

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**HIDRODINÂMICA E HIDROGEOQUÍMICA DA ZONA
NÃO SATURADA DO AQUÍFERO ADAMANTINA EM
URÂNIA - SP**

REGINALDO ANTONIO BERTOLO

Orientador: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA



	Nome	Assinatura
Presidente:	Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata	
Examinadores:	Prof. Dr. Chang Hung Kiang	
	Dr. Rodrigo César de Araújo Cunha	
	Prof ^a Dr ^a Sonia Maria Barros de Oliveira	
	Prof. Dr. William Zamboni de Mello	

SÃO PAULO
2001

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**HIDRODINÂMICA E HIDROGEOQUÍMICA DA ZONA NÃO
SATURADA DO AQÜÍFERO ADAMANTINA EM URÂNIA - SP**

Reginaldo Antonio Bertolo

Orientador: Prof. Dr. Ricardo C. A. Hirata



TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

São Paulo
2001

DEDALUS - Acervo - IGC



30900007275

Ao Pedro, Helena e Celina, pela existência.

À Rhauna, pelo caminho.

Ao Nilo e a quem mais chegar, pela continuação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS.....	V
LISTA DE EQUAÇÕES	VI
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES.....	VII
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
AGRADECIMENTOS	X
1. APRESENTAÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Aspectos Teóricos	4
2.1.1. Movimento e Reservação da Água na Zona Não Saturada	4
2.1.2. Hidrogeoquímica da Zona Não Saturada	7
2.1.3. Modelos Hidrogeoquímicos.....	12
2.2. Síntese de Trabalhos Publicados.....	15
2.2.1. Monitoramento da Zona Não Saturada	16
2.2.2. Hidráulica e Hidrogeoquímica da Zona Não Saturada	17
2.2.3. Modelos Matemáticos de Fluxo e Transporte da Zona Não Saturada	22
2.3. Características Regionais do Meio Físico	23
2.3.1. Aspectos Fisioclimáticos.....	23
2.3.2. Geologia	24
2.3.3. Hidrogeologia e Hidrogeoquímica	26
3. MATERIAL E MÉTODO	31
3.1. Instalação da Estação de Monitoramento	31
3.1.1. Critério de Locação da Estação	31
3.1.2. Perfuração, Revestimento e Acesso ao Poço.....	31
3.1.3. Instalação dos Equipamentos de Monitoramento	35
3.2. Coleta e Análises de Amostras de Solo	39
3.2.1. Análises Granulométricas	40
3.2.2. Análises Mineralógicas	40
3.2.3. Análises Químicas	41
3.3. Coleta e Ensaios em Laboratório de Amostras Indeformadas de Solo.....	45
3.4. Monitoramento do Comportamento Hidráulico das Zonas Saturada e Não Saturada	46

3.5. Coleta e Análises Químicas de Amostras de Água	46
3.5.1. Procedimentos de Amostragem	46
3.5.2. Análises Realizadas e Controle de Qualidade dos Resultados	48
3.6. Tratamento de Dados	53
3.6.1. Caracterização Hidráulica da Zona Não Saturada	53
3.6.2. Caracterização Hidrogeoquímica da Zona Não Saturada e Modelagem Matemática	55
3.6.3. Modelagem de Transporte de Contaminantes	56
4. HIDRÁULICA DA ZONA NÃO SATURADA	57
4.1. Caracterização do Meio Poroso	57
4.1.1. Descrição Visual do Material de Perfuração	57
4.1.2. Ensaios de Granulometria	57
4.1.3. Ensaios de Condutividade Hidráulica Saturada	59
4.1.4. Curvas de Retenção	63
4.1.5. Porosidades Total e Efetiva	66
4.2. Potenciais Hidráulicos na Zona Não Saturada	67
4.2.1. Variações de Potenciais Hidráulicos com a Profundidade.....	67
4.2.2. Variações Laterais de Potenciais Hidráulicos	71
4.3. Utilização do Modelo VS2DT na Avaliação de Fluxo e Reservação de Água na Zona Não Saturada	76
4.3.1. Concepção do Modelo	76
4.3.2. Calibração	77
4.3.3. Resultados Obtidos.....	79
4.3.4. Variações de Umidade e de Velocidade de Fluxos na Zona Não Saturada	84
5. HIDROGEOQUÍMICA DA ZONA NÃO SATURADA	89
5.1. Mineralogia e Composição Química da Fase Sólida da Zona Não Saturada	89
5.1.1. Microscopia Ótica	89
5.1.2. Análises Mineralógicas por Difração de Raio X (DRX).....	89
5.1.3. Análises Químicas por ICP/AES-Plasma	91
5.1.4. Análises de Capacidade de Troca de Cátions, pH e Matéria Orgânica	95
5.1.5. Análises em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	100
5.1.6. Correlações entre Mineralogia e Composição Química do Solo.....	102
5.2. Evolução da Composição Química da Água	104
5.2.1. Resultados das Análises.....	104
5.2.2. Classificação Hidroquímica.....	110
5.2.3. Variações da Composição Química com a Profundidade	112
5.2.4. Variações Laterais da Composição Química	119
5.3. Modelo Hidrogeoquímico Conceitual	121
5.3.1. Cálculo de Índices de Saturação através de Modelo de Especificação	121
5.3.2. Diagramas de Estabilidade de Aluminossilicatos	124
5.3.3. Relações entre Capacidade de Troca de Cátions e Composição Química da Água	127
5.3.4. Modelagem Inversa	129
5.3.5. Síntese do Modelo Hidrogeoquímico Conceitual	134
6. SIMULAÇÕES DE TRANSPORTE DE NITRATO NA ZONA NÃO SATURADA	138
6.1. Transporte de Contaminantes através de Fossas	138
6.2. Transporte de Nitrato através de Fertilizantes.....	141

