 1 lb massa (lb_f) tem um peso de 1 lb força (lb_f). 1 lb_f é a força necessária para acelerar um corpo de 1 lb_m para uma aceleração de $g = 32.2 \text{ ft/s}^2$. Um slug é a unidade de massa que, quando submetido a uma força de 1 lb_f, adquire aceleração de 1 ft/s^2 .

A massa específica (ou simplesmente, densidade absoluta) de um fluido é definida como sua massa por unidade de volume (Tabela A1.1). A densidade de peso (ou peso específico, ou peso unitário) de um fluido é definido como o peso por unidade de volume. Os dois parâmetros estão relacionados por:

$$\gamma = \rho g \quad (\text{A1.1})$$

Para a água, $\rho = 1,0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $\gamma = 9,8 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$. No sistema FPS, $\gamma = 62,4 \frac{\text{lb}_f}{\text{ft}^3}$.

A *densidade relativa* G de qualquer material é a relação entre sua densidade (ou peso específico) e da água. Para a água, $G=1,0$; para a maioria dos solos e rochas, $G \approx 2,65$.

A *viscosidade* de um fluido é a propriedade que permite que os fluidos resistam ao movimento relativo e à deformação por cisalhamento durante o fluxo. Quanto mais viscoso o fluido, maior a tensão de cisalhamento em qualquer gradiente de velocidade. De acordo com a lei da viscosidade de Newton,

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (\text{A1.2})$$

Apêndice I

onde τ é a tensão de cisalhamento, $\frac{dv}{dy}$ é o gradiente de velocidade e μ , a viscosidade ou *viscosidade dinâmica*. A *viscosidade cinemática* é dada por

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (A1.3)$$

onde ρ é a densidade do fluido.

A *compressibilidade* de um fluido reflete suas propriedades tensão-deformação. A *tensão* é a resposta interna de um material a uma pressão externa. Nos fluidos, a tensão é transmitida pela pressão ao qual o fluido está submetido. A *deformação* é a medida da deformação linear ou volumétrica de um material tensionado. Nos fluidos, a deformação toma a forma do volume reduzido (e com densidade aumentada) sob pressões de fluido crescentes. A compressibilidade da água β foi amplamente discutida na Seção 2.9 e é definida pela Eq. (2.44).

A densidade, viscosidade e compressibilidade da água são funções da temperatura e pressão (Dorsey, 1940; Weast, 1972). Em geral, sua variação não é grande, e para a faixa de pressões e temperaturas que ocorrem na maioria das aplicações de águas subterrâneas, é comum considerá-las constantes. A $15,5^\circ C$, $\rho = 1,0 \frac{g}{cm^3}$, $\mu = 1,124 \text{ cP}$, e $\beta = 4,4 \times 10^{-10} \frac{m^2}{N}$.

A *pressão do fluido* p em qualquer corpo imerso em água é a força por unidade de área que atua nesse ponto. Sob condições hidrostáticas, a pressão do fluido em um ponto reflete o peso da coluna d'água sobre a área da seção transversal em torno desse ponto. Assim, é possível expressar a pressão em relação à pressão absoluta mas, geralmente, é expressa em relação à pressão atmosférica. Neste último caso, a pressão é chamada de *pressão relativa*, pois esta é a pressão de leitura que é obtida em medidores zerados para a atmosfera.

A *carga de pressão* ψ em um determinado ponto do fluido é a altura que uma coluna d'água alcançaria em um manômetro instalado nesse ponto. Em um corpo d'água em repouso, ψ é igual à profundidade do ponto de medição abaixo da superfície. Se p é definido como pressão relativa, ψ é definida pela relação

$$p = \rho g \psi = \gamma \psi \quad (A1.4)$$

Em outras palavras, a carga de pressão ψ é uma medida da pressão p do fluido.

As pressões do fluido também são desenvolvidas nas águas subterrâneas que fluem nos solos através dos poros nas formações geológicas. Na Seção 2.2, os elementos da mecânica dos fluidos apresentados neste apêndice são aplicados no desenvolvimento da teoria do escoamento das águas subterrâneas.

Apêndice II Equação para Escoamento Transiente em Meios Saturados Deformáveis

Um desenvolvimento rigoroso da equação para o escoamento transiente em meios porosos saturados deve reconhecer o fato que mudanças transientes de pressão no fluido resultam em deformações da estrutura granular de um meio poroso e essas transformações implicam que o meio, assim como a água, está em movimento. Esta percepção cria a necessidade de dois refinamentos na clássica derivação apresentada por Jacob (1940) e apresentada na Seção 2.11 deste texto. Primeiramente, como reconhecido por Biot (1955), é necessário reescrever a lei de Darcy em termos da velocidade relativa do fluido em relação aos grãos. Em segundo lugar, como reconhecido por Cooper (1966), é necessário considerar a conservação da massa para o meio, bem como para o fluido no volume de controle elementar. Podem ser desenvolvidas relações de continuidade de uma das três seguintes maneiras: (1) pela consideração de um volume de controle deformável em coordenadas deformáveis; (2) pela consideração de um volume elementar deformável em coordenadas fixas; ou (3) pela consideração de um volume elementar fixo em coordenadas fixas. Conforme Gambolati e Freeze (1973), usaremos um volume elementar fixo em coordenadas fixas. A abordagem requer o uso de notação vetorial e derivada material (derivada total, derivada substantiva). Se estes conceitos não são familiares, Aris (1962) e Wills (1958) apresentam tratamentos introdutórios. O desenvolvimento será apresentado aqui para um meio isotrópico, homogêneo, com condutividade hidráulica K , porosidade n , e compressibilidade α . A mesma abordagem é facilmente adaptada para meios heterogêneos e anisotrópicos.

Em notação vetorial, a forma tridimensional da equação lei de Darcy (Eq. (2.34)) é:

$$\vec{v} = -K \nabla h \quad (\text{A2.1})$$

onde $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ é a velocidade relativa do fluido em relação aos grãos e $\nabla h = \delta h / \delta x, \delta h / \delta y, \delta h / \delta z$ é o gradiente hidráulico. Podemos expandir o vetor $\vec{v}$ como:

$$\vec{v} = n(\vec{v}_w - \vec{v}_s) \quad (\text{A2.2})$$

onde $\vec{v}_w$ é a velocidade do fluido e $\vec{v}_s$ é a velocidade do meio deformável.

A equação de estado para a água [Eq. (2.47)] é

Apêndice I

$$\rho = \rho_0 e^{\beta p} \quad (\text{A2.3})$$

e para os grãos de solo, que são incompressíveis, é:

$$\rho_s = \text{constante} \quad (\text{A2.4})$$

A equação da continuidade para a água é

$$-\nabla \cdot [np \vec{v}_w] = \frac{\delta}{\delta t} [np] \quad (\text{A2.5})$$

e para o solo é

$$-\nabla \cdot [(1-n)\rho_s \vec{v}_s] = \frac{\delta}{\delta t} [(1-n)\rho_s] \quad (\text{A2.6})$$

Nestas equações, $\nabla \cdot$ é o operador divergente:

$$\nabla \cdot = \frac{\delta}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta y} + \frac{\delta}{\delta z}$$

Expandindo a Eq. (A2.5), chegamos a

$$-\rho \nabla \cdot (n \vec{v}_w) - n \vec{v}_w \cdot \nabla \rho = n \frac{\delta \rho}{\delta t} + \rho \frac{\delta n}{\delta t} \quad (\text{A2.7})$$

Cancelando ρ_s da Eq. (A2.6) e reescrevendo aquela equação, obtemos uma expressão para $\delta h / \delta t$. Essa pode ser substituída na Eq. (A2.7) juntamente com uma expressão para $n \vec{v}_w$ obtida da Eq. (A2.2). Dividindo tudo por ρ e rearranjando, a Eq. (A2.7) torna-se:

$$-\nabla \cdot \vec{v} - \left(\frac{\vec{v}}{\rho}\right) \cdot \nabla \rho = \left(\frac{\rho}{\rho}\right) \left(\frac{\delta \rho}{\delta t} + \vec{v}_s \cdot \nabla \rho\right) + \nabla \cdot \vec{v}_s \quad (\text{A2.8})$$

Se utilizarmos a derivada material $D/Dt = \delta/\delta t + \vec{v}_s \cdot \nabla$, a Eq. (A2.8) pode ser escrita como:

$$-\nabla \cdot \vec{v} - \left(\frac{\vec{v}}{\rho}\right) \cdot \nabla \rho = \frac{\rho}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \vec{v}_s \quad (\text{A2.9})$$

Apêndice I

O primeiro termo do lado direito da Eq. (A2.9) pode ser relacionado à compressibilidade da água β

$$\frac{D\rho}{Dt} = \rho\beta\frac{Dp}{Dt} \quad (\text{A2.10})$$

A derivada material no lado direito da equação (A2.10) pode ser substituída por uma derivada parcial somente se a desigualdade é satisfeita:

$$\vec{v}_s \cdot \nabla p \ll \frac{\delta p}{\delta t} \quad (\text{A2.11})$$

Assumindo para o lado esquerdo da Eq. (A2.9) que

$$\left(\frac{\vec{v}}{\rho}\right) \cdot \nabla p \ll \nabla \cdot \vec{v} \quad (\text{A2.12})$$

Então, substituindo as Eqs. (A2.1) e (A2.10) na Eq. (A2.9) resulta em

$$\nabla \cdot (K \nabla h) = n\beta \frac{\delta p}{\delta t} + \nabla \cdot \vec{v}_s \quad (\text{A2.13})$$

Em um campo de tensões tridimensional, o vetor de velocidade dos grãos $\vec{v}_s = (v_{sx}, v_{sy}, v_{sz})$ é relacionado ao vetor de deformação (ou deslocamento do solo) $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ por

$$\vec{v}_s = \frac{D\vec{u}}{Dt} \quad (\text{A2.14})$$

Em um campo de tensões unidimensional,

$$v_{sx} = v_{sy} = u_x = u_y = 0 \quad (\text{A2.15})$$

Se as condições da Eq. (A2.15) são satisfeitas, o termo final da Eq. (A2.13) pode ser expandido (Cooper, 1966; Gambolati e Freeze, 1973; Gambolati, 1973a) como

$$\nabla \cdot \vec{v}_s = \frac{\delta v_{sz}}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta z} \left(\frac{Du_z}{Dt} \right) = \frac{D}{Dt} \left(\frac{\delta u_z}{\delta z} \right) = \alpha \frac{Dp}{Dt} \quad (\text{A2.16})$$

Apêndice I

em que α é a compressibilidade vertical do meio poroso. A mudança de derivada em torno da igualdade central é válida para um vetor de posição mas não em geral. A derivada material na expressão da direita na Eq. (A2.16) pode ser substituída pela derivada parcial se a Eq. (A2.11) é satisfeita. Nesse caso, a Eq. (A2.13) resulta em

$$\nabla \cdot (K \nabla h) = n\beta \frac{\delta p}{\delta t} + \alpha \frac{\delta p}{\delta t} \quad (\text{A2.17})$$

Como $p = \rho g(h - z)$ e K é uma constante, a Eq. (A2.17) é simplificada para

$$\nabla^2 h = \frac{\rho g(\alpha + n\beta)}{K} \frac{\delta h}{\delta t} \quad (\text{A2.18})$$

Ou, lembrando que $S_s = \rho g(\alpha + n\beta)$ e expandindo a notação vetorial,

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\delta h}{\delta t} \quad (\text{A2.19})$$

A Equação (A2.19) é idêntica à Eq. (2.75) desenvolvida por Jacob (1940). O desenvolvimento mais rigoroso demonstra que a validade da equação clássica de escoamento é baseada na satisfação das desigualdades das Eqs. (A2.11) e (A2.12) e das condições de tensão da Eq. (A2.15). É improvável que essas condições sejam sempre satisfeitas. Gambolati (1973b) mostra que quando a taxa de consolidação v_s^- supera a taxa de percolação do fluido v_w^- , como pode ocorrer em espessas camadas argilosas de baixa permeabilidade e alta compressibilidade, a desigualdade pode não ser satisfeita. Com respeito à condição de tensão, o termo $\nabla \cdot v_s^-$ no final da Eq. (A2.13) é realmente a saliente ponta do iceberg que relaciona o campo de escoamento tridimensional ao campo tridimensional de tensões. Biot (1941, 1955) apresentou essa relação e Verruijt (1969) proveu uma clara derivação. Schiffman et al. (1969) desenvolveram uma comparação entre o procedimento clássico e de Biot, e Gambolati (1974) analisou a faixa de validade da clássica equação de escoamento.

Apêndice III Exemplo de uma Solução Analítica para um Problema de Valor de Contorno

Considere o problema simples de fluxo de água subterrânea mostrado na Figura 2.25(a). A equação de fluxo saturado em estado estacionário no plano xy é:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{A3.1})$$

A definição matemática das condições de contorno é:

$$\frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad \text{em } y = 0 \text{ e } y = y_L \quad (\text{A3.2})$$

$$h = h_0 \quad \text{em } x = 0 \quad (\text{A3.3})$$

$$h = h_1 \quad \text{em } x = x_L \quad (\text{A3.4})$$

Resolveremos a equação para $h(x,y)$ usando a técnica de separação de variáveis.

Suponha que a solução seja resultado de um produto da seguinte forma:

$$h(x, y) = X(x) \cdot Y(y) \quad (\text{A3.5})$$

A equação (A3.1) então torna-se

$$Y \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + X \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{A3.6})$$

Dividindo por XY obtém-se

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = - \frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} \quad (\text{A3.7})$$

Apêndice I

O lado esquerdo da equação é independente de y . Assim, o lado direito da equação, apesar de sua aparência, deve também ser independente de y , uma vez que é igual identicamente ao lado esquerdo. Similarmente, o lado direito da equação é independente de x , e da mesma forma o lado esquerdo. Se ambos os lados são independentes de x e y , cada lado deve ser igual a uma constante. Dessa forma:

$$\frac{1}{X} \frac{\delta^2 X}{\delta x^2} = G \quad \text{e} \quad \frac{1}{Y} \frac{\delta^2 Y}{\delta y^2} = G \quad (\text{A3.8})$$

A constante G pode ser positiva, negativa ou nula. Todos os três casos resultam em soluções de produtos, mas apenas o caso de $G = 0$ leva a uma solução que possui significado físico para este problema. Deste modo, as equações (A3.8) resultam em:

$$\frac{1}{X} \frac{\delta^2 X}{\delta x^2} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{1}{Y} \frac{\delta^2 Y}{\delta y^2} = 0 \quad (\text{A3.9})$$

Essas são equações diferenciais ordinárias, cujas soluções são conhecidas como:

$$X = Ax + B \quad \text{e} \quad Y = Cy + D \quad (\text{A3.10})$$

A solução produto da Eq. (A3.5) torna-se:

$$h(x, y) = (Ax + B)(Cy + D) \quad (\text{A3.11})$$

Pode-se determinar os coeficientes A , B , C e D recorrendo às condições de contorno. Diferenciando a Eq. (A3.11) em relação a y produz

$$\frac{\delta h}{\delta y} = (Ax + B)C \quad (\text{A3.12})$$

e recorrendo à Eq. (A3.2) implica que $C = 0$. A partir da Eq. (A3.11), resulta em

$$h(x, y) = (Ax + B)D = Ex + F \quad (\text{A3.13})$$

Valendo-se das condições de contorno das Eqs. (A3.3) e (A3.4) produz $F = h_0$ e $E = (h_0 - h_1)/x_L$. Desse modo, a solução é

$$h(x, y) = h_0 - (h_0 - h_1) \frac{x}{x_L} \quad (\text{A3.14})$$

Apêndice I

Essa equação é idêntica à Eq. (2.81), apresentada na Seção 2.11 sem demonstração.

É imediatamente claro que a Eq. (A3.14) satisfaz as condições de contorno das Eqs. (A3.3) e (A3.4). Diferenciando com respeito a y produz 0 , satisfazendo a Eq. (A3.2). Diferenciando duas vezes com relação a x também produz 0 , logo a solução Eq.(A3.14) satisfaz a equação de fluxo [Eq. (A3.1)].

Apêndice IV Equação de Debye-Hückel e Tabela Kielland para Coeficientes de Atividade Iônica

Expressão de Debye-Hückel para atividades iônicas individuais:

$$\log \gamma = \frac{-Az^2\sqrt{I}}{1+aB\sqrt{I}}$$

Valores do Parâmetro de tamanho do íon **a** para íons comumente encontrados em águas naturais

a x 10⁸	Íon
2,5	NH_4^+
3,0	K^+, Cl^-, NO_3^-
3,5	OH^-, HS^-, MnO_4^-, F^-
4,0	$SO_4^{2-}, PO_4^{3-}, HPO_4^{2-}$
4,0-4,5	$Na^+, HCO_3^-, H_2PO_4^-, HSO_3^-$
4,5	CO_3^{2-}, SO_3^{2-}
5	Sr^{2+}, Ba^{2+}, S^{2-}
6	$Ca^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}$
8	Mg^{2+}
9	H^+, Al^{3+}, Fe^{3+}

Parâmetros A e B à pressão de 1 bar

Temperatura (°C)	A	B (x 10 ⁻⁸)
0	0,4883	0,3241

Apêndice I

5	0,4921	0,3249
10	0,4960	0,3258
15	0,5000	0,3262
20	0,5042	0,3273
25	0,5085	0,3281
30	0,5130	0,3290
35	0,5175	0,3297
40	0,5221	0,3305
50	0,5319	0,3321
60	0,5425	0,3338

**Tabela de Kielland para coeficientes de atividade iônica a 25°C.
Organizado pelo tamanho de íons (baseado na Equação de Debye-Hückel).**

Carga	Tamanho ,* a	Íons	I=							
			0,0005	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1
1	2,5	$Rb^+, Cs^+, Ag^+, NH_4^+, Ti^+$	0,975	0,964	0,945	0,924	0,898	0,85	0,8	0,75
	3	$K^+, Cl^-, Br^-, I^-, CN^-, NO_3^-, NO_2^-, OH^-, F^-, ClO_4^-$	0,975	0,964	0,945	0,925	0,899	0,85	0,805	0,755
	4	$Na^+, IO_3^-, HCO_3^-, HSO_3^-, H_2PO_4^-, Cl_2^-, C_2H_3O_2^-$	0,975	0,964	0,947	0,928	0,902	0,86	0,82	0,775
	6	$Li^+, C_6H_5COO^-$	0,975	0,965	0,948	0,929	0,907	0,87	0,835	0,8
	9	H^+	0,975	0,967	0,95	0,933	0,914	0,88	0,86	0,83
2	4,5	$Pb^{2+}, Hg^{2+}, SO_4^{2-}, CrO_4^{2-}, CO_3^{2-}, SO_3^{2-}, C_2O_4^{2-}, S_2O_3^{2-}, C_2O_4^{2-}, H_{citrato}^{2-}$	0,903	0,867	0,805	0,742	0,665	0,55	0,455	0,37
	5	$Sr^{2+}, Ba^{2+}, Cd^{2+}, Hg^{2+}, S^{2+}, WO_4^{2-}$	0,903	0,868	0,805	0,744	0,67	0,555	0,465	0,38
	6	$Ca^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Sn^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{2+}, Ni^{2+}, CO^{2+}, fitalato^{2-}$	0,905	0,87	0,809	0,749	0,675	0,57	0,485	0,405

Apêndice I

	8	Mg^{2+}, Be^{2+}	0,906	0,872	0,813	0,755	0,69	0,595	0,52	0,45
3	4	$PO_4^{3-}, Fe(CN)_6^{3-}, Cr(NH_3)_6^{3+}$	0,769	0,725	0,612	0,505	0,395	0,25	0,16	0,095
	9	$Al^{3+}, Fe^{3+}, Cr^{3+}, Sc^{3+}, In^{3+},$ <i>e terras raras</i>	0,802	0,738	0,632	0,54	0,445	0,325	0,245	0,18

*Note que esses tamanhos são valores arredondados para o tamanho efetivo em solução aquosa e não são o tamanho de íons simples, desidratado. Para uma discussão mais detalhada, veja o artigo original, do qual esses valores foram retirados [J.Kielland, J.Amer. Chem.Soc., 59, 1675 (1937)].

Apêndice V - Função Erro Complementar (erfc)

$$\operatorname{erf}(\beta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\beta} e^{-e^2} d\epsilon$$

$$\operatorname{erf}(-\beta) = -\operatorname{erf} \beta$$

$$\operatorname{erfc}(-\beta) = 1 - \operatorname{erf}(\beta)$$

β	$\operatorname{erf}(\beta)$	$\operatorname{erfc}(\beta)$
0	0	1,0
0,05	0,056372	0,943628
0,1	0,112463	0,887537
0,15	0,167996	0,832004
0,2	0,222703	0,777297
0,25	0,276326	0,723674
0,3	0,328627	0,671373
0,35	0,379382	0,620618
0,4	0,428392	0,571608
0,45	0,475482	0,524518
0,5	0,520500	0,479500
0,55	0,563323	0,436677
0,6	0,603856	0,396144
0,65	0,642029	0,357971
0,7	0,677801	0,322199
0,75	0,711156	0,288844
0,8	0,742101	0,257899
0,85	0,770668	0,229332
0,9	0,796908	0,203092
0,95	0,820891	0,179109
1,0	0,842701	0,157299
1,1	0,880205	0,119795
1,2	0,910314	0,089686
1,3	0,934008	0,065992
1,4	0,952285	0,047715
1,5	0,966105	0,033895

Apêndice I

1,6	0,976348	0,023652
1,7	0,983790	0,016210
1,8	0,989091	0,010909
1,9	0,992790	0,007210
2	0,995322	0,004678
2,1	0,997021	0,002979
2,2	0,998137	0,001863
2,3	0,998857	0,001143
2,4	0,999311	0,000689
2,5	0,999593	0,000407
2,6	0,999764	0,000236
2,7	0,999866	0,000134
2,8	0,999925	0,000075
2,9	0,999959	0,000041
3	0,999978	0,000022

Apêndice VI Desenvolvimento de Equação de Diferenças Finitas para Escoamento Estacionário em Meio Homogêneo Isotrópico

A equação diferencial parcial que descreve o escoamento estacionário em duas dimensões, em meio homogêneo e isotrópico (Seção 2.11) é a equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{A6.1})$$

Para encontrar a equação de diferenças finitas para um nó interior da malha de nós usada para discretizar a região de escoamento, devemos substituir as derivadas parciais de segunda ordem da Eq. (A6.1) por quocientes de diferenças. Vamos considerar o primeiro termo da equação. Lembre-se que a definição de derivada parcial com respeito a x de uma função de duas variáveis $h(x, z)$, é:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{h(x + \Delta x, z) - h(x, z)}{\Delta x} \quad (\text{A6.2})$$

Em um computador, é impossível obter o limite quando $\Delta x \rightarrow 0$, mas é possível aproximar o limite atribuído, arbitrariamente, um pequeno valor para Δx . De fato, podemos fazer isso discretizando uma rede nodal com o espaçamento da malha Δx .

Para qualquer valor de z , por exemplo z_0 , podemos expandir $h(x, z_0)$ em uma Série de Taylor em torno do ponto (x_0, z_0) , como:

$$h(x, z_0) = h(x_0, z_0) + (x - x_0) \frac{\partial h}{\partial x}(x_0, z_0) + \frac{(x - x_0)^2}{2} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}(x_0, z_0) + \dots \quad (\text{A6.3})$$

Se definirmos $x = x_0 + \Delta x$ (isto é conhecido como diferença progressiva), e desprezarmos os termos de ordem maior que a unidade, podemos aproximar $\partial h / \partial x$ por:

$$\frac{\partial h}{\partial x}(x_0, z_0) = \frac{h(x_0 + \Delta x, z_0) - h(x_0, z_0)}{\Delta x} \quad (\text{A6.4})$$

Os termos desprezados da expansão de Taylor representam um erro de truncamento na aproximação por diferenças finitas.

