

**Ana Beatriz da Cunha Barreto**

**Avaliação de Recarga e de Sustentabilidade de Recursos  
Hídricos Subterrâneos de uma Micro-bacia usando  
Modelagem Numérica**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Junior  
Co-orientador: John Edward Gale

Rio de Janeiro, maio de 2010

**Ana Beatriz da Cunha Barreto**

**Avaliação de Recarga e de Sustentabilidade de Recursos  
Hídricos Subterrâneos de uma Micro-Bacia usando  
Modelagem Numérica**

Tese apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Doutor pelo Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-  
Rio. Aprovada pela Comissão abaixo assinada.

**Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior**

Orientador e Presidente

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. José Tavares de Araruna Júnior**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. George de Paula Bernardes**

UNESP-FEG

**Prof. Nelson Ferreira Fernandes**

IG/UFRJ

**Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho**

COPPE/UFRJ

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de maio de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

### Ana Beatriz da Cunha Barreto

Graduou-se em Geologia pela UFRJ em 1982 e obteve o título de Mestre em Engenharia Civil pela PUC-Rio. É professora da Faculdade de Geologia da UERJ e pesquisadora em geociências da CPRM/Serviço Geológico do Brasil, onde é responsável pela Divisão de Hidrogeologia e Exploração do Departamento de Hidrologia.

#### Ficha Catalográfica

Barreto, Ana Beatriz da Cunha

Avaliação de recarga e de sustentabilidade de recursos hídricos subterrâneos de uma micro-bacia cristalina através de modelagem numérica / Ana Beatriz da Cunha Barreto ; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Junior ; co-orientador: John Edward Gale. – 2010.

210 : il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Hidrogeologia. 2. Recarga. 3. Sustentabilidade. 4. Bacias cristalinas. 5. Modelagem numérica. I. Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. II. Gale, John Edward. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

## Agradecimentos

Aos meus pais pelo amor e por serem as pessoas mais generosas que eu conheço, tendo me proporcionado todas as oportunidades na vida.

Ao Guilherme pelo riso e pela cumplicidade, pela paciência e amor e por tudo aquilo que faz a nossa convivência tão especial.

Aos meus orientadores Eurípedes do Amaral Vargas Junior e John Edward Gale, pelo incentivo, apoio e pelo exemplo de vida.

Às amigas Andrea, Jane, Raquel e Lígia pela ajuda e pelas idéias, que contribuíram tanto com essa Tese.

À Genevieve Gale que me acolheu como membro de sua família e fez o inverno na Terra Nova não parecer tão difícil.

À Rita de Cássia da civil, por sua bondade e atenção.

À CAPES pelo auxílio que possibilitou a execução de parte importante desta Tese.

À CPRM e à UERJ pelas licenças concedidas, sem as quais seria impossível a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos e familiares pela convivência e pelo incentivo.

## Resumo

Barreto, Ana Beatriz da Cunha; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral; Gale, John Edward. **Avaliação da Recarga e de Sustentabilidade de Recursos Hídricos Subterrâneos de uma Micro-Bacia usando Modelagem Numérica.** Rio de Janeiro 210p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A avaliação da recarga subterrânea e de sua variação temporal e espacial, em bacias hidrográficas, é essencial para estudos de sustentabilidade de recursos hídricos e requer, na maior parte das vezes, o uso de um modelo numérico de fluxo 3D. Geralmente, dados como mapas geológicos e pedológicos estão disponíveis, a localização e geometria das principais feições estruturais podem ser identificadas a partir de imagens de satélite, em ambiente SIG, e dados de hidrologia superficial e de elevação de terreno são fáceis de conseguir. No entanto, para se utilizar um modelo numérico que forneça uma primeira avaliação da sustentabilidade de uma exploração, é necessário alimentá-lo com dados de propriedades hidráulicas consistentes com a faixa de valores representativos dos tipos de rocha que compõe a bacia. Uma revisão de dados hidrogeológicos de uma série de localidades mostra que, enquanto as propriedades hidráulicas das rochas fraturadas apresentam uma grande variação em seus valores, quando analisadas de forma indiscriminada, ao serem agrupadas por tipo litológico, apresentam uma faixa de variação mais restrita (i.e. granito fraturado vs. gabro fraturado). Há um grande volume de dados relativos a projetos de disposição de lixo radioativo, mineração e engenharia civil, em diversos sítios ao redor do mundo, em que foram feitas investigações detalhadas do meio fraturado. Dados de um determinado maciço fraturado podem ser usados em outro, não investigado, como uma primeira aproximação, desde que possuam o mesmo tipo litológico e pertençam a ambientes tectônicos semelhantes. Este tratamento foi utilizado para modelar a vazão sustentável de uma pequena bacia de drenagem no Noroeste Fluminense. Dados relativos às estruturas dominantes e aos sistemas de fraturas foram extraídos de imagens de satélite, fotos aéreas e de afloramentos, e tratados

em ambiente SIG. O modelo de fluxo subterrâneo foi construído com dados de elevação do terreno, mapas geológicos, registros hidrológicos históricos bem como mapas pedológicos e de uso da terra. O programa FEFLOW (Diersch, 1998) foi usado para simular a distribuição espacial e temporal da recarga subterrânea na bacia e diferentes cenários de exploração de água subterrânea. O modelo mostrou-se capaz de fornecer uma primeira aproximação das reservas subterrâneas da bacia e de avaliar a relação entre o fluxo subterrâneo e dos cursos d'água superficiais, em condições naturais e nos cenários de exploração, sendo assim uma ferramenta útil para análises de sustentabilidade de exploração destes recursos.