7. CONCLUSÕES	145
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	149
9. ANEXOS	157
9.1. ANEXO 1 – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO.....	157
9.2. ANEXO 2 – RESULTADOS DE ENSAIOS REALIZADOS NO SOLO	161
9.3. ANEXO 3 – DADOS DE MONITORAMENTO DE POTENCIAL MATRICIAL DOS TENSÍOMETROS.....	163
9.4. ANEXO 4 – RELATÓRIO DE DADOS DE ENTRADA DO MODELO VS2DT	172
9.5. ANEXO 5 – UMIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADA.....	182
9.6. ANEXO 6 – RESULTADOS DE ANÁLISES QUÍMICAS E MINERALÓGICAS DO MATERIAL DO SOLO	189
9.7. ANEXO 7 – RESULTADOS DE ANÁLISES QUÍMICAS DA ÁGUA.....	200
9.8. ANEXO 8 – ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS DE ANÁLISES QUÍMICAS DE ÁGUA.....	206
9.9. ANEXO 9 – RESULTADOS DE MODELAGENS HIDROQUÍMICAS.....	209
9.10. ANEXO 10 – DADOS DE ENTRADA DAS MODELAGENS DE TRANSPORTE.....	214

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização do município de Urânia.....	2
Figura 2 – Potenciometria da cidade de Urânia e arredores (Hirata, 2000).....	28
Figura 3 – Potenciometria da cidade de Urânia e arredores com a operação dos poços profundos da SABESP (Hirata, 2000).....	28
Figura 4 – Localização da estação de monitoramento na área urbana de Urânia.....	32
Figura 5 – Planta construtiva da estação de monitoramento da zona não saturada.....	33
Figura 6 – Resultados dos ensaios de granulometria das amostras de solo do poço da estação de monitoramento.....	58
Figura 7 – Condutividades hidráulicas nas direções Z, X e Y de amostras indeformadas de solo em função da profundidade.....	61
Figura 8 – Condutividade hidráulica calculada a partir dos ensaios granulométricos em função da profundidade.....	61
Figura 9 – Curvas de retenção das amostras de solo de 1 m de profundidade.....	64
Figura 10 – Curvas de retenção das amostras de solo de 3 m de profundidade.....	64
Figura 11 – Curvas de retenção das amostras de solo de 5 m de profundidade.....	65
Figura 12 – Curvas de retenção das amostras de solo de 7 m de profundidade.....	65
Figura 13 – Curvas de retenção das amostras de solo de 9 e 9,5 m de profundidade.....	65
Figura 14 – Potenciais hidráulicos totais dos tensiômetros e cargas hidráulicas do poço de monitoramento ao longo do tempo.....	68
Figura 15 – Potenciais hidráulicos totais dos tensiômetros de 0,5 m ao longo do tempo.....	72
Figura 16 – Potenciais hidráulicos totais dos tensiômetros de 1,0 m ao longo do tempo.....	73
Figura 17 – Potenciais hidráulicos dos tensiômetros de T50D, T1D e T2 ao longo do tempo.....	73