Apêndice I

Podemos obter uma expressão similar a (A6.4) substituindo uma diferença regressiva, $x = x_0 - \Delta x$, na equação (A6.3). Isto produz:

$$\frac{\delta h}{\delta x}(x_0, z_0) = \frac{h(x_0, z_0) - h(x_0 - \Delta x, z_0)}{\Delta x} \quad (\text{A6.5})$$

Para obter uma aproximação para $\delta^2 h / \delta x^2$, escrevemos a equação diferencial em termos de $\delta h / \delta x$, utilizando uma expressão de diferença progressiva.

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2}(x_0, z_0) = \frac{\frac{\delta h}{\delta x}(x_0 + \Delta x, z_0) - \frac{\delta h}{\delta x}(x_0, z_0)}{\Delta x} \quad (\text{A6.6})$$

e substituímos a expressão de diferença regressiva Eq. (A6.5) na Eq. (A6.6) para obter

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2}(x_0, z_0) = \frac{h(x_0 + \Delta x, z_0) - 2h(x_0, z_0) + h(x_0 - \Delta x, z_0)}{(\Delta x)^2} \quad (\text{A6.7})$$

De maneira similar, podemos desenvolver uma equação diferencial para $\delta^2 h / \delta x^2$

$$\frac{\delta^2 h}{\delta z^2}(x_0, z_0) = \frac{h(x_0, z_0 + \Delta z) - 2h(x_0, z_0) + h(x_0, z_0 - \Delta z)}{(\Delta z)^2} \quad (\text{A6.8})$$

Para uma malha quadrada, $\Delta x = \Delta z$, somando as Eqs. (A6.7) e (A6.8), a equação de Laplace, resulta

$$\frac{1}{(\Delta x)^2} [h(x_0 + \Delta x, z_0) + h(x_0 - \Delta x, z_0) + h(x_0, z_0 + \Delta z) + h(x_0, z_0 - \Delta z) + 4h(x_0, z_0)] = 0 \quad (\text{A6.9})$$

Se deixarmos (x_0, z_0) ser o ponto nodal (i, j) , a Eq. (A6.9) pode ser rearranjada para resultar:

$$h_{ij} = \frac{1}{4}(h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}) \quad (\text{A6.10})$$

que é idêntica à Eq. (5.24).

Apêndice VII Solução Analítica de Toth para o Escoamento Subterrâneo Regional

Toth (1962, 1963) apresentou duas soluções analíticas para o problema de valor de contorno para escoamento permanente vertical, bidimensional, saturado, homogêneo, isotrópico, limitado no topo pela superfície freática e nos outros três lados por fronteiras impermeáveis (área hachurada da figura 6.1, reproduzida em um sistema de coordenadas xz na figura A7.1)

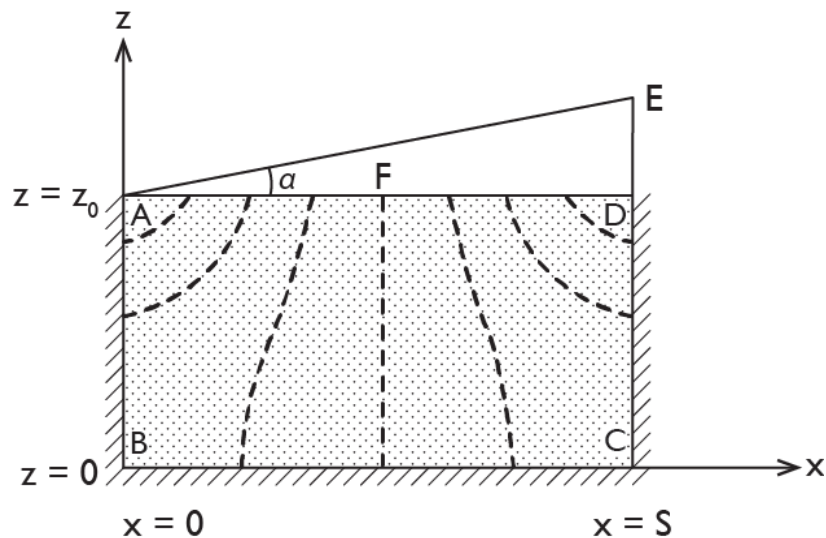


Figura A7.1 – Região de escoamento para a solução analítica de Toth.

Primeiro ele considerou o caso em que a superfície freática é uma linha reta de declividade constante. Nesse caso, a região de escoamento na figura A7.1 é a região $ABCEA$. Como não é possível obter uma solução analítica em um domínio trapezoidal, Toth aproximou o campo real de escoamento pela região sombreada $ABCD$. Ele projetou os valores de carga hidráulica da superfície real do lençol freático AE sobre a fronteira superior AD da região de solução. A aproximação é satisfatória para α pequeno.

A equação de fluxo é a equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (A7.1)$$

Apêndice I

Para a região limitada por $x = s$ e $z = z_0$, as condições de contorno são:

$$\begin{aligned}\frac{\delta h}{\delta x}(0, z) = \frac{\delta h}{\delta x}(s, z) = 0 & \quad \text{em } AB \text{ e } CD \\ \frac{\delta h}{\delta x}(x, 0) = 0 & \quad \text{em } BC\end{aligned}\tag{A7.2}$$

$$h(x, z_0) = z_0 + cx \quad \text{em } AD$$

em que $c = \tan \alpha$.

A solução analítica, obtida por separação de variáveis, é:

$$h(x, z) = z_0 + \frac{cs}{2} - \frac{4cs}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\cos [(2m+1)\pi x/s] \cosh [(2m+1)\pi z/s]}{(2m+1)^2 \cosh [(2m+1)\pi z_0/s]}\tag{A7.3}$$

Esta equação satisfaz a equação de fluxo (A7.1) e as condições de contorno (A7.2). Quando plotada, leva à rede equipotencial mostrada na figura A7.1. O escoamento ocorre da fronteira de recarga DF através do domínio até a fronteira de descarga AF .

Toth também considerou o caso em que a superfície freática é representada como uma curva senoidal sobreposta à linha AE (para representar uma topografia ondulada). A condição de contorno torna-se, então:

$$h(x, z_0) = z_0 + cx + a \sin bx \quad \text{em } AD\tag{A7.4}$$

em que $c = \tan \alpha$, $a = a'/\cos \alpha$, $b = b'/\cos \alpha$, a' representa a amplitude da curva senóide e b' , sua frequência.

A solução analítica para este caso assume a forma:

$$\begin{aligned}h(x, z) = z_0 + \frac{cs}{2} + \frac{a}{sb}(1 - \cos bs) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{ab(1 - \cos bs \cos m\pi)}{b^2 - \frac{m^2\pi^2}{s^2}} + \frac{cs^2}{m^2\pi^2}(\cos m\pi - 1) \right] \\ \times \frac{\cos (m\pi x/s) \cosh (m\pi z/s)}{s \cosh (m\pi z_0/s)}\end{aligned}\tag{A7.5}$$

Apêndice I

A rede equipotencial descrita por essa função é similar à figura 6.2(b).

Apêndice VIII Solução Numérica do Problema de Valor de Contorno Representando Infiltração Unidimensional em um Sistema de Escoamento de Águas Subterrâneas com Recarga

Considere um escoamento unidimensional, vertical e homogêneo com o seu limite superior na superfície do solo e o seu limite inferior abaixo da superfície freática. Como descrito na Seção 6.4, a equação do escoamento para esse sistema é:

$$\frac{\partial}{\partial z} [K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right)] = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (\text{A8.1})$$

e as condições de contorno são:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{R}{K(\psi)} - 1 \quad (\text{A8.2})$$

no topo, e

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{Q}{K_0} - 1 \quad (\text{A8.3})$$

na base.

A solução é obtida em função da carga de pressão, $\psi(z, t)$. A posição da superfície freática em qualquer instante de tempo é dada pelo valor de z , no qual $\psi = 0$. As informações necessárias incluem as condições iniciais $\psi(z, 0)$, a taxa de precipitação R , a taxa de recarga de água subterrânea Q , e as curvas características não saturadas $K(\psi)$ e $C(\psi)$. Para $\psi \geq \psi_a$, $K = K_0$ e $C = 0$, sendo ψ_a , a carga de pressão de entrada de ar.

O esquema numérico de diferenças finitas usado por Rubin e Steinhardt (1963), Liakopoulos (1965b) e Freeze (1969b) é o esquema implícito de Richtmyer (1957). Nesse método, o plano (z, t) é representado por uma malha retangular de pontos $j = 1, 2, \dots, L$ ao longo do eixo z , e $n = 1, 2, \dots$, ao longo do eixo t . A distância entre os nós verticais é Δz , e entre os intervalos de tempo, Δt . A solução em qualquer ponto (j, n) da malha é

Apêndice I

ψ_j^n . Sob essa notação, o esquema de diferenças finitas para a Eq. (A8.1) para um nó interior ($j = 2$ até $j = L-1$), depois dos rearranjos pertinentes, é:

$$C(\psi_{III}) \left(\frac{\psi_j^n - \psi_j^{n-1}}{\Delta_t} \right) = \frac{1}{\Delta_z} \{ [K(\psi_I)(1 + \frac{1}{2\Delta_z} [\psi_{j+1}^{n-1} + \psi_{j+1}^n - \psi_j^{n-1} - \psi_j^n]) - [K(\psi_{II})(1 + \frac{1}{2\Delta_z} [\psi_j^{n-1} + \psi_j^n - \psi_{j-1}^{n-1} - \psi_{j-1}^n])]] \} \quad (A8.4)$$

em que os valores de ψ_I , ψ_{II} , e ψ_{III} , que determinam os valores de K e de C que serão aplicados em um nó em um determinado instante de tempo, são determinados por extrapolação de instantes anteriores, como descrito por Rubin e Steinhardt (1963). Equações de diferenças finitas que incorporam as condições de contorno (A8.2) e (A8.3) podem ser escritas para os nós nas fronteiras superior e inferior ($j = 1, j = L$).

Para cada intervalo de tempo, as aproximações por diferenças finitas constituem um sistema de L equações algébricas lineares, com L incógnitas. A fórmula geral é:

$$-A_j \psi_{j+1}^n + B_j \psi_j^n - C_j \psi_{j-1}^n = D_j \quad (A8.5)$$

em que os coeficientes A , B , C e D variam com o nó ($j = 1, j = 2$ até $L-1, j = L$), com o instante de tempo ($n = 1, n = 2, n > 2$), e com a saturação ($\psi \geq \psi_a, \psi < \psi_a$). As variáveis, das quais A , B , C e D dependem, são os valores de ψ do instante de tempo anterior, os valores de contorno R e Q , e as relações funcionais $K(\psi)$ e $C(\psi)$.

Os valores de ψ_j^n são calculados pela seguinte relação recorrente:

$$\psi_j^n = E_j \psi_{j+1}^n + F_j \quad (A8.6)$$

em que

$$E_j = \frac{A_j}{B_j - C_j E_{j-1}}$$

$$F_j = \frac{D_j + C_j F_{j-1}}{B_j - C_j E_{j-1}}$$

Os coeficientes E e F são calculados de $j = 1$ até $j = L$, e os ψ 's são calculados forma reversa, de $j = L$ até $j = 1$, usando a Eq. (A8.6). Para $j = 1$, $E_1 = A_1/B_1$ e $F_1 = D_1/B_1$. Se o nó superior ($j = L$) está saturado, surgem complicações.

Apêndice I

Se $K(\psi)$ e $C(\psi)$ apresentam histerese, essas relações são implementadas no programa computacional na forma de tabelas de valores, representando as curvas de umedecimento e de drenagem. O programa deve localizar a curva correta, considerando se o nó analisado está umedecendo ou secando, e verificar a evolução do nó para determinar o valor de ψ para o qual ocorreu uma mudança de umedecimento para drenagem, ou vice versa.

Apêndice IX Desenvolvimento da Equação de Diferenças Finitas para o Escoamento Transiente em um Aquífero Heterogêneo, Anisotrópico, Horizontal e Confinado

A equação diferencial parcial que descreve o escoamento transiente através de um meio anisotrópico saturado (Seção 2.11) é:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{A9.1})$$

Para um aquífero horizontal, confinado de espessura, b , a forma bidimensional da equação (A9.1) se reduz para:

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y \frac{\partial h}{\partial y}) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{A9.2})$$

em que T_x e T_y são os componentes principais do tensor de transmissividade definido por $T = Kb$, e S é o armazenamento definido por $S = S_s b$. Para encontrar a equação de diferenças finitas para um nó no interior da malha usada para discretizar a região de escoamento, devemos substituir as derivadas parciais da Eq. (A9.2) por diferenças. Usando as definições desenvolvidas no Apêndice VI, a notação ijk da seção 8.8 e a figura 8.26(c), podemos escrever a expressão de diferenças finitas:

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial h}{\partial x}) \approx \frac{1}{\Delta x} [(T_x \frac{\partial h}{\partial x})_{i+1/2,j}^k - (T_x \frac{\partial h}{\partial x})_{i-1/2,j}^k] \quad (\text{A9.3})$$

em que o subscrito $(i + 1/2, j)$ significa que a quantidade entre parênteses é avaliada no ponto médio entre os nós (i, j) e $(i+1, j)$, e o sobrescrito k significa que a quantidade entre parênteses é avaliada no instante de tempo k . Os termos do lado direito Eq. (A9.3) podem ser aproximados por:

$$(T_x \frac{\partial h}{\partial x})_{i+1/2,j}^k = (T_x)_{i+1/2,j} (h_{i+1,j}^k - h_{i,j}^k) \frac{1}{\Delta x} \quad (\text{A9.4a})$$

Apêndice I

$$(T_x \frac{\delta h}{\delta x})_{i-1/2,j}^k = (T_x)_{i-1/2,j} (h_{i,j}^k - h_{i-1,j}^k) \frac{1}{\Delta x} \quad (\text{A9.4b})$$

Se definirmos $(T_x)_{i+1/2,j}$ e $(T_x)_{i-1/2,j}$ como médias simples na forma

$$(T_x)_{i+1/2,j} \simeq \frac{(T_x)_{i+1,j} + (T_x)_{i,j}}{2} \quad (\text{A9.5})$$

essas expressões podem ser substituídas nas Eqs. (A9.4), e as Eqs. (A9.4) podem subsequentemente ser substituídas na Eq. (A9.3) para obter:

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta x} (T_x \frac{\delta h}{\delta x}) &\simeq \frac{1}{2\Delta_x^2} \{ [(T_x)_{i+1,j} + (T_x)_{i,j}] h_{i+1,j}^k \\ &- [(T_x)_{i+1,j} + 2(T_x)_{i,j} + (T_x)_{i-1,j}] h_{i,j}^k + [(T_x)_{i,j} + (T_x)_{i-1,j}] h_{i-1,j}^k \} \end{aligned} \quad (\text{A9.6})$$

Similarmente:

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta y} (T_y \frac{\delta h}{\delta y}) &\simeq \frac{1}{2\Delta_y^2} \{ [(T_y)_{i,j+1} + (T_y)_{i,j}] h_{i,j+1}^k \\ &- [(T_y)_{i,j+1} + 2(T_y)_{i,j} + (T_y)_{i,j-1}] h_{i,j}^k + [(T_y)_{i,j} + (T_y)_{i,j-1}] h_{i,j-1}^k \} \end{aligned} \quad (\text{A9.7})$$

Finalmente, podemos aproximar o lado direito da equação (A9.2) por:

$$S \frac{\delta h}{\delta t} \simeq S_{ij} \frac{h_{i,j}^k - h_{i,j}^{k-1}}{\Delta_t} \quad (\text{A9.8})$$

Substituindo as Eqs. (A9.6), (A9.7) e (A9.8) para os três termos da Eq. (A9.2) e agrupando os termos, obtemos a equação geral de diferenças finitas para um nó interno em um aquífero heterogêneo e anisotrópico:

$$Ah_{i,j}^k = B_{i,j-1}^k + Ch_{i+1,j}^k + Dh_{i,j+1}^k + Eh_{i-1,j}^k + F \quad (\text{A9.9})$$

em que

$$A = \frac{1}{2\Delta_x^2} [(T_x)_{i+1,j} + 2(T_x)_{i,j} + (T_x)_{i-1,j}] + \frac{1}{2\Delta_y^2} [(T_y)_{i,j+1} + 2(T_y)_{i,j} + (T_y)_{i,j-1}] + \frac{S_{ij}}{\Delta_t}$$

$$B = \frac{1}{2\Delta_y^2} [(T_y)_{i,j} + (T_y)_{i,j-1}]$$

Apêndice I

$$C = \frac{1}{2\Delta_x^2} [(T_x)_{i+1,j} + (T_x)_{i,j}]$$

$$D = \frac{1}{2\Delta_y^2} [(T_y)_{i,j+1} + (T_y)_{i,j}]$$

$$E = \frac{1}{2\Delta_x^2} [(T_x)_{i,j} + (T_x)_{i-1,j}]$$

$$F = \frac{S_{ij}}{\Delta_t} \cdot h_{ij}^{k-1}$$

Se o aquífero é homogêneo e isotrópico, $T_x = T_y = T$ para todo (i, j) e $S_{ij} = S$ para todo (i, j) . Sob essas condições, e para uma malha quadrada com $\Delta_x = \Delta_y$, os coeficientes da Eq. (A9.9) tornam-se:

$$A = \frac{4T}{\Delta_x^2} + \frac{S_{ij}}{\Delta_t}$$

$$B = C = D = E = \frac{T}{\Delta_x^2}$$

$$F = \frac{S}{\Delta_t} \cdot h_{ij}^{k-1}$$

Se dividirmos por $\frac{T}{\Delta_x^2}$, percebe-se que esses coeficientes são os mesmos que aqueles desenvolvidos de uma maneira menos rigorosa na seção 8.8 e apresentados em conexão com a Eq. (8.57).

Trescott et al. (1976) sugeriram que existem algumas vantagens em utilizar a média harmônica ao invés da média aritmética na Eq. (A9.5). Essa abordagem muda os coeficientes na equação de diferenças finitas, mas não altera os conceitos contidos no desenvolvimento.

A equação (A9.9) é escrita em termos dos valores de carga hidráulica em cinco nós no instante de tempo k , e um nó no instante de tempo $k-1$. Essa forma é conhecida como aproximação por diferenças regressivas (ou atrasada). Remson et al. (1971) notam que existem algumas vantagens computacionais em usar a aproximação por diferença central, conhecida como esquema *Crank-Nicholson*, que utiliza valores de carga hidráulica em cinco nós no instante de tempo k e cinco nós no instante de tempo $k-1$. O procedimento implícito de direções alternadas (ADIP) utilizado por Pinder e Bredehoeft (1968) envolve duas equações de diferenças finitas, uma no plano xt e outra no plano yt . Cada uma utiliza valores de carga em três nós no instante de tempo k , e três nós no instante de tempo $k-1$.

Apêndice X Derivação da Equação de Advecção-Dispersão para Transporte de Solutos em Meio Poroso

A equação derivada aqui é uma representação da lei de conservação de massa. A derivação se baseia em Ogata (1970) e Bear (1972). Ela assume que o meio poroso é homogêneo e isotrópico, encontra-se saturado, o fluxo da água em estado estacionário e a lei de Darcy é válida. Sob essa hipótese, o fluxo é descrito pela velocidade linear média, a qual transporta a substância dissolvida por advecção. Se esse fosse o único mecanismo de transporte atuante, os solutos não-reativos transportados pelo fluido se moveriam como um plugue. Na realidade, há um processo de mistura adicional, a dispersão hidrodinâmica (Seção 2.13), que é causada pelas variações na velocidade microscópica dentro de cada canal de poro e de um canal para o outro. Se desejarmos descrever o processo de transporte em uma escala macroscópica, usando parâmetros macroscópicos e levando em consideração o efeito de mistura microscópica, é necessário introduzir um segundo mecanismo de transporte, em adição à advecção, para considerar a dispersão hidrodinâmica.

Para estabelecer uma demonstração matemática da equação de conservação de massa, o fluxo do soluto entrando e saindo de um volume elementar representativo do meio poroso será considerado (Figura A10.1). Em coordenadas cartesianas a descarga específica v possui componentes (v_x, v_y, v_z) e a velocidade linear média $\bar{v} = v/n$ possui componentes $(\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z)$. A taxa de transporte advectivo é igual a $\bar{v}$. A concentração de um soluto C é definido como a massa de soluto por unidade de volume da solução. A massa de soluto por unidade de volume do meio poroso é, por consequência, nC . Para um meio homogêneo, a porosidade n é uma constante e $\delta(nC)/\delta x = n\delta C/\delta x$.

Apêndice I

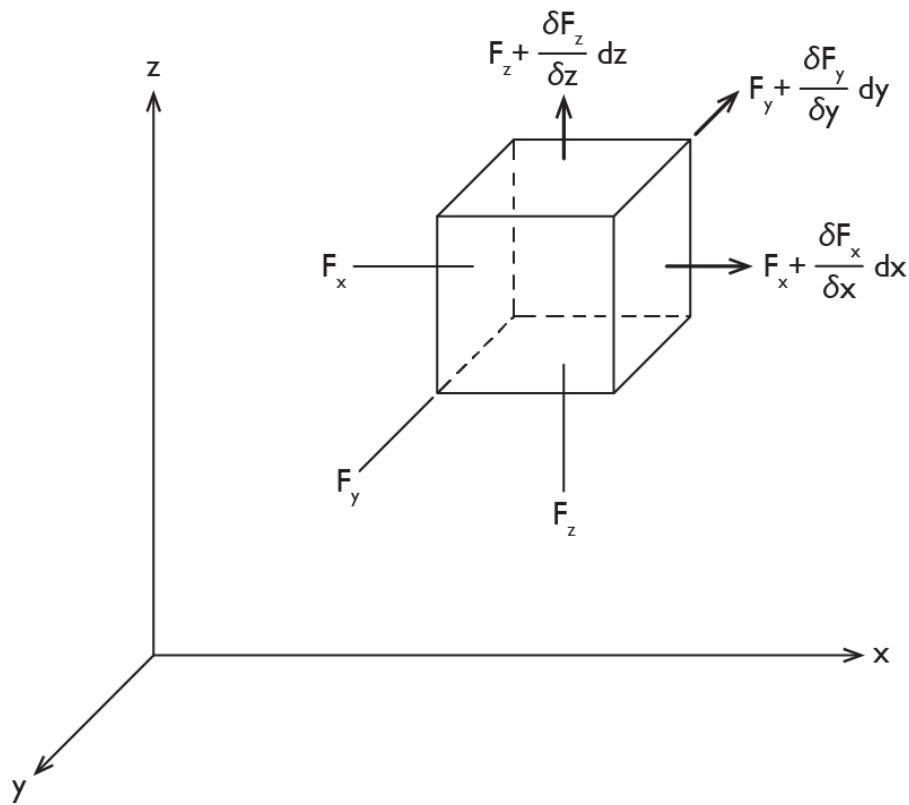


FIGURA A10.1 - Balanço de massa em um elemento cúbico no espaço.