### **Palavras-chave**

Hidrogeologia; recarga; sustentabilidade; bacias cristalinas; modelagem numérica.

## Abstract

Barreto, Ana Beatriz da Cunha; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral (Advisor); Gale, John Edward (Co-advisor). **Assessment of Groundwater Recharge and Sustainable Resources in a Small Crystalline Fractured Rock Drainage Basin with Numerical Modeling**. Rio de Janeiro, 2010. 210p. Dsc. Thesis - Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The estimation of groundwater recharge and its spatial and temporal variability in a drainage basin is essential for sustainability assessments and requires, in most cases, the use of an appropriate 3D numerical flow and transport model. For most drainage basins, the bedrock and overburden geology maps exist, the location and geometry of major structural features can be identified using available GIS databases, and surface water and terrain elevation data at an appropriate scale are readily available. In order to use 3D models to provide an initial assessment of the sustainability of the groundwater resource extraction of a specific drainage basin, the 3D model has to be populated with hydraulic properties that are consistent with the range of values that are representative of the rock types that underlie the drainage basin. A review of hydrogeological data from a number of sites shows that while there is a wide range in the hydraulic properties of fractured rocks in general, the range for individual rock types is more constrained, (i.e. fractured granite versus fractured gabbro). There is a great amount of hydrogeological data from fractured rock masses that have been investigated in detail as part of nuclear waste, mining and civil engineering projects around the world. Data from a specific site can be used as a first approach in another one, not investigated, once they have the same geologic characteristics and tectonic environment. This approach was used to model the sustainable groundwater yield of a small drainage basin in Southeast Brazil. Data on major structures and fracture systems were extracted from satellite images, aerial photos and outcrop expositions using GIS environment. The groundwater flow model was constructed using terrain elevation data, geology maps, hydrological records,

as well as soil type and land use maps. FEFLOW (Diersch, 1988) was used to simulate the spatial and temporal distribution of groundwater recharge in the basin, using different pumping scenarios. The model was capable to yield a good estimation of groundwater resources in the watershed, as a first approach, and to assess groundwater and surface water relations in natural conditions and in stress scenarios being a useful tool for sustainability analysis of groundwater exploitation.

## **Keywords**

Hydrogeology; recharge; sustainability; fractured rock watersheds; numerical modeling



## Sumário

|   |    |
|---|----|
| 1. Introdução   | 14 |
| 1.1. Apresentação do problema   | 14 |
| 1.2. Objetivos  | 17 |
| 1.3. Justificativas   | 17 |
| 1.4. Organização da Tese  | 18 |
| <br>  |    |
| 2. Recarga Subterrânea e Sustentabilidade                               | 19 |
| <br>  |    |
| 2.1. Recarga subterrânea  | 19 |
| 2.2. Metodologias de avaliação de recarga subterrânea                   | 22 |
| 2.2.1 Técnicas baseadas em dados de água superficial                    | 25 |
| 2.2.1.1. Balanço hídrico de canal                                       | 26 |
| 2.2.1.2. Medidas de drenagem em leitos de corpos d'água superficiais    | 27 |
| 2.2.1.3 Fluxo de base através da separação da hidrógrafa                | 27 |
| 2.2.1.4. Traçadores   | 29 |
| 2.2.1.5. Modelagem Numérica   | 30 |
| 2.2.2 Técnicas baseadas em dados da zona não saturada                   | 30 |
| 2.2.2.1 Lisímetros  | 31 |
| 2.2.2.2 Plano de fluxo zero   | 31 |
| 2.2.2.3 Lei de Darcy  | 32 |
| 2.2.2.4 Traçadores  | 33 |
| 2.2.2.5 Modelagem numérica  | 34 |
| 2.2.3 Técnicas baseadas em dados da zona saturada                       | 35 |
| 2.2.3.1 Método da variação do nível freático                            | 35 |
| 2.2.3.2 Lei de Darcy  | 36 |
| 2.2.3.3 Traçadores  | 36 |
| 2.2.3.4 Modelagem numérica  | 37 |
| 2.3. Relação entre recarga subterrânea e exploração de água subterrânea | 38 |