Figura 18 – Variação do potencial hidráulico em função da profundidade em três situações de tempo.....	74
Figura 19 – Potenciais matriciais calculados e reais – modelo Urânia A.....	81
Figura 20 – Potenciais matriciais calculados e reais – modelo Urânia B.....	81
Figura 21 – Potenciais matriciais calculados e reais – modelo Urânia C.....	83
Figura 22 – Variações de umidade do modelo Urânia A, expressas em % de saturação e em conteúdo de umidade (vol/vol).	84
Figura 23 – Velocidades de fluxo de água e balanço de fluxos de entrada e saída do modelo Urânia A.....	85
Figura 24 – Variação temporal da umidade de saturação.....	87
Figura 25 – Variação temporal da condutividade hidráulica não saturada.....	88
Figura 26 – Variação da composição química das amostras de solo total com a profundidade ..	92
Figura 27 – Resultados das análises de capacidade de troca de cátions.....	96
Figura 28 – Resultados das análises de pH e matéria orgânica do solo.....	97
Figura 29 – Relações entre cátions adsorvidos e capacidade de troca de cátions	97
Figura 30 – Faixa de concentrações dos parâmetros químicos em relação ao desvio padrão em torno da média.....	107
Figura 31 – Diagramas de classificação hidroquímica das cinco campanhas de amostragem...	111
Figura 32 – Variações da composição química da água com a profundidade nas cinco campanhas de amostragem	113
Figura 33 – Índices de saturação em função da profundidade para alguns dos minerais mais reativos.....	123
Figura 34 – Diagramas de estabilidade de alguns minerais dos sistemas dos sistemas Na ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ , CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ e K ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ , a 25°C e 1 atm.....	125
Figura 35 – Variações das concentrações de nitrato na zona não saturada para taxa de infiltração constante de 2,2 cm/dia.....	139
Figura 36 – Variações das concentrações de nitrato com a profundidade para duas situações de contaminação inicial (200 e 1000 mg/L)	143
Figura 37 – Concentração efetiva de nitrato infiltrado por concentração que chega no aquífero, de acordo com as simulações realizadas.....	143
Figura 38 – Variações das concentrações de nitrato para concentração inicial de 200 mg/L em cinco anos de simulação	144

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Algumas reações de dissolução/precipitação de minerais que podem ocorrer na zona não saturada de aquíferos sedimentares arenosos em clima tropical	9
Tabela 2 – Medidas de capacidades de troca de cátions e de pH _{zpc} de alguns materiais comuns	10
Tabela 3 – Resumo dos principais processos que produzem e que controlam as concentrações dos íons na água.	12
Tabela 4 – Análises realizadas em amostras deformadas de solo	39
Tabela 5 – Parâmetros químicos analisados em amostras de água, preservação, laboratório e método de análise.....	49
Tabela 6 – Reprodutibilidade das análises de amostras de água duplicata do lisímetro L9 e do poço de monitoramento PM.....	51
Tabela 7 – Reprodutibilidade das análises da água para avaliação de diferentes procedimentos de amostragem.....	52
Tabela 8 – Descrição visual do material de perfuração do poço da estação de monitoramento ..	57
Tabela 9 – Comparação de resultados de ensaios de granulometria por diferentes métodos.....	59

Tabela 10 – Resultados de condutividade hidráulica em amostras indeformadas de solo e por curva de granulometria	60
Tabela 11 – Resultados calculados dos parâmetros da equação de van Genuchten a partir das curvas de retenção de água	63
Tabela 12 – Porosidades total, de retenção (capacidade de campo) e efetiva das amostras indeformadas de solo	66
Tabela 13 – Resultados de resíduos normalizados dos três modelos	79
Tabela 14 – Comparação de valores de condutividade hidráulica saturada medidas em laboratório e utilizadas nos modelos.....	80
Tabela 15 - Resultados de análises mineralógicas por difração de raio X do solo do poço - frações fina, fluviado e afundado.....	90
Tabela 16 – Composição química média das frações total, fina, afundada e fluviada das amostras de solo das profundidades de 1, 6 e 9,5 m.	93
Tabela 17 – Matriz de correlação das análises químicas do solo total por ICP/AES e ensaios de granulometria	94
Tabela 18 - Matriz de correlação entre as análises de capacidade de troca de cátions (CTC) e as análises químicas do solo total por ICP/AES.....	98
Tabela 19 – Relação entre cátions adsorvidos sobre cátions totais no solo da zona não saturada (em %).....	99
Tabela 20 - Matriz de correlação entre as análises de capacidade de troca de cátions (CTC) e os ensaios de granulometria.....	100
Tabela 21 – Matriz de correlação dos parâmetros químicos analisados na água dos lisímetros L50 a L9	115
Tabela 22 – Composição química teórica da água na hipótese de ocorrência de desadsorção dos cátions de base adsorvidos	128
Tabela 23 – Coeficientes de correlação entre cátions adsorvidos e em solução	129
Tabela 24 – Resultados da modelagem inversa entre os pontos L3 e L5 (agosto/99)	131
Tabela 25 - Resultados da modelagem inversa entre os pontos L5 e L7 (agosto/2000).....	133