A massa do soluto transportado na direção x pelos dois mecanismos de transporte do soluto pode ser representada como

$$\text{transporte por advecção} = \bar{v}_x n C \, dA \quad (\text{A10.1})$$

$$\text{transporte por dispersão} = n D_x \frac{\delta C}{\delta x} \, dA \quad (\text{A10.2})$$

onde D_x é o coeficiente de dispersão na direção x e dA é a área da seção elementar do elemento cúbico. O coeficiente de dispersão D_x está relacionado à dispersividade α_x e ao coeficiente de difusão D^* pela Eq. (9.4):

$$D_x = \alpha_x \bar{v}_x + D^* \quad (\text{A10.3})$$

A forma da componente de dispersão incorporada na Eq. (A10.2) é análoga à primeira Lei de Fick.

Apêndice I

Se F_x representa a massa total do soluto por unidade de área transportada na direção x por unidade de tempo, então:

$$F_x = \bar{v}_x n C - n D_x \frac{\delta C}{\delta x} \quad (\text{A10.4})$$

O sinal negativo antes do termo dispersivo indica que o contaminante se move para a zona de menor concentração. Da mesma forma, expressões nas outras duas direções são escritas

$$F_y = \bar{v}_y n C - n D_y \frac{\delta C}{\delta y} \quad (\text{A10.5})$$

$$F_z = \bar{v}_z n C - n D_z \frac{\delta C}{\delta z} \quad (\text{A10.6})$$

A quantidade total de soluto entrando no elemento cúbico (figura A10.1) é

$$F_x dz dy + F_y dz dx + F_z dx dy$$

A quantidade total saindo do elemento cúbico é

$$(F_x + \frac{\delta F_x}{\delta x} dx) dz dy + (F_y + \frac{\delta F_y}{\delta y} dy) dz dx + (F_z + \frac{\delta F_z}{\delta z} dz) dx dy$$

onde os termos parciais indicam a variação espacial da massa de soluto em uma direção específica. A diferença na quantidade que entra e que sai do elemento é, portanto,

$$(\frac{\delta F_x}{\delta x} + \frac{\delta F_y}{\delta y} + \frac{\delta F_z}{\delta z}) dx dy dz$$

Porque a substância dissolvida é assumida como não-reativa, a diferença entre o fluxo que entra e que sai é igual à quantidade da substância acumulada no próprio elemento. A taxa de variação de massa no elemento é

$$- n \frac{\delta C}{\delta t} dx dy dz$$

A equação de conservação de massa completa, portanto, torna-se

$$\frac{\delta F_x}{\delta x} + \frac{\delta F_y}{\delta y} + \frac{\delta F_z}{\delta z} = n \frac{\delta C}{\delta t} \quad (\text{A10.7})$$

Apêndice I

Substituindo-se as expressões (A10.4), (A10.5) e (A10.6) na Eq. (A10.7) e cancelando n de ambos lados da equação tem-se que :

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\vec{v}_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (\vec{v}_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (\vec{v}_z C) \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{A10.8})$$

Em meios homogêneos em que a velocidade ($\vec{v}$) é estável e uniforme (p.e., se essa não varia no tempo ou espaço), os coeficientes de dispersão D_x , D_y e D_z não variam através do espaço e a Eq. (A10.8) torna-se

$$\left[D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] - \left[\bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial C}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial C}{\partial z} \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{A10.9})$$

Em uma dimensão

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{A10.10})$$

Em algumas aplicações, a direção unidimensional é tomada como uma coordenada curvilínea na direção do fluxo ao longo da linha de fluxo. A equação de transporte torna-se, então,

$$D_l \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - \bar{v}_l \frac{\partial C}{\partial l} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{A10.11})$$

onde l é a direção ao longo da linha de fluxo, D_l o coeficiente de dispersão longitudinal e $\bar{v}_l$ a velocidade linear média ao longo da linha de fluxo.

Para um problema bidimensional, é possível definir duas direções de coordenadas curvilíneas, S_l e S_t , onde S_l é direcionada ao longo da linha de fluxo e S_t é ortogonal a esta. A equação de transporte resulta em

$$D_l \frac{\partial^2 C}{\partial S_l^2} + D_t \frac{\partial^2 C}{\partial S_t^2} - \bar{v}_l \frac{\partial C}{\partial S_l} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{A10.12})$$

Apêndice I

onde D_l e D_t são os coeficientes de dispersão longitudinal e transversal, respectivamente.

Se v_l varia ao longo de uma linha de corrente e D_l e D_t variam no espaço, a equação (A10.12) resulta em

$$\frac{\partial}{\partial S_l}(D_l \frac{\partial C}{\partial S_l}) + \frac{\partial}{\partial S_t}(D_t \frac{\partial C}{\partial S_t}) - \frac{\partial}{\partial S_l}(\bar{v}_l C) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{A10.13})$$

As equações (A10.8) a (A10.13) representam seis formas da equação de advecção-dispersão para o transporte de solutos em meios porosos saturados. A equação (A10.11) é idêntica à Eq. (9.3) na Seção 9.2. A solução de qualquer uma dessas equações fornece a concentração do soluto C em função do espaço e tempo. Ela tomará a forma $C(x, y, z, t)$ para as Eqs. (A10.8) e (A10.9); $C(l, t)$ para a Eq. (A10.11) e $C(S_l, S_t, t)$ para as Eqs. (A10.12) e (A10.13). Existem várias soluções analíticas conhecidas para as formas mais simples da equação de transporte. A Eq. (9.5) da Seção 9.2 é uma solução analítica da Eq. (A10.11), e a Eq. (9.6) é uma solução analítica da Eq. (A10.9). Em muitas situações de campo, análises bi- ou tridimensionais são necessárias. Adicionalmente, as velocidades são raramente uniformes e as dispersões são geralmente variáveis no espaço. Para essas condições, métodos numéricos adaptados para computadores devem ser usados para obter tais soluções.

O coeficiente de dispersão em meio tridimensional em meios porosos, isotrópicos, homogêneos como expresso na Eq. (A10.12) é um tensor simétrico de segunda ordem com nove componentes. D_l e D_t são os termos diagonais da forma bidimensional. As propriedades direcionais do coeficiente de dispersão são causadas pela natureza do processo de dispersão nas direções transversal e longitudinal. Se o meio é anisotrópico, a descrição matemática do processo de dispersão aumenta de complexidade. Não existem soluções numéricas ou analíticas disponíveis para sistemas anisotrópicos. Apenas para meios isotrópicos, o coeficiente de dispersão foi representado com sucesso por métodos experimentais.

É possível estender a equação de transporte para incluir os efeitos de retardação do transporte do soluto por adsorção, reação química, transformação biológica ou decaimento radioativo. Neste caso, o balanço de massa no volume elementar deve incluir um termo “sumidouro”. Para a retardação devido a adsorção, a equação de transporte em um meio homogêneo em um sistema unidimensional ao longo da direção de fluxo toma a forma

Apêndice I

$$D_l \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - \bar{v}_l \frac{\partial C}{\partial l} + \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{A10.14})$$

em que ρ_b é a massa específica (densidade absoluta) do meio poroso, n a porosidade e S a massa do constituinte químico adsorvido a uma unidade de massa da parte sólida do meio poroso. O primeiro termo da Eq. (A10.14) é o termo de dispersão, o segundo é o termo de advecção e o terceiro é o termo de reação. Este termo de reação é tratado na Seção 9.2, em conexão com as Eqs. (9.9) a (9.13). Soluções analíticas para a Eq. (A10.14) são apresentadas por Codell e Schreiber (in press). A Figura 9.12 apresenta exemplos de soluções realizadas por Pickens e Lennox (1976) usando métodos numéricos.



Referências Bibliográficas

- ADAMS, R. S., JR. 1973. Factors influencing soil adsorption and bioactivity of pesticides. *J. Residue Rev.*, 47, pp. 1–54.
- ALBERTSON, M. L., and D. B. SIMONS. 1964. Fluid mechanics. Handbook of Applied Hydrology, ed. V. T. Chow. McGraw-Hill, New York, pp. 7.1–7.49.
- ALLEN, J. R. C. 1970. Physical Processes of Sedimentation. George Allen & Unwin, London, 248 pp.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. 1972. The migration of petroleum products in soil and ground water. Amer. Petrol. Inst. Publ. 4149, Washington, D.C.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. 1967. Permeability and Capillarity of Soils. ASTM, Philadelphia, 210 pp.
- AMYX, J. W., D. M. BASS, JR., and R. L. WHITING. 1960. Petroleum Reservoir Engineering Physical Properties. McGraw-Hill, New York.
- ANDERSON, D. M., and N. R. MORGENSTERN. 1973. Physics, chemistry and mechanics of frozen ground. Permafrost, 2nd Intern. Conf. U.S. Nat. Acad. Sci.—U.S. Nat. Res. Council, Washington, D.C., pp. 257–288.
- APGAR, M. A., and W. B. SATHERTHWAITE, JR. 1975. Ground water contamination associated with the Llangollen landfill, New Castle County, Delaware. Proc. Res. Symp., Gas and Leachate from Landfills, New Brunswick, N.J. U.S. Environmental Protection Agency, National Environmental Research Center, Cincinnati, Ohio.
- ARGERSINGER, W. J., A. W. DAVIDSON, and O. D. BONNER. 1950. Thermodynamics of ion exchange phenomena. Kansas Acad. Sci. Trans., 53, pp. 404–410.
- ARIS, R. 1962. Vectors, Tensors and the Basic Equations of Fluid Mechanics. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- ATLANTIC-RICHFIELD HANFORD COMPANY. 1976. Preliminary Feasibility Study of Storage of Radioactive Wastes in Columbia River Basalts. Rept. ARH-ST-137, Vol. 1, 168 pp.
- ATWATER, G. I. 1966. The effect of decrease in porosity with depth on oil and gas reserves in sandstone reservoirs. Unpublished paper presented to School of Earth Sciences, Stanford University, Stanford, Calif., Jan. 10.
- AYERS, R. S., and R. C. BRANSON, eds. 1973. Nitrates in the upper Santa Anna River Basin in relation to ground water pollution. Calif. Agr. Exp. Sta. Bull. 861, p. 60.
- BABCOCK, K. L. 1963. Theory of the chemical properties of soil colloidal systems at equilibrium. *Hilgardia*, 34, pp. 417–542.
- BABCOCK, K. L., and R. K. SCHULZ. 1963. Effect of anions on the sodium-calcium exchange in soils. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 27, pp. 630–631.
- BACK, W. 1961. Techniques for mapping of hydrochemical facies. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 424—D, pp. 380–382.
- BACK, W. 1966. Hydrochemical facies and ground-water flow patterns in northern part of Atlantic Coastal Plain. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 498—A, 42 pp.

Referências Bibliográficas

- BACK, W., and I. BARNES. 1969. Relation of electrochemical potentials and iron content to groundwater flow patterns. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 498-C, 16 pp.
- BACK, W., and J. A. CHERRY. 1976. Chemical aspects of present and future hydrogeologic problems. Proc. Symp. Adv. Groundwater Hydrol. Amer. Water Resources Assoc.
- BACK, W., and B. B. HANSHAW. 1965. Chemical geohydrology. Adv. Hydrosol., 2, pp. 49-109.
- BACK, W., and B. B. HANSHAW. 1970. Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan. J. Hydrol., 10, pp. 330-368.
- BAETSLÉ, L. H. 1967. Computational methods for the prediction of underground movement of radionuclides. J. Nuclear Safety, 8, no. 6, pp. 576-588.
- BAETSLÉ, L. H. 1969. Migration of radionuclides in porous media. Progress in Nuclear Energy, Series XII, Health Physics, ed. A. M. F. Duhamel. Pergamon Press, Elmsford, N.Y., pp. 707-730.
- BANIN, A., and D. M. ANDERSON. 1974. Effects of salt concentration changes during freezing on the unfrozen water content of porous materials. Water Resources Res., 10, pp. 124-128.
- BARNES, I., and J. D. HEM. 1973. Chemistry of subsurface waters. Ann. Rev. Earth Planetary Sci., 1, pp. 157-301.
- BAUER, W. J. 1974. Land treatment designs, present and future. Proc. Intern. Conf. Land for Waste Management, ed. J. Thomlinson. National Research Council, Ottawa, Canada, pp. 343-346.
- BAVER, L. D., W. H. GARDNER, and W. R. GARDNER. 1972. Soil Physics, 4th ed. John Wiley & Sons, New York.
- BEAR, J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier, New York.
- BEAR, J., and G. DAGAN. 1965. The relationship between solutions of flow problems in isotropic and anisotropic soils. J. Hydrol., 3, pp. 88-96.
- BEAR, J., and O. LEVIN. 1967. The optimal yield of an aquifer. Intern. Assoc. Sci. Hydrol., Proc. Haifa Symp. Publ. 72, pp. 401-412.
- BEAR, J., D. ZASLAVSKY, and S. IRMAY. 1968. Physical Principles of Water Percolation and Seepage. UNESCO, Paris, 465 pp.
- BEEK, J., and F. A. M. DE HAAN. 1974. Phosphate removal by soil in relation to waste disposal. Proc. Intern. Conf. Land for Waste Management, ed. J. Thomlinson. National Research Council, Ottawa, Canada, pp. 77-86.
- BENNION, D. W., and J. C. GRIFFITHS. 1966. A stochastic model for predicting variations in reservoir rock properties. Trans. Amer. Inst. Mining Met. Engrs., 237, no. 2, pp. 9-16.
- BERNER, R. A. 1971. Principles of Chemical Sedimentology. McGraw-Hill, New York, 240 pp.
- BERRY, F. A. F. 1959. Hydrodynamics and Geochemistry of the Jurassic and Cretaceous Systems in the San Juan Basin, Northwestern New Mexico and Southwestern Colorado. Unpublished Ph.D. thesis, Stanford University.
- BERRY, F. A. F. 1969. Relative factors influencing membrane Filtration effects in geologic environments. Chem. Geol., 4, pp. 295-301.

Referências Bibliográficas

- BERSON, R. P. 1964. What is watershed runoff? J. Geophys. Res., 69, pp. 1541–1551.
- BIANCHI, W. C., and E. E. HASKELL, JR. 1966. Air in the vadose zone as it affects water movements beneath a recharge basin. Water Resources Res., 2, pp. 315–322.
- BIANCHI, W. C., and E. E. HASKELL, JR. 1968. Field observations compared with Dupuit-Forchheimer theory for mound heights under a recharge basin. Water Resources Res., 4, pp. 1049–1057.
- BILLINGS, G. K., B. HITCHON, and D. R. SHAW. 1969. Geochemistry and origin of formation waters in western Canada sedimentary basin. Chem. Geol., 4, pp. 211–223.
- BIOT, M. A. 1941. General theory of three-dimensional consolidation. J. Appl. Phys., 12, pp. 155–164.
- BIOT, M. A. 1955. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. J. Appl. Phys., 26, pp. 182–185.
- BISHOP, A. W. 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, 5, pp. 7–17.
- BISHOP, A. W., and G. E. BLIGHT. 1963. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. Géotechnique, 13, pp. 177–197.
- BISHOP, A. W., and N. R. MORGENSTERN. 1960. Stability coefficients for earth slopes. Géotechnique, 10, pp. 29–150.
- BISWAS, A. 1970. History of Hydrology. North-Holland, Amsterdam, 336 pp.
- BJERRUM, L., and F. JORSTAD. 1964. Rockfalls in Norway. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
- BLACK, C. A., ed. 1965. Methods in Soil Analysis, Part 1. American Society of Agronomy, Madison, Wis., 770 pp.
- BLANEY, H. F., and W. D. CRIDDLE. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. U.S. Dept. Agr. Soil Conserv. Serv., Rept. T.P. 96.
- BLATT, H., G. MIDDLETON, AND R. MURRAY. 1972. Origin of Sedimentary Rocks. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 634 pp.
- BLOMEKE, J. O., J. P. NICHOLS, and W. C. MCCLAIN. 1973. Managing radioactive wastes. Phys. Today, 26, pp. 36–42.
- BODMAN, G. B., and E. A. COLMAN. 1943. Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 8, pp. 116–122.
- BOERSMA, L. 1965. Field measurement of hydraulic conductivity below a water table. Methods of Soil Analysis, Part 1, ed. C. A. Black. American Society of Agronomy, Madison, Wis., pp. 222–233.
- BOLT, G. H., and P. H. GROENEVELT. 1969. Coupling phenomena as a possible cause for non-Darcian behaviour of water in soil. Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydrol., 14, no. 2, pp. 17–26.
- BOSTOCK, C. A. 1971. Estimating truncation error in image well theory. Water Resources Res., 7, pp. 1658–1660.

Referências Bibliográficas

- BOTTOMLEY, D. 1974. Influence of Hydrology and Weathering on the Water Chemistry of a Small Precambrian Shield Watershed. Unpublished M.Sc. thesis, University of Waterloo.
- BOULTON, G. S. 1974. Processes and patterns of glacial erosion. *Glacial Geomorphology*, ed. D. R. Coates. State University of New York, Binghamton, N.Y., pp. 41–87.
- BOULTON, G. S. 1975. Processes and patterns of subglacial sedimentation: a theoretical approach. *Ice Ages: Ancient and Modern*, ed. A. E. Wright and F. Moseley. *Geol. J. Spec. Issue* No. 6, pp. 7–42.
- BOULTON, N. S. 1954. The drawdown of the water table under non-steady conditions near a pumped well in an unconfined formation. *Proc. Inst. Civil Engrs.*, 3, pp. 564–579.
- BOULTON, N. S. 1955. Unsteady radial flow to a pumped well allowing for delayed yield from storage. *Proc. Gen. Assembly Rome, Intern. Ass. Sci. Hydrol. Publ.* 37, pp. 472–477.
- BOULTON, N. S. 1963. Analysis of data from nonequilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. *Proc. Inst. Civil Engrs.*, 26, pp. 469–482.
- BOUSSINESQ, J. 1904. Recherches théorétiques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *J. Math. Pure Appl.*, 10, pp. 5–78.
- BOUWER, H. 1962. Analyzing ground-water mounds by resistance network. *J. Irrig. Drain. Div., Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs.*, 88 (IR3), pp. 15–36.
- BOUWER, H. 1965. Theoretical aspects of seepage from open channels. *J. Hydraul. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 91 (HY3), pp. 37–59.
- BOUWER, H., and R. D. JACKSON. 1974. Determining soil properties. *Drainage for Agriculture*, ed. J. van Schilfgaarde. American Society of Agronomy, Madison, Wis., pp. 611–672.
- BOUWER, H., and W. C. LITTLE. 1959. A unifying numerical solution for two-dimensional steady flow problems in porous media with an electrical resistance network *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 23, pp. 91–96.
- BRADSHAW, P. M. D., ed. 1975. Conceptual models in exploration geochemistry: the Canadian Cordillera and Canadian Shield. *J. Geochem. Exploration*, 4, pp. 1–231.
- BRADSHAW, R. L., and W. C. MCCLAIN. 1971. Project salt vault: a demonstration of the disposal of high-activity solidified wastes in underground salt mines. Rept. ORNL-4555, Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, Tenn.
- BREDEHOEFT, J. D., and B. B. HANSHAW. 1968. On the maintenance of anomalous fluid pressures: I. Thick sedimentary sequences. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 79, pp. 1097–1106.
- BREDEHOEFT, J. D., and I. S. PAPADOPOULOS. 1965. Rates of vertical groundwater movement estimated from the earth's thermal profile. *Water Resources Res.*, 1, pp. 325–328.
- BREDEHOEFT, J. D., and G. F. PINDER. 1970. Digital analysis of areal flow in multiaquifer groundwater systems: a quasi three-dimensional model. *Water Resources Res.*, 6, pp. 883–888.
- BREDEHOEFT, J. D., and G. F. PINDER. 1973. Mass transport in flowing groundwater. *Water Resources Res.*, 9, pp. 194–209.

Referências Bibliográficas

- BREDEHOEFT, J. D., and R. A. YOUNG. 1970. The temporal allocation of groundwater: a simulation approach. *Water Resources Res.*, 6, pp. 3–21.
- BREDEHOEFT, J. D., C. R. BLYTH, W. A. WHITE, and G. B. MAXEY. 1963. Possible mechanism for concentration of brines in subsurface formations. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 47, pp. 257–269.
- BRICKER, O. P. 1967. Cations and silica in natural waters: control by silicate minerals. *Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.* 78, pp. 110–119.
- BRICKER, O. P., A. E. GODFREY, and E. T. CLEAVES. 1968. Mineral-water interaction during the chemical weathering of silicates. *Advances in Chemistry Series No. 73*, American Chemical Society, Washington, D.C.
- BRIGGS, G. F., and A. G. FIEDLER, eds. 1966. *Ground Water and Wells*. Edward E. Johnson, Inc., St. Paul, Minn.
- BROADBENT, F. E. 1971. Nitrogen in soil and water. *Symp. Nitrogen Soil Water*, University of Guelph, Guelph, Ontario, p. 56.
- BROCK, T. D. 1966. *Principles of Microbial Ecology*. Prentice-Hall, Englewood Cliff's, N.J., 306 pp.
- BROWN, I. C., ed. 1967. *Groundwater in Canada*. *Geol. Surv. Can. Econ. Geol. Rept. No. 24*.
- BROWN, R. H., A. A. KONOPLYANTSEV, J. INESON, and U. S. KOVALEVSKY, eds. 1972. *Ground Water Studies: An International Guide for Research and Practice*, *Studies and Reports in Hydrology*, UNESCO, 7, no. 10, pp. 1–18.
- BRUTSAERT, W. F., E. A. BREITENBACH, and D. K. SUNADA. 1971. Computer analysis of free-surface well flow. *J. Irrig. Drain. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 97, pp. 405–420.
- BURAS, N. 1966. Dynamic programming in water resource development. *Adv. Hydrosoci.*, 3, pp. 367–412.
- BURKHOLDER, H. C. 1976. Methods and data for predicting nuclide migration in geologic media. *Intern. Symp. Management of Wastes from the LWR Fuel Cycle*, Denver, Colo.
- BURNS, E. A., and D. A. MCLAREN. 1975. Factors affecting pesticide loss from soil. *Soil Biochemistry*, Vol. 4. Marcel Dekker, New York.
- BURT, O. 1967. Temporal allocation of groundwater. *Water Resources Res.*, 3, pp. 45–56.
- BURT, T. P., and P. J. WILLIAMS. 1976. Hydraulic conductivity in frozen soils. *Earth Surface Processes*, 1, pp. 249–360.
- CALIF. BUREAU OF SANITARY ENGINEERING. 1963. Occurrence of nitrate in ground water supplies in southern California. *Bureau of Sanitary Engineering*, State Department of Public Health.
- CAMP, T. R. 1963. *Water and Its Impurities*. Reinhold, New York, 355 pp.
- CAMPBELL, M. D., and J. H. LEHR. 1973. *Water Well Technology*. McGraw-Hill, New York.
- CARBOGNIN, L., P. GATTO, G. MOZZI, G. GAMBOLATI, and G. RICCERI. 1976. New trend in the subsidence of Venice. *2nd Intern. Symp. Land Subsidence*, Anaheim, Calif.