|   |    |
|---|----|
| 2.4. Alguns casos de modelagem numérica aplicada a estudos de avaliação de recarga e sustentabilidade de recursos hídricos subterrâneos | 44 |
| 2.4.1 Aqüífero do Alto Vale de Santiago, Chile  | 44 |
| 2.4.2 Aqüífero da bacia do Rio Küçük Menderes, Turquia Ocidental  | 46 |
| 2.4.3 Swidnica, Polônia   | 48 |
| 2.4.4 Baixada do Rio São Lourenço, Quebec, Canadá   | 49 |
| 2.4.5 Aqüífero Ogallala, em Kansas  | 51 |
| <br>  |    |
| 3. O caso da Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos, sub-bacia de Barro Branco  | 53 |
| <br>  |    |
| 3.1 Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos  | 53 |
| 3.1.1 Localização   | 53 |
| 3.1.2 Clima   | 53 |
| 3.1.3 Geologia  | 55 |
| 3.1.3.1 Geologia Regional   | 55 |
| 3.1.3.2 Geologia Local  | 56 |
| 3.1.4 Geomorfologia   | 60 |
| 3.1.5 Solos   | 60 |
| 3.1.6 Uso e Ocupação da Terra   | 61 |
| 3.2 Micro-bacia de Barro Branco   | 67 |
| 3.2.1 Descrição da área   | 67 |
| 3.2.2 Geologia  | 67 |
| 3.2.3 Solos   | 77 |
| 3.2.2 Uso da Terra  | 77 |
| <br>  |    |
| 4. Metodologia  | 80 |
| 4.1 Modelo Conceitual   | 82 |
| 4.2 Modelo Numérico   | 82 |
| 4.2.1 Malha de Elementos Finitos  | 83 |
| 4.2.2 Dados de Entrada  | 84 |
| 4.2.3 Base de Dados de Rochas Fraturadas  | 85 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.2.4 | Dados Hidrológicos  | 86  |
| 4.2.5 | Calibração  | 86  |
| 4.2.6 | Análise de Sensibilidade  | 87  |
| 4.2.7 | Simulação de Cenários de Bombeamento                                  | 87  |
| 5.    | Modelo conceitual de fluxo subterrâneo da micro-bacia de Barro Branco | 88  |
| 5.1   | Descrição do Domínio  | 88  |
| 5.2   | Condições de Contorno   | 91  |
| 5.3   | Condições Iniciais  | 92  |
| 5.4   | Parâmetros de fluxo   | 93  |
| 5.4.1 | Condutividade Hidráulica  | 93  |
| 5.4.2 | Coefficiente de Armazenamento   | 96  |
| 5.4.3 | Coefficiente de Transferência ou de Drenança                          | 96  |
| 5.4.4 | Parâmetros de fluxo não saturado                                      | 97  |
| 5.5   | Recarga   | 100 |
| 6.    | Modelo numérico de fluxo subterrâneo de Barro Branco                  | 110 |
| 6.1.  | Equações de Fluxo   | 111 |
| 6.2.  | Malha de Elementos Finitos  | 112 |
| 6.3.  | Dados de Entrada  | 114 |
| 6.3.1 | Condições Iniciais  | 114 |
| 6.3.2 | Condições de contorno   | 115 |
| 6.3.3 | Parâmetros de Fluxo   | 116 |
| 6.3.4 | Recarga   | 117 |
| 6.4.  | Calibração  | 117 |
| 6.5   | Verificação da calibração   | 128 |
| 6.6   | Análise de sensibilidade  | 132 |
| 6.6.1 | Recarga   | 134 |
| 6.6.2 | Condutividade Hidráulica  | 138 |
| 6.6.3 | Carga hidráulica de referência dos rios                               | 140 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.7 Apresentação e análise dos resultados                          | 143 |
| 6.7.1 Distribuição da carga hidráulica e posição do nível freático | 143 |
| 6.7.2 Estimativas de recarga e balanço de massa                    | 160 |
| 6.7.3 Estimativas de vazão   | 163 |
| 6.8 Vazões efluentes e vazão sustentável                           | 164 |
| <br>   |     |
| 7. Cenários simulados de bombeamento                               | 166 |
| <br>   |     |
| 7.1 Cenário 1  | 167 |
| 7.2 Cenário 2  | 171 |
| 7.3 Cenário 3  | 174 |
| 7.4 Cenário 4  | 178 |
| 7.5 Cenário 5  | 181 |
| 7.6 Cenário 6  | 185 |
| 7.7 Análise dos Resultados   | 189 |
| <br>   |     |
| 8. Conclusões e Considerações Finais                               | 197 |

*Olha, que chuva boa, prazenteira  
que vem molhar minha roseira,  
chuva boa, criadeira,  
que molha a terra,  
que enche o rio, que limpa o céu,  
que traz o azul*

...

*Olha, o jasmineiro está florido  
e o riachinho de água esperta  
se lança embaixo do rio de águas calmas*

...

Tom Jobim,  
Chovendo na Roseira