Lista de Equações

Equação 1.....	4
Equação 2.....	5
Equação 3.....	5
Equação 4.....	6
Equação 5.....	6
Equação 6.....	13
Equação 7.....	49
Equação 8.....	59
Equação 9.....	66
Equação 10.....	78
Equação 11.....	127
Equação 12.....	140

Lista de Símbolos e Unidades

- h – potencial hidráulico (em metros de coluna d'água)
- z – potencial de elevação (em metros de coluna d'água)
- ψ – potencial matricial (em metros de coluna d'água)
- p – potencial matricial, (N/m^2 - Pascal); ($1 \text{ mm Hg} = 133 \text{ Pascal}$)
- ρ – densidade de massa (kg/m^3)
- g – aceleração da gravidade (m/s^2)
- θ – umidade volumétrica para determinado potencial matricial (vol. água/vol. sólido)
- θ_r – umidade volumétrica de retenção (vol. água/vol. sólido)
- θ_s – umidade volumétrica de saturação (vol. água/vol. sólido)
- α – constantes empíricas relacionadas com o solo (cm^{-1} de H_2O)
- m e n – constantes empíricas de van Genuchten relacionadas com o solo (adimensionais)
- $K_{(\theta)}$ – condutividade hidráulica não saturada (cm/s)
- K – condutividade hidráulica saturada (cm/s)
- ω – saturação efetiva (adimensional)
- L – parâmetro empírico de van Genuchten (adimensional)
- IS – índice de saturação (adimensional)
- IAP – produto das atividades dos íons formadores de um mineral (adimensional)
- K – constante de equilíbrio químico de um mineral (adimensional)
- K_{gr} – condutividade hidráulica saturada calculada por ensaio granulométrico (em cm/s)
- A – coeficiente relacionado ao grau de arredondamento dos grãos (adimensional)
- d_{10} – diâmetro granulométrico representativo dos 10% mais finos (em mm)
- K_x , K_y e K_z – condutividade hidráulica saturada nos sentidos X, Y e Z (em cm/s)
- n – porosidade total (vol./vol.)
- ρ_b – densidade aparente da amostra (em g/cm^3)
- ρ_s – densidade dos sólidos (em g/cm^3).

Resumo

Este trabalho objetiva investigar o comportamento hidráulico e a evolução hidrogeoquímica da água de infiltração da zona não saturada do Aquífero Adamantina, bem como simular o comportamento de nitrato neste meio. O método consistiu na construção de uma estação de monitoramento, na execução de vários ensaios e análises em amostras de solo, no monitoramento de potenciais matriciais, em amostragens e análises de água da zona não saturada e na execução de modelagens hidroquímicas e de fluxo e transporte de contaminantes.

A zona não saturada apresenta natureza arenosa fina e subdivide-se em três sub-zonas hidráulicas: a primeira, entre a superfície até a linha de evaporação (a 2 m), sofre os efeitos das variações climáticas, com os potenciais hidráulicos respondendo rapidamente a cada pequeno evento de recarga ou evaporação; na segunda zona, entre 2 e 7 m, as pequenas frentes de molhamento sofrem dissipação e os tensiômetros registram apenas mudanças de potenciais matriciais que se relacionam com eventos mais longos de recarga ou de secagem. A terceira zona situa-se entre 7 m e o nível d'água (média de 9,5 m) e caracteriza-se por apresentar valores de potenciais hidráulicos muito próximos da carga hidráulica do aquífero freático. O tempo de trânsito da água na zona não saturada, no evento de recarga do início de 2000, foi de 3 meses.

A zona não saturada encontra-se num avançado estágio de intemperismo, sendo que a mineralogia principal é composta por quartzo e caulinita. A água é pouco mineralizada, classificada como bicarbonatada cálcica, mas com elevadas concentrações de nitrato, apresenta variações de concentrações com a profundidade, lateralmente e no tempo e encontra-se estratificada em três zonas que coincidem com as zonas hidráulicas. Foram identificados os seguintes processos hidrogeoquímicos na zona não saturada: (1) ações antropogênicas, devido à poluição por nitrato; (2) ação de evaporação até 2 m; (3) ação de respiração vegetal até 7 m, (4) condições propícias para a dissolução de minerais primários e formação de caulinita e de formas secundárias de sílica; e (5) condições propícias para a ocorrência de fenômenos de adsorção e troca iônica, cujas análises de capacidade de troca de cátions indicaram os minerais ferruginosos como as principais superfícies adsorventes.

As simulações de transporte de nitrato indicaram que o aquífero freático é vulnerável à poluição devido à infiltração de efluentes de fossas sépticas e à aplicação de fertilizantes nitrogenados no solo.

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