Referências Bibliográficas

- CARDER, D. S. 1970. Reservoir loading and local earthquakes. *Geol. Soc. Amer. Eng. Geol. Case Histories*, 8, pp. 51–61.
- CARROLL, D. 1962. Rainwater as a chemical of geologic processes—a review. *U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper* 1535-G.
- CARSLAW, H. S., and J. C. JAEGER. 1959. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, London.
- CARSON, M. A., and M. J. KIRKBY. 1972. *Hillslope Form and Process*. Cambridge University Press, Cambridge, England, 475 pp.
- CARTWRIGHT, K. 1968. Thermal prospecting for groundwater. *Water Resources Res.*, 4, pp. 395–401.
- CARTWRIGHT, K. 1974. Tracing shallow groundwater systems by soil temperatures. *Water Resources Res.*, 10, pp. 847–855.
- CASAGRANDE, A. 1961. Control of seepage through foundations and abutments of dams. *Géotechnique*, 11, pp. 161–181.
- CASAGRANDE, L. 1952. Electro-osmotic stabilization of soils, Boston Society of Civil Engineers. *Contrib. Soil Mech.*, 1941–1953, 285 pp.
- CASTILLO, E. R., J. KRIZEK, and G. M. KARADI. 1972. Comparison of dispersion characteristics in fissured rock. *Proc. 2nd Intern. Symp. Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*, Guelph, Ontario, 2, pp. 778–797.
- CEDERGREN, H. R. 1967. *Seepage, Drainage, and Flow Nets*. John Wiley & Sons, New York.
- CEDERGREN, H. R. 1975. Drainage and dewatering. *Foundation Engineering Handbook*, ed. H. F. Winterkorn and H. Y. Fang. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 221–243.
- CHAMBERLAIN, T. C. 1885. The requisite and qualifying conditions of artesian wells. *U.S. Geol. Surv. Ann. Rept.*, pp. 125–173.
- CHEBOTAREV, I. I. 1955. Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 8, pp. 22–48, 137–170, 198–212.
- CHERRY, J. A. 1972. Geochemical processes in shallow groundwater flow systems in five areas in southern Manitoba, Canada. *Proc. 24th Intern. Geol. Congr., Montreal, Sec. 11*, pp. 208–221.
- CHERRY, J. A., G. E. GRISAK, and W. E. CLISTER. 1973. Hydrogeologic studies at a subsurface radioactive waste management site in west-central Canada. *Intern. Symp. Underground Waste Management Artificial Recharge*, AAPG– USGS, New Orleans, ed. J. Braunstein, pp. 436–467.
- CHERRY, J. A., G. E. GRISAK, and R. E. JACKSON. 1974. Hydrogeological factors in shallow subsurface radioactive waste management in Canada. *Proc. Intern. Conf. Land for Waste Management*, ed. J. Thomlinson. National Research Council, Ottawa, Canada, pp. 131–146.
- CHERRY, J. A., R. W. GILLHAM, and J. F. PICKENS. 1975. Contaminant hydrogeology: Part 1 : physical processes. *J. Geosci. Can.*, 2, pp. 76–84.

Referências Bibliográficas

- CHERRY, J. A., R. W. GILLHAM, G. E. GRISAK, and D. L. LUSH. In press. Hydrogeological factors in shallow subsurface radioactive waste management. Proc. Symp. Management Low-Level Radio-active Waste, ed. Melvin Carter. U.S. Environmental Protection Agency.
- CHILDS, E. C. 1943. The water table, equipotentials, and streamlines in drained land. *Soil Sci.*, 56, pp. 317–330.
- CHILDS, E. C. 1969. *The Physical Basis of Soil Water Phenomena*. Wiley-Interscience, New York.
- CHILDS, K. E., S. B. UPCHURCH, and B. ELLIS. 1974. Sampling of variable waste migration patterns in groundwater. *Groundwater*, 12, pp. 369–376.
- CHILINGAR, G. V. 1963. Relationship between porosity, permeability, and grain-size distribution of sands and sandstones. Proc. Intern. Sedimentol. Congr., Amsterdam, Antwerp.
- CHOPPIN, G. 1965. *Chemistry*, 38, p. 11.
- CHOW, V. T., ed. 1964a. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- CHOW, V. T., ed. 1964b. Hydrology and its development. *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, pp. 1.1–1.22.
- CHRISTIANSEN, E. A., and S. H. WHITAKER. 1976. Glacial thrusting of drift and bedrock. *Glacial Till: An Interdisciplinary Study*, ed. R. F. Leggett. Roy. Soc. Can. Spec. Publ. 12, pp. 121–130.
- CHRISTIANSEN, E. A., S. H. WHITAKER, and W. A. MENELEY. ca. 1971. *Groundwater Program*. Saskatchewan Research Council.
- CLARKE, W. B., and G. KUGLER. 1973. Dissolved helium in groundwater: a possible method for uranium and thorium prospecting. *Econ. Geol.*, 68, pp. 243–251.
- CLAYTON, L., and S. R. MORAN. 1974. A glacial process-form model. *Glacial Geomorphology*, ed. D. R. Coates. State University of New York, Binghamton, N.Y., pp. 89–119.
- CLAYTON, R. N., I. FRIEDMAN, D. L. GRAF, T. K. MAYEDA, W. F. MEENTS, and N. F. SHIMP. 1966. The origin of saline formation waters. *J. Geophys. Res.*, 71, pp. 3869–3882.
- CLEAVES, E. T., A. E. GODFREY, and O. P. BRICKER. 1970. Geochemical balance of a small watershed and its geomorphic implications. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 81, pp. 3015–3032.
- CLEAVES, E. T., D. W. FISHER, and O. P. BRICKER. 1974. Chemical weathering of serpentinite in the eastern Piedmont of Maryland. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 85.
- CLOKE, P. L. 1966. The geochemical application of Eh-pH diagrams. *J. Geol. Educ.*, 4, pp. 140–148.
- COATES, D. R., ed. 1977. *Landslides*. *Geol. Soc. Am. Rev. Eng. Geol.*, 3.
- CODELL, R. B., and D. L. SCHREIBER. In press. NRC models for evaluating the transport of radionuclides in groundwater. Proc. Symp. Low-level Radioactive Waste Management. U.S. Geological Survey and National Regulatory Commission, Atlanta, Ga.
- COHEN, B. L. June 1977. The disposal of radioactive wastes from fission reactors. *Sci. Amer.*, 236, no. 6.
- COLLINS, R. E. 1961. *Flow of Fluids Through Porous Materials*. Reinhold, New York.
- COOLEY, R. L. 1971. A finite-difference method for unsteady flow in variably saturated porous media: application to a single pumping well. *Water Resources Res.*, 7, pp. 1607–1625.

Referências Bibliográficas

- COOPER, H. H. 1966. The equation of groundwater flow in fixed and deforming coordinates. *J. Geophys. Res.*, 71, pp. 4785–4790.
- COOPER, H. H., Jr., and C. E. JACOB. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 27, pp. 526–534.
- COOPER, H. H., Jr., and M. I. RORABAUGH. 1963. Groundwater movements and bank storage due to flood stages in surface streams. *U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper* 1536–J.
- COOPER, H. H., Jr., F. A. KOHOUT, H. R. HENRY, and R. E. GLOVER. 1964. Sea water in coastal aquifers. *U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper* 1613–C, 84 pp.
- COOPER, H. H., Jr., J. D. BREDEHOEFT, and I. S. PAPADOPOULOS. 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Res.*, 3, pp. 263–269.
- COPLEN, T. B. 1970. Isotopic fractionation of water by ultra-filtration. Unpublished Ph.D. thesis, University of Chicago.
- CRANK, J. 1956. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, Oxford, 347 pp.
- CROLL, B. T. 1972. The impact of organic pesticides and herbicides upon groundwater pollution. *Ground Water Pollution in Europe*, ed. John A. Cole. Water Information Center, Inc., Port Washington, N.Y., pp. 350–364.
- CUSTER, G. S. 1976. Shallow ground-water salinization in dryland farm areas of Montana. *Montana Universities Joint Water Resources Res. Center Rept. No. 79*, Bozeman, Mont.
- CUSTODIO, E., and M. R. LLAMAS. 1974. *Hidrologia Subterranea*. Ediciones Omega, Barcelona, Spain, 2 vols.
- DAGAN, G. 1967. A method of determining the permeability and effective porosity of unconfined anisotropic aquifers. *Water Resources Res.*, 3, pp. 1059–1071.
- DAMSGAARD, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, pp. 436–468.
- DARCY, H. 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris.
- DAVIDSON, J. M., LI-TSE OU, and P. S.C. RAO. 1976. Behavior of high pesticide concentrations in soil water systems. *Proc. Res. S ymp. Residual Management by Land Disposal*, ed. W. H. Fuller, University of Arizona, Tucson, Ariz.
- DAVIS, S. N. 1964. Silica in streams and ground water. *Amer. J. Sci.*, 262, pp. 870–891.
- DAVIS, S. N. 1969. Porosity and permeability of natural materials. *Flow Through Porous Media*, ed. R. J. M. De Wiest. Academic Press, New York, pp. 54–89.
- DAVIS, S. N., and R. J. M. DE WIEST. 1966. *Hydrogeology*. John Wiley & Sons, New York, 463 pp.
- DAVISON, C. A. 1976. A hydrogeochemical investigation of a brine disposal lagoon—aquifer system, Esterhazy, Saskatchewan. Unpublished Master's thesis, University of Waterloo.
- DEERE, D. U., and F. D. PATTON. 1967. Effect of pore pressure on the stability of slopes. *Geol. Soc. Amer.–Soc. Civil Engrs. Symp.* New Orleans. La.

Referências Bibliográficas

- DE GEOFFROY, J., S. M. WU, and R. W. HEINS. 1967. Geochemical coverage by spring sampling method in the Southwest Wisconsin zinc area. *Econ. Geol.*, 62, 679–697.
- DEJU, R. A. 1971. A model of chemical weathering of silicate minerals. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 82.
- DELWICHE, C. C. 1967. Energy relationships in soil biochemistry. *Soil Biochemistry*, ed. A. D. McLaren and G. H. Peterson. Marcel Dekker, New York, pp. 173–193.
- DENBIGH, K. B. 1966. *The Principles of Chemical Equilibrium: With Applications in Chemistry and Chemical Engineering*, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- DESAI, C. S., and J. F. ABEL. 1972. *Introduction to the Finite Element Method*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- DE WIEST, R. J. M. 1962. Free-surface flow in homogeneous porous mediums. *Trans. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 127, pp. 1045–1084.
- DE WIEST, R. J. M. 1966. On the storage coefficient and the equations of groundwater flow. *J. Geophys. Res.*, 71, pp. 1117–1122.
- DEWSNUT, R. L., D. W. JENSEN, and R. W. SWENSON. 1973. *A Summary Digest of State Water Laws*. National Water Commission.
- DICKER, D. 1969. Transient free-surface flow in porous media. *Flow Through Porous Media*, ed. R. J. M. De Wiest. Academic Press, New York, pp. 293–330.
- DIETZ, D. N. 1971. Pollution of permeable strata by oil components. *Water Pollution by Oil*, ed. Peter Hepple. Elsevier, Amsterdam, pp. 128–142.
- DOBRIN, M. B. 1960. *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw-Hill, New York, 446 pp.
- DOMENICO, P. A. 1972. *Concepts and Models in Groundwater Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- DOMENICO, P. A. 1977. Transport phenomena in chemical rate processes in sediments. *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, 5, pp. 287–317.
- DOMENICO, P. A., and M. D. MIFFLIN. 1965. Water from low-permeability sediments and land subsidence. *Water Resources Res.*, 1, pp. 563–576.
- DOMENICO, P. A., and V. V. PALCIAUSKAS. 1973. Theoretical analysis of forced convective heat transfer in regional groundwater flow. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 84, pp. 3803–3814.
- DOMENICO, P. A., D. ANDERSON, and C. CASE. 1968. Optimal groundwater mining. *Water Resources Res.*, 4, pp. 247–255.
- DONALDSON, I. G. 1962. Temperature gradients in the upper layers of the earth's crust due to convective water flows. *J. Geophys. Res.*, 67, pp. 3449–3459.
- DONALDSON, I. G. 1970. The simulation of geothermal systems with a simple convective model. *Geothermics, Spec. Issue 2, Vol. 2, pt. 1*, pp. 649–654.
- DONER, H. E., and A. D. MCLAREN. 1976. *Soil Nitrogen Transformations: A Modeling Study, Vol 1: Environmental Biogeochemistry*, ed. J. O. Nriagu. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich.
- DORSEY, N. E. 1940. *Properties of ordinary water-substance in all its phases; water-vapor, water and all the ices*. Amer. Chem. Soc. Monogr. No. 81, Reinhold, New York.

Referências Bibliográficas

- DREWRY, W. A., and R. E. ELIASSEN. 1968. Virus movement in groundwater. *J. Water Pollution Control Fed.*, 40, pp. 257–271.
- DROST, W., D. KLOTZ, A. KOCH, H. MOSER, F. NEUMAIER, and W. RAUERT. 1968. Point dilution methods of investigating groundwater flow by means of radioisotopes. *Water Resources Res.*, 4, pp. 125–146.
- DUDLEY, J. G., and D. A. STEPHENSON. 1973. Nutrient enrichment of ground water from septic tank disposal systems. Upper Great Lakes Regional Commission.
- DUNNE, T. 1978. Field studies of hillslope flow processes. *Hillslope Hydrology*, ed. M. J. Kirkby. Wiley-Interscience, New York, pp. 227–293.
- DUNNE, T., and R. D. BLACK. 1970a. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Res.*, 6, pp. 478–490.
- DUNNE, T., and R. D. BLACK. 1970b. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Res.*, 6, pp. 1296–1311.
- DUPUIT, J. 1863. *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*. Dunod, Paris.
- DYCK, J. H., W. S. KEYS, and W. A. MENELEY. 1972. Application of geophysical logging to ground-water studies in southern Saskatchewan. *Can. J. Earth Sci.*, 9, pp. 78–94.
- EAGLESON, P. S. 1970. *Dynamic Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 462 pp.
- EBACK, E. A., and R. R. WHITE. 1958. Mixing of fluids flowing through beds of packed solids. *Amer. Inst. Chem. Eng. J.*, 4, no. 2.
- ECKEL, E. B., ed. 1958. *Landslides and Engineering Practice*. Highway Res. Board, Spec. Rept. No. 29.
- EDMUNDS, W. M. 1973. Trace element variations across an oxidation-reduction barrier in a limestone aquifer. *Proc. Symp. Hydrogeochem. Biochem.*, Tokyo 1970, The Clarke Company, Washington, D.C., pp. 500–526.
- ELDER, J. W. 1965. Physical processes in geothermal areas. *Terrestrial Heat Flow*, ed. W. H. K. Lee, *Amer. Geophys. Union Monogr.* 8, pp. 211–239.
- ELLIS, R. R., L. DEVI, and W. A. WEIBENGA. 1968. The investigation of water flow through porous mediums by means of radiotracers, *Water Resources Res.*, 4, pp. 413–416.
- EL-PRINCE, A. M., and K. L. BABCOCK. 1975. Prediction of ion exchange equilibria in aqueous systems with more than two counter ions. *Soil Sci.*, 120, pp. 332–338.
- EMSELLEM, Y., and G. de MARSILY. 1971. An automatic solution for the inverse problem. *Water Resources Res.*, 7, pp. 1264–1283.
- EVANS, D. M. 1966. The Denver area earthquakes and the Rocky Mountain Arsenal disposal well. *Mountain Geol.*, 3, pp. 23–26.
- FARQUAR, G. F., and F. A. ROVERS. 1973. Gas production during refuse decomposition. *Water, Air Soil Pollution*, 2.

Referências Bibliográficas

- FARVOLDEN, R. N. 1963. Geologic controls on groundwater storage and base flow. *J. Hydrol.*, 1, pp. 219–249.
- FARVOLDEN, R. N., and G. M. HUGHES. 1976. Hydrogeological implications in solid waste disposal. *Bull Intern. Assoc. Sci. Hydrol.*, pp. 146–158.
- FARVOLDEN, R. N., and J. P. NUNAN. 1970. Hydrogeologic aspects of dewatering at Welland. *Can. Geotech. J.*, 7, pp. 194–204.
- FAYERS, F. J., and J. W. SHELDON. 1962. The use of a high-speed digital computer in the study of the hydrodynamics of geologic basins. *J. Geophys. Res.*, 67, pp. 2421–2431.
- FERGUSON, J. F., and J. GAVIS. 1972. A review of the arsenic cycle in natural waters. *Water Research*. Pergamon Press, Oxford, pp. 1259–1274.
- FERRIS, J. G., D. B. KNOWLES, R. H. BROWNE, and R. W. STALLMAN. 1962. Theory of aquifer tests. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper I536-E.
- FERRO, C., G. P. GIANNOTTI, M. MITTEMBERGHER, D. MUSY, G. SIDOTI, E. STAMPHONE, and C. VALLONE. 1973. Utilization of clay formations for storage of solid high-level radioactive wastes. *Management of Radioactive Wastes from Fuel Reprocessing*. Organization for Economic Cooperation and Development and International Atomic Energy Agency, Paris, pp. 887–916.
- FETH, J. H., C. C. ROBERTSON, and W. L. POLZER. 1964. Sources of mineral constituents in water from granitic rocks, Sierra Nevada, California and Nevada. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1535-1, 170 pp.
- FLOWER, F. B. 1976. Case history of landfill gas movement through soils. *Gas and Leachate from Landfills*, ed. E. J. Genetelli and J. Cirello. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 600/9-76-004, pp. 177–189.
- FORD, T. D., and C. H. D. CULLINGFORD, eds. 1976. *The Science of Speleology*. Academic Press, New York, 594 pp.
- FORCHHEIMER, P. 1930. *Hydraulik*. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart.
- FORSYTHE, G. E., and W. R. WASOW. 1960. *Finite-Difference Methods for Partial Differential Equations*. John Wiley & Sons, New York.
- FOSTER, M. D. 1950. The origin of high sodium bicarbonate waters in the Atlantic and Gulf Coastal Plains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1, pp. 33–48.
- FOSTER, S. S. D. 1975. The chalk groundwater tritium anomaly—a possible explanation. *J. Hydrol.*, 25, pp. 159–165.
- FOSTER, S. S. D., and R. I. CREASE. 1972. Nitrate pollution of chalk groundwater in East Yorkshire: a hydrogeological appraisal. *Groundwater Pollution in Europe*, ed. J. A. Cole. Water Information Center, Port Washington, N.Y., pp. 269–271.
- FREEZE, R. A. 1967. Quantitative interpretation of regional groundwater flow patterns as an aid to water balance studies. *Intern. Assoc. Sci. Hydrol., Gen. Assembly of Berne, Publ. 78*, pp. 154–173.

Referências Bibliográficas

- FREEZE, R. A. 1969a. Regional groundwater flow—Old Wives Lake Drainage Basin, Saskatchewan. Can. Inland Waters Branch, Sci. Series No. 5, 245 pp.
- FREEZE, R. A. 1969b. The mechanism of natural groundwater recharge and discharge: 1. One-dimensional, vertical, unsteady, unsaturated flow above a recharging or discharging groundwater flow system. *Water Resources Res.*, 5, pp. 153–171.
- FREEZE, R. A. 1971a. Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin. *Water Resources Res.*, 7, pp. 347–366.
- FREEZE, R. A. 1971b. Influence of the unsaturated flow domain on seepage through earth dams. *Water Resources Res.*, 7, pp. 929–941.
- FREEZE, R. A. 1972a. Role of subsurface flow in generating Surface runoff: 1. Baseflow contributions to channel flow. *Water Resources Res.*, 8, pp. 609–623.
- FREEZE, R. A. 1972b. Role of subsurface flow in generating surface runoff: 2. Upstream source areas. *Water Resources Res.*, 8, pp. 1272–1283.
- FREEZE, R. A. 1974. Streamflow generation. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 12, pp. 627–647.
- FREEZE, R. A. 1975. A stochastic conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in non-uniform homogeneous media. *Water Resources Res.*, 11, pp. 725–741.
- FREEZE, R. A., and J. BANNER. 1970. The mechanism of natural groundwater recharge and discharge: 2. Laboratory column experiments and field measurements. *Water Resources Res.*, 6, pp. 138–155.
- FREEZE, R. A., and P. A. WITHERSPOON. 1966. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Resources Res.*, 2, pp. 641–656.
- FREEZE, R. A., and P. A. WITHERSPOON. 1967. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation. *Water Resources Res.*, 3, pp. 623–634.
- FREEZE, R. A., and P. A. WITHERSPOON. 1968. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 3. Quantitative interpretations. *Water Resources Res.*, 4, pp. 581–590.
- FRIED, J. J. 1975. *Groundwater Pollution*, Elsevier, Amsterdam, 330 pp.
- FRIED, J. J., P. C. LEVEQUE, D. POITRINAL, and J. SEVERAC. 1974. Local studies of miscible pollutions of groundwater: the single well pulse technique. *Groundwater Pollution in Europe*, ed. J. A. Cole. Water Information Center, Port Washington, N.Y., pp. 388–406.
- FRIND, E. O. 1970. Theoretical analysis of aquifer response due to dewatering at Welland. *Can. Geotech. J.*, 7, pp. 205–216.
- FRIND, E. O., and G. F. PINDER. 1973. Galerkin solution of the inverse problem for aquifer transmissivity. *Water Resources Res.*, 9, pp. 1397–1410.
- FRITZ, P., R. J. DRIMMIE, and F. W. RENDER. 1974. Stable isotope contents of a major prairie aquifer in central Manitoba, Canada. *Isotope Techniques in Groundwater Hydrology*. Intern. Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 379–397.

Referências Bibliográficas

- FRITZ, P., J. A. CHERRY, K. U. WEYER, and M. SKLASH. 1976. Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions. Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology. Intern. Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 111–130.
- FUHRIMAN, D. K., and J. R. BARTON. 1971. Ground water pollution in Arizona, California, Nevada and Utah. Environ. Protect. Agency. Rept. 16060 ERU.
- GAMBOLATI, G. 1973a. Equation for one-dimensional vertical flow of groundwater: 1. The rigorous theory. Water Resources Res., 9, pp. 1022–1028.
- GAMBOLATI, G. 1973b. Equation for one-dimensional vertical flow of groundwater: 2. Validity range of the diffusion equation. Water Resources Res., 9, pp. 1385–1395.
- GAMBOLATI, G. 1974. Second-order theory of flow in three-dimensional deforming media. Water Resources Res., 10, pp. 1217–1228.
- GAMBOLATI, G. 1976. Transient free surface flow to a well: An analysis of theoretical solutions. Water Resources Res., 12, pp. 27–39.
- GAMBOLATI, G., and R. A. FREEZE. 1973. Mathematical simulation of the subsidence of Venice: 1. Theory. Water Resources Res., 9, pp. 721–733.
- GAMBOLATI, G., P. GATTO, and R. A. FREEZE. 1974a. Mathematical simulation of the subsidence of Venice: 2. Results. Water Resources Res., 10, pp. 563–577.
- GAMBOLATI, G., P. GATTO, and R. A. FREEZE. 1974b. Predictive simulation of the subsidence of Venice. Science, 183, pp. 849–851.
- GARLAND, G. A., and D. C. MOSHER. 1975. Leachate effects from improper land disposal. J. Wasteage, 6, pp. 42–48.
- GARRELS, R. M. 1967. Genesis of some ground waters from igneous rocks. Researches in Geochemistry, Vol. 2, ed. P. H. Abelson. John Wiley & Sons, New York, 663 pp.
- GARRELS, R. M., and C. L. CHRIST. 1965. Solutions, Minerals and Equilibria. Harper & Row, New York, 450 pp.
- GARRELS, R. M., and P. HOWARD. 1957. Reactions of feldspars and mica with water at low temperature and pressure. Proc. 6th Nat. Conf. Clays Clay Minerals.
- GARRELS, R. M., and F. T. MACKENZIE. 1967. Origin of the chemical compositions of some springs and lakes. Equilibrium Concepts in Natural Water Systems, ed. R. F. Gould. American Chemical Society Publications, Washington, D.C.
- GASPAR, E., and M. ONcEscU. 1972. Radioactive Tracers in Hydrology. American Elsevier, New York, 90 pp.
- GATES, J. S., and C. C. KISIEL. 1974. Worth of additional data to a digital computer model of a ground-water basin. Water Resources Res., 10, pp. 1031–1038.
- GERA, F., and D. G. JACOBS. 1972. Considerations in the long-term management of high-level radioactive wastes. Rept. ORNL–4762, Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, Tenn., 151 pp.
- GERBA, C. P., C. WALLIS, and J. L. MELNICK. 1975. The fate of wastewater bacteria and viruses in soil. J. Irri. Drainage Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., 101, pp. 157–174.

Referências Bibliográficas

- GERMANOV, A. I., G. A. VOLKOV, A. K. LISITSIN, and V. S. SEREBENNIKOV. 1958. Investigation of the oxidation reduction potential of ground waters. Acad. Sci. USSR, Moscow, Inst. Geol. Ore Deposits, Petrogr., Mineral, Geochem., pp. 322–329.
- GHYBEN, W. B. 1888. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. Tijdschrift van het Koninklijk Inst. van Ing.
- GIBBS, H. J., and W. Y. HOLLAND. 1960. Petrographic and engineering properties of loess. U.S. Bur. Reclamation, Eng. Monogr. No. 28.
- GIBSON, U. P., and R. D. SINGER. 1971. Water Well Manual. Premier Press, Berkeley, California 156 pp.
- GIGER, W., and P. V. ROBERTS. 1977. Characterization of refractory organic carbon. Water Pollution Microbiology, Vol. 2, ed. Ralph Mitchell. Wiley-Interscience, New York.
- GILLHAM, R. W., and J. A. CHERRY. 1978. Field evidence of denitrification in shallow groundwater flow systems. Proc. 13th Can. Symp. Water Pollution Res. McMaster University, Hamilton, Ontario.
- GILLHAM, R. W., and L. R. WEBBER. 1969. Nitrogen contamination of groundwater by barnyard leachates. J. Water Pollution Control Fed., 41, pp. 1752–1762.
- GOFF, K. J. 1971. Hydrology and chemistry of the Shoal Lakes Basin, Interlake Area, Manitoba. Unpublished Master's thesis, University of Manitoba.
- GOODALL, D. C., and R. M. QUIGLEY. 1977. Pollutant migration from two sanitary landfill sites near Sarnia, Ontario. Can. Geotech. J., 14, pp. 223–236.
- GOODMAN, R. E., D. G. MOYE, A. VAN SCHALKWYK, and I. JAVANDEL. 1965. Ground water inflows during tunnel driving. Eng. Geol., 2, pp. 39–56.
- GOSLING, A. W., E. A. JENNE, and T. T. CHAO. 1971. Gold content of natural waters in Colorado. Econ. Geol. 66, pp. 309–313.
- GRAF, D. L., I. FRIEDMAN, and W. F. MEENTS. 1965. The origin of saline formation waters: II. Isotopic fractionation by shale micropore systems. Illinois State Geol. Surv. Circ. 393, 32 pp.
- GRAHAM, G. S., S. E. KESLER, and J. C. van LOON. 1975. Fluorine in groundwater as a guide to Pb—Zn—Ba—F mineralization. Econ. Geol., 70, pp. 396–398.
- GRANE, F. E., and G. H. F. GARDNER. 1961. Measurements of transverse dispersion in granular media. Chem. Eng. Data, 6, pp. 283–287.
- GRAY, D. M., et al. 1970. Handbook on the Principles of Hydrology. National Research Council, Canada.
- GRAY, D. M., G. A. MCKAY, and J. M. WIGHAM. 1970. Energy, evaporation and evapotranspiration. Handbook on the Principles of Hydrology, ed. D. M. Gray. National Research Council, Canada.
- GREEN, D. W., H. DABIRI, C. F. WEINAUG, and R. PRILL. 1970. Numerical modeling of unsaturated groundwater flow and comparison of the model to a field experiment. Water Resources Res., 6, pp. 862–874.
- GREENKORN, R. A., and D. P. KESSLER. 1969. Dispersion in heterogenous nonuniform anisotropic porous media. Ind. Eng. Chem., 61, pp. 14–32.

Referências Bibliográficas

- GRICE, R. H. 1968. Hydrogeology of the jointed dolomites, Grand Rapids Hydroelectric Power Station, Manitoba, Canada. Geol. Soc. Amer. Eng. Geol. Case Histories, 6, pp. 33–48.
- GRIFFIN, R. A., K. CARTWRIGHT, N. F. SHIMP, J. D. STEELE, R. R. BUCH, W. A. WHITE, G. M. HUGES, and R. H. GILKESON. 1976. Alteration of pollutants in municipal landfill leachate by clay minerals: Part 1. Column leaching and field verification. Illinois State Geol. Surv. Bull. 78.
- GRIM, R. E. 1968. Clay mineralogy, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, 596 pp.
- GRISAK, G. E. 1975. Nitrates in shallow groundwater near Lethbridge. Tech. Rept. Environ. Protection Services, Edmonton, Alberta.
- GRISAK, G. E., and J. A. CHERRY. 1975. Hydrogeologic characteristics and response of fractured till and clay confining a shallow aquifer. Can. Geotech. J., 12, pp. 23–43.
- GRISAK, G. E., J. A. CHERRY, J. A. VONHOF, and J. P. BLEUMLE. 1976. Hydrogeologic and hydrochemical properties of fractured till in the interior plains region. Glacial Till, ed. R. F. Legget. Spec. Publ. Roy. Soc. Can., pp. 304–335.
- GRISAK, G. E., W. F. MERRITT, and D. W. WILLIAMS. 1977. A fluoride borehole dilution apparatus for groundwater velocity measurements. Can. Geotech. J., 14, pp. 554–561.
- GROBA, F., and J. HAHN. 1972. Variations of groundwater chemistry by anthropogenic factors in northwest Germany. Proc. 24th Intern. Geol. Congr. Montreal, Sec. 11, Hydrogeol., pp. 270–281.
- GROENEWOLD, G., and others. In press. Geology and hydrogeology of the Knife River Basin, West-Central North Dakota. North Dakota Geol. Surv. Rept. Investigation 65.
- GROVE, D. B., and W. A. BEETEM. 1971. Porosity and dispersion constant calculations for a fractured carbonate aquifer using the two well tracer method. Water Resources Res., 7, pp. 128–134.
- GUENTHER, W. B. 1968. Quantitative Chemistry. Addison-Wesley, Reading, Mass.
- GUENTHER, W. B. 1975. Chemical Equilibrium: A Practical Introduction for the Physical and Life Sciences. Plenum Press, New York, 248 pp.
- GUGGENHEIM, E. A. 1949. Thermodynamics: An Advanced Treatment for Chemists and Physicists, 4th ed. North-Holland, Amsterdam.
- GUPTA, S. K., and K. K. TANGI. 1976. A three-dimensional Galerkin finite-element solution of flow through multiaquifers in Sutter Basin, California. Water Resources Res., 12, pp. 155–162.
- GURR, C. G., T. J. MARSHALL, and J. T. HUTTON. 1952. Water movement in soil due to a temperature gradient. Soil Sci., 24, pp. 335–344.
- GYMER, R. G. 1973. Chemistry: An Ecological Approach. Harper & Row, New York, 801 pp.
- HAGMAIER, J. L. 1971. Groundwater flow, hydrochemistry, and uranium deposition in the Power River Basin, Wyoming. Ph.D. thesis, University of North Dakota, 166 pp.
- HAGUE, R., D. W. SCHMEDDING, and V. H. FREED. 1974. Aqueous solubility, adsorption, and vapour behaviour of polychlorinated biphenyl arochlor 1254. J. Environ. Sci. Technol., 8, no. 2, pp. 139–142.

Referências Bibliográficas

- HALEVY, E., H. MOSER, O. ZELLHOFER, and A. ZUBER. 1967. Borehole dilution techniques: a critical review. *Isotopes in Hydrology*. IAEA, Vienna, pp. 531–564.
- HALL, E. S. 1972. Some chemical principles of groundwater pollution. *Groundwater Pollution in Europe*, ed. J. A. Cole. Water Information Center, Port Washington, N.Y.
- HALL, F. R. 1968. Baseflow recessions—a review. *Water Resources Res.*, 4, pp. 973–983.
- HAMAKER, J. W., and J. M. THOMPSON. 1972. Physicochemical relationships of organic chemicals in soils—adsorption. *Organic Chemicals in the Soil Environment*, ed. C. A. Goring and J. W. Hamahu. Marcel Dekker, New York, 49 pp.
- HAMBLIN, W. K. 1976. *The Earth's Dynamic Systems: A Textbook in Physical Geology*. Burgess, Minneapolis, Minn.
- HAMILTON, T. M. 1970. Groundwater flow in part of the Little Missouri River Basin, North Dakota. Unpublished Ph.D. thesis, University of North Dakota.
- HANSHAW, B. B. 1962. Membrane properties of compacted clays. Ph.D. thesis, Harvard University.
- HANSHAW, B. B., and T. B. COPLEN. 1973. Ultrafiltration by a compacted clay membrane: 11. Sodium ion exclusion at various ionic strengths. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, pp. 2311–2327.
- HANSHAW, B. B., W. BACK, and R. G. DEIKE. 1971. A geochemical hypothesis for dolomitization by ground water. *Econ. Geol.*, pp. 710–724.
- HANTUSH, M. S. 1956. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 37, pp. 702–714.
- HANTUSH, M. S. 1960. Modification of the theory of leaky aquifers. *J. Geophys. Res.*, 65, pp. 3713–3725.
- HANTUSH, M. S. 1962. Drawdown around a partially-penetrating well. *Amer. Soc. Civil Engrs. Trans.*, 127, pp. 268–283.
- HANTUSH, M. S. 1964. Hydraulics of wells. *Adv. Hydrosci.*, 1, pp. 281–432.
- HANTUSH, M. S. 1967. Growth and decay of groundwater mounds in response to uniform percolation. *Water Resources Res.*, 3, pp. 227–234.
- HANTUSH, M. S., and C. E. JACOB. 1955. Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 36, pp. 95–100.
- HARLAN, R. L. 1973. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resources Res.*, 9, pp. 1314–1323.
- HARR, M. E. 1962. *Groundwater and Seepage*. McGraw-Hill, New York.
- HARRISON, S. S., and L. CLAYTON. 1970. Effects of groundwater seepage on fluvial processes. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 81, pp. 1217–1226.
- HAWKES, H. E., and J. S. WEBB. 1962. *Geochemistry in Mineral Exploration*. Harper & Row, New York, 415 pp.

Referências Bibliográficas

- HEALY, J. H. 1975. Recent highlights and future trends in research on earthquake prediction and control. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 13, pp. 361–364.
- HEALY, J. H., W. W. RUBEY, D. T. GRIGGS, and C. B. RALEIGH. 1968. The Denver earthquakes. *Science*, 161, pp. 1301–1310.
- HEDBERG, H. D. 1964. Geologic aspects of origin of petroleum. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 48, pp. 1755–1803.
- HEDLIN, R. A. 1972. Nitrate contamination of ground water in the Neepawa-Langruth area of Manitoba. *Can. J. Soil Sci.*, pp. 75–84.
- HELFFERICH, F. 1962. *Ion Exchange*. McGraw-Hill, New York.
- HELGESON, H. C. 1970. A chemical and thermodynamic model of ore deposition in hydrothermal systems. *Min. Soc. Amer. Spec. Paper No. 3*, pp. 155–186.
- HELM, D. C. 1975. One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, California: 1. Constant Parameters. *Water Resources Res.*, 11, pp. 465–478.
- HELM, D. C. 1976. One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, California: 2. Stress-dependent parameters. *Water Resources Res.*, 12, pp. 375–391.
- HEM, J. D. 1967. Equilibrium chemistry of iron in ground water. *Principles and Applications of Water Chemistry*, ed. S. D. Faust and J. V. Hunter. John Wiley & Sons, New York.
- HEM, J. D. 1970. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1473, 363 pp.
- HENRY, H. R. 1960. Salt water intrusion into coastal aquifers. *Intern. Assoc. Sci. Hydrol, Publ.* 52, pp. 478–487.
- HERZBERG, A. 1901. Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. *J. Gasbeleucht. Wasserversorg.*, 44, pp. 815–819.
- HEWLETT, J. D., and A. R. HIBBERT. 1963. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. *J. Geophys. Res.*, 68, pp. 1081–1087.
- HEWLETT, J. D., and A. R. HIBBERT. 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *Forest Hydrology*, ed. W. E. Sopper and H. W. Lull. Pergamon Press, Oxford, pp. 275–290.
- HEWLETT, J. D., and W. L. NUTTER. 1970. The varying source area of streamflow from upland basins. *Proc. Amer. Soc. Civil Engrs. Symp. Interdisciplinary Aspects of Watershed Management*, Montana State University, Bozeman, pp. 65–93.
- HIGGINS, G. H. 1959. Evaluation of the groundwater contamination hazard from underground nuclear explosives. *J. Geophys. Res.*, 64, pp. 1509–1519.
- HILL, R. A. 1940. Geochemical patterns in Coachella Valley, Calif. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 21.
- HITCHON, B. 1969a. Fluid flow in the Western Canada Sedimentary Basin: 1. Effect of topography. *Water Resources Res.*, 5, pp. 186–195.

Referências Bibliográficas

- HITCHON, B. 1969b. Fluid flow in the Western Canada Sedimentary Basin: 2. Effect of geology. *Water Resources Res.*, 5, pp. 460–469.
- HITCHON, B. 1971. Origin of oil: geological and geochemical constraints. *Origin and Refinery of Petroleum*, Advances in Chemistry Series, No. 103, American Chemical Society, Washington, D.C., pp. 30–66.
- HITCHON, B. 1976. Hydrogeochemical aspects of mineral deposits in sedimentary rocks. *Handbook of Stratabound and Stratiform Ore Deposits*, ed. K. H. Wolf. Elsevier, New York, pp. 53–66.
- HITCHON, B. 1977. Geochemical links between oil fields and ore deposits in sedimentary rocks. *Proc. Forum on Oil and Ore in Sediments*, Imperial College, London, 34 pp.
- HITCHON, B., and I. FRIEDMAN. 1969. Geochemistry and origin of formation waters in the Western Canada Sedimentary Basin: 1. Stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 35, pp. 1321–1349.
- HITCHON, B., and J. HAYS. 1971. Hydrodynamics and hydrocarbon occurrences, Surat Basin, Queensland, Australia. *Water Resources Res.*, 7, pp. 658–676.
- HITCHON, B., G. K. BILLINGS, and J. E. KLOVAN. 1971. Geochemistry and origin of formation waters in the Western Canada Sedimentary Basin: III. Factors controlling chemical composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 35, pp. 567–598.
- HOAG, R. B., and G. R. WEBBER. 1976. Significance for mineral exploration of sulphate concentrations in groundwaters. *CIM Bull.*, 69, no. 776, pp. 86–91.
- HOBSON, G. 1967. Seismic methods in mining and groundwater exploration. *Proc. Can. Centennial Conf. Mining Groundwater Geophys. Geol. Surv. Can., Econ. Geol. Rept.* 26, pp. 148–176.
- HODGE, R. A. L., and R. A. FREEZE. 1977. Groundwater flow systems and slope stability. *Can. Geotech J.*, 14, pp. 466–476.
- HOEK, E., and J. BRAY. 1974. *Rock Slope Engineering*. Institute of Mining and Metallurgy, London.
- HOEKSTRA, P. 1966. Moisture movement in soils under temperature gradients with the cold-side temperature below freezing. *Water Resources Res.*, 2, pp. 241–250.
- HOLLAND, H. D., T. V. KIRSIPU, J. S. HUEFNER, and U. M. OXBURGH. 1964. On some aspects of the chemical evolution of cave waters. *J. Geol.*, 72, no. 1, pp. 36–67.
- HOLMES, R. M., and G. W. ROBERTSON. 1959. A modulated soil moisture budget. *Monthly Weather Rev.*, 87, no. 3, pp. 1–7.
- HORNBERGER, G. M., I. REMSON, and A. A. FUNGAROLI. 1969. Numeric studies of a composite soil moisture groundwater system. *Water Resources Res.*, 5, pp. 797–802.
- HORNBERGER, G. M., J. EBERT, and I. REMSON. 1970. Numerical solution of the Boussinesq equation for aquifer-stream interaction. *Water Resources Res.*, 6, pp. 601–608.
- HORTON, R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 14, pp. 446–460.

Referências Bibliográficas

- HOUSTON, W. N. 1972. The surface chemistry and geochemistry of feldspar weathering. Unpublished Master's thesis, McMaster University.
- HOWARD, A. D. 1964a. Processes of limestone cavern development. *Intern. J. Speleol.*, 1, pp. 47–60.
- HOWARD, A. D. 1964b. Model for cavern development under artesian groundwater flow, with special reference to the Black Hills. *Nat. Speleol. Soc. Bull.*, 26, pp. 7–16.
- HOWARD, A. D., and B. Y. HOWARD. 1967. Solution of limestone under laminar flow between parallel boundaries. *Caves and Karst*, 9, pp. 25–40.
- HUBBERT, M. K. 1940. The theory of groundwater motion. *J. Geol.*, 48, pp. 785–944.
- HUBBERT, M. K. 1954. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 37, pp. 1954–2026.
- HUBBERT, M. K. 1956. Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids. *Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng.*, 207, pp. 222–239.
- HUBBERT, M. K., and W. W. RUBEY. 1959. Role of fluid pressures in mechanics of overthrust faulting: I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 70, pp. 115–166.
- HUGGENBERGER, F., J. LETEY, and W. J. FARMER. 1972. Observed and calculated distribution of lindane in soil columns as influenced by water movement. *J. Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36, pp. 544–548.
- HUGHES, G. M., R. A. LANDON, and R. N. FARVOLDEN. 1971. Hydrogeology of solid waste disposal sites in northeastern Illinois. U.S. Environ. Protection Agency Rept. SW-12D, 154 pp.
- HUNTOON, P. W. 1974. Predicting water-level declines for alternative groundwater developments in the Upper Big Blue River Basin, Nebraska. Univ. Nebraska, Inst. Agr. Natural Resources, Resource Rept., 106 pp.
- HVORSLEV, M. J. 1951. Time lag and soil permeability in groundwater observations. U.S. Army Corps Engrs. Waterways Exp. Sta. Bull. 36, Vicksburg, Miss.
- IBRAHIM, H. A., and W. BRUTSAERT. 1965. Inflow hydrographs from large unconfined aquifers. *J. Irr. Drain. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 91 (IR2), pp. 21–38.
- ILIFF, N. A. 1973. Organic chemicals in global aspects of chemistry. *Toxicology and Technology as Applied to the Environment*, Vol. 2, ed. F. Coulson and F. Korte. Academic Press, New York, 64 pp.
- INESON, J. ., and R. A. DOWNING. 1964. The groundwater component of river discharge and its relationship to hydrogeology. *J. Inst. Water Eng.*, 18, pp. 519–541.
- INESON J., and R. F. PACKHAM. 1967. Contamination of water by petroleum products. *The Joint Problems of the Oil and Water Industry*, ed. Peter Hepple. Proc. Symp. Brighton, England, Inst. Petrol., pp. 97–116.
- IRMAY, S. 1958. On the theoretical derivation of Darcy and Forchheimer formulas. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 39, pp. 702–707.

Referências Bibliográficas

- JACOB, C. E. 1939. Fluctuations in artesian pressure produced by passing railroad trains as shown in a well on Long Island, New York. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 20, pp. 666–674.
- JACOB, C. E. 1940. On the flow of water in an elastic artesian aquifer. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 2, pp. 574–586.
- JACOB, C. E. 1950. Flow of groundwater. *Engineering Hydraulics*, ed. H. Rouse. John Wiley & Sons, New York, pp. 321–386.
- JACOBSON, R. L., and D. LANGMUIR. 1970. The chemical history of some spring waters in carbonate rocks. *Ground Water*, 8, pp. 5–9.
- JAEGER, J. C. 1971. Friction of rocks and stability of rock slopes. *Géotechnique*, 21, pp. 97–134.
- JAEGER, C. 1972. *Rock Mechanics and Engineering*. Cambridge University Press, London.
- JAKUCS, L. 1973. The karstic corrosion of naturally occurring limestones in the geomorphology of our age, *Symp. Karst-Morphogenesis Intern. Geogr. Union*, 52 pp.
- JAVANDEL, I., and P. A. WITHERSPOON. 1969. A method of analyzing transient fluid flow in multilayered aquifers. *Water Resources Res.*, 5, pp. 856–869.
- JENNE, E. A. 1968. Control of Mn, Fe, Ni, Cu, and Zn concentration in soils and waters: significant role of hydrous Mn and Fe oxides. *Trace Inorganics in Water*, American Chemical Society Publication 73, pp. 337–387.
- JENSEN, H. E., and K. L. BABCOCK. 1973. Cation-exchange equilibria on a Yolo loam. *Hilgardia*, 41, pp. 475–488.
- JEPPSON, R. W. 1968. Axisymmetric seepage through homogeneous and nonhomogeneous porous mediums. *Water Resources Res.*, 4, pp. 1277–1288.
- JEPPSON, R. W., and R. W. NELSON. 1970. Inverse formulation and finite-difference solution to partially-saturated seepage from canals. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 34, pp. 9–14.
- JOHN, K. W. 1968. Graphical stability analysis of slopes in jointed rock. *J. Soil Mech. Found. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 49 (SM2), pp. 497–526.
- JOHNSON, A. I., and D. A. MORRIS. 1962. Physical and hydrologic properties of water bearing deposits from core holes in the Las Banos–Kettleman City Area, California. U.S. Geol. Surv. Open-File Dept., Denver, Colo.
- JOHNSON, A. I., R. P. MOSTON, and D. A. MORRIS. 1968. Physical and hydrologic properties of water bearing deposits in subsiding areas in central California. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 497A.
- JOHNSTON, P. M. 1962. Geology and ground-water resources of the Fairfax Quadrangle, Virginia. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1539-L.
- JONES, P. H., and H. E. SKIBITZKE. 1956. Subsurface geophysical methods in groundwater hydrology. *Adv. Geophys.*, 3, pp. 241–300.
- KARPLUS, W. J. 1958. *Analog Simulation*. McGraw-Hill, New York.
- KAUFMAN, W. J. 1974. Chemical pollution of ground water. *Water Technol./Quality*, pp. 152–158.

Referências Bibliográficas

- KAY, B. D., and D. L. ELRICK. 1967. Adsorption and movement of lindane in soils. *J. Soil Sci.*, 104, pp. 314–322.
- KAZMANN, R. G. 1956. Safe yield in groundwater development, reality or illusion? *J. Irr. Drain. Div., Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs.*, 82 (IR3), 12 pp.
- KAZMANN, R. G. 1972. *Modern Hydrology*, 2nd ed. Harper & Row, New York.
- KAZMANN, R. G. 1974. Waste surveillance in subsurface disposal projects. *Ground Water Proc. 2nd NWWA-EPA National Ground Water Quality Symp.*, 1, pp. 418–426.
- KEMPER, W. D., J. OLSEN, and C. J. DEMOODY. 1975. Dissolution rate of gypsum in flowing groundwater. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, pp. 458–463.
- KERN, D. B. 1960. The hydration of carbon dioxide. *J. Chem. Educ.*, 37, pp. 14–23.
- KEYS, W. S. 1967. Borehole geophysics as applied to groundwater. *Proc. Canadian Centennial Conf. Mining Groundwater Geophys. Geol. Surv. Can., Econ. Geol. Rept.* 26, pp. 598–612.
- KEYS, W. S. 1968. Logging in groundwater hydrology. *Groundwater*, 6, pp. 10–18.
- KHARAKA, Y. K., and I. BARNES. 1973. SOLMNEQ, solution—mineral equilibrium computations. *U.S. Geol. Surv. Computer Contr. NTIS Rept.* PB2-15899.
- KHARAKA, Y. K., and F. A. F. BERRY. 1973. Simultaneous flow of water and solutes through geological membranes: I. Experimental investigation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, pp. 2577–2603.
- KHARAKA, Y. K., and W. C. SMALLEY. 1976. Flow of water and solutes through compacted clays. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 60, pp. 973–980.
- KHARAKA, Y. K., F. A. F. BERRY, and I. FRIEDMAN. 1973. Isotopic composition of oil-field brines from Kettleman North Dome, California, and their geologic implications. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, pp. 1899–1908.
- KIMMEL, G. E., and O. C. BRAIDS. 1974. Leachate plumes in a highly permeable aquifer. *Ground Water*, 12, pp. 388–393.
- KIPP, K. L. 1973. Unsteady flow to a partially penetrating finite radius well in an unconfined aquifer. *Water Resources Res.*, 9, pp. 448–462.
- KIRKBY, M. J., and R. J. CHORLEY. 1967. Throughflow, overland flow, and erosion. *Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydrol.*, 12, no. 3, pp. 5–21.
- KIRKHAM, D. 1964. Soil Physics. *Handbook of Applied Hydrology*, ed. V. T. Chow. McGraw-Hill, New York, pp. 5.1–5.26.
- KIRKHAM, D. 1967. Explanation of paradoxes in Dupuit-Forchheimer seepage theory. *Water Resources Res.*, 3, pp. 609–622.
- KIRKHAM, D., and W. L. POWERS. 1972. *Advanced Soil Physics*. Wiley-Interscience, New York.
- KLEIN, J. M. 1974. Geochemical behaviour of silica in the artesian ground water of the closed basin area, San Luis Valley, Colorado. Unpublished M.Sc. thesis, School of Mines, Boulder, Col.
- KLEIN, S. A. 1964. The fate of detergents in septic tank systems and oxidation ponds. *Sanitary Eng. Res. Lab. SERL Rpt. No. 64-1*, University of California, Berkeley.

Referências Bibliográficas

- KLOTZ, D., and H. MOSER. 1974. Hydrodynamic dispersion as aquifer characteristic: model experiments with radioactive tracers. *Isotope Techniques in Groundwater Hydrology*, Vol. 2. Intern. Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 341–354.
- KLUTE, A. 1965a. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. *Methods of Soil Analysis*, Part 1, ed. C. A. Black. American Society of Agronomy, Madison, Wis., pp. 210–221.
- KLUTE, A. 1965b. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Methods of Soil Analysis*, Part 1, ed. C. A. Black. American Society of Agronomy, Madison, Wis., pp. 253–261.
- KLUTE, A. 1965c. Water diffusivity. *Methods of Soil Analysis*, Part 1, ed. C. A. Black. American Society of Agronomy, Madison, Wis., pp. 262–272.
- KNUTSON, G. 1966. Tracers for ground water investigations. *Groundwater Problems* (Proc. Intern. Symp. Stockholm, Sweden). Pergamon Press, Oxford.
- KOHOUT, F. A. 1960a. Cyclic flow of salt water in the Biscayne aquifer of southeastern Florida. *J. Geophys. Res.*, 65, pp. 2133–2141.
- KOHOUT, F. A. 1960b. Flow pattern of fresh water and salt water in the Biscayne aquifer of the Miami area, Florida. *Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.* 52, pp. 440–448.
- KONIKOW, L. F., and J. D. BREDEHOEFT. 1974. Modeling flow and chemical quality changes in an irrigated steam-aquifer system. *Water Resources Res.*, 10, no. 3, pp. 546–562.
- KRAUSKOPF, K. B. 1956. Dissolution and precipitation of silica at low temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 10, pp. 1–26.
- KRAUSKOPF, K. B. 1967. *Introduction to Geochemistry*. McGraw-Hill, New York.
- KREITLER, C. W., and D. C. JONES. 1975. Natural soil nitrate: the cause of the nitrate contamination of ground water in Runnels county, Texas. *Ground Water*, 13, no. 1, pp. 53–61.
- KRONE, R. B., P. H. MCGAUHEY, and H. B. GOTAAS. 1957. Direct discharge of groundwater with sewage effluents. *Amer. Soc. Civil Engrs., J. Sanit. Eng. Div.*, 83 (SA4), pp. 1–25.
- KRONE, R. B., G. T. ORLAB, and C. HODGKINSON. 1958. Movement of coliform bacteria through porous media. *Sewage Industrial Wastes*, 30, pp. 1–13.
- KROSZYNSKI, U. I., and G. DAGAN. 1975. Well pumping in unconfined aquifers: the influence of the unsaturated zone. *Water Resources Res.*, 11, pp. 479–490.
- KRUSEMAN, G. P., and N. A. de RIDDER. 1970. Analysis and evaluation of pumping test data. *Intern. Inst. Land Reclamation and Improvement Bull.* 11, Wageningen, The Netherlands.
- KRYNINE, D. P., and W. R. JUDD. 1957. *Principles of Engineering Geology and Geotechnics*. McGraw-Hill, New York.
- KU, H. F. H., B. G. KATZ, D. J. S. SULAM, and R. K. KRULIKAS. 1978. Scavenging of chromium and cadmium by aquifer material, South Farmingdale—Massapequa area, Long Island, New York. *Ground Water*, 16, pp. 112–118.
- KUBO, A. S., and D. J. ROSE. 1973. Disposal of nuclear wastes. *Science*, 182, pp. 1205–1211.

Referências Bibliográficas

- LAL, D., and B. PETERS. 1962. Cosmic ray produced isotopes and their applications in problems of geophysics. *Progr. Elementary Particle Cosmic Ray Phys.*, 6, pp. 1–74.
- LAL, D., and H. E. SUESS. 1968. The radioactivity of the atmosphere and hydrosphere. *Ann. Rev. Nuclear Sci.*, 18, pp. 407–434.
- LAMBE, T. W. 1951. *Soil Testing for Engineers*. John Wiley & Sons, New York, 165 pp.
- LANCE, J. C., C. P. GERBA, and J. L. MELNICK. 1977. Virus movement in soil columns flooded with secondary sewage effluent. *Appl. J. Environ. Microbiol.*
- LANEY, R. L. 1965. A comparison of the chemical composition of rainwater and ground water in western North Carolina. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 525-C*, pp. C187—189.
- LANGMUIR, D. 1970. Eh-pH determination. *Methods in Sedimentary Petrology*, ed. R. E. Carver. Wiley-Interscience, New York, pp. 597–635.
- LANGMUIR, D. 1971. The geochemistry of some carbonate ground waters in central Pennsylvania. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 35, pp. 1023–1045.
- LANGMUIR, D., and D. O. WHITTEMORE. 1971. Variation in the stability of precipitated ferric oxyhydroxides. *Proc. Symp. Nonequilibrium Systems in Natural Water Chem.* ed. J. D. Hem. *Advances in Chemistry Series No. 106*, American Chemical Society, Washington, D. C., pp. 209–234.
- LATTMAN, L. A., and R. R. PARIZEK. 1964. Relationship between fracture traces and the occurrence of ground water in carbonate rocks. *J. Hydrol.*, 2, pp. 73–91.
- LECKIE, J. O., and R. O. JAMES. 1974. Control mechanisms for trace metals in natural waters. *Aqueous-Environmental Chemistry of Metals*, ed. A. J. Rubin, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich., pp. 1–127.
- LECKIE, J. O., and M. B. NELSON. In press. Role of natural heterogeneous Sulfide systems in controlling the concentration and distribution of heavy metals. *Amer. J. Sci.*
- LECKIE, J. O., J. G. PACE, and C. HALVADAKIS. 1975. Accelerated refuse stabilization through controlled moisture application. Unpublished report, Dept. Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, Calif.
- LEE, C. H., and T. S. CHENG. 1974. On seawater encroachment in coastal aquifers. *Water Resources Res.*, 10, pp. 1039–1043.
- LEE, D. R. 1976. The role of groundwater in eutrophication of a lake in glacial outwash terrain. *Intern. J. Speleol.*, 8, pp. 117–126.
- LEE, D. R. 1977. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. *Limnol. Oceanogr.*, 22, pp. 140–147.
- LEE, D. R., and J. A. CHERRY. In press. A field exercise on groundwater flow using seepage meters and minipiezometers. *J. Geol. Educ.*
- LEENHEER, J. A., and E. W. D. HUFFMAN, JR. 1977. Classification of organic solutes in water using macroreticular resins. *J. Res., U.S. Geol. Surv.*
- LEGGET, R. F. 1962. *Geology and Engineering*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.

Referências Bibliográficas

- LEGRAND, H. E. 1949. Sheet structure, a major factor in the occurrence of ground water in the granites of Georgia. *Econ. Geol.*, 44, pp. 110–118.
- LEGRAND, H. E. 1954. Geology and ground water in the Statesville area. North Carolina: North Carolina Dept. Conservation Development, Div. Mineral Resources Bull. 68.
- LENNOX, D. H., and V. CARLSON. 1967. Integration of geophysical methods for groundwater exploration in the prairie provinces, Canada. *Proc. Can. Centennial Conf. Mining Groundwater Geo-Phys., Geol. Surv. Can., Econ. Geol. Rept.* 26, pp. 517–533.
- LEVORSEN, A. I. 1967. *Geology of Petroleum*, 2nd ed. W. H. Freeman, San Francisco, 724 pp.
- LEWIS, B.-A. G. 1976. Selenium in biological systems, and pathways for its volatilization in higher plants. *Environmental Biogeochemistry*, ed. J. O. Nriagir. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich., p. 1.
- LIAKOPOULOS, A. C. 1965a. Theoretical solution of the unsteady unsaturated flow problems in soils. *Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydrol.*, 10, pp. 5–39.
- LIAKOPOULOS, A. C. 1965b. Variation of the permeability tensor ellipsoid in homogeneous anisotropic soils. *Water Resources Res.*, 1, pp. 135–141.
- LINSLEY, R. K., M. A. KOHLER, and J. L. H. PAULHUS. 1975. *Hydrology for Engineers*. McGraw-Hill, New York.
- LISSEY, A. 1967. The use of reducers to increase the sensitivity of piezometers. *J. Hydrol.*, 5, pp. 197–205.
- LISSEY, A. 1968. Surficial mapping of groundwater flow systems with application to the Oak River Basin, Manitoba. Ph.D. thesis, University of Saskatchewan, 141 pp.
- LOHMAN, S. W., ed. 1972. Definitions of selected groundwater terms—revisions and conceptual refinements. *U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper* 1988, 21 pp.
- LONDE, P., G. VIGIER, and R. VORMERINGER. 1969. Stability of rock slopes—a three dimensional study. *J. Soil Mech. Found. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 95 (SM1), pp. 235–262.
- LOUIS, C. 1969. A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses. Imperial College, Rock Mech. Res. Rept. 10.
- LOVELL, R. E., L. DUCKSTEIN, and C. C. KISIEL. 1972. Use of subjective information in estimation of aquifer parameters. *Water Resources Res.*, 8, pp. 680–690.
- LUMB, P. 1975. Slope failures in Hong Kong. *Quart. J. Eng. Geol.*, 8, pp. 31–65.
- LUTHIN, J. N. 1953. An electrical resistance network for solving drainage problems. *Soil Sci.*, 75, pp. 259–274.
- LUTHIN, J. N., and P. R. DAY. 1955. Lateral flow above a sloping water table. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 18, pp. 406–410.
- LUTHIN, J. N., and R. E. GASKELL. 1950. Numerical solutions for tile drainage of layered soils. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 31, pp. 595–602.
- LVOVITCH, M. I. 1970. World water balance: general report. *Proc. Symp. World Water Balance, Intern. Assoc. Sci. Hydrol.*, 2, pp. 401–415.

Referências Bibliográficas

- MAASLAND, M. 1957. Soil anisotropy and land drainage. Drainage of Agricultural Lands, ed. N. Luthin. American Society of Agronomy, Madison, Wis., pp. 216–285.
- MADDOCK, T. 1974. The operation of a stream-aquifer system under stochastic demands. Water Resources Res., 10, pp. 1–10.
- MALCOLM, R. L., and J. A. LEENHEER. 1973. The usefulness of organic carbon parameters in water quality investigations. Inst. Environ. Sci. Proc., No. 19, Anaheim, Calif., pp. 336–340.
- MANTELL, C. L., ed. 1975. Solid Wastes: Origin, Collection, Processing, and Disposal. Wiley-Interscience, New York, 1127 pp.
- MARCUS, H., and D. E. EVENSON. 1961. Directional permeability in anisotropic porous media. Water Resources Center Contrib. No. 31, University of California, Berkeley.
- MARINO, M. A. 1975a. Artificial groundwater recharge: I. Circular recharging area. J. Hydrol., 25, pp. 201–208.
- MARINO, M. A. 1975b. Artificial groundwater recharge: II. Rectangular recharging area. J. Hydrol., 26, pp. 29–37.
- MASCH, F. D., and K. J. DENNY. 1966. Grain-size distribution and its effect on the permeability of unconsolidated sands. Water Resources Res., 2, pp. 665–677.
- MATTHESS, G. 1974. Heavy metals as trace constituents in natural and polluted groundwaters. Geol. Mijnbouw, 53, pp. 149–155.
- MATHEWS, W. H., and J. R. MACKAY. 1960. Deformation of soils by glacier ice and the influence of pore pressure and permafrost. Roy. Soc. Can. Trans., S4, ser. 3, sec. 4, pp. 27–36.
- MAWSON, C. A., and A. E. RUSSELL. 1971. Canadian experience with a national waste-management facility. Management of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, IAEA, Vienna, pp. 183–194.
- MAXEY, G. B. 1964. Hydrogeology. Handbook of Applied Hydrology, ed. V. T. Chow. McGraw-Hill, New York, pp. 4.1–4.38.
- MAXWELL, J. C. 1964. Influence of depth, temperature, and geologic age on porosity of quartzose sandstone. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 48, pp. 697–709.
- MAZOR, E. 1972. Paleotemperatures and other hydrological parameters deduced from noble gases dissolved in groundwaters: Jordan Rift Valley, Israel. Geochim. Cosmochim. Acta, 36, pp. 1321–1336.
- MCBRIDE, M. S., and H. O. PFANNKUCH. 1975. The distribution of seepage within lakebeds. U.S. Geol. Surv. J. Res., 3, no. 5, pp. 505–512.
- MCCARTY, P. L. 1965. Thermodynamics of biological synthesis and growth. Advances in Water Pollution Research, ed. J. K. Baars, Pergamon Press, New York, pp. 169–187.
- MCCRACKEN, D. D., and W. S. DORN. 1964. Numerical Methods and Fortran Programming with Applications in Engineering and Science. John Wiley & Sons, New York.
- MCDONALD, H. R., and D. WANTLAND. 1961. Geophysical procedures in ground water study. Trans. Amer. Soc. Civil Engrs., 126, pp. 122–135.

Referências Bibliográficas

- MCGARY, L. M., and T. W. LAMBERT. 1962. Reconnaissance of ground-water resources of the Jackson Purchase region, Kentucky. U.S. Geol. Surv. Hydrol. Atlas 13.
- MCGINNIS, L. D. 1968. Glaciation as a possible cause of mineral deposition. *Econ. Geol.*, 63, pp. 390–400.
- MCGUINNESS, C. L. 1963. The role of groundwater in the National Water Situation. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1800.
- MCKEE, J. E. 1956. Oily substances and their effects on the beneficial uses of water. State Water Pollution Control Board Publ. 16, Sacramento, Calif.
- MCKEE, J. E., F. B. LAVERLY, and R. M. HERTEL. 1972. Gasoline in groundwater. *J. Water Pollution Control Fed.*, 44, pp. 293–302.
- MCKELVEY, J. G., and I. H. MILNE. 1962. The flow of salt through compacted clay. *Clay and Clay Minerals*, 9, pp. 248–259.
- MCWHORTER, D. B. 1971. Infiltration affected by flow of air. Colorado State Univ. Hydrol. Paper 49, Fort Collins, Colo.
- MEINZER, O. E. 1923. The occurrence of groundwater in the United States, with a discussion of principles. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 489.
- MEINZER, O. E. 1927. Plants as indicators of groundwater. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 577, 91 pp.
- MERCER, J. W., G. F. PINDER, and I. G. DONALDSON. 1975. A Galerkin finite-element analysis of the hydrothermal system at Wairakei, New Zealand. *J. Geophys. Res.* 80, pp. 2608–2621.
- MEYBOOM, P. 1961. Estimating groundwater recharge from stream hydrographs. *J. Geophys. Res.*, 66, pp. 1203–1214.
- MEYBOOM, P. 1964. Three observations on stream-flow depletion by phreatophytes. *J. Hydrol.*, 2, pp. 248–261.
- MEYBOOM, P. 1966a. Groundwater studies in the Assiniboine River Drainage Basin: I. The evaluation of a flow system in south-central Saskatchewan. *Geol. Surv. Can. Bull.* 139, 65 pp.
- MEYBOOM, P. 1966b. Unsteady groundwater flow near a willow ring in hummocky moraine. *J. Hydrol.*, 4, pp. 38–62.
- MEYBOOM, P. 1967. Groundwater studies in the Assiniboine River Drainage Basin: II. Hydrologic characteristics of phreatophytic vegetation in south-central Saskatchewan. *Geol. Surv. Can. Bull.* 139, 64 pp.
- MEYBOOM, P. 1968. Hydrogeology: A decennial appraisal and forecast. *The Earth Sciences in Canada: A Centennial Appraisal and Forecast*, ed. E. R. W. Neale. Roy. Soc. Can. Spec. Publ. 11, pp. 203–221.
- MILLER, D. W., F. A. DELUCA, and T. L. TESSIER. 1974. Groundwater contamination in the northeast states. U.S. Environ. Protect. Agency Rept. EPA 660/2-74-056.
- MOENCH, A. F., and T. A. PRICKETT. 1972. Radial flow in an infinite aquifer undergoing conversion from artesian to water table conditions. *Water Resources Res.*, 8, pp. 494–499.

Referências Bibliográficas

- MOHSEN, M. F. N. 1975. Gas migration from sanitary landfills and associated problems. Unpublished Ph.D. thesis, University of Waterloo.
- MOLLARD, J. D. 1973. Landforms and Surface Materials of Canada: A Stereoscopic Airphoto Atlas and Glossary. J. D. Mollard and Associates Ltd. Regina, Sask., Canada.
- MOOK, W. G. 1972. Application of natural isotopes in ground water hydrology. *Geol. Mijnbouw*, 51.
- MOORE, G. W., and G. NICHOLAS. 1964. *Speleology*. Heath, Boston.
- MOORE, J. E., and L. A. WOOD. 1967. Data requirements and preliminary results of an analog-model evaluation—Arkansas River Valley in Eastern Colorado. *Ground Water*, 5, no. 1, pp. 20–23.
- MORAN, R. E. 1976. Geochemistry of selenium in ground water near Golden, Jefferson County, Colorado. *Geol. Soc. Am. Abst., Am. Meeting*, 8, no. 6, 1018 pp.
- MORAN, S. R. 1971. Glaciotectonic structures in drift. *Till: A Symposium*, ed. R. P. Goldthwait. Ohio State University Press, Columbus. Ohio, pp. 127–248.
- MORAN, S. R., J. A. CHERRY, and J. H. ULMER. 1976. An environmental assessment of a 250 MMSCFD dry ash Surgi coal gasification facility in Dunn County, North Dakota. *Univ. North Dakota, Eng. Exp. Sta. Bull.* 76-12-EES-01.
- MORAN, S. R., J. A. CHERRY, J. H. ULMER, and W. PETERSON. 1978a. Geology and subsurface hydrology of the Dunn Center Area, North Dakota. *North Dakota Geol. Surv. Rept. Invest.* 61.
- MORAN, S. R., G. GROENEWOLD, and J. A. CHERRY. 1978b. Hydrogeologic and geochemical concepts and methods in overburden investigations for reclamation of mined land. *North Dakota Geol. Surv. Rept. Invest.* 62, 150 pp.
- MOREY, G. W., R. O. FOURNIER, and J. J. ROWE. 1962. The solubility of quartz in water in the temperature interval from 25°C to 300°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 26, pp. 1029–1043.
- MOREY, G. W., R. O. FOURNIER, and J. J. ROWE. 1964. The solubility of amorphous silica at 25°C. *J. Geophys. Res.*, 69, no. 10, pp. 1995–2002.
- MORGAN, C. O. and M. D. WINNER, JR. 1962. Hydrochemical facies in the 400 foot and 600 foot sands of the Baton Rouge Area, Louisiana. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 450-B, pp. B120–121.
- MORGENSTERN, N. R., and V. E. PRICE. 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15, pp. 79–93.
- MUNNICH, K. O. 1957. Messung des ¹⁴C-Gehaltes von hartem Grundwasser. *Naturwissenschaften*, 44, p. 32.
- MURRAY, C. R. 1973. Water use, consumption, and outlook in the U.S. in 1970. *J. Amer. Water Works Assoc.*, 65, pp. 302–308.
- MURRAY, C. R., and E. B. REEVES. 1972. Estimated use of water in the United States in 1970. *U.S. Geol. Surv. Circ.* 676.
- NACE, R. L., ed. 1971. Scientific framework of world water balance. *UNESCO Tech. Papers Hydrol.*, 7, 27 pp.

Referências Bibliográficas

- NARASIMHAN, T. N. 1975. A unified numerical model for saturated-unsaturated groundwater flow. Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley.
- NELSON, R. W. 1968. In place determination of permeability distribution for heterogeneous porous media through analysis of energy dissipation. Soc. Petrol. Engrs. J., 8, pp. 33–42.
- NEUMAN, S. P. 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. Water Resources Res., 8, pp. 1031–1045.
- NEUMAN, S. P. 1973a. Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty. Water Resources Res., 9, pp. 1006–1021.
- NEUMAN, S. P. 1973b. Supplementary comments on theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. Water Resources Res., 9, pp. 1102–1103.
- NEUMAN, S. P. 1974. Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response. Water Resources Res., 10, pp. 303–312.
- NEUMAN, S. P. 1975a. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. Water Resources Res., 11, pp. 329–342.
- NEUMAN, S. P. 1975b. Role of subjective value judgement in parameter identification. Modeling and Simulation of Water Resources Systems, ed. G. C. Vansteenkiste. North-Holland, Amsterdam, pp. 59–82.
- NEUMAN, S. P., and P. A. WITHERSPOON. 1969a. Theory of flow in a confined two-aquifer system. Water Resources Res., 5, pp. 803–816.
- NEUMAN, S. P., and P. A. WITHERSPOON. 1969b. Applicability of current theories of flow in leaky aquifers. Water Resources Res., 5, pp. 817–829.
- NEUMAN, S. P., and P. A. WITHERSPOON. 1972. Field determination of the hydraulic properties of leaky multiple-aquifer systems. Water Resources Res., 8, pp. 1284–1298.
- NEWBURY, R. W., J. A. CHERRY, and R. A. Cox. 1969. Groundwater-streamflow systems in Wilson Creek Experimental Watershed. Can. J. Earth Sci., 6, pp. 613–623.
- NIGHTINGALE, H. I. 1970. Statistical evaluation of salinity and nitrate content and trends beneath urban and agricultural areas. Ground Water, 8, no. 1, pp. 22–28.
- NOBLE, E. A. 1963. Formation of ore deposits by water of compaction. Econ. Geol. 58, pp. 1145–1156.
- NORTON, D., and J. KNIGHT. 1977. Transport phenomena in hydrothermal systems: cooling plutons. Amer. J. Sci., 277, pp. 937–981.
- OGATA, A. 1970. Theory of dispersion in a granular medium. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 411-I.
- OGATA, A., and R. B. BANKS. 1961. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 411-A.
- OLSEN, H. W. 1969. Simultaneous fluxes of liquid and charge in saturated kaolinite. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 33, pp. 334–338.

Referências Bibliográficas

- ONISHI, H., and E. B. SANDELL. 1955. Geochemistry Of arsenic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 7, pp. 1–33.
- OPPENHEIMER, C. H. 1963. Editor's Preface. *Introduction to Geological Microbiology*, by S. V. Kuznetsov, M. V. Ivanov, and N. N. Lyalikova. McGraw-Hill, New York, 251 pp.
- OREGON STATE UNIVERSITY. 1974. Disposal of environmentally hazardous wastes. Task Force Rept. Environ. Health Sci. Center Oregon State Univ.
- PACES, T. 1973. Steady-state kinetics and equilibrium between ground water and granitic rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, pp. 2641–2663.
- PACES, T. 1976. Kinetics of natural water systems. *Proc. Symp. Interpretation of Environmental Isotopes and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology*, Intern. Atomic Energy Agency Spec. Publ., Vienna.
- PALCIAUSKAS, V. V., and P. A. DOMENICO. 1976. Solution chemistry, mass transfer, and the approach to chemical equilibrium in porous carbonate rocks and sediments. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87, pp. 207–214.
- PAPADOPOULOS, I. S., J. D. BREDEHOEFT, and H. H. COOPER. 1973. On the analysis of slug test data. *Water Resources Res.*, 9, pp. 1087–1089.
- PARIZEK, R. R. 1969. Glacial ice-contact rings and ridges. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 123, INQUA volume.
- PARIZEK, R. R., and L. J. DREW. 1966. Random drilling for water in carbonate rocks. *Proc. Symp. Short Course Computers Operations Res. Mineral Ind. Exp. Sta.*, Vol. 3. Pennsylvania State University. University Park, Pa., pp. 1–22.
- PARK, C. F., Jr., and R. A. MacDIARMID. 1975. *Ore Deposits*, 3rd ed. W. H. Freeman, San Francisco, 529 pp.
- PARKER, G. G., and V. T. STRINGFIELD. 1950. Effects of earthquakes, trains, tides, winds, and atmospheric pressure changes on water in the geologic formations of southern Florida. *Econ. Geol.*, 45, pp. 441–160.
- PARKS, G. A. 1967. Aqueous surface chemistry of oxides and complex oxide minerals. *Equilibrium Concepts in Natural Water Systems*. American Chemical Society, Washington, D.C., pp. 121–160.
- PARSONS, M. L. 1970. Groundwater thermal regime in a glacial complex. *Water Resources Res.*, 6, pp. 1701–1720.
- PATTEN, E. P. 1965. Design. construction and use of electric analog model. *Analog Model Study of Groundwater in Houston District*, by L. A. Wood and R. K. Gabrysch. *Texas Water Comm. Bull.* 6508.
- PATTEN, E. P., and G. D. BENNETT. 1963. Application of electrical and radioactive well logging to ground-water hydrology. *U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper* 1544-D.
- PATTON, F. D., and D. U. DEERE. 1971. Geologic factors controlling slope stability in open pit mines. *Stability in Open Pit Mining*. ed. C. O. Brawner and V. Milligan. American Institute of Mining Engineers. New York. pp. 23–18.

Referências Bibliográficas

- PATTON, F. D., and A. J. HENDRON, Jr. 1974. General report on mass movements. Proc. 2nd Intern. Congr., Intern. Assoc. Eng. Geol., Sao Paulo, Brazil, 2, pp. V-GR.1–V-GR.57.
- PAULING, L. and P. PAULING. 1975. Chemistry. W. H. Freeman, San Francisco, 767 pp.
- PAYNE, B. R. 1972. Isotope hydrology. Adv. Hydrosci., 8, pp. 95–138.
- PEARSON, F. J. Jr., and I. FRIEDMAN. 1970. Sources of dissolved carbonate in an aquifer free of carbonate minerals. Water Resources Res., 6, pp. 1775–1781.
- PEARSON, F. J. Jr., and B. B. HANSHAW. 1970. Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon-14 dating. Isotope Hydrology. International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 271–286.
- PEARSON, F. J. Jr., and D. E. WHITE. 1967. Carbon-14 ages and flow rates of water in Carrizo sand, Atascosa County, Texas. Water Resources Res., 3, pp. 251–261.
- PECK, A. J. 1960. The water table as affected by atmospheric pressure. J. Geophys. Res., 65, pp. 2383–2388.
- PECKHAM, A. E., and W. G. BELTER. 1962. Considerations for selection and operation of radioactive burial sites. 2nd Ground Disposal Radioactive Wastes Conf., USAEC Rept. TED-7668, Book 2, Chalk River, Canada. pp. 428–436.
- PELTON, W. L., K. M. KING, and C. B. TANNER. 1960. An evaluation of the Thornthwaite and mean temperature methods for determining potential evapotranspiration. Agronomy J., 52, pp. 387–395.
- PENMAN, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. Lond., A193, pp. 120–145.
- PERCIOUS, D. J. 1969. Aquifer dispersivity by recharge-discharge of a fluorescent dye tracer through a single well. Unpublished M.Sc. thesis, University of Arizona.
- PERKINS, T. K., and O. C. JOHNSTON. 1963. A review of diffusion and dispersion in porous media. J. Soc. Petrol. Eng., 3, pp. 70–83.
- PERLMUTTER, N. M., M. LIEBER, and H. L. FRAUENTHAL. 1964. Contamination of ground water by detergents in a suburban environment—south Farmingdale area, Long Island, New York. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 501-C, pp. 170–175.
- PETERSON, R. 1954. Studies of the Bearspaw Shale at a damsite. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., Soil Mech. Found. Div., Vol. 80, No. 476.
- PETROVIC, R., R. A. BERNER, and M. B. GOLDBERGER. 1976. Rate control in dissolution of alkali feldspars: 1. Study of residual feldspar grains by x-ray photoelectron microscopy. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, pp. 537–548.
- PFERD, J. W., R. H. FAKUNDINY, and J. F. DAVIS. 1977. Geology and integrity of low-level waste burial techniques at West Valley, New York. Symp. Management Low-Level Radioactive Waste, Atlanta, Ga.
- PHILIP, J. R. 1957a. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. Soil Sci., 83, pp. 345–357.
- PHILIP, J. R. 1957b. The theory of infiltration: 2. The profile at infinity. Soil Sci., 83, pp. 435–448.

Referências Bibliográficas

- PHILIP, J. R. 1957c. The theory of infiltration: 3. Moisture profiles and relation to experiment. *Soil Sci.*, 84, pp. 163–178.
- PHILIP, J. R. 1957d. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.*, 84, pp. 257–264.
- PHILIP, J. R. 1957e. The theory of infiltration: 5. The influence of the initial moisture content. *Soil Sci.*, 84, pp. 329–339.
- PHILIP, J. R. 1957f. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. *J. Meteor.*, 14, pp. 354–366.
- PHILIP, J. R. 1958a. The theory of infiltration: 6. Effect of water depth over soil. *Soil Sci.*, 85, pp. 278–286.
- PHILIP, J. R. 1958b. The theory of infiltration: 7. *Soil Sci.*, 85, pp. 333–337.
- PHILIP, J. R., and D. A. de VRIES. 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 38, pp. 222–232.
- PICKENS, J. F., and W. C. LENNOX. 1976. Numerical simulation of waste movement in steady groundwater flow systems. *Water Resources Res.*, 12, no. 2, pp. 171–180.
- PICKENS, J. F., J. A. CHERRY, G. E. GRISAK, W. F. MERRITT, and B. RISTO. In press. A multilevel device for water sampling and piezometric monitoring in cohesionless deposits. *Ground Water*.
- PIERSOL, R. J., L. E. WORKMAN, and M. C. WATSON. 1940. Porosity, total liquid saturation, and permeability of Illinois oil sands. *Illinois Geol. Surv. Rept. Invest.* 67.
- PINDER, G. F. 1973. *Illinois Geol. Surv. Rept. Invest.* A Galerkin-finite element simulation of groundwater contamination on Long Island, N.Y. *Water Resources Res.*, 9, no. 6, pp. 1657–1669.
- PINDER, G. F., and J. D. BREDEHOEFT. 1968. Application of the digital computer for aquifer evaluation. *Water Resources Res.*, 4, pp. 1069–1093.
- PINDER, G. F., and H. H. COOPER, Jr. 1970. A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front. *Water Resources Res.*, 6, pp. 875–882.
- PINDER, G. F., and E. O. FRIND. 1972. Application of Galerkins procedure to aquifer analysis. *Water Resources Res.*, 8, pp. 108–120.
- PINDER, G. F., and W. G. GRAY. 1977. *Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology*. Academic Press, New York, 295 pp.
- PINDER, G. F., and J. F. JONES. 1969. Determination of ground-water component of peak discharge from chemistry of total runoff. *Water Resources Res.*, 5, pp. 438–445.
- PINDER, G. F., and S. P. SAUER. 1971. Numerical simulation of flood-wave modification due to bank storage effects. *Water Resources Res.*, 7, pp. 63–70.
- PIPER, A. M. 1960. Interpretation and current status of ground-water rights. *U.S. Geol. Surv. Circ.* 432.

Referências Bibliográficas

- PIPER, A. M. 1970. Disposal of liquid wastes by injection underground—neither myth nor millennium. U.S. Geol. Surv. Circ. 631.
- PIPER, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Trans. Amer. Geophys. Union, 25, pp. 914–923.
- PIRSON, S. J. 1958. Oil Reservoir Engineering. McGraw-Hill, New York.
- PIRSON, S. J. 1963. Handbook of Well Log Analysis for Oil and Gas Formation Evaluation. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- PITEAU, D. R., and F. L. PECKOVER. In press. Rock slope engineering. Landslides: Analysis and Control, ed. R. Schuster and R. Krizek. Transportation Research Board, U.S. Department of Transportation.
- POLAND, J. F. 1972. Subsidence and its control. Underground Waste Management and Environmental Implications. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 18, pp. 50–71.
- POLAND, J. F., and G. H. DAVIS. 1969. Land subsidence due to withdrawal of fluids. Geol. Soc. Amer. Rev. Eng. Geol., 2, pp. 187–269.
- POLUBARINOVA-KOCHINA, P. Ya. 1962. Theory of Groundwater Movement. Princeton University Press, Princeton, N.J., 613 pp.
- POURBAIX, M. J. N., J. VAN MUYLDER, and N. DE ZHOUBOV. 1963. Atlas d'Equilibres Electrochimiques à 25°C. Gauthier-Villars, Paris. (J. A. Franklin, trans., Pergamon Press, London, 1966.)
- PRICKETT, T. A. 1965. Type curve solution to aquifer tests under water table conditions. Ground Water, 3, no. 3, pp. 5–14.
- PRICKETT, T. A. 1975. Modeling techniques for groundwater evaluation. Adv. Hydrosci., 10, pp. 1–143.
- PRICKETT, T. A., and C. G. LONNOQUIST. 1968. Comparison between analog and digital simulation techniques for aquifer evaluation. Proc. Symp. Use Analog Digital Computers Hydrol., Intern. Assoc. Sci. Hydrol., Publ. 81, pp. 625–634.
- PRICKETT, T. A. and C. G. LONNOQUIST. 1971. Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation. Illinois State Water Surv. Bull. 55, 62 pp.
- RAGAN, R. M. 1968. An experimental investigation of partial-area contributions. Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Gen. Assembly, Berne, Publ. 76, pp. 241–249.
- RAINWATER, F. H., and L. O. THATCHER. 1960. Methods for collection and analysis of water samples. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1454, 301 pp.
- RALEIGH, C. B., J. H. HEALY, and J. D. BREDEHOEFT. 1972. Faulting and crustal stress at Rangely Colorado. Flow and Fracture of Rocks Monogr. 16, American Geophysical Union, Washington, D.C. pp. 275–284.
- RASMUSSEN, W. C., and G. E. ANDREASEN. 1959. Hydrologic budget of the Beaverdam Creek basin, Maryland. U.S. Geol. Surv., Water-Supply Paper 1472.
- RAUCH, H. W., and W. B. WHITE. 1977. Dissolution kinetics of carbonate rocks: 1. Effects of lithology on dissolution rate. Water Resources Res., 13, no. 2, pp. 381–394.

Referências Bibliográficas

- REARDON, E. J., and P. FRITZ. 1978. Computer modelling of groundwater ^{13}C and ^{14}C , isotope compositions. *J. Hydrol.*, 36, pp. 201–224.
- REDDELL, D. L., and D. K. SUNADA. 1970. Numerical simulation of dispersion in groundwater aquifers. *Hydrol. Paper No. 41*. Colorado State University, Fort Collins, 79 pp.
- REEVE, R. C. 1965. Hydraulic head. *Methods in Soil Analysis*, Part 1, ed. C. A. Black. American Society of Agronomy, Madison, Wis., pp. 180–196.
- REISENAUER, A. E. 1963. Methods for solving problems of multidimensional, partially-saturated steady flow in soils. *J. Geophys. Res.*, 68, pp. 5725–5733.
- REMSON, I., C. A. APPEL, and R. A. WEBSTER. 1965. Ground-water models solved by digital computer. *J. Hydraul. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 91 (HY3), pp. 133–147.
- REMSON, I., G. M. HORNBERGER, and F. J. MOLZ. 1971. *Numerical Methods in Subsurface Hydrology*. Wiley-Interscience, New York.
- RENDER, F. W. 1970. Geohydrology of the metropolitan Winnipeg area as related to groundwater supply and construction. *Canadian Geotech. J.*, 7, pp. 243–274.
- RENDER, F. W. 1971. Electric analog and digital modeling of the upper carbonate aquifer in the metropolitan Winnipeg area. *Geol. Assoc. Can. Spec. Paper 9*, pp. 311–320.
- RENDER, F. W. 1972. Estimating the yield of the upper carbonate aquifer in the metropolitan Winnipeg area by means of a digital model. *Proc. 24th Intern. Geol. Congr., Sec. 11*, pp. 36–45.
- RETTIE, J. R., and F. W. PATTERSON. 1963. Some foundation considerations at the Grand Rapids Hydroelectric Project. *Eng. J. Eng. Inst. Can.*, 46, no. 12, pp. 32–38.
- RICH, J. L. 1921. Moving underground water as a primary cause of the migration and accumulation of oil and gas. *Econ. Geol.*, 16, pp. 347–371.
- RICHARDS, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, pp. 318–333.
- RICHARDS, L. A. 1965. Physical condition of water in soil. *Methods of Soil Analysis*, Part 1, ed. C. A. Black. American Society of Agronomy, Madison, Wis., pp. 128–152.
- RICHARDS, S. J. 1965. Soil suction measurements with tensiometers. *Methods in Soil Analysis*, Part 1, ed. C. A. Black, American Society of Agronomy, Madison, Wis., pp. 153–163.
- RICHARDSON, R. M. 1962a. Northeastern burial ground studies. 2nd Ground Disposal Radioactive Waste Conf. USAEC Rept. TID-7628 Book 2, Chalk River, Can., pp. 460–461.
- RICHARDSON, R. M. 1962b. Significance of climate in relation to the disposal of radioactive waste at shallow depth below ground. *Proc. on Retention and Migration of Radioactive Ions Through the Soil*. Commissariat à l’Energie Atomique, Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, Saclay, France, pp. 207–211.
- RICHTMYER, R. D. 1957. *Difference Methods Initial Value Problems*. Wiley-Interscience, New York.

Referências Bibliográficas

- RIFAI, M. N. E., W. J. KAUFMAN, and D. K. TODD. 1956. Dispersion phenomena in laminar flow through porous media. Report No. 3. I.E.R. Series 90, Sanitary Eng. Res. Lab., Univ. Calif, Berkeley.
- RILEY, F. S. 1969. Analysis of borehole extensometer data from central California. Proc. Tokyo Symp. Land Subsidence, Intern. Assoc. Sci. Hydrol., 2, pp. 423–431.
- ROBECK, G. G. 1969. Microbial problems in groundwater. *Ground Water*, 7, pp. 33–35.
- ROBERTSON, J. B. 1974. Digital modeling of radioactive and chemical waste transport in the Snake River Plain aquifer at the National Reactor Testing Station, Idaho. U.S. Geol. Surv., Water Resources Div., IDO-22054, Idaho Falls, Idaho.
- ROBERTSON, J. M., C. R. TOUSSAINT, and M. A. JORQUE. 1974. Organic compounds entering ground water from a landfill. *Environ. Protect. Technol. Ser. EPA 660/2-74-077*.
- ROBINSON, R. A., and R. H. STOKES. 1965. *Electrolyte Solutions*, 2nd ed. Butterworth, London.
- ROBINSON, T. W. 1958. Phreatophytes. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1423, 84 pp.
- ROBINSON, T. W. 1964. Phreatophyte research in the western States, March 1959 to July 1964. U.S. Geol. Surv. Circ. 495.
- ROSE, H. E. 1945. An investigation into the laws of flow of fluids through beds of granular material. *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 153, pp. 141–148.
- ROSSINI, F. D., D. D. WAGMAN, W. H. EVANS, S. LEVINE, and I. JAFFE. 1952. Selected values of chemical thermodynamics properties. U.S. Nat. Bur. Standards Circ. 500, 1268 pp.
- ROUTSON, R. C., and R. J. SERNE. 1972. Experimental Support studies for the percol and transport models. Battelle, Pacific Northwest Laboratories BNWL-1719, Richland, Wash.
- ROVERS, F. A., and G. T. FARQUHAR. 1974. Evaluating contaminant attenuation in the soil to improve landfill selection and design. *Proc. Intern. Conf. Land for Waste Management*, Ottawa, Can.
- ROWE, P. W. 1972. The relevance of soil fabric to site investigation practice. *Géotechnique*, 22, pp. 195–300.
- RUBIN, J. 1968. Theoretical analysis of two-dimensional transient flow of water in unsaturated and partly unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, pp. 607–615.
- RUBIN, J., and R. STEINHARDT. 1963. Soil water relations during rain infiltration: 1. Theory. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 27, pp. 246–251.
- RUBIN, J., R. STEINHARDT, and P. REINIGER. 1964. Soil water relations during rain infiltration: II. Moisture content profiles during rains of low intensities. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, pp. 1–5.
- RUNNELS, D. D. 1969. Diagenesis, chemical sediments and the mixing of waters. *J. Sedimentary Petrol.*, 39, pp. 1188–1201.
- SAGAR, B., S. YAKOWITZ, and L. DUCKSTEIN. 1975. A direct method for the identification of the parameters of dynamic nonhomogeneous aquifers. *Water Resources Res.*, 11, pp. 563–570.

Referências Bibliográficas

- SALITERNIK, C. 1972. Groundwater pollution by nitrogen compounds. 6th Intern. Conf. Water Pollution Res., Jerusalem.
- SCALF, M. R. 1977. Groundwater pollution problems in the southwestern United States. U.S. Environ. Protect. Agency, Rept. 600/3-77-012.
- SCALE, M. R., J. W. KEELEY, and C. J. LAFEVERS. 1973. Groundwater pollution in the south central States. U.S. Environ. Protect. Agency Rept. EPA-122-73-268, June.
- SCHEIDEGGER, A. 1960. Physics of Flow Through Porous Media. University of Toronto Press, Toronto, Canada.
- SCHICHT, R. J., and W. C. WALTON. 1961. Hydrologic budgets for three small watersheds in Illinois. Illinois State Water Surv. Rept. Invest. 40.
- SCHIFFMAN, R. L., A. T. F. CHEN, and J. C. JORDAN. 1969. An analysis of consolidation theories. J. Soil Mech. Found. Div., Amer. Soc. Civil Engrs., 95 (SM1), pp. 285-312.
- SCHNEIDER, R. 1962. An application of thermometry to the study of groundwater. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1544-B, 16 pp.
- SCHOELLER, H. 1955. Géochimie des eaux souterraines. Rev. Inst. Franc. Pétrole, Paris, 10, no. 3, pp. 181-213, and 10, no. 4, pp. 219-246.
- SCHOELLER, H. 1959. Arid zone hydrology recent developments. UNESCO Rev., Reicardi, 12.
- SCHOELLER, H. 1962. Les Eaux souterraines. Mason et Cie, Paris.
- SCHOLZ, C. H., L. R. SYKES, and Y. P. AGGARWAL. 1973. Earthquake prediction: a physical basis. Science, 181, pp. 803-810.
- SCHUSTER, R., and R. KRIZEK, eds. In press. Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board, U.S. Department of Transportation.
- SCHWARTZ, F. W. 1974. The origin of chemical variations in groundwaters from a small watershed in southwestern Ontario. Can. J. Earth Sci., 11, no. 7, pp. 893-904.
- SCHWARTZ, F. W. 1975. On radioactive waste management: an analysis of the parameters controlling subsurface contaminant transfer. J. Hydrol., 27, pp. 51-71.
- SCHWILLE, F. 1967. Petroleum contamination of the subsoil—a hydrological problem. The Joint Problems of the Oil and Water Industries. ed. Peter Hepple. Elsevier, Amsterdam, pp. 23-53.
- SCOTT, J. S., and F. W. RENDER. 1964. Effect of an Alaskan earthquake on water levels in wells at Winnipeg and Ottawa, Canada. J. Hydrol., 2, pp. 262-268.
- SCOTT, R. F. 1963. Principles of Soil Mechanics. Addison-Wesley, Reading, Mass.
- SEABER, P. R. 1962. Cation hydrochemical facies of groundwater in the Englishtown Formation, New Jersey. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 450-B, pp. B124-B126.
- SEABURN, G. E. 1970. Preliminary results of hydrologic studies at two recharge basins on Long Island, New York. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 627-C, 17 pp.
- SEIDELL, A. 1958. Solubilities, 1, 4th ed. American Chemical Society, D. van Nostrand Co., Princeton, NJ.

Referências Bibliográficas

- SEGOL, G., and G. F. PINDER. 1976. Transient simulation of saltwater intrusion in southeastern Florida. *Water Resources Res.*, 12, pp. 65–70.
- SHACKELFORD, W. M., and L. H. KEITH. 1976. Frequency of organic compounds identified in water. Analytical Chemistry Branch, Environmental Research Laboratory, Athens, Ga.
- SHARP, J . C. In press. Groundwater. Pit Slope Design Manual. Canada Department of Energy Mines and Resources.
- SHARP, J . C., and Y. N. T. MAINI. 1972. Fundamental considerations on the hydraulic characteristics of joints in rock. *Percolation Through Fissured Rock*. edited by W. Wittke. International Society of Rock Mechanics, Stuttgart.
- SHARP, J. C., Y. N.T. MAINI, and T. R. HARPER. 1972. Influence of groundwater on the stability of rock masses: 1. Hydraulics within rock masses. *Trans. Inst. Min. and Met. Lond.*, 81, pp. A13–A20.
- SHAW, F.S., and R. V. SOUTHWELL. 1941. Relaxation methods applied to engineering problems: VII. Problems relating to the percolation of fluids through porous materials. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A178, pp. 1–17.
- SHERARD, J. L., R. J. WOODWARD, S. F. GIZIENSKI, and W. A. CLEVINGER. 1963. *Earth and Earth-Rock Dams*. John Wiley & Sons, New York.
- SHTERNINA, E. B. 1960. Solubility of gypsum in aqueous solutions of salts. *Intern. Geol. Rev.*, 1, pp. 605–616.
- SHTERNINA, E. B., and E. V. FROLOVA. 1945. Solubility of the system $\text{CaCO}_3\text{--CaSO}_4\text{--NaCl--CO}_2\text{--H}_2\text{O}$ at 25°C. *Compt. Rend. (Doklady) Acad. Sci. URSS*, 47, no. 1, pp. 33–35.
- SILLEN, L. G., and A. E. MARTELL. 1964. Stability Constants of Metal Ion Complexes. *Chem. Soc. Lond. Spec. Publ.* 17.
- SILLEN, L. G. and A. E. MARTELL. 1971. Stability constants of metal ion complexes (Supplement). *Chem. Soc. Lond. Spec. Publ.* 25.
- SIMPSON, F. 1976. Deep well injection of fluid industrial wastes in Canada. *Proc. 15th Ann. Conf, Ontario Petrol. Inst.*
- SINGH, K. P. 1969. Theoretical baseflow curves *J. Hydraul. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 95 (HY6), pp. 2029–2048.
- SKEMPTON, A. W. 1961. Effective stress in soils, concrete and rocks. *Conference on Pore Pressures and Suction in Soils*. Butterworth, London, pp. 4–16.
- SKIBITZKE, H. E., and G. M. ROBERTSON. 1963. Dispersion in groundwater flowing through heterogeneous materials. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 386-B.
- SKINNER, B. J., and P. B. BARTON, Jr. 1973. Genesis of mineral deposits. *Ann. Rev. Earth Planetary Sci.*, 1, pp. 183–211.
- SKLASH, M. G. 1978. Isotope studies of runoff from small headwater basins. Ph.D. thesis, University of Waterloo, Ontario.

Referências Bibliográficas

- SKLASH, M. G., R. N. FARVOLDEN, and P. FRITZ. 1976. A conceptual model of watershed response to rainfall developed through the use of oxygen-18 as a natural tracer. *Can. J. Earth Sci.*, 13, pp. 271–283.
- SMITH, R. E., and D. A. WOOLHISER. 1971. Overland flow on an infiltrating surface. *Water Resources Res.*, 7, pp. 899–913.
- SNOW, D. T. 1968. Rock fracture spacings, openings, and porosities. *J. Soil Mech. Found. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 94, pp. 73–91.
- SNOW, D.T. 1969. Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resources Res.*, 5, pp. 1273–1289.
- SPALDING, R. F., J. R. GORMLY, B. H. CURTIS, and M. E. EXNER. 1978. Nonpoint nitrate contamination of groundwater in Merrick County, Nebraska. *Ground Water*, 16, pp. 86–95.
- SPIEKER, A. M. 1968. Effect of increased pumping of groundwater in the Fairfield-New Baltimore area, Ohio—a prediction by analog-model study. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 605-C.
- STALLMAN, R. W. 1956. Use of numerical methods for analyzing data on groundwater levels. *Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.* 41, pp. 227–231.
- STALLMAN, R. W. 1963. Computation of groundwater velocity from temperature data. *Methods of Collecting and Interpreting Groundwater Data*, ed. R. Bentall, U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1544-H, pp. H36–H46.
- STALLMAN, R. W. 1964. Multiphase fluids in porous media—a review of theories pertinent to hydrologic studies. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 411E.
- STALLMAN, R. W. 1971. Aquifer-test design, observation and data analysis. *Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey*. Chap. B1. Government Printing Office, Washington, D.C.
- STEPHENSON, D. A. 1971. Groundwater flow system analysis in lake environments, with management and planning implications. *Water Resources Bull.*, 7, pp. 1038–1047.
- STEPHENSON, G. R., and R. A. FREEZE. 1974. Mathematical simulation of subsurface flow contributions to snowmelt runoff, Reynolds Creek Watershed, Idaho. *Water Resources Res.*, 10, pp. 284–294.
- STREETER, V. L. 1962. *Fluid Mechanics*, 3rd ed. McGraw-Hill, New York.
- STRELTSOVA, T. D. 1972. Unsteady radial flow in an unconfined aquifer. *Water Resources Res.*, 8, pp. 1059–1066.
- STUART, W. T., E. A. BROWN, and E. C. RHODEHAMEL. 1954. Groundwater investigations of the Marquette iron-mining district. *Michigan. Geol. Surv. Div. Tech. Rept.* 3.
- STUMM, W., and J. J. MORGAN. 1970. *Aquatic Chemistry*. John Wiley & Sons, New York, 583 pp.
- SUAREZ, D. L. 1974. Heavy metals in waters and Soil associated with several Pennsylvania landfills. Unpublished Ph.D. thesis. The Pennsylvania State University, 222 pp.
- SUGISAKI, R. 1959. Measurement of effective flow velocity of groundwater by means of dissolved gases. *Amer. J. Sci.*, 259, pp. 144–153.

Referências Bibliográficas

- SUGISAKI, R. 1961. Geochemical study of ground water. Nagoya Univ. J. Earth Sci., 10, no. 1, pp. 1–33.
- SUMMERS, W. K. 1972. Specific capacities of wells in crystalline rocks. Ground Water, 10, no. 6, pp. 37–47.
- SUMMERS, W. K., and Z. SPIEGAL. 1974. Groundwater Pollution: A Bibliography. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich.
- SUTCLIFFE, R. C. 1970. World water balance: a geophysical problem. Proc. Symp. World Water Balance, Intern. Assoc. Sci. Hydrol., 1, pp. 19–24.
- SWARTZENDRUBER, D. 1962. Non-Darcy flow behaviour in liquid-saturated porous media. J. Geophys. Res., 67, pp. 5205–5213.
- SWEET, B. H., and R. D. ELLENDER. 1972. Electroosmosis: a new technique for concentrating viruses from water. Water Res., 6, pp. 775–779.
- TARDY, Y. 1971. Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs. Chem. Geol., 7, pp. 253–271.
- TAYLOR, G. S., and J. N. LUTHIN. 1969. Computer methods for transient analysis of water table aquifers. Water Resources Res., 5, pp. 144–152.
- TAYLOR, S. A., and J. W. CARY. 1964. Linear equations for the simultaneous flow of matter and energy in a continuous Soil system. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 28, pp. 167–172.
- TERZAGHI, K. 1925. Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage. Franz Deuticke, Vienna.
- TERZAGHI, K. 1950. Mechanism of landslides. Berkey Volume: Application of Geology to Engineering Practice. Geological Society of America, New York, pp. 83–123.
- TERZAGHI, K., and R. B. PECK. 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- THEIS, C. V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans. Amer. Geophys. Union, 2, pp. 519–524.
- THOMAS, H. E. 1951. The Conservation of Groundwater. McGraw-Hill, New York.
- THOMAS, H. E. 1958. Hydrology vs. water allocation in the eastern United States. The Law of Water Allocation in the Eastern United States. Ronald Press, New York.
- THOMPSON, G. M., J. M. HAYES, and S. N. DAVIS. 1974. Fluorocarbon tracers in hydrology. Geophys. Res. Letters, 1, pp. 377–380.
- THOMPSON, T. F. 1966. San Jacinto Tunnel. Engineering Geology in Southern California, Assoc. Eng. Geol. Spec. Publ., pp. 104–107.
- THORNTON, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geog. Rev., 38, pp. 55–94.
- THRAIKILL, J. 1968. Chemical and hydrologic factors in the excavation of limestone caves. Geol. Soc. Amer. Bull., 79, pp. 19–46.

Referências Bibliográficas

- TODD, D. K. 1955. Ground-water in relation to a flooding stream. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., 81, pp. 1–20, separate 628.
- TODD, D. K. 1959. Ground Water Hydrology. John Wiley & Sons, New York.
- TODD, D. K., and D. E. O. MCNULTY. 1976. Polluted Groundwater. Water Information Center, Port Washington, NY.
- TOLMAN, C. F. 1937. Groundwater. McGraw-Hill, New York.
- TÓTH, J . 1962. A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta. J. Geophys. Res., 67, pp. 4375–4387.
- TÓTH, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. J. Geophys. Res., 68, pp. 4795–4812.
- TÓTH, J. 1966. Mapping and interpretation of field phenomena for groundwater reconnaissance in a prairie environment, Alberta Canada. Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydrol., 11, no. 2, pp. 1–49.
- TÓTH, J. 1968. A hydrogeological study of the Three Hills area, Alberta. Research Council of Alberta, Geol. Div., Bull. 24.
- TÓTH, J . 1970. Relation between electric analogue patterns of groundwater flow and accumulation Of hydrocarbons. Can. J. Earth Sci., 7, pp. 988–1007.
- TRAINER, F. W., and R. C. HEATH. 1976. Bicarbonate content of groundwater in carbonate rock in eastern North America. J. Hydrol., 31, pp. 37–55.
- TREFZGER, R. E. 1966. Tecolote tunnel. Engineering Geology in Southern California. Assoc. Eng. Geol. Spec. Publ., pp. 108–113.
- TRESCOTT, P. C., G. F. PINDER, and S. P. LARSON. 1976. Finite-difference model for aquifer simulation in two-dimensions with results of numerical experiments. Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geol. Surv., Book 7, Chap. C1, 116 pp.
- TRUESDELL, A. H., and B. F. JONES. 1974. WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters. U.S. Geol. Surv. J. Res., 2, pp. 233–248.
- TURK, L. J. 1975. Diurnal fluctuations of water tables induced by atmospheric pressure changes. J. Hydrol., 26, pp. 1–16.
- S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1973a. Manual of Individual Water Supply Systems. Report EPA-430/9-74-007, 155 pp.
- S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1973b. Water Quality Criteria 1972, EPA R3 73033. Government Printing Office, Washington, D.C.
- S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1974a. Land Application of Sewage Effluents and Sludges: Selected Abstracts. Government Printing Office, Washington, D.C.
- S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1974b. Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. Office of Technology Transfer, Washington, D.C., pp. 105–106.
- S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1975. Water programs: national interim primary drinking water regulations. Federal Register, 40, no. 248.

Referências Bibliográficas

- S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1976. Manual of Water Well Construction Practices. Report EPA-570/9-75-001, 156 pp.
- S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1977. The report to Congress: waste disposal practices and their effects on ground water. USEPA Office of Water Supply, Office of Solid Waste Management Programs.
- VAN BAVEL, C. H. M. 1966. Potential evapotranspiration: the combination concept and its experimental verification. *Water Resources Res.*, 2, pp. 455-467.
- VAN DAM, J. 1967. The migration of hydrocarbons in a water bearing stratum. *The Joint Problems of the Oil and Water Industries*, ed. Peter Hepple. Institute of Petroleum, London.
- VAN EVERDINGEN, R. O. 1968a. The influence of the South Saskatchewan Reservoir on the local groundwater regime—a prognosis. *Geol. Surv. Can. Paper* 65-39.
- VAN EVERDINGEN, R. O. 1968b. Studies of formation waters in Western Canada: geochemistry and hydrodynamics. *Can. J. Earth Sci.*, 5, pp. 523-543.
- VAN EVERDINGEN, R. O. 1968c. Mobility of main ion species in reverse osmosis and the modification of subsurface brines. *Canadian J. Earth Sci.*, 5, pp. 1253-1260.
- VAN EVERDINGEN, R. O. 1976. Geocryological terminology. *Can. J. Earth Sci.*, 13, no. 6, pp. 862-867.
- VAN EVERDINGEN, R. O., and R. A. FREEZE. 1971. Subsurface disposal of waste in Canada. *Inland Waters Branch Tech. Rept.* Department of Environment, Canada.
- VAN GROSSE, A. V., W. M. JOHNSTON, R. L. WOLFGANG, and W. F. LIBBY. 1951. Tritium in nature. *Science*, 113, pp. 1-2.
- VAN OLPHEN, H. 1963. *An Introduction to Colloid Chemistry*. Wiley-Interscience, New York. 301 pp.
- VANSELOW, A. P. 1932. Equilibria Of the base-exchange reactions of bentonites, permutites, soil-colloids and zeolites. *Soil Sci.*, 33, pp. 95-113.
- VAN VOAST, W. A., and R. B. HEDGES. 1975. Hydrogeologic aspects of existing and proposed strip coal mines near Decker, Southeastern Montana. *Montana Bur. Mines Geol. Bull.*, 97.
- VAUX, W. G. 1968. Intragravel flow and interchange of water in a streambed. *Fishery Bull.*, 66, pp. 479-489.
- VENNARD, J. K. 1961. *Elementary Fluid Mechanics*, 4th ed. John Wiley & Sons, New York.
- VERMA, R. D., and W. BRUTSAERT. 1970. Unconfined aquifer seepage by capillary flow theory. *J. Hydraul. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 96 (HY6), pp. 1331-1344.
- VERMA, R. D., and W. BRUTSAERT. 1971. Unsteady free-surface groundwater seepage. *J. Hydraul. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 97 (HY8), pp. 1213-1229.
- VERMEULEN, T., and N. K. HIESTER. 1952. Ion exchange chromatography of trace elements. *Ind. Eng. Chem.*, 44, pp. 636-651.
- VERRUIJT, A. 1969. Elastic storage of aquifers. *Flow Through Porous Media*, ed. R. J. M. DeWiest. Academic Press, New York, pp. 331-376.

Referências Bibliográficas

- VOGWILL, R. I. J. 1976. Some practical aspects of open-pit dewatering at Pine Point. *Bull. Can. Inst. Min. Met.*, 69, 768, pp. 76–88.
- VOMOCIL, J. A. 1965. Porosity. *Methods of Soil Analysis*, Part 1, ed. C. A. Black. American Society of Agronomy, Madison. Wis., pp. 299–314.
- WAHLSTROM, E. E. 1973. *Tunneling in Rock*. American Elsevier, New York.
- WAHLSTROM, E. E. 1974. *Dams, Dam Foundations and Reservoir Sites*. American Elsevier, New York.
- WALKER, E. H. 1956. Ground-water resources of the Hopkinsville Quadrangle, Kentucky. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1328.
- WALLIS, C., A. HOMMA, and J. L. MELNICK. 1972. A portable virus concentrator for testing water in the field. *Water Res*, 6, pp. 1249–1256.
- WALTON, W. C. 1960. Leaky artesian aquifer conditions in Illinois. *Illinois State Water Surv. Rept. Invest.* 39, 27 pp.
- WALTON, W. C. 1962. Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. *Illinois State Water Surv. Bull.* 49, 81 pp.
- WALTON, W. C. 1970. *Groundwater Resource Evaluation*. McGraw-Hill, New York, 664 pp.
- WARNER, D. L. 1965. Deep well injection of liquid waste. *Environmental Health Series, Water Supply and Pollution Control*, No. 999-WP-21. U.S. Department of Health, Education and Welfare, Cincinnati, Ohio.
- WARNER, D. L., and D. H. ORCUTT. 1973. Industrial wastewater injection wells in United States—status of use and regulation. *Underground Waste Management and Artificial Recharge*, ed. J. Braunstein. *Amer. Assoc. Petrol. Geol., U.S. Geol. Surv., Intern. Assoc. Hydrol. Sci.*, 2.
- WARREN, J. E., and H. S. PRICE. 1961. Flow in heterogeneous porous media. *Soc. Petrol. Eng. J.*, 1, pp. 153–169.
- WAY, D. S. 1973. *Terrain Analysis: A Guide to Site Selection Using Aerial Photographic Interpretation*. Dowden, Hutchison & Ross, Stroudsburg, Pa., 392 pp.
- WAYMAN, C. H. 1967. Adsorption on clay mineral surfaces. *Principles and Applications of Water Chemistry*, ed. S. D. Faust and J. V. Hunter. John Wiley & Sons, New York, pp. 127–167.
- WEAST, R. C., ed. 1972. *Handbook of Chemistry and Physics*, 53rd ed. CRC Press, Cleveland, Ohio.
- WEEKS, L. G. 1961. Origin, migration and occurrence of petroleum. *Petroleum Exploration Handbook*, ed. G. B. Moody. McGraw-Hill, New York, pp. 5-1–5-50.
- WEERTMAN, J. . 1972. General theory of water flow at the base of a glacier or ice sheet. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 10, pp. 287–333.
- WENZEL, L. K. 1942. Methods of determining permeability of water-bearing materials. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 887, 192 pp.
- WESNER, G. M., and D. C. BAIER. 1970. Injection of reclaimed wastewater into confined aquifers. *J. Amer. Water Works Assoc.*, 62, pp. 203–210.

Referências Bibliográficas

- WHIPKEY, R. Z. 1965. Subsurface stormflow from forested slopes. *Bull Intern. Assoc. Sci. Hydrol.*, 10, no. 2, pp. 74–85.
- WHITE, D. E. 1957. Magmatic, connate, and metamorphic waters. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 68, pp. 1659–1682.
- WHITE, D. E. 1968. Environments of generation of some base-metal ore deposits. *Econ. Geol.*, 63, pp. 301–335.
- WHITE, D. E. 1973. Characteristics of geothermal resources. *Geothermal Energy*, ed. P. Kruger and C. Otte. Stanford University Press, Stanford, Calif., pp. 69–94.
- WHITE, N. F., H. R. DUKE, and D. K. SUNADA. 1970. Physics of desaturation in porous materials. *J. Irr. Drain. Div., Amer. Soc. Civil Engrs.*, 96, pp. 165–191.
- WHITE, W. N. 1932. A method of estimating groundwater supplies based on discharge by plants and evaporation from soil. *U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper* 659-A.
- WHITEHEAD, H. C., and J. H. FETH. 1964. Chemical composition of rain, dry fallout, and bulk precipitation at Menlo Park, California. *J. Geophys. Res.*, 69, no. 16, pp. 1957–1959.
- WHITFEILD, M. 1974. Thermodynamic limitations of the use of the platinum electrode in Eh measurements. *Limnol. Oceanogr.*, 19, pp. 857–865.
- WIGLEY, T. M. L. 1975. Carbon 14 dating of groundwater from closed and open systems. *Water Resources Res.*, 11, pp. 324–328.
- WIGLEY, T. M. L., and L. N. PLUMMER. 1976. Mixing of carbonate waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40, pp. 989–995.
- WIKLANDER, L. 1964. Cation and anion exchange phenomena. *Chemistry of the Soil*, 2nd ed., ed. F. E. Bear. American Chemical Society; Reinhold, New York.
- WILLARDSON, L. S., and R. L. HURST. 1965. Sample size estimates in permeability studies. *J. Irr. Drain. Div., Amer. Soc. Civil Engrs.*, 91, pp. 1–9.
- WILLIAMS, J. R. 1970. Ground water in the permafrost regions of Alaska. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 696.
- WILLIAMS, R.E. 1970. Applicability of mathematical models of groundwater flow systems to hydrogeochemical exploration. *Idaho Bur. Mines Geol. Pamphlet* 144, 13 pp.
- WILLIAMS, R. E., and R. N. FARVOLDEN. 1969. The influence of joints on the movement of groundwater through glacial till. *J. Hydrol.*, 5, pp. 163–170.
- WILLS, A. P. 1958. *Vector Analysis with an Introduction to Tensor Analysis*. Dover, New York.
- WILSON, J. L., R. L. LENTON, and J. PORTER, eds. 1976. *Ground-water pollution: technology economics and management*. Dept. Civil Eng., M.I.T., Rept. TR208.
- WILSON, L. G., and J. N. LUTHIN. 1963. Effect of air flow ahead of the wetting front on infiltration. *Soil Sci.*, 96, pp. 136–143.
- WINOGRAD, I. J. 1974. Radioactive waste storage in the arid zone. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, 55, no. 10, pp. 884–894.

Referências Bibliográficas

- WINOGRAD, I. J., and G. M. FARLEKAS. 1974. Problems in ^{14}C dating of water from aquifers of deltaic origin. *Isotope Hydrology*, International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 69–93.
- WINTER, T. C. 1976. Numerical simulation analysis of the interaction of lakes and groundwater. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 1001, 45 pp.
- WISLER, C. O., and E. F. BRATER. 1959. *Hydrology*, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, 408 pp.
- WITHERSPOON, P. A., S. P. NEUMAN, M. L. SOREY, and M. J. LIPPMAN. 1975. Modeling geothermal systems. Lawrence Berkeley Lab. Rep. LBL-3263, 68 pp.
- WITTKE, W. 1973. General report on the symposium "Percolation Through Fissured Rock." *Bull. Intern. Assoc. Eng. Geol.*, pp. 3–28.
- WITTKE, W., P. RISSLER, and S. SEMPRICH. 1972. Three-dimensional laminar and turbulent flow through fissured rock according to discontinuous and continuous models (German). *Proc. Symp. Percolation Through Fissured Rock*, Intern. Soc. Rock Mech., Stuttgart.
- WOLFF, R. G. 1970. Field and laboratory determination of the hydraulic diffusivity of a confining bed. *Water Resources Res.*, 6, pp. 194–203.
- WOLLAST, R. 1967. Kinetics of the alteration of K-feldspar in buffered solutions at low temperature. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31, pp. 635–648.
- WOOD, W. W. 1976. A hypothesis of ion filtration in a potable water aquifer system. *Ground Water*, 14, pp. 233–244.
- WYLLIE, M. R. J. 1963. *The Fundamentals of Well Log Interpretation*. Academic Press, New York, 238 pp.
- YEH, W. W. 1975. Aquifer parameter identification. *J. Hydraul. Div., Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs.*, 101 (HY9), pp. 1197–1209.
- YEN, B. C., and B. SCANLON. 1975. Sanitary landfill settlement rates. *J. Geotech. Div., Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs.* 101 (GT5), pp. 475–487.
- YOUNG, A., P. F. LAU, and A. S. MCLATCHIE. 1964. Permeability studies of argillaceous rocks. *J. Geophys. Res.*, 69, pp. 4237–4245.
- YOUNG, C. P., D. B. OAKES, and W. B. WILKINSON. 1977. Prediction of future nitrate concentrations in groundwater. *Proc. Third Nat. Groundwater Quality Symp.*, U.S. Environ. Protect. Agency and Nat. Water Well Assoc., Las Vegas, Nev., U.S. Env. Protect. Agency Rept. 600/9-77-014.
- YOUNG, R. A., and J. D. BREDEHOEFT. 1972. Digital computer simulation for solving management problems of conjunctive groundwater and surface water systems. *Water Resources Res.*, 8, pp. 533–556.
- YOUNGS, E. G., and A. J. PACK. 1964. Moisture profile development and air compression during water uptake by bounded porous bodies: 1. Theoretical introduction. *Soil Sci.*, 98, pp. 280–294.
- YU, W., and Y. Y. HAIMES. 1974. Multilevel optimization for conjunctive use of groundwater and surface water. *Water Resources Res.*, 10, pp. 625–636.

Referências Bibliográficas

- ZAPOROZEC, A. 1972. Graphical interpretation of water quality data. *Ground Water*, 10, pp. 32-43.
- ZARUBA, Q., and V. MENCL. 1969. *Landslides and Their Control*. American Elsevier, New York.
- ZIENKIEWICZ, O. C. 1967. *The Finite-Element Method in Structural and Continuum Mechanics*. McGraw-Hill, New York.
- ZUBER, A. 1974. Theoretical possibilities of the two-well pulse method. Intern. Atomic Energy Agency, Rept. SM-182/45.

INSTITUTO ÁGUA SUSTENTAVEL

Apoio:

