

Trabalho Final de Mestrado em Engenharia Ambiental  
Modalidade: Dissertação

**UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA COMO  
FORMA DE GANHO DE COMPETITIVIDADE E DISPONIBILIZAÇÃO  
DE RECURSOS HÍDRICOS PARA A POPULAÇÃO**

Autor: *Alberto Evaristo Bernabé*

Orientador: *Norberto Mangiavacchi*

Co-Orientadora: *Thereza Christina de Almeida Rosso*

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente

Abril de 2006

**UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA COMO  
FORMA DE GANHO DE COMPETITIVIDADE E DISPONIBILIZAÇÃO  
DE RECURSOS HÍDRICOS PARA A POPULAÇÃO**

Alberto Evaristo Bernabé

Trabalho Final submetido ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada por:

---

Prof. Norberto Mangiavacchi, D.Sc. - Presidente  
PEAMB/UERJ

---

Prof<sup>ª</sup> Thereza Christina de Almeida Rosso, D.Sc.  
PEAMB/UERJ

---

Eng<sup>o</sup> Cássio Botelho Pereira Soares Eng. Químico, D. Sc.  
Furnas Centrais Elétricas, SA. – DEA.T/ DNA.T

---

Eng<sup>a</sup> Digna de Faria Mariz, D. Sc.  
Petrobrás, SA.

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Abril de 2006

**BERNABÉ, ALBERTO EVARISTO**

Utilização sustentável de água subterrânea como forma de ganho de competitividade e disponibilização de recursos hídricos para a população. [Rio de Janeiro] 2006.

xviii, 268 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, M.Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - Área de Concentração: Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos, 2006.)

Dissertação - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

1. Água Subterrânea;
  2. Operação e Manutenção de Poços;
  3. Outorga de Uso;
  4. Legislação – Estado do Rio de Janeiro, Brasil;
- I. FEN/UERJ II. Título (série)

## DEDICATÓRIA

A minha esposa, Ângela, filhos e amigos  
pelo carinho, apoio, incentivo e compreensão pe-  
los momentos de ausência.

## AGRADECIMENTOS

À EcoAqua Soluções S/A, pela sua política de capacitação de funcionários, em particular à Direção, Alain Arcalji, Fernando Zulian, Gino Cristallini, André Paiva e Vlamir Paes que acreditaram no meu trabalho e atenderam a minha solicitação, aprovando o pedido de flexibilização do meu horário de trabalho.

À Ângela, minha esposa, pelo amor, incentivo e apoio para realizar este Mestrado e por saber escutar e compartilhar comigo todos os momentos de dificuldades e alegrias e principalmente por entender minhas seguidas ausências do nosso convívio comum e de família, pelas madrugadas acordadas, isolado no escritório de casa correspondendo assim às necessidades de conciliar as exigências do trabalho e da pesquisa para a dissertação do Mestrado. Muito Obrigado

Aos meus filhos, Rodrigo, Teodoro e Nicolas principalmente, pela compreensão nos momentos em que o trabalho exigia dedicação em tempo integral.

Ao Prof. Norberto Mangiavacchi e Professora Thereza Christina de Almeida Rosso pela ajuda, incentivo, orientação e cobrança importantes para a elaboração deste trabalho e principalmente pela grande amizade que surgiu.

Ao geólogo e companheiro de trabalho, Fernando Zulian, pelo seu incentivo, dicas e disponibilidade em ajudar, em vários momentos, inclusive na revisão dos textos.

Aos geólogos Ana Beatriz Barreto, Ivanir Borella, Élcio Linhares e Jean Marie Teissdre agradeço a orientação e disponibilização de trabalhos e matérias tão pertinentes ao tema enfocado e a todos os meus companheiros de trabalho, especialmente, André Castro, Cosme Chiniara, Felipe Alves, Fernando Pitanga, Mauro Sagrilo, Renata Carvalho e Rodrigo Borges, pelo entusiasmado apoio e colaboração.

A todos os meus familiares e amigos em especial a Luiza Perciliana, Vanda, Carmem, e Frederico que ao longo dessa empreitada incentivaram-me e contribuíram muito para o êxito desse trabalho e a memória dos meus pais, Antonio Bernabé e Maria do Socorro e do meu irmão Antonio, pelos ensinamentos e as lições de vida transmitidas.

A SERLA, pela disponibilização dos dados.

A Energia Cósmica do Universo que me deu a vida e o privilégio de conviver com muitos amigos, colaboradores, e instituições, o que demonstra que sem a ajuda dessas pessoas e instituições certamente não seria possível a realização deste trabalho.

A UERJ e seus profissionais pela possibilidade de realizar um trabalho que possa contribuir para a qualidade de vida da nossa população e realizar um sonho profissional

A todas as pessoas que de alguma maneira colaboraram para a realização desta tese.

Resumo do Trabalho Final apresentado ao PEAMB/UERJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

## **UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA COMO FORMA DE GANHO DE COMPETITIVIDADE E DISPONIBILIZAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA A POPULAÇÃO**

Alberto Evaristo Bernabé

Abril de 2006

Orientador: Norberto Mangiavacchi, D. Sc., PEAMB/UERJ

Co-orientadora: Thereza Christina de Almeida Rosso, D. Sc., PEAMB/UERJ

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - Área de Concentração Controle da Poluição Urbana e Industrial - Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos

A água já foi considerada o recurso natural mais farto, barato e acessível de todos. Gerações cresceram acostumadas a pensar em água como algo garantido, que jamais viria a faltar. Porém isto não é mais verdade. Neste contexto, a utilização das águas subterrâneas desponta como uma alternativa viável, em função de sua disponibilidade ser superior às águas superficiais e mais segura, uma vez que estão mais protegidas da poluição externa. As soluções nesse campo necessitam de abordagens abrangentes, incluindo aspectos legais, técnicos, sociais, econômicos e ambientais. A presente dissertação foi formulada considerando as publicações existentes, a legislação em vigor e a experiência profissional do autor na implantação e operação de sistemas de abastecimento. O objetivo foi descrever metodologias de estudos de viabilidade para implantação desses sistemas, regras de operação e manutenção que permitam a utilização sustentável das águas subterrâneas. Entendendo que a outorga é um importante instrumento de gestão dos recursos hídricos, pois visa à racionalização do seu uso, o autor aponta a necessidade de se definir critérios que permitam a transparência do processo de sua concessão. Para isso, foi realizada uma análise da legislação existente e apontadas distorções, como as restrições impostas pelo Estado do Rio de Janeiro ao uso das águas subterrâneas para consumo humano.

**Palavras-Chave:** **Palavras-Chave:** Água subterrânea, operação e manutenção de poços, outorga de uso, legislação – Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

Abstract of Final Work presented to PEAMB/UERJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Environmental Engineering.

## **SUSTAINABLE GROUND WATER USE AS PROFIT OF COMPETITIVELY AND WATER RESOURCES MANAGEMENT FOR THE POPULATION**

Alberto Evaristo Bernabé

April 2006

Advisors: Norberto Mangiavacchi, D. Sc., PEAMB/UERJ

Thereza Christina de Almeida Rosso, D. Sc., PEAMB/UERJ

Environmental Engineering Post graduation Program - Area of study: Water Resources Management

The water already was considered the most plentiful, cheap and accessible natural resources of all. Generations had grown thinking about water as something guaranteed, that it would never come to lack. Nowadays this is not more truth. At this way the Ground-Water usage is an workable and insurance alternative to be explored in function of its availability to be superior of superficial waters and the its bigger protection against external pollution. The solutions in this field need approaches covering legal, technical, social economics and environmental aspects. This Dissertation was formulated from the study of present publications, the legislation and the professional experience of the author, with the objective to describe methodologies for accomplishment of feasibility studies for usage Ground Water and Wells rules of operation and maintenance in a context of sustainable use. The grant process is an instrument for water resources management that it aims at to the rationalization of its use. Understanding that the grant is an important instrument for water resources management, the author points the necessity to define criteria that allow the transparency of the process of its concession. For this, was studied the present legislation and pointed distortions, as the restrictions imposed for the State of Rio De Janeiro to the use of Ground Waters with respect to human consumption.

**Key-words:** Groundwater, wells operation and maintenance, groundwater use grant, Law and Legislation - Rio de Janeiro, Brazil (State)

## SUMÁRIO

Resumo	vii
Abstract	viii
Sumário	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Quadros	xviii
Lista de Formulários	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Caracterização do Problema	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Metodologia	6
2. REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 História da água subterrânea	7
2.1.1 Quanto a origem da água subterrânea	9
2.1.2. Os primeiros estudos sobre a movimentação das águas subterrâneas	10
2.1.3. A água subterrânea dentro do ciclo hidrológico	11
2.2 Importância da água subterrânea	13
2.3 As águas subterrâneas no Brasil	14
2.3.1 Reservas e condições de utilização das águas subterrâneas	18
3. ORIGEM E CIRCULAÇÃO: CICLO HIDROLÓGICO	22
3.1 Considerações iniciais	22
3.2 Hidrologia e hidrogeologia	22
3.3 Quantidade e distribuição de água na Terra	22
3.4 Ciclo hidrológico	24
3.5 Deflúvio (Runoff)	30
3.6. Relações entre o escoamento em cursos d'água e o lençol subterrâneo	34
4. OCORRÊNCIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	36
4.1 Considerações iniciais	36
4.2 Rochas e água	37
4.2.1 Tipos de rocha e suas qualidades de suprir água	38
4.2.1.1 Interstícios originais	38
4.2.1.2 Interstícios secundários	39
4.2.1.3 Interstícios de solução	39
4.2.1.4 Interstícios segundo intemperismo	39
4.2.2 Tipos de rochas	39
4.2.2.1 Cascalho e conglomerado	39
4.2.2.2 Areia e silte	39
4.2.2.3 Calcário	40
4.2.2.4 Argila, folhelho e ardósia	40
4.2.2.5 Gipsita	40
4.2.2.6 Carvão	41
4.2.2.7 Basalto	41
4.2.2.8 Rochas cristalinas	41
4.2.2.9 Rocha granítica fresca	41

4.2.2.10 Rocha granítica intemperizada	41
4.2.2.11 Xisto	41
4.2.2.12 Xisto intemperizado	42
4.2.2.13 Quartzito	42
4.3 Porosidade e permeabilidade	42
4.4 Distribuição vertical da água subterrânea no perfil do solo e subsolo	45
4.4.1 Zona de aeração ou não saturada	46
4.4.2 Zona de umidade do solo	47
4.4.3 Franja de capilaridade	47
4.4.4 Zona intermediária	48
4.4.5 Zona saturada	48
4.5 Tipos de aquíferos	49
4.5.1 Aquífero poroso ou sedimentar	50
4.5.2 Aquífero fraturado ou fissural	50
4.5.3 Aquífero cárstico (karst)	51
4.5.4 Aquífero livre ou freático	51
4.5.5 Aquífero confinado ou artesiano	52
	55
4.6 Movimento da água subterrânea	
4.6.1 Fluxo em meios porosos	56
4.6.2 Condutividade hidráulica	57
4.6.3 Transmissividade	58
4.6.4 Coeficiente de armazenamento	60
4.6.5 Aquíferos em regiões costeiras	62
	64
5. Modelos matemáticos para simulação de escoamento de águas subterrâneas	
5.1 Considerações Iniciais	64
5.2 Modelo conceitual de aquífero	70
5.3 Modelos matemáticos de fluxo	72
5.3.1 Equação diferencial da continuidade	73
5.3.2 Condições de contorno	79
5.4 Métodos numéricos	80
5.4.1 Método das diferenças finitas	80
5.4.2 Método de elementos de contorno	80
5.4.3 Método de elementos finitos (MEF)	81
5.4.4 Exemplos de aplicação de elementos finitos em aquíferos	83
5.5 Implementação do sistema para simulação de fluxo subterrâneo utilizando MEF	87
5.6 Utilização do sistema para simulação de fluxo subterrâneo utilizando MEF	88
5.6.1 Exemplo A	88
5.6.2 Exemplo B	90
	93
5.7 Potencial de aplicação da ferramenta de simulação	
6. Planejamento e execução de uma metodologia de trabalho para a utilização sustentável da água subterrânea	94
6.1 Estudo de viabilidade inicial	96
6.1.1 Identificação do interessado, volume e disponibilidade hídrica.	96
6.1.2 Identificação da qualidade de água necessária para a utilização	99
6.1.3 Estudo hidrogeológico preliminar.	99
6.1.3.1 Levantamento inicial	99
6.1.3.2 Levantamento de campo	100

6.1.3.3 Vulnerabilidade dos aquíferos	101
6.1.3.4 Relatório preliminar – Estudo hidrogeológico	101
6.1.4 Levantamento preliminar dos custos	101
6.1.4.1 Investimentos	102
6.1.4.2 Despesas de operação	103
6.1.5 Tomada de decisão	103
6.2 Execução do Projeto – Fase 1.	104
6.2.1 Estudos hidrogeológicos para a locação dos poços.	105
6.2.2 Projeto Técnico de Construção de Poços.	109
6.2.3 Autorização para perfuração de poços de extração de água subterrânea	110
6.2.4 Construção dos poços	112
6.2.4.1 Percussão	113
6.2.4.2 Rotativo	114
6.2.4.3 Roto pneumático	115
6.2.4.4 Perfilagem geofísica de poço	116
6.2.4.5 Instalação de filtros para poços e encascalhamento	118
6.2.4.6 Desenvolvimento	118
6.2.4.7 Cimentação	119
6.2.5 Identificação da qualidade de água	120
6.2.6 Testes de bombeamento em poços e aquíferos	122
6.2.6.1 Testes de produção (Bombeamento)	124
6.2.6.1.1 Determinação das perdas de carga e da vazão máxima explorável	129
6.2.6.1.2 Determinação da eficiência	131
6.2.6.1.3 Determinação da eficiência fixação das condições de exploração	132
6.2.6.2 Teste de aquíferos	139
6.2.6.3 Resultados de um teste de aquífero	144
6.3. Elaboração do Projeto Final – Fase 2	159
6.3.1. Outorga do recurso hídrico subterrâneo (autorização para o uso).	160
6.4. Execução do Projeto Final – Fase 2	162
6.5. Comparação com as premissas iniciais	163
7. MODELOS PRÁTICOS PARA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE POÇOS TUB RES PROFUNDOS.	165
7.1 Levantamento e registro de dados básico	169
7.1.1 Relatório final de poço	169
7.1.2 Resultado de análises físico químicas e bacteriológicas da água	170
7.1.3 Estabelecimento das condições iniciais de operação.	171
7.1.3 Instalação e características do equipamento de bombeamento e materiais auxiliares.	171
7.2 Operação e manutenção - Levantamento e registro de dados básicos – Avaliação e pretação dos dados	175
7.2.1 Medições e testes	178
7.2.1.1 Principais Medições	178
7.2.1.2 Teste de bombeamento e recuperação	180
7.2.1.3 Análise físico química	181
7.2.1.4 Análise bacteriológica da água.	181
7.2.2 Processamento e controle dos dados	182
7.2.2.1 Acompanhamento diário do ND x vazão x número de horas de funcionamento.	182
7.2.2.2 Controle de qualidade físico química da água – Acompanhamento mensal e anual	195

7.3 Programa de manutenção	196
7.3.1 Problemas mais frequentes em poços	197
7.3.1.1 Problemas mecânicos	198
7.3.1.2 Problemas hidráulicos	199
7.3.1.3 Problemas de qualidade de água	200
7.4. Aplicação de soluções – Recondicionamento de poços	202
7.4.1 Obstrução	202
7.4.2 Queda de vazão ou de produção	203
7.4.3 Prevenção e tratamento da incrustação	204
7.5 Limpeza e desinfecção	204
7.6. Defeitos mais comuns em bombas e parte elétrica	208
7.7 Diretrizes de manutenção preventiva	209
7.8 Avaliação e interpretação de dados	209
8. GESTÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	213
8.1 Aspectos Históricos da política re recursos hídricos – Base Legal e Institucional	213
8.2 Coordenação regulatória com os setores usuários e avanços na Constituição de uma base legal	225
8.3 A situação no Rio de Janeiro	228
8.3.1 A base legal do Poder do Estado do Rio de Janeiro	228
8.3.2 As instituições e seus papéis	231
8.3.2.1 Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano (SEMADUR)	232
8.4 Processo de Outorga	234
8.4.1 Avaliação dos Sistemas de Outorga em Estados selecionados	238
8.5 Processo de Outorga no Estado do Rio de Janeiro	244
8.6 Utilização da Água Subterrânea no Rio Grande do Norte, São Paulo e Centro-Oeste	250
8.7 Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito Internacional	253
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS	260
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	265

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Distribuição da Água na Terra	24
Figura 3.2 - Esquema do ciclo hidrológico	25
Figura 3.3 - Ciclo Hidrológico	25
Figura 3.4 - Desenho esquemático do ciclo hidrológico. Movimento da água é mostrado pelas linhas sólidas e o movimento do vapor pelas linhas tracejadas.	29
Figura 3.5 - Mecanismos de alimentação pela chuva de um curso d'água	31
Figura 3.6 - Mecanismos da precipitação, infiltração e escoamento superficial	32
Figura 3.7 - Fluxo hipodérmico (interflow) em um solo com alta porosidade e uma fina camada de material permeável sobre uma camada de rocha de baixa permeabilidade.	33
Figura 3.8 - Influência da elevação do lençol freático	34
Figura 3.9.a.b.c.d. - Formas de interação entre um curso d'água e o lençol de água subterrânea	35
Figura 3.10 - Forma de interação entre rio e o lençol de acordo com a época do ano	35
Figura 4.1 – Representação esquemática de distintos tipos de rocha, indicando a relação entre a textura e a porosidade: (a) rocha sedimentar com granulometria homogênea (porosidade elevada); (b) rocha sedimentar de granulometria homogênea cujos grãos são porosos (porosidade muito elevada); (c) rocha sedimentar de granulometria heterogênea (baixa porosidade); alto grau de cimentação (porosidade muito baixa); (e) rocha com porosidade secundária devido a fraturas; (f) rocha com porosidade secundária devido a dissolução.	43
Figura 4.2 – Conceito de porosidade efetiva, como sendo a quantidade de água efetivamente drenada por gravidade de um volume unitário saturado do aquífero.	44
Figura 4.3 – Distribuição vertical da água no solo e subsolo.	45
Figura 4.4 - Caracterização esquemática das zonas não saturada e saturada no subsolo	46
Figura 4.5 – Tipos de Aquíferos quanto à porosidade	50
Figura 4.6 – Tipos de aquíferos quanto à pressão	51
Figura 4.7 – Representação esquemática do nível de pressão nos aquíferos.	53
Figura 4.8 – Esboço esquemático de dispositivo utilizado por Darcy	56
Figura 4.9. Conceitos de condutividade hidráulica e transmissividade	59
Figura 4.10 - Representação do Volume de água Liberada de Aquíferos.	61
Figura 4.11 - Representação Esquemática do Contato entre um Aquífero e a Camada Confinante Sobreposta.	62
Figura 4.12 – Aquífero em regiões costeiras. Água doce, água salgada e cunha salina em equilíbrio hidrodinâmico	63
Figura 4.13 – Avanço da cunha salina devido a bombeamento excessivo	63
Figura 5.1 – Modelos Matemáticos	65
Figura 5.2 – Etapas da modelação	68
Figura 5.3 – Etapas da Modelagem	69

Figura 5.4 – Volume de controle para formulação da equação da continuidade	73
Figura 5.5 – Esquema do fluxo de massa através da superfície do volume de controle	74
Figura 5.6 – Esquema de fluxo de massa nas direções $x$ e $y$	75
Figura 5.7 – Perda de massa no volume do controle	76
Figura 5.8 – Malha de elementos finitos com elementos triangulares	83
Figura 5.9 – Contorno $\Gamma$	84
Figura 5.10 – Malha de Simulação	89
Figura 5.11 – Condição Inicial -Tempo $t=0$	89
Figura 5.12 – Condição Final – Tempo $t=t_1$	90
Figura 5.13 – Condição Inicial da carga hidráulica utilizada no exemplo B	91
Figura 5.14 – Condição Transiente da carga hidráulica no tempo $t_1$	91
Figura 5.15 – Condição Transiente da carga hidráulica no tempo $t_2$	92
Figura 5.16 – Condição Transiente da carga hidráulica no tempo $t_3$	92
Figura 5.17– Condição Estacionária	93
Figura 6.1 - Exemplo típico de uma indústria	98
Figura 6.2 – Mapa de localização dos <i>Campi</i> da UFPR indicando os alinhamentos foto-interpretados, as seções geofísicas e as propostas de locações de poços tubulares profundos	100
Figura 6.3 – Mapa dos <i>Campi</i> Centro Politécnico e Jardim Botânico indicando a localização das linhas geofísicas, os lineamentos fotointerpretados, os poços perfurados e as propostas de locação.	107
Figura 6.4 – Mapa do <i>Campus</i> Juvevê indicando a localização da linha geofísica, os lineamentos fotointerpretados e a proposta de locação de poço tubular profundo	108
Figura 6.5 – Teste de Produção	124
Figura 6.6 - Curva de Rebaixamento x Tempo em Testes de Produção Escalonado	125
Figura 6.7 - Causas do rebaixamento em poços	127
Figura 6.8 - Representação gráfica do teste de rebaixamento em etapas	129
Figura 6.9 - Representação gráfica da equação característica do poço	130
Figura 6.10 - Curva característica de poço	131
Figura 6.11 - Ficha técnica e resultados de teste de produção em poço	135
Figura 6.12 - Ficha técnica e resultados de teste de produção em poço exemplo B	138
Figura 6.13 – Teste de Aquífero	141
Figura 6.14 - Planilha de teste de Aquífero - Tipo de Teste – Rebaixamento	148
Figura 6.15 - Planilha de teste de Aquífero - Interpretação do Teste de Rebaixamento	149
Figura 6.16 - Planilha de teste de Aquífero - Tipo de Teste – Recuperação	150
Figura 6.17 - Planilha de teste de Aquífero - Interpretação do Teste de Recuperação	151
Figura 6.18 - Planilha de teste de Aquífero - Tipo de Teste – Recuperação $t/t'$	152

Figura 6.19 - Planilha de teste de Aquífero - Interpretação do Teste – Recuperação t/t'	153
Figura 7.1 – Operação e Pré Operação	167
Figura 7.2 – Manutenção	168
Figura 7.3 Desenho Esquemático da Instalação de Poço Tubular	173
Figura 7.4 Barrilete de controle operacional	173
Figura 7.5 Barrilete de controle operacional	174
Figura 8.1 Pedidos de outorga e outorgas emitidas pela SERLA de 2003 a março 2006	244
Figura 8.2 Outorgas de água subterrânea emitidas pela SERLA de 2003 a março 2006	244
Figura 8.3 Autorizações de Perfuração expedidas pela SERLA de 2003 a março 2006	245
Figura 8.4 Gráfico sobre a estimativa de distribuição de captações de água subterrânea outorgados ou em processo de outorga em função de seu uso.	246
Figura 8.5 Distribuição dos poços no Estado do Rio de Janeiro por atividade.	247
Figura 8.6 Gráfico sobre distribuição dos usuários de água superficial e subterrânea cadastrados	248
Figura 8.7 – Distribuição dos usuários cadastrados em função da finalidade de seu uso	248
Figura 8.8 Outorgas Expedidas por ano pelo DAEE	251
Figura 8.9 – Usos outorgados em 2006 pelo DAEE até 31/01/2006	252

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Distribuição de suprimentos de água na Terra, em %.	24
Tabela 4.1 – Água Doce da Hidrosfera e Sua Taxa de Troca	38
Tabela 4.2 – Valores típicos de porosidade para alguns solos e rochas	44
Tabela 4.3 – Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para vários materiais não consolidados	59
Tabela 6.1 - Consumo de Água por ramos de atividade	98
Tabela 6.2 - Investimentos	102
Tabela 6.3 – Despesas Mensais de Operação	103
Tabela 6.4 – Estudo da Rentabilidade dos Investimentos	104
Tabela 6.5 – Síntese dos cenários de investimento e operação	104
Tabela 6.6 – Classificação dos métodos geofísicos	106
Tabela 6.7 – Orientações para a Utilização de Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo	112
Tabela 6.8 – Lista de tabelas da Portaria nº 518	121
Tabela 6.9 – Definições	123
Tabela 6.10 - Planejamento para um teste de produção em etapas sucessivas	126
Tabela 6.11 – Planejamento para um teste de produção em etapas escalonadas	126
Tabela 6.12 - Disposição dos resultados de teste de bombeamento em etapas	129
Tabela 6.13 – Métodos de Interpretação de testes de Aquífero em função do tipo de aquífero e do regime de bombeamento	140
Tabela 6.14 – Avaliação das características hidráulicas do poço 8	154
Tabela 6.15 - Interpretação do Teste de produção do poço 8	157
Tabela 6.16 – Valores de transmissividade do aquífero	158
Tabela 6.17 – Descrição dos Piezômetros	158
Tabela 6.18 – Rebaixamento por interferência do poço 11	159
Tabela 6.19 - Cronograma de obra	163
Tabela 6.20 - Rentabilidade dos investimentos Após Obra	164
Tabela 7.1 – Característica do Poço, Equipamentos de Bombeamento e Instalações Auxiliares	175
Tabela 7.2 – Sumário com as principais informações e testes	177
Tabela 7.3 – LV0001	186
Tabela 7.4 a - Acompanhamento Diário dos Níveis dinâmicos x Vazão	191
Tabela 7.4 b - Acompanhamento Mensal dos Níveis dinâmicos x Vazão e Número de	191

horas de Funcionamento do poço	
Tabela 7.4c - Relatório Diagnóstico de Manutenção	192
Tabela 7.5 - Monitoramento sem Perda	193
Tabela 7.6 - Monitoramento com Perda	194
Tabela 7.7 - Padrão Análises Físico – Químicas e Bacteriológicas EcoAqua	196
Tabela 7.8 – Quantidade de hipoclorito de sódio para cada m <sup>3</sup> de solução	205
Tabela 7.9 - Volume de alvejante para cada m <sup>3</sup> de solução	205
Tabela 7.10 - Instrução de Trabalho Desinfecção de Poços	206
Tabela 7.11 – Tipos de problemas que podem ocorrer em um poço tubular profundo	207
Tabela 8.1 – Modelos brasileiros de gestão de recursos hídricos e breve caracterização	215
Tabela 8.2 – Síntese histórica da evolução do uso das águas	222
Tabela 8.3 Avaliação Institucional Qualitativa dos Órgãos Gestores Estaduais	226
Tabela 8.4 – Síntese sobre os sistemas de outorga utilizados entre os estados brasileiros pesquisados	240

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Informações do meio físico	71
Quadro 2 – Informações do meio hidrogeológico	71
Quadro 3 - Script exemplificando o sistema de simulação da exploração de um poço de um aquífero confinado	87
Quadro 4 - Resumo dos resultados dos testes	146
Quadro 5 – Síntese Dos Sistemas de Gestão da Água na Europa e Estados Unidos	258
Quadro 6 - Síntese sobre os Sistemas de Gestão da Água na América Latina	259

## **LISTA DE FORMULÁRIOS**

Formulário 1 – Registro diário de operação	184
Formulário 2 – Registro diário de manutenção	185
Formulário 3 – Controle Mensal de Operação	189
Formulário 4 – Controle Anual de Operação	190

# **CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA**

A água já foi considerada o recurso natural mais farto, barato e acessível de todos. Gerações cresceram acostumadas a pensar em água como algo garantido, que jamais viria a ser fonte de maiores preocupações. Porém, esta não é mais a realidade atual. Na medida em que crescem populações e economias, o fornecimento de água em quantidade e qualidade adequada, assim como a preservação dos mananciais, torna-se questões cada vez mais sensíveis.

Sabe-se que aproximadamente  $\frac{3}{4}$  da superfície da Terra é coberto por água, considerada substância essencial para a manutenção dos seres vivos. A ciência a reconhece como o ambiente em que surgiu a vida.

A existência da água nos estados sólido, líquido e gasoso na Terra, envolve o fenômeno denominado ciclo hidrológico, que é a contínua circulação entre os oceanos, a atmosfera e os continentes, sendo responsável pela renovação da água doce, há pelo menos 3,8 bilhões de anos. Entretanto, aproximadamente 97,6% da água do planeta é constituída pelos oceanos, mares e lagos de água salgada. A água doce representa algo no entorno dos 2,4% restante e a sua maior parte fica situada nas calotas polares e geleiras (1,9%), inacessível aos homens pelos meios tecnológicos atuais. Da parcela restante (0,5%), mais de 95% é constituída pelas águas subterrâneas (CAPUCCI,2001).

Já há consenso mundial de que uma grave crise de abastecimento de água deverá ser enfrentada nos próximos anos. No Brasil, por exemplo, o cenário também é preocupante: 43% da população se concentram em regiões que somam apenas 6,8% dos recursos hídricos, e os investimentos necessários para a expansão e consolidação de uma rede de saneamento básico adequada são da ordem de dezenas de bilhões de dólares.

As metrópoles brasileiras situam-se, quase todas, naquelas regiões onde é menor a disponibilidade hídrica, basicamente no Sudeste e Sul (São Paulo, Belo Horizonte e Curitiba situam-se em áreas de montante de bacias hidrográficas) e ao longo costa nordestina. A bacia amazônica detém cerca de 70% da disponibilidade hídrica do Brasil. (COSTA, 2003)

Nas últimas décadas observa-se um crescimento populacional, que além de aumentar as necessidades hídricas, nem sempre está ocorrendo em áreas com maior disponibilidade de recursos hídricos.

A busca por uma eficiência no gerenciamento dos recursos hídricos constitui, sem dúvida, um dos temas atuais de importância estratégica no cenário mundial. No Brasil, também se avança neste objetivo. Simultaneamente, no âmbito federal e estadual, decisões em colegiado pelos representantes dos setores políticos, usuários, técnicos e da sociedade civil, têm catali-

sado a estruturação do gerenciamento dos recursos hídricos nas diversas frentes nas quais este objetivo deve ser confrontado.

De acordo com COSTA (2003), durante a última década, problemas de escassez e poluição da água têm exigido dos governos e da sociedade em geral uma maior atenção para o assunto. Apesar destes problemas, recentes avanços alcançados pelo Brasil no campo do desenvolvimento de recursos hídricos foram significativos. No setor de saneamento, os resultados são igualmente impressionantes. Nos últimos 40 anos, o Brasil ampliou seus sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário, respectivamente, para mais 100 milhões e 50 milhões de brasileiros, respectivamente.

Entretanto, ainda existem imensos desafios a enfrentar em um País onde o acesso à água ainda é muito desigual, impondo enormes restrições à população mais pobre. Apenas na região Nordeste do País, mais de um terço da população não tem acesso confiável ao abastecimento de água potável. A poluição de rios e outros mananciais em regiões metropolitanas continua se alastrando.

Num momento como este, torna-se fundamental abordar o tema de forma ousada e criativa. O futuro do abastecimento de água depende de um trabalho que se re-inicia todos os dias, na busca de soluções que garantam disponibilidade, qualidade e custo viável, ao mesmo tempo permitindo a perpetuação do meio-ambiente.

A água também é um veículo para os mais diversos tipos de doenças, quando poluída ou contaminada, conforme apresentado em FEITOSA (1997). Além disso, é reconhecido na literatura técnica especializada que a falta de água potável e de saneamento básico provoca a morte de pessoas, principalmente crianças vitimadas por doenças de veiculação hídrica como a cólera, a diarreia, entre outras doenças. No Brasil, tais constatações são alarmantes tendo em vista que um estudo do Banco Nacional de Desenvolvimento Social, BNDES, (1998) <sup>1</sup> sobre saneamento indicou que 9 % da população urbana não é atendida por rede de água dos sistemas de abastecimento e que cerca de 45% das águas tratadas distribuídas são desperdiçadas. A pesquisa constatou ainda a alarmante realidade de que a coleta de esgotos atinge a 49 % da população e que 90% dos esgotos são lançados “in natura” nos solos e rios, sem qualquer tratamento.

Segundo COSTA (2003), em 1999, cerca de 93% da população brasileira urbana era atendida por rede geral de abastecimento de água e permaneciam ainda sem rede coletora de esgotos ou fossa séptica 26% dessa população. No entanto, esses percentuais de cobertura de

---

<sup>1</sup> palestra realizada em 07/12/1998 Pela Terezinha Moreira, chefe do Departamento de Saneamento Ambiental do BNDES, no seminário organizado pela Gazeta Mercantil – Perspectivas, Financiamentos e Operações.

abastecimento de água e esgotamento sanitário variam de forma muito expressiva entre a população, segundo a região de moradia e faixas de rendimentos.

No Nordeste, 62% da população urbana com rendimentos mensais domiciliares de até 1 salário mínimo contam com rede geral de abastecimento de água, embora cerca de 70% dessa população não esteja ligada à rede coletora de esgotos ou possuam fossa séptica. Nas diversas regiões do Brasil, a taxa de cobertura de abastecimento de água e esgotamento sanitário da população urbana com rendimentos mensais domiciliares superiores a 20 salários mínimos alcança níveis próximos a 100%.

Constitui ainda um fator agravante dessa situação, o fato de que somente uma pequena parcela (cerca de 20%) dos esgotos coletados são tratados antes que infiltrados em lençóis freáticos ou despejados nos cursos de água.

Desta forma, com o objetivo de atender continuamente a demanda da população as empresas de tratamento de água voltadas para o abastecimento público são obrigadas a aumentar os seus custos operacionais de tratamento. Além disto, uma vez que a distância entre a captação, tratamento e distribuição aumentam, os investimentos necessários também são elevados. Outro fator importante é a dificuldade de tratamento em função dos diferentes tipos de contaminantes químicos potenciais.

Apesar de cerca de 97% da água doce disponível para a utilização encontrar-se no subsolo, na forma de água subterrânea, a maior ênfase dos mananciais de águas para abastecimento encontram-se nas águas superficiais, principalmente pelo fato destas águas serem visíveis e também pela dificuldade de exploração da água subterrânea em relação à água superficial.

De acordo com HIRATA (1991), água subterrânea é aquela proveniente do subsolo, que preenche os poros e fraturas das rochas. Ainda segundo o autor, nos termos do art. 1º da lei n.º 6.105/98 do estado do Pará, "são consideradas subterrâneas as águas que ocorram, natural ou artificialmente, no subsolo, de forma suscetível de extração e utilização pelo homem".

Em termos legislativos, HIRATA (1992) destaca que existem muitas controvérsias no que concerne à competência para legislar sobre as águas subterrâneas e seus respectivos domínios. Mesmo na lei federal 9.433 de 1997, conhecida como *Lei das Águas* e que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, PNRH e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, SINGREH, esse conflito de competência para legislar sobre as águas subterrâneas também pode ser observado:

*"No caso das águas subterrâneas, os aquíferos, entendidos como estruturas que retêm águas infiltradas, podem ter prolongamentos além das fronteiras estaduais, passando portanto a ser de domínio federal. Essas águas, assim podem ser federais ou estaduais,*

*diferente do que se popularizou como titularidade dos Estados. A caracterização vai depender das direções dos fluxos subterrâneos e das águas de recarga (alimentação) e se as obras para sua captação foram contratadas pelo poder público federal (...)"*.

HIRATA (1991) enumera as vantagens da utilização das águas subterrâneas, destacando-se: *a)* baixos custos de captação quando comparados com os das águas superficiais por exigir menos construções; *b)* maior facilidade de exploração, podendo ser ter sua prospecção mais popularizada; *c)* menor impacto ambiental, desde que se sigam corretamente todos os trâmites administrativos e técnicos exigidos; *d)* bom nível de potabilidade; *e)* encontram-se em locais sem contato direto com as principais atividades podendo ser consideradas melhores protegidas dos agentes poluidores, na maioria dos casos.

Não se pode negar, entretanto que, embora de muita importância, a água subterrânea, não é suficiente para abastecer grandes centros populacionais, situados em áreas de aquíferos pobres, como é o caso, por exemplo, da região metropolitana do Rio de Janeiro. Entretanto, é um complemento importante à água superficial. No Brasil, nas duas últimas décadas, houve um grande crescimento do uso deste recurso. Mesmo assim, o país está longe dos níveis de uso e gerenciamento alcançados pelos países da Europa e os Estados Unidos.

No mundo globalizado de hoje, o estudo da água subterrânea e o seu aproveitamento criterioso assume uma importância cada dia maior como instrumento capaz de prover solução para os problemas de suprimento hídrico e como fator fundamental para o desenvolvimento. Entre as alternativas existentes para estes problemas destacam-se:

- perfuração de poços artesianos, o que representa uma fonte alternativa de abastecimento a um custo acessível. No entanto existe um alto risco envolvido no que se refere ao sucesso da perfuração, qualidade e volume de água encontrado;
- captação de água da chuva e posterior tratamento. Esta tecnologia vem sendo desenvolvida há algum tempo, porém os projetos ainda esbarram em certas dificuldades técnicas.
- reúso de água, como por exemplo, utilização de efluente proveniente de estações de tratamento para regas de jardim ou em processos industriais.

Em função deste cenário, a água subterrânea assume importância cada vez maior como fonte de abastecimento em áreas rurais e urbanas, para uso humano, agrícola e industrial, tornando-se uma alternativa viável aos usuários e apresentando uso crescente nos últimos anos. A contradição explicitada na alternativa de utilização da água subterrânea, descrita acima, é

função do risco envolvido na perfuração, que poderá ser minimizado pelos estudos a serem realizados, mais que nunca devem ser desprezados.

A ciência que estuda a utilização da água subterrânea é a hidrogeologia e visa satisfazer a necessidade de ampliação de conhecimentos em vários campos notadamente:

- exploração(prospecção), avaliação e exploração (operação) dos aquíferos;
- proteção e conservação dos aquíferos visando a não contaminação dos mesmos ou a remoção dos contaminantes;
- planejamento e administração dos recursos para as diversas utilizações.

Convém entender que o objetivo da discussão desses argumentos não é mostrar que a água subterrânea é sempre superior e mais vantajosa, mas sim chamar a atenção para o fato de que, quando os dois recursos estão presentes ambos devem ser utilizados racionalmente de acordo com suas características específicas.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo principal deste estudo é avaliar a viabilidade técnica e econômica da exploração sustentável de água subterrânea, através do emprego de diversas ferramentas e metodologias de controle operacional que visam o gerenciamento adequado dos recursos hídricos subterrâneos. Pretende-se ainda realizar uma análise das exigências legais para outorga, suas implicações para o usuário e o entendimento da base legal.

Dentre os objetivos, pode-se citar também: estudar os mecanismos que podem minimizar os riscos envolvidos na exploração de água subterrânea, garantindo o uso do aquífero como fonte sustentável de água baseada na utilização racional dos recursos hídricos subterrâneos. Espera-se assim que tais estudos possam contribuir para a redução da dependência da concessionária, minimizando os riscos de racionamentos, interrupções e cortes de fornecimento, com uma boa qualidade, a um custo inferior aos praticados normalmente pelas concessionárias. Pretende-se ainda demonstrar a potencialidade dos recursos hídricos subterrâneos para a redução de custo com qualidade e confiabilidade do abastecimento, desonerando o setor público de alguns investimentos. Desta forma incrementa-se a oferta da água, principalmente para empresas e grandes consumidores, obtendo-se como consequência o aumento da disponibilidade da concessionária para o abastecimento da população.

### 1.3. METODOLOGIA

O trabalho consistirá no estudo do contexto da exploração e captação da água subterrânea através de poços tubulares profundos, implantação de um sistema de tratamento adequado, cuidados para evitar poluição dos aquíferos e contemplará principalmente as seguintes etapas:

- revisão da literatura;
- metodologias para estudo de viabilidades para projetos de exploração e exploração de água subterrânea, demonstrando a utilização de modelos matemáticos;
- procedimentos operacionais para a exploração do aquífero (operação e manutenção dos poços);
- gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Nos Capítulos 2, 3 e 4 é apresentada uma visão histórica da água, revisão da literatura e alguns conceitos de hidrogeologia.

No Capítulo 5 demonstra-se a viabilidade da utilização de modelos matemáticos como ferramentas de suporte a decisão para os órgãos gestores de recursos hídricos bem como para outros fins.

No Capítulo 6 e 7 apresentam-se as metodologias e exemplos práticos da implantação de uma solução alternativa de abastecimento de água tendo como principal manancial a água subterrânea.

No Capítulo 8 é caracterizado o estado da arte da legislação sobre recursos hídricos, principalmente sobre água subterrânea.

No Capítulo 9 têm-se a conclusão desta dissertação, ressaltando-se a importância da inclusão de metodologias para a exploração, exploração e gestão de águas subterrâneas no contexto da gestão de recursos hídricos do País.

## CAPÍTULO 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. HISTÓRIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

O culto à água, seja ela subterrânea ou superficial, se confunde com a própria história da humanidade. O homem primitivo, ainda selvagem, errava nu e mesmo exposto às intempéries e rigores das estações, imergia seu corpo nas fontes, rios e lagos para diversão, banhos e para abrandar o calor ambiental, entre outras finalidades. Podemos citar também como um destaque às águas minerais, em especial as quentes, utilizadas para tratamentos preventivos e curativos. Estas terapias e hábitos foram cultivados pelas mais antigas civilizações e transmitidas através das diversas gerações.

Segundo VILLIERS (2002), os povos da Mesopotâmia e do Oriente Médio, que estiveram em condições críticas de água mesmo em tempos bíblicos, possuem contos sobre a água que correm o mundo todo. No Livro do Profeta, os crentes são recomendados a partilhar a água com qualquer um que precise, como parte básica da obrigação humana em relação aos estrangeiros. Afinal o mundo não surgiu quando Deus separou as águas das profundezas das águas do ar, criando a Terra? No Corão, o Senhor diz: “Nós dividimos os céus e a Terra, e por meio da água demos vida a tudo” Deus é a fonte de água viva. Os contadores da exegese diziam que há mais de duzentas referências à água, aos poços e aos oásis na Bíblia. Moisés significa “tirado da água” em hebraico.

Os povos antigos também veneravam as águas das fontes e as águas subterrâneas, como pode ser observado em MOURÃO (1997). Segundo o autor, a *fonte* era um local de nascimento misterioso, a água brotando das profundidades tenebrosas para a luz do dia, fenômeno que se repete incessantemente. O nome das *fontes* é, por isso, feminino, correspondendo, entre os germânicos, a uma ondina ou naiade (ninfa dos rios). A palavra ninfa, em grego, significa “noiva”. As ninfas, por isso, eram as deusas do casamento.

Outras citações podem ser observadas através da literatura especializada abordando as construções de sistemas de diques, canais e aquedutos, muitos deles projetados e construídos para abastecer zonas urbanas, explorar e controlar cheias sazonais e irrigar campos áridos contribuindo assim para o incremento da agricultura.

A utilização das águas subterrâneas precedeu grandemente a compreensão de sua origem, ocorrência e movimento. O homem desde a antiguidade observou as nascentes e reconheceu a sua importância, muito antes de entender a sua origem. De acordo com SILVA (2000), suas reservas são utilizadas como fonte de abastecimento das populações das regiões áridas e semi-áridas desde os primórdios das civilizações antigas. Estima-se que as escavações realizadas para extração dessa água para consumo datam de pelo menos 8.000 a.C. A perfura-

ção de poços, utilizando-se de varas de bambu, por exemplo, iniciou-se na China por volta de 5.000 a.C. e no Brasil, a utilização das águas subterrâneas ocorre desde o período colonial, podendo ser atestada pelos “cacimbões” existentes nos fortes militares, conventos, igrejas e outras construções dessa.

A escavação de poços rasos foi a mais antiga alternativa organizada a partir da cacimba comunitária. Os poços tornam-se mais profundos à medida que a necessidade da população aumenta e novas ferramentas foram desenvolvidas. Os egípcios aperfeiçoaram uma perfuração de sondagem em pedreiras por volta de 3.000 a.C., embora os poços da época, com diâmetros variáveis, revestidos com pedra e construídos com trabalho humano e animal, raramente possuíssem mais de 50 metros de profundidade. (VILLIERS, 2002).

TOLMAN (apud FEITOSA, 1997) elencou que túneis e poços construídos para captação de água na Pérsia e no Egito por volta de 800 a.C., comprovam que as águas subterrâneas são aproveitadas pelo homem desde a idade antiga.

De acordo com MOURÃO (1997), na cidade de Serra Negra, em São Paulo, uma constelação de dezesseis santos beatifica suas fontes oligominerais e radioativas. Os gregos escolheram a fonte Juvência, como símbolo da eterna juventude, transformando-a em síntese mágica da vida, juventude, saúde e eternidade. De acordo com VILLIERS (2002), em 1893, RC HOPE publicou *The legendary Lore of the Holy Wells of England*, no qual catalogou o nome de 129 santos aos quais os poços venerados antigamente haviam sido consagrados, sendo a Virgem a mais comum.

Observa-se ainda a utilização da água subterrânea para irrigação conforme apresentado em VILLIERS (2002). Segundo o autor, os mais antigos esquemas de irrigação eram chamados de “qanats”, os quais eram ao mesmo tempo poços e aqueduto. Os “qanats” tornaram possível a grande civilização urbana da Mesopotâmia e ainda são muito usados desde o Afeganistão, passando pelo Iraque e Irã na direção oeste até o Egito. Um qanat é essencialmente um poço horizontal. Os aquíferos, águas subterrâneas próximas à superfície, são encontrados em terras altas, freqüentemente nas colinas ao pé das montanhas. Uma perfuração é feita horizontalmente neste cone aluvial, que em geral é alimentado por riachos da montanha. O túnel é construído para descer gradualmente, de forma que a água possa fluir até o seu destino somente pela gravidade, o que pode significar, em um dos mais antigos, uma distância de 50 quilômetros. Ainda segundo o autor, este sistema pode correr alguns metros abaixo da superfície, protegendo a água da evaporação no sol do deserto. Muitos desses qnatas vêm operando há milhares de anos. Até a construção dos reservatórios de captação na década de 1930, Teerã recebia toda a sua água de dezenas de qnatas que produziam cerca de 800 litros por segundo.

### 2.1.1. Quanto à origem da água subterrânea

As primeiras teorias para explicar a origem das nascentes e das águas subterrâneas põem ser vistas nas obras dos filósofos gregos e romanos, teorias estas que variam da fantasia a considerações quase corretas. Segundo alguns filósofos, a água que brotava de nascentes não podia ser proveniente das chuvas, porque se acreditava que a quantidade era inadequada. Apresentam-se a seguir algumas das formulações apresentadas por estes filósofos.

Homero, Tales, Platão e René Descartes formularam hipóteses de que as nascentes eram formadas por água do mar conduzida através de canais subterrâneos para baixo das montanhas, depois purificados e dirigindo até à superfície. Aristóteles supôs que se o ar entrasse em frias cavernas escuras sob as montanhas, ele se condensaria em água e contribuiria para as nascentes. Sêneca e Plínio seguiram as idéias gregas e pouco contribuíram para o assunto. Entretanto, um passo importante foi dado pelo arquiteto romano Vitruvio, explicando a teoria da infiltração, tendo como referência a grande quantidade de chuva que as montanhas recebem escoando através dos estratos rochosos e emergindo para formar os cursos de água.

Anaxágoras (500-428 a.C.) reconheceu a importância da chuva como fonte de água para os rios e mesmo para o armazenamento da água subterrânea, embora não tenha entendido corretamente a natureza desse armazenamento (WALTON, apud FEITOSA, 1997).

A Bíblia relata muitos incidentes ilustrando a importância das águas subterrâneas para abastecimento das tribos de Israel. O capítulo XXVI do Gênesis parece uma cartilha de água subterrânea.

A Europa, isolada das civilizações do Oriente e de suas habilidades de engenharia, chegou relativamente tarde à perfuração de poços. Tal fato foi decorrente da relativa facilidade de encontrar água no seu clima temperado. No início do século XII, foram descobertos “poços jorrantes” em Flandres na Inglaterra. No mesmo século, foram inventados furadeiras de percussão. Os monges cartuxos de Lilliers, na França perfuraram um antigo poço em 1126. Alguns anos depois, outros religiosos na província de Artois, perfuraram quatro poços de 100 metros na pedra de greda (calcáreo friável que geralmente contém sílica e argila). Tais poços esguicharam com tanta força que conseguiram fazer mover um moinho d’água de quase 4 metros de altura. Desde então, os poços jorrantes foram chamados de “artesianos”, por causa destes poços de Artois<sup>2</sup>.

De acordo com FEITOSA (1997), durante o século XVII, principalmente na França, foram realizados estudos de precipitação pluviométrica sobre bacias hidrográficas, ficando de-

---

<sup>2</sup> In Enciclopédia Britânica. Disponível em: [www.britannica.com](http://www.britannica.com). Acesso em: 10/09/2005.

monstrado que as chuvas poderiam garantir o fluxo de água dos rios, de água para as plantas e ainda para a infiltração até profundidades além do alcance das raízes.

Ainda, segundo o autor, no século XVIII, estabeleceram-se os fundamentos geológicos para a compreensão da ocorrência e movimento das águas subterrâneas, destacando-se a importância de uma camada impermeável como estrato confinante de um sistema de água subterrânea sob pressão (aquífero).

O oleiro e filósofo francês Berbard Palissy (1510-1589) reiterou a teoria da infiltração em 1580, mas seus ensinamentos foram ignorados. O astrônomo alemão Johann Kepler (1571-1630) foi um homem de forte imaginação que assemelhava a Terra a um enorme animal que tira a água do oceano, digere e assimila-a descarregando os produtos finais deste processo fisiológico como águas subterrâneas e nascentes.

Pierre Perrault (1608-1680) advogado por profissão, (ocupou posições administrativas e financeiras no governo francês), escolheu a bacia de contribuição do rio Sena localizada à montante de Aignay-le-Duc onde mediu a altura pluviométrica média durante os anos de 1668 a 1670. Com base nesse valor e na área da bacia, o volume médio anual de precipitação atingiu 63 milhões de metros cúbicos. Durante o mesmo período, Perrault mediu a vazão do rio em Aignay-le-Duc encontrando uma descarga média de 10 milhões de metros cúbicos por ano, ou seja, a sexta parte do volume total das precipitações. Ficava assim demonstrado que as águas da chuva podiam facilmente abastecer não só o fluxo do rio como suprir a água utilizada pelas plantas, e aquela que se infiltrava até os lençóis aquíferos que se formavam nas zonas saturadas do subsolo. Outros autores como Edmé Mariotté (1620-1684) realizaram medidas no rio Sena em Paris e confirmaram o trabalho de Perrault. (FEITOSA, 1997)

### **2.1.2. Os primeiros estudos sobre a movimentação das águas subterrâneas**

No século XIX ocorreu na França um grande interesse pelas águas subterrâneas em função das fontes naturais e também em função dos sucessos obtidos com a perfuração de poços tubulares para o abastecimento d'água para consumo em povoados. Dentro dessa linha, o engenheiro hidráulico francês Henry Darcy (1803-1858) estudou o movimento da água através da areia. Seu tratado de 1856 definiu a relação, que governa o fluxo das águas subterrâneas na maioria das formações aluvionais e sedimentares. A partir de inúmeros experimentos realizados sobre o movimento da água através de coluna de areia e estabeleceu-se uma fórmula conhecida como a *Lei de Darcy*, que permite expressar a descarga de água, através da areia, por unidade de superfície, em função da condutividade hidráulica do material arenoso e do gradi-

ente hidráulico. Essa lei constitui a base de muitos métodos de avaliação quantitativa de recursos hídricos subterrâneos (DARCY, apud FEITOSA, 1997).

Ao estudarmos quantitativamente a disponibilidade das águas subterrâneas, duas questões são importantes: o rebaixamento do nível da água devido ao seu uso, e a possibilidade de recarga em função dos diversos parâmetros ambientais.

Quando se retira água de um aquífero, este se estabiliza através da recarga ou ocorre um déficit, que por sua vez provoca a compressão das camadas e lentes de textura fina (se presentes). Caso a taxa de bombeamento exceda em muito a taxa de recarga por longos períodos, o aquífero que tem uma quantidade significativa de material compressível, apresentará um rebaixamento da superfície do terreno.

A literatura especializada apresenta vários relatos no tocante ao rebaixamento do lençol de água subterrâneo, sendo alguns exemplificados a seguir.

Um dos primeiros relatos é a construção do túnel Kilsby na ferrovia de Londres a Birmingham, em 1838, onde o nível de água foi rebaixado pela pressão provocada por eixos verticais e adjacentes.

No Brasil, uma das maiores obras de rebaixamento foi a execução da casa de força da barragem do Rio Curuá-Una (CENTRAIS ELÉTRICAS DO PARÁ, CELPA) no estado do Pará com área de 15.000m<sup>2</sup>, compreendendo 6 níveis de estágios de ponteiras permitindo assim o rebaixamento de 20 metros do nível de água. Nessa obra, foram utilizadas 900 ponteiras, 2000 metros de tubos coletores, 10 bombas de rebaixamento e 4 de recalques. Existem algumas aplicações na área de exploração de minérios no estado de Minas Gerais, onde se consegue rebaixamentos superiores a 50 metros com um conjunto de poços, bombeando e reaproveitando a água retirada para a lavagem do minério ou seu próprio resfriamento após a industrialização. Algumas cidades brasileiras, em função da exploração de suas águas minerais, participam ativamente do processo de rebaixamento do lençol freático e, conseqüentemente do aumento da pressão estática provocando desdobramento da superfície do terreno e recalques nas construções.

### **2.1.3. A água subterrânea dentro do ciclo hidrológico**

A Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, ABAS destaca a água subterrânea como a parcela do "ciclo hidrológico" que transita "escondida" pela superfície da Terra. Os hidrólogos destacam a água como sendo uma comodidade essencial para a humanidade e reconhecem que as maiores fontes disponíveis de água doce se encontram no subsolo. Nesse sentido, a demanda crescente de água subterrânea, estimulou a exploração, uma vez, que com o

progresso, houve o surgimento de novos problemas para serem resolvidos. Este fator exigiu o melhoramento dos métodos de investigação da sua ocorrência e de seu movimento, requerendo melhores técnicas para a sua extração e estabelecendo princípios de conservação e pesquisa.

O estudo do caminho da água nos meios permeáveis, ponto básico para a hidrogeologia, mecânica dos solos e mecânica das rochas, formalizou uma linguagem adequada à descrição quantitativa das características e inter-relações dos fenômenos físicos verificados durante o escoamento de fluidos através de meios permeáveis. Sua aplicação com fins utilitários abrange a exploração de água subterrânea e a funcionalidade de obras civis.

Os ambientes se interligam através da água da superfície do solo a partir das precipitações retidas nas depressões do terreno ou escoando superficialmente ao longo dos talwegues, podendo infiltrar-se por efeito das forças de gravidade e de capilaridade. O seu destino depende das características do subsolo, do relevo do terreno e da ação da vegetação, configurando o que se poderia denominar de fase subterrânea do ciclo hidrológico. A distribuição das águas subterrâneas, seu deslocamento e eventual ressurgimento natural ou artificial na superfície envolvem problemas extremamente variados e complexos nos domínios da geologia e da hidráulica do escoamento em meios porosos, constituindo um amplo campo de estudo especializado.

O seu tratamento em um texto básico de hidrologia, ainda que forçosamente limitado em extensão e profundidade, justifica-se não só pela importância das águas subterrâneas, cujas reservas são dezenas de vezes superiores ao volume de água doce disponível na superfície, como pela sua estreita inter-relação com as águas superficiais.

O homem, escravo da água, partiu para a perfuração de poços, sendo que este processo de exploração não pode ser um processo de rotina. A variabilidade das condições geológicas e da ocorrência de água subterrânea é tão grande que faz com que cada operação de perfuração se constitua em um empreendimento de exploração.

E por fim, na construção de edifícios, usinas, represas, barragens, túneis e portos, frequentemente exigem escavações abaixo do nível d'água, requerendo o rebaixamento do lençol freático, assegurando condições de trabalho firme e a seco. Em alguns casos a escavação pode ser subposta por uma camada permeável sobre a pressão artesianas, que se não liberada pode sofrer ruptura na base da escavação. A água do solo pode ser controlada por meio de um ou mais tipos do sistema de rebaixamento apropriado ao tamanho da escavação, propriedades do solo e suas condições geológicas, podendo também ser utilizado para aumentar o peso eficaz do solo e, posteriormente, a sua consolidação acima e abaixo do nível rebaixado.

De acordo com FEITOSA (1997), com o desenvolvimento da ciência, ocorreram inúmeras contribuições com ênfase em diferentes áreas, onde podemos destacar: a hidráulica do aproveitamento das águas subterrâneas; métodos para solução de fluxos; relação entre tamanho efetivo dos grãos da rocha e a permeabilidade da mesma; métodos para determinar a condutividade hidráulica de uma formação produtora de água e a taxa de fluxo, observando a relação entre a produção de um poço e o rebaixamento em outros poços vizinhos e em observação; princípios físicos das relações hidrodinâmicas entre água doce e água salgada; conceito do coeficiente de armazenamento; a investigação da subsidiência de terras produzida por exploração de água subterrânea e o uso de métodos numéricos na solução de problemas de fluxo em aquíferos.

Ainda segundo o mesmo autor, com o avanço da tecnologia, as relações entre águas superficiais e subterrâneas foram encaradas do ponto de vista da análise de sistemas, estabelecendo-se as bases para a gestão da água subterrânea. A utilização de modelos matemáticos tornou-se viável graças ao desenvolvimento da engenharia de *software* e da microeletrônica facilitando a acessibilidade e manipulação dos modelos digitais, tornando possíveis às soluções dos problemas de águas subterrâneas através de computadores.

Nos últimos anos, principalmente nos países industrializados o foco das pesquisas mudou de problemas de abastecimento de água para avaliação do controle de qualidade em função do comprometimento dos aquíferos por contaminantes químicos e sanitários. Desta forma pode-se acompanhar um grande desenvolvimento da modelagem da composição química da água subterrânea, do movimento e dispersão de fluidos miscíveis e de contaminantes.

## **2.2. IMPORTÂNCIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA**

A relação, em termos de demanda quanto ao uso da água, varia entre os países, e nestes, de região para região, constituindo o abastecimento público, de modo geral, a maior demanda individual. Em 1992, a UNESCO (Organização das Nações Unidas para a educação, Ciência e a Cultura) estimava que mais de 50% da população mundial poderia estar sendo abastecida pelo manancial subterrâneo. Observa-se atualmente que praticamente todos os países do mundo, desenvolvidos ou não, utilizam água subterrânea para suprir suas necessidades, seja no atendimento total ou apenas suplementar do abastecimento público e de atividades como irrigação, produção de energia, turismo, indústria, etc.

Estima-se em 300 milhões o número de poços perfurados no mundo nas três últimas décadas, 100 milhões dos quais nos Estados Unidos, onde são perfurados cerca de 400 mil poços por ano, os quais garantem a irrigação de 13 milhões de hectares e suprimento hídrico de 39%

dos serviços municipais de água e de 75% da população rural, (SOLLEY *et al.*, apud FEITOSA, 1997 e UNESCO, 1992 citado por REBOUÇAS *et al.*, 2002).

Países como a Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, França, Holanda, Hungria, Itália, Marrocos, Rússia e Suíça atendem de 70 a 90% da demanda para o abastecimento público (OECD, 1989 citado por REBOUÇAS *et al.*, 2002). Outros utilizam a água subterrânea no atendimento total (Dinamarca, Arábia Saudita, Malta) ou apenas como suplementação do abastecimento público e de atividades como irrigação, produção de energia, turismo, indústria, etc, (PIMENTEL, 1999). Na Austrália, 60% do país depende totalmente do manancial subterrâneo e em mais de 20% do restante o seu uso é preponderante (HARBERMEHL, 1985 citado por REBOUÇAS *et al.*, 2002). A cidade do México atende cerca de 80% da demanda dos quase 20 milhões de habitantes (ARREGUIN-CORTES, 1994 citado por REBOUÇAS *et al.*, 2002).

Na África do Norte, China, Índia, Estados Unidos e Arábia Saudita, cerca de 160 bilhões de toneladas de água são retiradas por ano e não se renovam. Essa água daria para produzir comida suficiente para 480 milhões de pessoas por ano (RODRIGUES, 2000).

Outro ponto importante observado pelo uso da água subterrânea é o seu papel de destaque, principalmente a partir da década de 50, no equacionamento do problema de água em regiões áridas e semi-áridas, como o Nordeste do Brasil e a Austrália, e mesmo desérticas, como na Líbia, onde cidades ao longo da costa e grandes projetos de irrigação têm a demanda de água atendida por poços tubulares perfurados em pleno deserto do Saara, através de uma adutora com 1.900 km de distância. VILLIERS (2002).

A água subterrânea é também a maior fonte de água utilizada pelas indústrias em processos de refrigeração e em processos que exigem grande suprimento de água e também amplamente utilizada em atividades agrícolas como na irrigação e criação de animais.

Até a década de 50 as águas subterrâneas eram, em geral, consideradas como um bem natural de uso doméstico/precário. O surto de desenvolvimento sócio econômico verificado logo após o término da II Guerra Mundial e a crescente deterioração das águas dos rios e lagos, engendraram a rápida evolução da importância das águas subterrâneas, a ponto de serem consideradas, atualmente, como um recurso de grande valor econômico, vital ou estratégico.

### **2.3. AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL**

No Brasil, de acordo com LEAL (1992), a água subterrânea é utilizada desde o início da colonização, em decorrência da expansão dos colonos portugueses para o interior, principalmente na região de rochas cristalinas do Nordeste, com grandes áreas desprovidas de água em

superfície. Inicialmente, aproveitava-se a água das coberturas inconsolidadas, principalmente dos aluviões, suficientes para atender às necessidades de então. Com o crescimento da população e, principalmente, com os surgimentos dos primeiros aglomerados humanos e com a expansão da pecuária, as principais fontes de abastecimento tornaram-se insuficientes para o atendimento das necessidades. Essa situação se fazia mais evidente na região Nordeste, tomando o aspecto de calamidade em períodos de seca.

REBOUÇAS<sup>3</sup> (2005) descreve histórico do abastecimento por águas subterrâneas no Brasil, classificando algumas fases do uso e gestão da água subterrânea ao longo da história do Brasil. A primeira fase é denominada de *fase empírica*, no Período Colonial (1500 a 1822), onde a água subterrânea era captada em fontes e poços escavados de alvenaria, com diâmetros de 1 a 3 metros. Rebouças destaca a existência destas captações em monumentos históricos deste período. É interessante anotar que antes do povoamento de uma área e da construção de conventos, era realizado um levantamento de nascentes de água e áreas propícias à construção de cacimbões, por “apontadores de água” (monges ou indivíduos com pendor místico). Nas regiões semi-áridas, o conhecimento e a experiência dos naturalistas era utilizado.

A segunda fase, Licença Real compreende o período de 1808 a 1889, iniciando com a vinda da Família Real Portuguesa ao Brasil. REBOUÇAS (2005) destaca a existência de tecnologia de perfuração de poços, e a necessidade de solicitar licença para captação das águas subterrâneas, cujas amostras das perfurações e o relatório de poço eram encaminhadas ao Museu Imperial. De 1840 a 1889, no Segundo Reinado, programas de melhoria de sistemas de abastecimento de água foram instalados. As perfurações de poços no estado do Ceará foram autorizadas. A Ceará Water Supply Co. foi fundada durante a seca de 1845 a 1846, com a contratação da empresa americana e texana Armstrong & Sons Drillers. Esta empresa perfurou poços de até 150 metros em Fortaleza e Messejana, porém o contrato foi rescindido por não terem encontrado poços jorrantes. Cabe destacar que nesta época a perfuração de poços na região nordeste tinha como objetivo suprir a população durante a época das secas. Já nas regiões sudeste e sul, o objetivo era para abastecimento urbano e atendimento das demandas do início da industrialização brasileira.

Na primeira fase republicana do país (1889 a 1930), a terceira fase, a autorização para perfuração de poços foi abolida, e segundo REBOUÇAS (2005), o Código das Águas de 1934, é resultado da adoção de modelos de países de clima úmido, em que a água superficial foi destacada, principalmente para a geração de energia elétrica. A falta de regulamentação

---

<sup>3</sup> Disponível em [http://www.perfuradores.com.br/index.php?pg=info\\_cientificas&sub=info\\_cientificas\\_tb&sub\\_tb=infocie\\_tb\\_30](http://www.perfuradores.com.br/index.php?pg=info_cientificas&sub=info_cientificas_tb&sub_tb=infocie_tb_30), acesso 09/10/2005

relativa ao uso das águas subterrâneas, provocou um quadro caótico que ainda se reflete até hoje.

Destaca-se, entretanto a criação em 1906 da Inspetoria de Obras Contra as Secas, IOCS, quando houve grandes avanços no conhecimento geológico para o Nordeste; sendo, entretanto, a perfuração de poços executada de forma empírica e improvisada em sua maior parte. As missões estrangeiras de cooperação eram destinadas a projetos de maior envergadura.

A partir da década de 50, REBOUÇAS (2005) descreve uma Fase Científica - Tecnológica, com a criação dos cursos de geologia, notadamente nos estados de Pernambuco, Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo e Rio Grande do Sul.

De acordo com REBOUÇAS (2005) e FEITOSA (1997), nesta fase destacam-se as transferências de conhecimentos sobre hidrogeologia de missões estrangeiras para técnicos brasileiros, a criação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, SUDENE, e de seu Projeto Bacia Escola (Cooperação francesa); a elaboração dos estudos de cálculo de reservas de águas subterrâneas, principalmente no Nordeste, elaboração de cartografias hidrogeológicas (mapas hidrogeológicos regionais da região nordeste); a perfuração de poços pela CPRM, com mais de 1000 metros de profundidade; os mapas hidrogeológicos do Brasil (escala 1:5.000.000) e da América do Sul (escala 1:5.000.000); os estudos de delimitação de aquíferos e potencial de águas subterrâneas em vários estados brasileiros e a Fundação da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas em 1978. Os trabalhos de perfuração de poços passaram a ser conduzidos por pessoal especializado e sendo desenvolvidos muitos estudos de caráter exploratório. A execução de testes de produção de poços passou a obedecer a uma metodologia universal. Como trabalho de base destaca-se o Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste, previsto para cobrir toda a área de jurisdição da Sudene (1.600.000 km<sup>2</sup>), que descreve de maneira sistemática os aquíferos da região avaliando as suas potencialidades e disponibilidades hídricas em termos de qualidade e quantidade para diversos usos.

Atualmente, vários núcleos urbanos no Brasil abastecem-se de água subterrânea de forma exclusiva ou complementar, constituindo o recurso mais importante de água doce. Indústrias, propriedades rurais, escolas, hospitais e outros estabelecimentos utilizam, com frequência, água de poços profundos. O maior volume de água ainda é, todavia, destinado ao abastecimento público. Importantes cidades do país dependem integral ou parcialmente da água subterrânea para abastecimento, como, por exemplo: Ribeirão Preto (SP), Mossoró e Natal (RN), Maceió (AL), Região Metropolitana de Recife (PE) e Barreiras (BA). No Maranhão, mais de 70% das cidades são abastecidas por águas subterrâneas, e em São Paulo e no Piauí esse percentual alcança 80%. As águas subterrâneas termais estimulam o turismo em cidades como Caldas Novas em Goiás, Araxá e Poços de Caldas em Minas Gerais. Além disso, atualmente,

a água mineral é amplamente usada pelas populações dos centros urbanos, por sua qualidade. Mesmo em casos de elevado teor salino, como nas áreas de ocorrência dos sistemas aquíferos fissurados do semi-árido nordestino, as águas subterrâneas constituem, não raro, a única fonte de suprimento permanente (LEAL, 1999).

O autor enfatiza ainda que, no Brasil, as águas subterrâneas ocupam diferentes tipos de reservatórios, desde as zonas fraturadas do embasamento cristalino até os depósitos sedimentares cenozóicos. Dessa diversificação, resultaram sistemas aquíferos que, pelo seu comportamento, podem ser reunidos em: *a*) sistemas porosos (rochas sedimentares); *b*) sistemas fissurados (rochas cristalinas e cristalofílicas); *c*) sistemas cársticos (rochas carbonáticas com fraturas e outras descontinuidades submetidas a processos de dissolução cárstica).

O sistema aquífero fissural ocupa uma área de cerca de 4.600.000 km<sup>2</sup>, correspondente a 53,8% do território nacional. Compreende as províncias hidrogeológicas dos escudos Setentrional (região Norte), Central (regiões Norte e Centro-Oeste), Oriental (regiões Nordeste e Sudoeste) e Meridional (região Sul). Esse sistema apresenta reservas de águas subterrâneas da ordem de 1.008.103 km<sup>3</sup> (REBOUÇAS, 1988), que, devido à heterogeneidade do meio, encontram-se distribuídas irregularmente por sua área de ocorrência.

REBOUÇAS (1988) assinala ainda que, hidrogeologicamente, as melhores possibilidades estão ligadas à presença de juntas e fraturas densas, associadas a coberturas inconsolidadas mais ou menos expressivas e clima úmido. Nesses casos, a zona aquífera principal pode, não raro, ser representada pelo sistema superficial. Essa situação é predominante nos terrenos cristalinos das regiões Norte, Centro-Oeste, Sudeste e Sul, onde as condições hidroclimáticas favoreceram o desenvolvimento de coberturas sedimentares inconsolidadas, às vezes muito espessas. Podem ocorrer vazões de várias dezenas de m<sup>3</sup>/h, com média em torno de 12 m<sup>3</sup>/h. As águas são de boa qualidade química, podendo ocorrer localmente teores de ferro acima do permitido.

No domínio do embasamento cristalino aflorante, como na região Nordeste, o reservatório é representado quase que exclusivamente pelas fraturas. As reservas são reduzidas e as vazões dos poços apresentam média inferior a 3 m<sup>3</sup>/h. As águas são, normalmente, salinizadas, com resíduo seco médio acima de 2.500 mg/L.

Os sistemas cársticos mais importantes correspondem aos domínios do calcário do grupo Bambuí (província hidrogeológica do São Francisco, com mais de 350.000 km<sup>2</sup> nos estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais) e da formação Jandaíra (subprovíncia Potiguar). Nos terrenos calcários do Bambuí, os carstes são, em geral, nus e desenvolvem-se nas fraturas situadas nas charneiras das dobras e nos contatos com as zonas margosas. Por outro lado, no aquífero Jandaíra, os carstes estão relacionados às variações faciológicas. As profundidades

do desenvolvimento cárstico são muito variáveis, com média em torno de 150m. Enquanto o Bambuí pode fornecer vazões superiores a 200 m<sup>3</sup>/h, o Jandaíra, com pequeno desenvolvimento cárstico, apresenta vazões muito baixas (geralmente inferiores a 3,5 m<sup>3</sup>/h).

Existem cerca de 20 bacias ou grupo de bacias sedimentares que ocupam uma área da ordem de 3.600.000 km<sup>2</sup>, correspondente a 42% da superfície do país. A estruturação geológica, com alternância de camadas permeáveis e impermeáveis, assegura-lhes condição de artesianismo. Entre elas se destacam, pela extensão e potencialidade, as bacias do Paraná, Amazonas, Parnaíba e Potiguar-Recife.

A mais extensa, a bacia sedimentar do Paraná, cobre uma área da ordem de 1.600.000 km<sup>2</sup>, sendo 1.000.000 km<sup>2</sup> no Brasil, apresentando uma espessura máxima de 7.825 m. O principal sistema aquífero é o Botucatu, também conhecido por sistema aquífero Guarani, que representa cerca de 80% das reservas da província do Paraná. Esta, por sua vez, detém cerca de 45% das reservas de água subterrânea do território nacional.

As maiores espessuras de sedimento são encontradas nas bacias de São Luís-Barreirinhas (MA) e do Tucano (BA). Essa última, pertencente à subprovíncia hidrogeológica Recôncavo-Tucano-Jatobá, constitui um meio-gráben com profundidade que pode ultrapassar os 10.000 m em sua margem oriental. Os principais aquíferos são Marizal, São Sebastião (com espessura de mais de 3.000 m) e Ilhas (2.500 m). Esses aquíferos apresentam vazão específica média dos poços da ordem de 3 m<sup>3</sup>/h/m. As águas até uma profundidade de 800 m são normalmente de boa qualidade.

No entanto grandes cidades brasileiras já são abastecidas, totais ou parcialmente, por água subterrânea. No estado de São Paulo estima-se que 75% das cidades são abastecidas por poços. Ribeirão Preto é um bom exemplo de uma grande cidade onde a água subterrânea tem sido bem gerenciada, garantindo o abastecimento de toda a população com uma água de qualidade.

Atualmente o estado de São Paulo é o estado brasileiro que mais se utiliza deste recurso ambiental: de maneira genérica as águas subterrâneas são utilizadas para o abastecimento de grande maioria da população rural, de 90% das indústrias e de cerca de 65% da população urbana (SILVA, 2002).

### **2.3.1. Reservas e condições de utilização das águas subterrâneas**

No Brasil, as reservas de água subterrânea são estimadas em 112.000 km<sup>3</sup> (112 trilhões de m<sup>3</sup>) e a contribuição multianual média à descarga dos rios é da ordem de 2.400 km<sup>3</sup>/ano (REBOUÇAS, 1988). Nem todas as formações geológicas possuem características hidrodi-

nâmicas que possibilitem a extração econômica de água subterrânea para atendimento de médias e grandes vazões pontuais. As vazões já obtidas por poços variam, no Brasil, desde menos de 1 m<sup>3</sup>/h até mais de 1.000 m<sup>3</sup>/h.

Segundo MENTE (1996), no Brasil, da mesma forma que em outras partes do mundo, a utilização das águas subterrâneas tem crescido de forma acelerada nas últimas décadas, e as indicações são de que essa tendência deverá continuar. A comprovar esse fato temos um crescimento contínuo do número de empresas privadas e órgãos públicos com atuação na pesquisa e captação dos recursos hídricos subterrâneos. Também é crescente o número de pessoas interessadas pelas águas subterrâneas, tanto nos aspectos técnico-científico e sócio-econômico como no administrativo e legal.

Ainda, de acordo com o autor, as águas subterrâneas, mais do que uma reserva de água, devem ser consideradas como um meio de acelerar o desenvolvimento econômico e social de regiões extremamente carentes, e do Brasil como um todo. Essa afirmação é apoiada na sua distribuição generalizada, na maior proteção às ações antrópicas e nos reduzidos recursos financeiros exigidos para sua exploração.

Conhecer a disponibilidade dos sistemas aquíferos e a qualidade de suas águas é primordial ao estabelecimento de política de gestão das águas subterrâneas.

Vários autores têm realizado estudos de avaliação das reservas hídricas subterrâneas em níveis nacional, regional e estadual. Entre eles, são freqüentemente citadas as determinações realizadas por REBOUÇAS & GASPARY (1971) para a região Nordeste, e REBOUÇAS (1988) para os vários domínios aquíferos do Brasil e para a bacia do Paraná (1976). Entre os estudos regionais de quantificação de reservas destacam-se ainda os realizados por COSTA (1994) e MENTE *et al.*, (1994). As metodologias adotadas são semelhantes, com algumas modificações relativas aos índices utilizados.

A exploração de água subterrânea está condicionada a três fatores: *a*) quantidade, intimamente ligada à condutividade hidráulica e ao coeficiente de armazenamento dos terrenos; *b*) qualidade, influenciada pela composição das rochas e condições climáticas e de renovação das águas; *c*) econômico, que depende da profundidade do aquífero e das condições de bombeamento.

As reservas temporárias correspondem ao escoamento de base dos rios, ou seja, às reservas reguladoras dos sistemas aquíferos. A relação entre o volume do escoamento natural e as reservas permanentes constitui o coeficiente de realimentação, importante na definição das condições de exploração. As reservas exploráveis, ou reservas hídricas, correspondem ao volume de água que se pode extrair anualmente do aquífero sem provocar resultados indesejá-

veis. O seu valor é obtido somando às recargas anuais um percentual, normalmente de 20%, das reservas permanentes, a ser utilizado por um período de 50 anos.

A avaliação dos recursos de água subterrânea do Brasil, por falta de maior precisão dos estudos locais, ainda é muito aproximativa. O valor das infiltrações é determinado a partir da vazão do escoamento de base. Ela é rápida nas bacias que drenam o cristalino da região Nordeste (cerca de 33 horas) e demorada nos demais domínios (vários meses e mesmo interanuais).

De acordo com REBOUÇAS (1988), nos terrenos sedimentares, os volumes acumulados até uma profundidade de 2.000 m, considerando 1/3 produtivo, são da ordem de 102.1012 m<sup>3</sup>. Esse volume, todavia, está distribuído irregularmente, sendo que mais de 81% encontram-se estocados apenas em duas bacias: do Paraná e do Amazonas.

Estima-se em mais de 200.000 o número de poços tubulares em atividade no Brasil, utilizados para diversos fins, como a irrigação, a pecuária, o abastecimento de indústrias, os condomínios etc. O maior volume de água ainda é, todavia, destinado ao abastecimento público. O número de poços perfurados por ano é estimado em 12.000, o que pode ser considerado irrisório diante das necessidades de água potável das populações e se comparado com outros países. Os estados com maior número de poços são: São Paulo (40.000), Bahia, Rio Grande do Sul, Ceará e Piauí.

Ao reduzido número de poços tubulares, relativamente ao tamanho da população e à dimensão territorial do país, soma-se a sua distribuição irregular no espaço, com densidade por estado variando de 1 hab/51.050 km<sup>2</sup> (AC) a 1 hab/6 km<sup>2</sup> (SP), com valores intermediários de 1 hab/12,2 km<sup>2</sup> (CE), 1 hab/26.2 km<sup>2</sup> (PI), 1 hab/3.990 km<sup>2</sup> (AP) etc. Essas densidades são pouco representativas se considerarmos que a grande maioria dos poços se encontra nas sedes municipais, principalmente nas maiores. A utilização da água subterrânea no meio rural é, de um modo geral, pouco representativa.

Em algumas zonas, todavia, as águas subterrâneas já são intensamente aproveitadas e constituem o recurso mais importante de água doce. Mesmo em casos de elevado teor salino, como nas áreas de ocorrência dos sistemas aquíferos fissurados do semi-árido nordestino, constituem, não raro, a única fonte de suprimento de água permanente.

O crescente uso das águas subterrâneas deve-se ao melhoramento das técnicas de construção de poços e dos métodos de bombeamento, permitindo a extração de água em volumes e profundidades cada vez maiores possibilitando o suprimento de água a cidades, indústrias, projetos de irrigação etc., que, pelo porte, eram impossíveis na prática.

Relacionam-se como fatores desencadeadores do uso das águas subterrâneas a crescente oferta de energia elétrica e a poluição das fontes hídricas de superfície, cujo uso está exigindo

a disponibilidade de recursos financeiros em quantidades cada vez maiores. Todavia este quadro começa a mudar com a promulgação de várias leis a partir de 1997, concebendo a Política Nacional e Estadual de Recursos Hídricos, renascendo mais uma vez as esperanças de novos progressos não só na hidrogeologia, tanto em termos de métodos exploratórios e de exploração e de gerenciamento das águas subterrâneas, bem como a integração da gestão de todos os recursos hídricos, sejam eles superficiais e subterrâneos.

## **CAPÍTULO 3. ORIGEM E CIRCULAÇÃO: CICLO HIDROLÓGICO**

### **3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A água possui propriedades de retenção térmica, mantém o clima e torna a vida no planeta sustentável. Sem a água limpa, a doença e a miséria aumentam. Sem água os seres vivos morrem. A água possui características térmicas especiais, atenuando as variações bruscas de temperaturas. Esta capacidade de absorção de calor tem várias conseqüências importantes para a biosfera (parte do planeta Terra capaz de suportar a vida), incluindo a capacidade que as águas de rios, lagos têm de moderar as diferenças de temperaturas tanto sazonais quanto diárias, dentro de ecossistemas aquáticos. Além disso, vale lembrar que a água é a única substância cuja forma sólida é menos densa que a forma líquida (VILLIERS, 2002).

### **3.2. HIDROLOGIA E HIDROGEOLOGIA**

Segundo FETTER (1994), hidrologia é o estudo da água em um sentido amplo. A hidrologia estuda a ocorrência, distribuição, movimento e química de todas as águas da Terra, analisando a inter-relação entre os materiais e processos geológicos com a água. Assim, o estudo da hidrogeologia permite o conhecimento de como ocorre a água no subterrâneo, sua distribuição, movimento e composição, com diversos objetivos.

### **3.3 QUANTIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NA TERRA**

De acordo com VILLIERS (2002), “a água pode ser poluída, mal tratada e mal utilizada, mas não é criada nem destruída; ela apenas migra, não existindo evidências que a água escape para o espaço”.

A água existe em um sistema fechado, chamado de hidrosfera (conjunto de águas oceânicas e continentais existentes na Terra), sistema este, intrincado, complexo, interdependente e estável que parece ter sido construído para regular a vida.

O volume total de água estimado na Terra é de cerca de 1,4 bilhão de quilômetros cúbicos, distribuídas nos oceanos, lagos, rios, geleiras e no subsolo, sob as formas líquida e congelada, conforme a **Tabela 3.1**. A água salgada dos oceanos representa 97,2% do total e que as águas continentais representa 2,8% do total, conforme apresentado na **Figura 3.1**.

**Tabela 3.1. Distribuição de suprimentos de água na Terra, em %.**

Oceanos	97,2
Calotas polares e geleiras	2,14
Água subterrânea (até 4.000 m de profundidade)	0,61
Umidade do solo	0,005
Lagos de água doce	0,009
Lagos de água salgada	0,008
Rios	0,0001
Atmosfera	0,001

Fonte: FETTER, 1994.

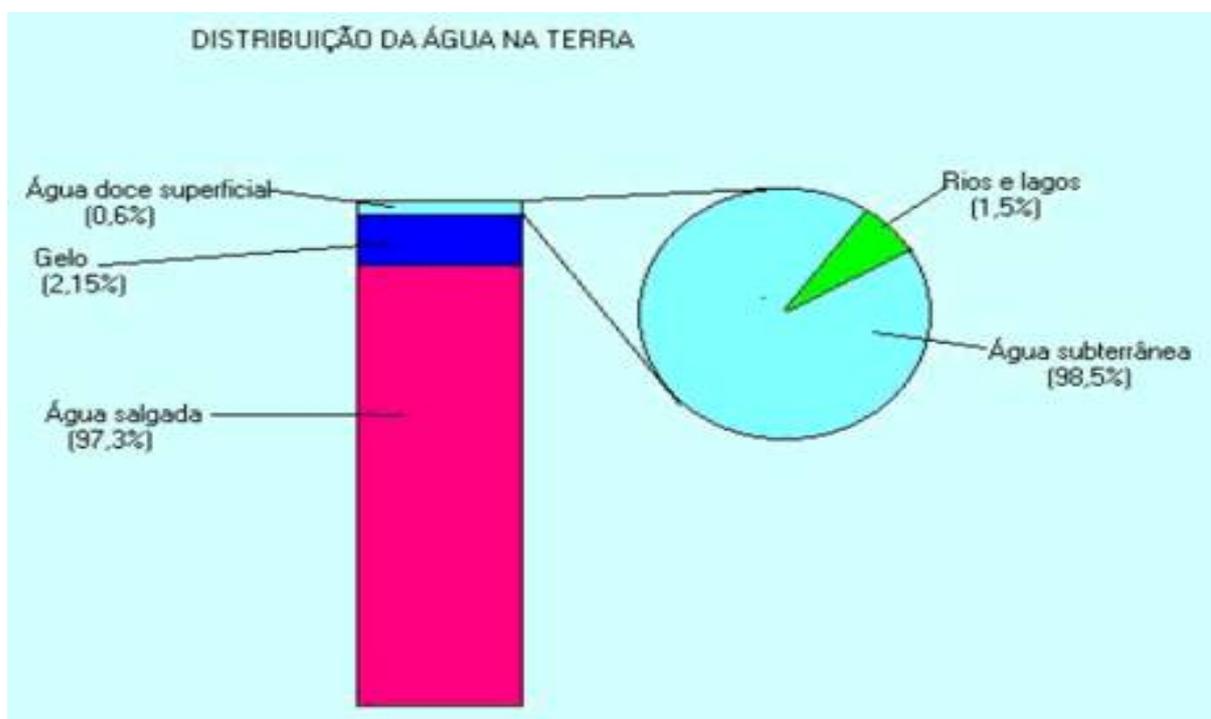


Figura 3.1. Distribuição da água na Terra. (Fonte: [www.meioambiente.pro.br/agua/guia/ociclo.htm](http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/ociclo.htm)).

Somente uma pequena quantidade de água doce encontra-se disponível para o consumo humano e para os seres vivos no Planeta. Conforme pode ser observado pela **Tabela 3.1**, considerando somente as águas disponíveis para consumo, desprezando as calotas polares, geleiras e lagos de água salgada, aproximadamente 98% da água disponível é água subterrânea. Em termos continentais, cerca de 22% do volume total das águas são águas subterrâneas, excedendo em muito o volume das águas doce de superfície (lagos e rios), que representa cerca de 0,3%.

### 3.4. CICLO HIDROLÓGICO

De acordo com VILLIERS (2002), o *ciclo hidrológico* é a forma como a água circula pelos sistemas da Terra, de uma altura de 15 quilômetros acima do solo para uma profundidade de cerca de 5 quilômetros. Este conceito é muito importante para o entendimento da ocorrência de água e a existência dos suprimentos de água na Terra. O ciclo hidrológico é um sistema químico quase estável e auto regulável, que transfere a água de um reservatório para outro em ciclos complexos. Estes reservatórios incluem a umidade atmosférica (nuvens e chuvas), os oceanos, rios e lagos, os lençóis freáticos, os aquíferos subterrâneos, as calotas polares e o solo saturado (a tundra ou as áreas alagadas).

O funcionamento deste sistema ocorre principalmente devido ao fato de que a quantidade de água que evapora dos oceanos é muito maior que retorna para ele diretamente na forma de chuva ou de neve. A diferença de água cai na Terra sob a forma de chuva ou neve, tornando a vida possível, uma vez que ela o faz em forma de água doce. A renovação ocorre não somente em termos quantitativos, mas também em termos qualitativos: o processo purifica a água de suas impurezas e a devolve potável, uma água utilizável pela biota (conjunto de seres animais e vegetais de uma determinada região), onde os seres humanos estão incluídos, (**Figuras 3.2 e 3.3**).

O ciclo hidrológico não possui início ou fim bem definidos, porém como a maior disponibilidade de água está nos oceanos, normalmente descreve-se o sistema como tendo início nos oceanos (FETTER, 1994).

VILLIERS (2002), salienta que quanto mais quente e seco o clima mais rápido ocorre à evaporação, uma vez que os principais fatores para este fenômeno são a temperatura, a umidade, a velocidade do vento e a radiação solar. A maior parte da evaporação vem dos oceanos e grandes extensões de água como rios e lagos. Uma outra parte vem das plantas, uma vez que as mesmas perdem água através dos pequenos poros encontrados nas folhas das plantas. A quantidade de água evaporada varia, sendo maior próximo à linha do equador, onde a radiação solar é mais intensa.

O vapor resultante é transportado pelo movimento das massas de ar. Sob determinadas condições, o vapor é condensado, formando as nuvens que por sua vez podem resultar em precipitação. A maior parte fica temporariamente retida no solo próximo de onde caiu e finalmente retorna à atmosfera por evaporação e transpiração das plantas. Uma parte da água restante escoar sobre a superfície do solo, ou através do solo para os rios, enquanto que a outra parte, penetrando profundamente no solo, vai suprir o lençol d'água subterrâneo.

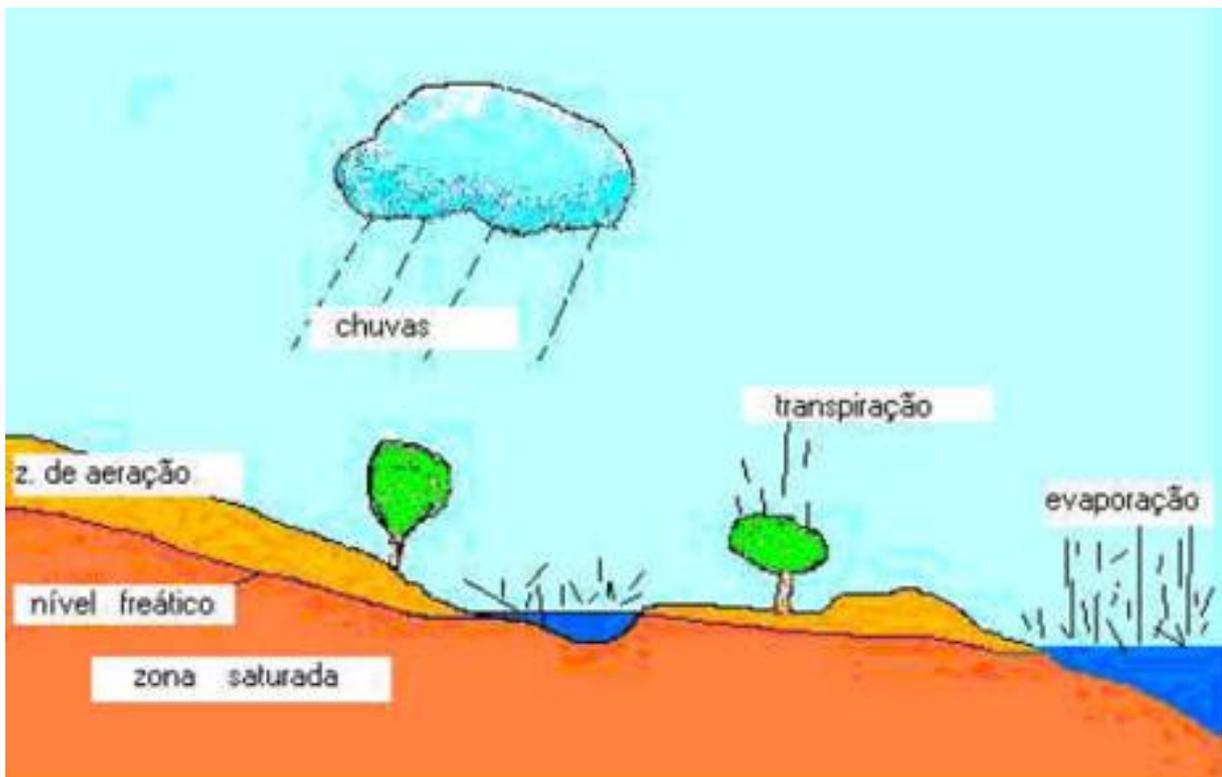


Figura 3.2. Esquema do ciclo hidrológico. (Fonte: [www.meioambiente.pro.br/agua/guia/ociclo.htm](http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/ociclo.htm)).



Figura 3.3. Ciclo hidrológico. (Fonte: VARCARCEL, 1985).

Uma vez que a evaporação excede a precipitação nos mares, existe uma parte dessa precipitação que se dá em terras secas. Também temos as chuvas de origem local e não oceânicas que também contribuem para a renovação das águas nos diversos corpos receptores, inclusive a vegetação.

Uma parte dessa chuva, nevoeiro ou neve, volta para a atmosfera pela evaporação. Parte é absorvida pelas plantas e evapora-se pela superfície das folhas. Se a vida vegetal for excepcionalmente densa, praticamente pouca chuva alcançará o solo, o que, até certo ponto, contribui para a relativa aridez do solo de algumas florestas tropicais e para a profusão de plantas trepadeiras, de floração e de vida vegetal de todo o tipo em sua parte superior.

Além da simples evaporação da água do solo, a água também retorna para a atmosfera pela transpiração das plantas. As plantas absorvem a água do solo por meio de sua rede de raízes e filamentos radiculares. Esta água é levada pelo tronco e pelos galhos para as folhas, de onde se desprende sob a forma de vapor d'água.

A chuva ou o vapor atmosférico possui outra função além de transportar a água dos oceanos para a Terra. É responsável também para o equilíbrio radioativo da Terra. Sua presença mantém a superfície do planeta mais quente do que seria de outra forma. Há mais precipitações nos trópicos do que nos pólos.

A chuva não depende apenas da quantidade de vapor, podendo variar em função da topografia local, dos padrões de evaporação e dos ventos. Os ventos podem deslocar a umidade, durante o seu tempo de residência no ar. Os ventos e as montanhas controlam os padrões de distribuição.

Outro ponto importante é que a água não é distribuída de maneira uniforme. Existem lugares que não precisam de água e têm excesso, e lugares que precisam desesperadamente de água e não possuem nada. O clima e os ventos têm um papel significativo neste sistema, pois para haver chuva e neve, é necessário que haja vapor de água suficiente no ar, associado a um movimento ascendente do ar, o suficiente para carregar o vapor de água a altitudes em que possa haver precipitação. Os sistemas de vento da Terra têm um papel significativo neste processo.

A precipitação que ocorre na superfície da Terra resulta em diferentes tipos de contribuição para o ciclo hidrológico. Uma parte poderá formar estoques temporários de água. Outra parte da chuva vai para o solo, por infiltração. O resto flui diretamente, pelo escoamento da superfície contribuindo para o volume de água dos rios e lagos. Parte da água que penetra no solo, após um tempo de percolação atinge os cursos d'água pelo escoamento dos lençóis freáticos.

Assim, da mesma forma que a distribuição das águas superficiais é muito variável, a das águas subterrâneas também é, estando inter-relacionada no ciclo hidrológico e dependente das condições climatológicas.

Em função da influência da gravidade, os escoamentos superficiais e subterrâneos são realizados em direção as partes mais baixas do relevo e são descarregados em cursos d'água (rios ou lagos) que irão desaguar nos oceanos.

O processo de infiltração ocorre em função da porosidade do solo. Quanto mais seco e arenoso for o solo, mais rapidamente a água se infiltrará. Nos períodos chuvosos, até mesmo os solos arenosos se tornam saturados, e uma proporção maior da água deixa de ser absorvida. Os solos argilosos, que contém partículas coloidais, retêm a água por mais tempo. Entre os períodos chuvosos, os solos tornam-se gradualmente secos no sentido descendente, ou seja, o vapor d'água do solo se espalha para cima, restabelecendo a água evaporada, e evapora-se a seguir.

Ainda de acordo com VILLIERS (2002), o tempo que a água permanece em qualquer lugar é denominado *tempo de residência*, podendo variar de 10 dias, para a atmosfera, para algo em torno de 37 mil anos, para o mar. Já os tempos de residência de lagos, rios, gelo e das águas subterrâneas encontram-se em algum ponto intermediário a esses dois extremos e são enormemente variáveis. A maior parte dos rios renova-se completamente de forma bastante rápida, em cerca de 16 dias. Os lençóis freáticos, os grandes lagos e as geleiras podem levar centenas ou até milhares de anos para se renovar.

O escoamento é o aspecto renovável das reservas de água, a parte dinâmica das reservas de água de longo prazo, um indicador da oferta de água.

De acordo com FEITOSA (1997), uma parte das chuvas que não se junta diretamente à água de superfície que corre livre, ou a parte que é adsorvida pelas plantas, infiltra-se na zona do solo, até uma profundidade média de mais ou menos um metro, na qual os pequenos interstícios entre as partículas do solo são preenchidos com uma mistura de água e ar. Esta região é conhecida como *zona vadosa* ou *zona de aeração*. A água estocada nesta região denomina-se água vadosa ou umidade do solo. Esta é a água que é utilizada pelas plantas para o seu crescimento e que após a transpiração da planta volta para a atmosfera. Em algumas situações a água desta zona pode fluir lateralmente, através de um processo denominado interfluxo.

Se a precipitação continua, ocorre uma completa saturação da zona do solo e a água continua descendo pelo efeito da gravidade até que, em algum ponto, encontra uma zona de rocha densa.

Algumas rochas são tão densas que não permitem a penetração de água; essas rochas impermeáveis são chamadas de aquíclúdes. Outras rochas são mais porosas e armazenam uma quantidade considerável de água. Estas rochas são chamadas de aquíferos. Os aquíferos algumas vezes podem estar embaixo de aquíclúdes, e são chamados de aquíferos confinados. Os

aquíferos são denominados não confinados, quando o material em torno do mesmo é insaturado e permeável como cascalho, xisto argiloso ou areia.

O limite superior da rocha porosa que contém água e o material não saturado é chamado de lençol freático. Em áreas onde existe uma abundância de água, o lençol freático pode estar relativamente próximo à superfície. Dependendo da geologia do local, o aquífero que estiver abaixo do lençol freático pode ter uma profundidade muito variável, de várias centenas de metros de profundidade até em alguns outros casos, apenas alguns metros. A água estocada nesta zona de saturação é conhecida como água subterrânea.

Assim como a água da superfície (lagos e rios), a água subterrânea também está em constante movimento e mudança. Ao longo de períodos mais longos que o período das águas superficiais, ela encontra seu caminho para as calhas dos rios e cursos d'água e volta para o mar. É também reabastecida pela chuva, uma vez que a infiltração colabora para a recarga dos aquíferos. A água subterrânea também contribui para o escoamento dos rios. Isto tem um efeito estabilizador sobre os rios, minimizando as diferenças entre as estações secas e de chuva. O movimento é muito mais lento que o escoamento da superfície.

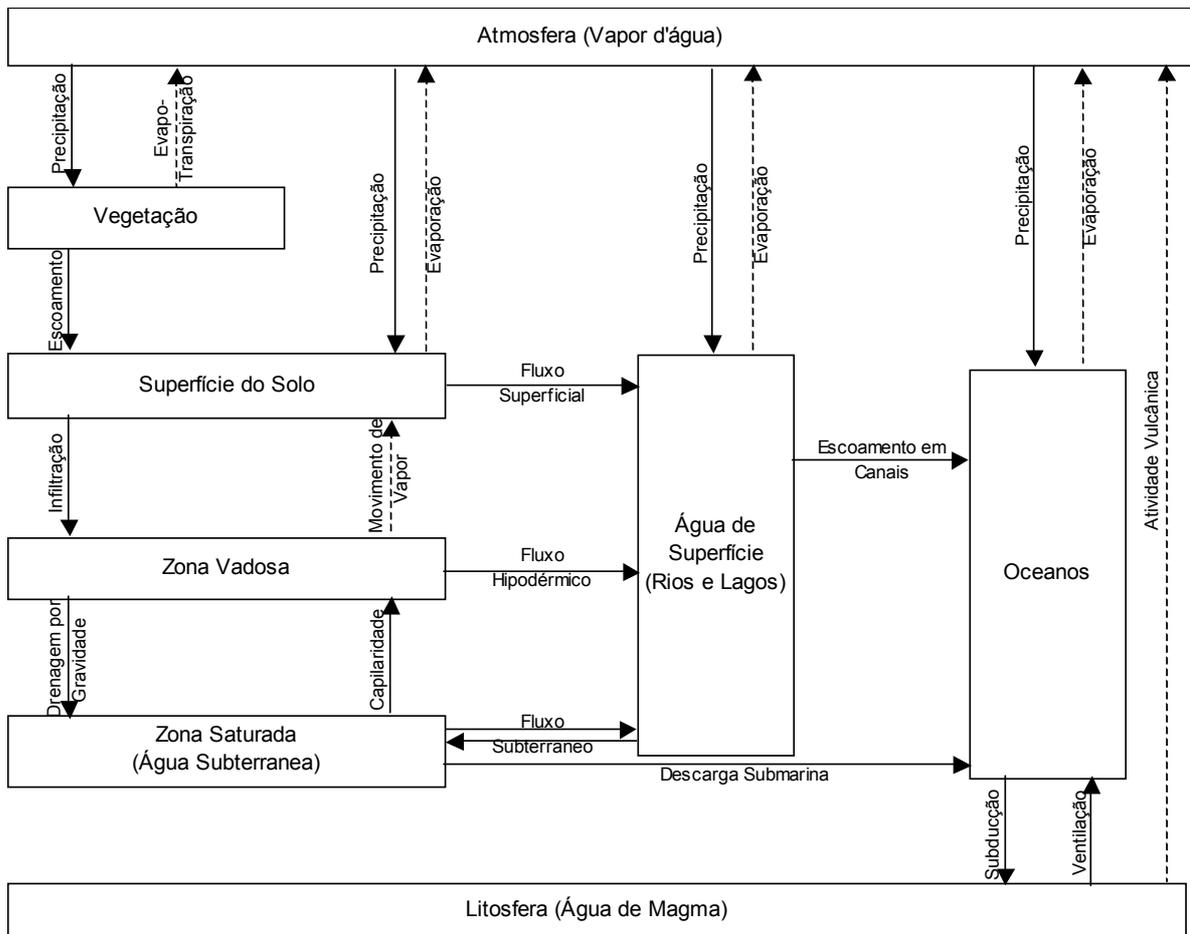
Segundo VILLIERS (2002), o lento reabastecimento da água subterrânea é chamado de “recarga do lençol freático”. Ele ocorre principalmente durante as estações das chuvas ou no inverno nas regiões de climas temperados.

Onde não há rochas permeáveis, ou onde elas existem, mas as mudanças climáticas não permitem reabastecimento, não há lençol freático.

O escoamento superficial ou *runoff* é o fluxo total de água que ocorre logo após uma chuva intensa e se desloca livremente pela superfície do terreno, até o escoamento de um rio, que pode ser alimentado tanto pelo excesso de precipitação como pelas águas subterrâneas (VILLELA, 1975).

A **Figura 3.4** apresenta um esquema do ciclo hidrológico, o qual mostra os principais reservatórios onde a água pode ser armazenada e os caminhos pelos quais ela pode se mover de um reservatório para outro.

A água doce é renovável, pelo menos no sentido de que o ciclo hidrológico evapora a água dos oceanos e devolve grande parte dessa água para a Terra. Esta água acaba por fazer o caminho de volta para os oceanos, por meio dos rios, cursos d'água, lagos e aquíferos subterrâneos. Uma enorme quantidade de água evapora da Terra e dos oceanos anualmente, consumindo cerca de metade da radiação solar que atinge a Terra.



**Figura 3.4 . Desenho esquemático do ciclo hidrológico. Movimento da água é mostrado pelas linhas sólidas e o movimento do vapor pelas linhas tracejadas. (Fonte: FETTER, 1994).**

As águas superficiais representam águas em trânsito que se renovam em períodos muito curtos (muitas vezes durante o ano). Os aportes dependem das chuvas e as perdas por evapotranspiração são contínuas, por estarem diretamente expostas às influências dos agentes e fatores climáticos, como temperatura do ar, ventos umidade relativa, insolação, etc.

Segundo FEITOSA (1997), as águas subterrâneas encontradas nos sistemas aquíferos regionais são águas armazenadas que se acumularam ao longo de milhares de anos e se encontram, em condições naturais, numa situação de quase equilíbrio, governado por um mecanismo de recarga e descarga. Além dessas águas não se encontrarem diretamente expostas às influências climáticas, o seu movimento é muito lento, implicando em tempo de residência muito longo. Mas nem toda a água do subsolo pode ser extraída das formações aquíferas em que se encontra. O volume explotável de um aquífero é uma variável de decisão a ser determinada como parte de um plano de gestão do sistema.

Nesse sentido é preciso desenvolver e aplicar políticas adequadas de gerenciamento de recursos hídricos disponíveis (águas superficiais e subterrâneas).

Alguns especialistas indicam que a quantidade de água subterrânea pode chegar até 60 milhões de km<sup>3</sup>, mas a sua ocorrência em grandes profundidades pode impossibilitar seu uso. Por essa razão, a quantidade passível de ser captada estaria a menos de 4.000 metros de profundidade, compreendendo cerca de 8 e 10 milhões de km<sup>3</sup>, que, segundo Rebouças *et al.* (2002), estaria assim distribuída: 65.000 km<sup>3</sup> constituindo a umidade do solo; 4,2 milhões de km<sup>3</sup> desde a zona não-saturada até 750 m de profundidade, e 5,3 milhões de km<sup>3</sup> de 750 m até 4.000 m de profundidade, constituindo o manancial subterrâneo.

### 3.5. DEFLÚVIO (*RUNOFF*)

O deflúvio de uma bacia hidrográfica é a quantidade total de água que flui em um rio ou canal e inclui as seguintes contribuições (FETTER, 1994) e (VILLELA, 1975):

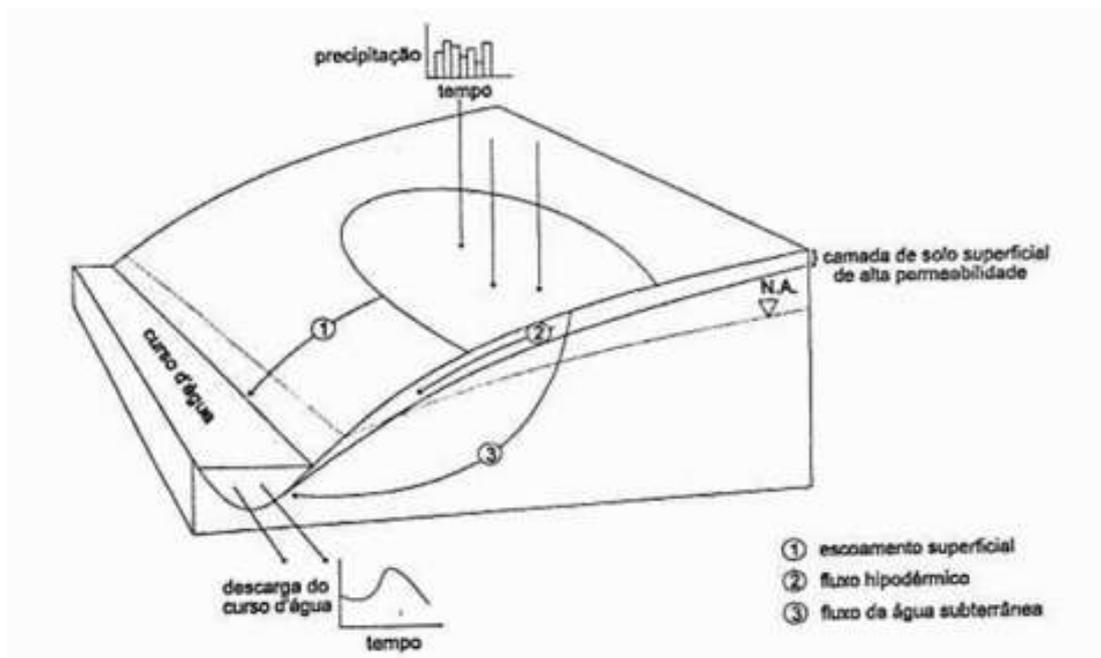
- a) precipitação recolhida diretamente pela superfície livre das águas;
- b) escoamento superficial direto (*overlandflow*), incluindo o escoamento subsuperficial (fluxo hipodérmico ou *interflow*);
- c) contribuição do lençol de água subterrânea (fluxo subterrâneo).

Essas contribuições podem ser observadas claramente na **Figura 3.5**.

Segundo FETTER (1994), o escoamento superficial é o processo pelo qual a água da chuva, precipitada na superfície da Terra, escoar por ação da gravidade, das partes mais altas para as mais baixas, nos leitos dos rios e riachos e ocorre quando a intensidade da precipitação ultrapassa a capacidade de infiltração do solo em determinada área.

O escoamento superficial sofre a influência de diversos fatores que contribuem para a sua maior ou menor intensidade. Estes fatores podem ser de natureza climática relacionados à precipitação ou ligados às características físicas, geográficas e geológicas da bacia.

A magnitude deste escoamento superficial é função da intensidade, duração das chuvas e sua distribuição espacial, pois quanto maior a intensidade, mais rápido o solo atinge a sua capacidade de infiltração, provocando um excesso de precipitação que escoará superficialmente. A duração da precipitação também é diretamente proporcional ao escoamento, pois quanto maior a duração, maior será o escoamento, supondo chuvas de intensidade constante.



**Figura 3.5. Mecanismos de alimentação pela chuva de um curso d'água. (Fonte: FREEZE & CHERRY, 1979 apud BORGES e BARRETO, 2001).**

Ainda de acordo com FETTER (1994), a trajetória seguida pela água até alcançar um canal ou rio depende do clima, da geologia, da topografia, da vegetação e do uso do solo. No início de uma chuva, uma quantidade da precipitação é retida pela vegetação e obstáculos em geral, constituindo o que se conhece por interceptação. Esta água não atinge a superfície do solo e retorna a atmosfera por evaporação. Por exemplo, uma chuva de pequena intensidade e curta duração pode ser totalmente consumida pela interceptação, pelo preenchimento de poças e depressões superficiais e eventualmente pela infiltração.

Um outro fator climático importante é a precipitação antecedente, pois uma precipitação que ocorra com o solo úmido devido a uma chuva anterior terá maior facilidade de escoamento.

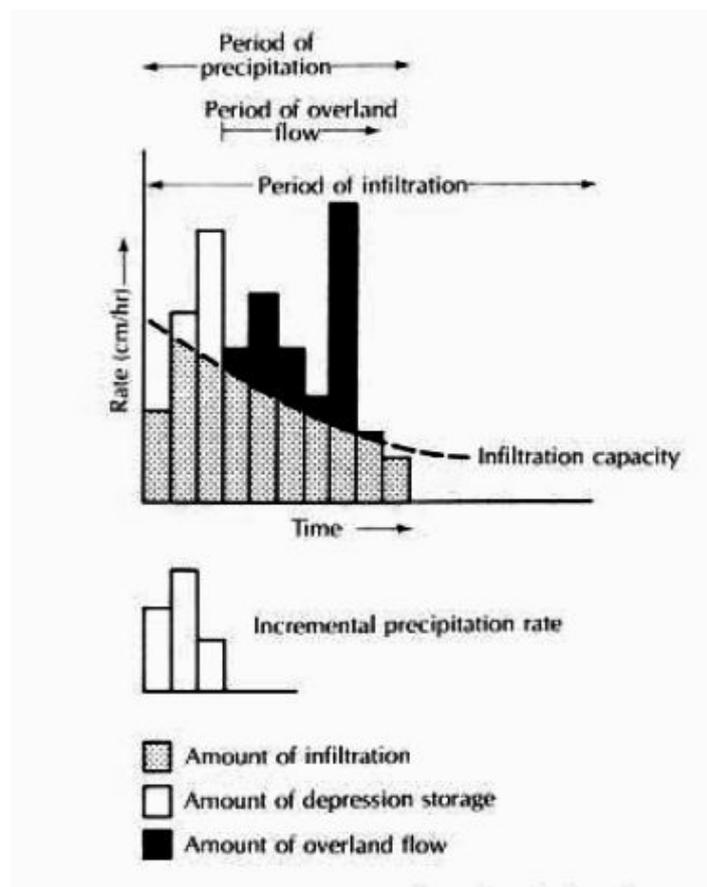
Desta forma o escoamento superficial ocorrerá somente em áreas em que a precipitação exceder a capacidade de infiltração do solo e a capacidade de armazenamento das depressões do terreno. O escoamento de fluxo sobre a superfície do terreno pode ocorrer durante tempestades fortes ou quando o solo está saturado. Segundo BORGES e BARRETO (2001), a heterogeneidade do solo na superfície e a distribuição irregular das chuvas no tempo e no espaço levam a uma grande variação na resposta do solo quanto à infiltração e geração de escoamento superficial, levando ao aparecimento de áreas que contribuem significativamente para o escoamento na superfície e outras que contribuem pouco ou não contribuem. O desenvolvimento de fluxo sobre a superfície do solo é uma ocorrência rara no tempo e espaço. Normal-

mente, após distâncias curtas, formam-se canais que se vão somando e engrossando rapidamente as vazões.

Em relação aos fatores fisiográficos, podemos destacar a permeabilidade da superfície do solo, tipo de vegetação, área da bacia de drenagem, geometria dos canais dos rios e riachos, topografia, profundidade do nível das águas subterrâneas e declividade do solo.

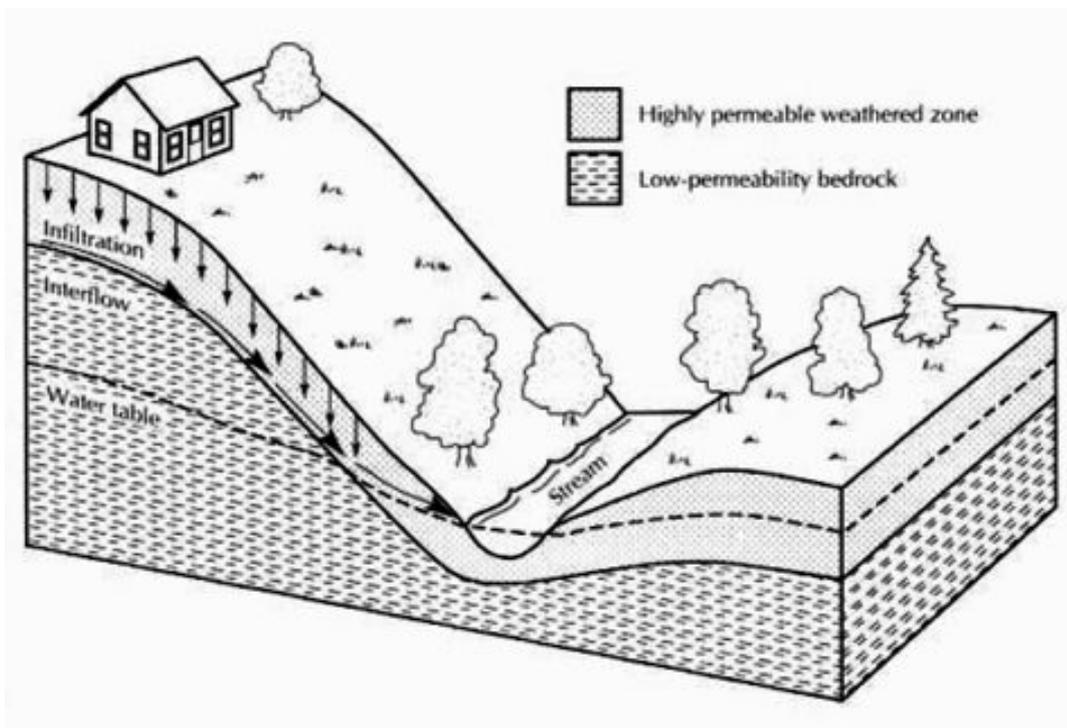
A permeabilidade do solo influi diretamente na capacidade de infiltração, ou seja, quanto mais permeável for o solo, maior será a quantidade de água que ele pode absorver, diminuindo assim a ocorrência de excesso de precipitação.

Na **Figura 3.6** pode-se observar o incremento da taxa de infiltração e a distribuição entre a infiltração, estocagem em depressões e escoamento superficial (*overland flow*). O início da infiltração ocorre quando a precipitação se inicia. O escoamento superficial não se inicia até que todas as depressões da superfície do terreno estejam completas. O escoamento superficial continua após o término da precipitação. A infiltração continuará pelo tempo necessário para esgotar a água existente nas depressões (FETTER, 1994).



**Figura 3.6.** Mecanismos da precipitação, infiltração e escoamento superficial. (Fonte: FETTER, 1994).

Se o solo é uniformemente permeável, a maioria da água irá percolar verticalmente. Caso exista abaixo do terreno um solo com menor permeabilidade ou um solo permeável acima de uma camada de rochas fraturadas de menor permeabilidade, a infiltração decorrente de chuvas intensas poderá se mover horizontalmente na zona saturada do solo, formando um fluxo de água subsuperficial, paralelo a superfície do solo denominado fluxo hipodérmico (*interflow*). Este fluxo é considerado parte do escoamento superficial e poderá contribuir significativamente para o escoamento dos rios e canais (**Figura 3.7**)



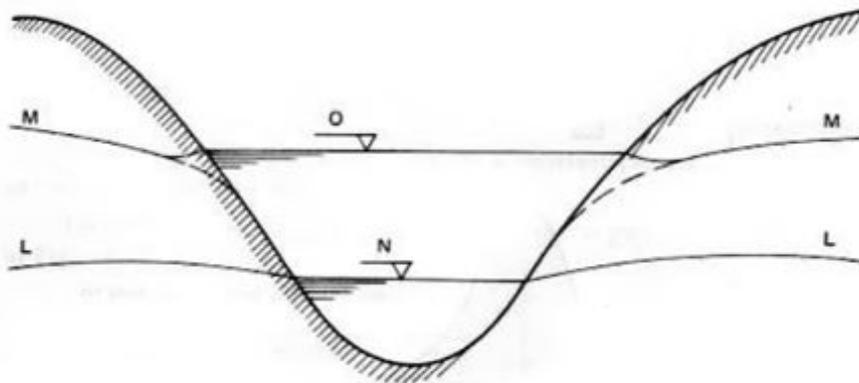
**Figura 3.7.** Fluxo hipodérmico (*interflow*) em um solo com alta porosidade e uma fina camada de material permeável sobre uma camada de rocha de baixa permeabilidade. (Fonte: FETTER, 1994).

Além do escoamento superficial, e do subsuperficial, o curso d'água recebe uma contribuição do lençol subterrâneo, o qual tem uma variação devida à parte da precipitação que se infiltra. A água infiltrada ou recarga alcança o reservatório de água subterrânea no lençol freático e está em constante movimento. Quando ocorre a recarga por infiltração em um ponto do reservatório, o nível do lençol freático aumenta e uma parcela da água subterrânea (fluxo subterrâneo) descarrega nos cursos d'água (rios e canais).

Se a infiltração ocasionar o aumento do nível de água do lençol freático, a descarga deste fluxo subterrâneo irá contribuir para aumentar o nível de água nos cursos d'água e conseqüentemente a sua vazão.

Na **Figura 3.8** pode-se observar a seção transversal do curso d'água e a relação entre o aumento da vazão e a elevação do lençol. No início da precipitação, os níveis de água e no

lençol estavam na posição *N* e *LL*. Devido à água infiltrada e depois de suprida a deficiência de umidade do solo, o nível do lençol cresce até atingir a posição *MM*. Ao mesmo tempo em razão das contribuições, o nível d'água passa de *N* para *O*. Para as grandes enchentes pode ocorrer uma inversão temporária do escoamento, ou seja, a elevação do nível do curso d'água superar a correspondente elevação do lençol, fazendo com que a água flua do rio para o lençol (VILLELA, 1975).



**Figura 3.8.** Influência da elevação do lençol freático. (Fonte: VILLELA, 1975).

### **3.6. RELAÇÕES ENTRE O ESCOAMENTO EM CURSOS D'ÁGUA E O LENÇOL SUBTERRÂNEO**

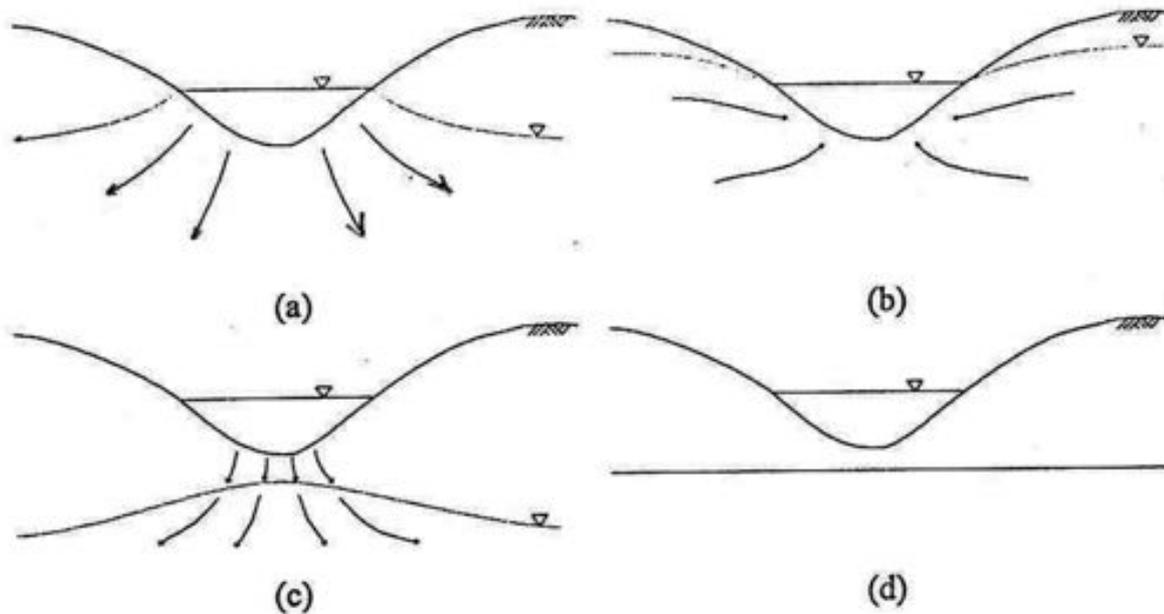
De acordo com BORGES e BARRETO (2001), dependendo das condições gerais de fluxo, topografia e da geologia, os cursos d'água podem ser classificados de acordo com as suas interações com o lençol d'água, que se encontram ilustradas na **Figura 3.9**.

Na **Figura 3.9.a** verifica-se o “influyente” que é quando o rio fornece água ao lençol. Trata-se de um caso típico de rios em regiões áridas, que recebem contribuições de escoamento superficial em altas altitudes ou suas nascentes são originárias de regiões úmidas. Com a propagação do rio em elevações mais baixas, a precipitação decresce e conseqüentemente há menos infiltração e o nível de água do lençol freático também decresce. Logo se o fundo da calha do rio é superior ao nível de água do lençol freático, a água irá ser drenada do rio para o solo.

Na **Figura 3.9.b** percebe-se o “efluente” que é quando o rio recebe água do lençol. É o caso usual de rios em regiões úmidas, que recebem a descarga de águas subterrâneas. Com a propagação do rio, o nível da água aumenta, mesmo que não haja entradas tributárias por afluentes a jusante.

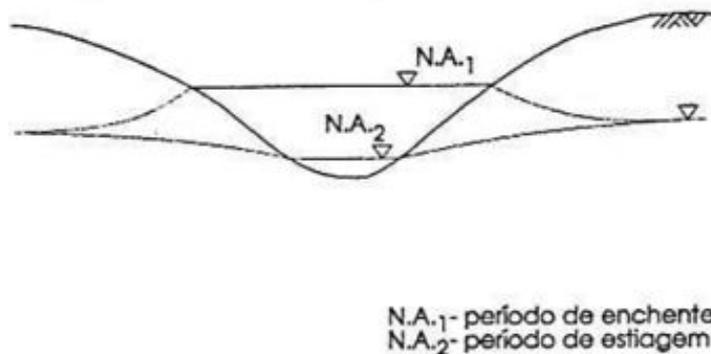
O intermitente é quando o rio fornece água ao lençol freático durante a estação chuvosa (**Figura 3.9.c**).

Por último verifica-se o curso d'água hidráulicamente isolado do lençol, onde não há interação entre o rio e o lençol (**Figura 3.9.d**).



**Figura 3.9.a.b.c.d.** Formas de interação entre um curso d'água e o lençol de água subterrânea. (Fonte: BORGES e BARRETO, 2001).

Ainda de acordo com as autoras, um rio que durante o período de seca normalmente recebe o fluxo subterrâneo do lençol (efluente) pode se tornar um rio influente durante períodos de inundação, uma vez que o nível de água no rio aumenta em relação à elevação do nível de água no lençol freático conforma **Figura 3.10**.



**Figura 3.10.** Forma de interação entre rio e o lençol de acordo com a época do ano. (Fonte: BORGES e BARRETO, 2001).

## CAPITULO 4. OCORRÊNCIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O ambiente da água subterrânea é escondido da vista exceto em cavernas e em minas, e a impressão que se obtém mesmo através destas é muito confusa. Observando a Terra tem-se uma impressão de uma Terra “sólida”. Esta impressão não é muito alterada quando se entra em uma caverna calcária e se vê água fluindo em um canal que a natureza esculpiu no que parece ser uma rocha sólida. De fato, de nossas observações, tanto em superfície, como em cavernas, somos levados a concluir que a água subterrânea ocorre somente em rios subterrâneos e “veios”. Não observamos nem enxergamos as pequenas aberturas que existem entre os grãos de areia e de silte, entre partículas de argila ou, mesmo ao longo de fraturas de granito. Conseqüentemente, não temos o conhecimento da presença de aberturas que, no volume total, em muito excedem o volume de todas as cavernas.

A maioria das aberturas subsuperficiais contém água e a importância desta água para a humanidade pode ser rapidamente demonstrada pela comparação de seu volume com os volumes de água em outras partes da hidrosfera. De acordo com a **Tabela 4.1**, 97,2 % da água disponível está nos oceanos e contém concentrações relativamente altas de sais minerais dissolvidos ela não está disponível para um uso imediato, embora existam atualmente tecnologias para o tratamento da água salgada com custos altos se comparados com o tratamento convencional. Atualmente tais tecnologias são empregadas em locais onde haja demanda e a viabilidade econômica e ou social assim a justifiquem.

Assim sendo, se o nosso foco for apenas à disponibilidade de água doce e observando as estimativas para a água doce na hidrosfera feitas pelo hidrólogo russo M. I. L’vovich que constam da **Tabela 4.1**, verificamos que o maior volume de água doce ocorre nas geleiras e a segunda maior parcela, cerca de 14 %, é água subterrânea.

Ao contrário de nossas impressões de rápido movimento observado em fluxo de correntes em cavernas, o movimento da maioria da água subterrânea é muito lento, conforme está demonstrado na **Tabela 4.1**, onde podemos observar a taxa de troca de água ou o tempo requerido para substituir a água contida nas diferentes partes da hidrosfera.

Aberturas subsuperficiais suficientemente grandes para fornecer água em quantidade usável a poços e nascentes ocorrem largamente sob a superfície terrestre. Associado a esta disponibilidade, a água subterrânea também representa uma alternativa de reserva de água doce rapidamente disponível ao homem, o que torna o valor da água subterrânea, tanto em termos econômicos como de bem estar incalculável. Conseqüentemente seu seguro desenvolvimento, e sua diligente conservação e proteção da poluição são importantes preocupações que devem

estar presentes em toda a sociedade e principalmente nos órgãos gestores da política de recursos hídricos.

**Tabela 4.1. Água doce da hidrosfera e sua taxa de troca.**

<b>Partes da hidrosfera</b>	<b>Volume de água doce - km<sup>3</sup></b>	<b>Parte total de água doce - %</b>	<b>Taxa de troca de água - ano</b>
Geleiras	24.000.000	84,945	8.000
Água subterrânea	4.000.000	14,158	280
Lagos e reservatórios	155.000	0,549	7
Umidade do solo	83.000	0,294	1
Atmosfera	14.000	0,049	0,027
Rios	1.200	0,004	0,031
<b>Total</b>	<b>28.253.200</b>	<b>100,00</b>	

Fonte: Heath, R.C. Water Supply paper. Disponível em <http://pubs.er.usgs.gov/pubs/wsp/wsp2220>.

## 4.2. ROCHAS E ÁGUA

Para HEATH (2002), as maiorias das rochas próximas da superfície da Terra são compostas de sólidos e vazios. A parte sólida é a parte óbvia da nossa observação em comparação com a observação dos vazios, porém sem os vazios não haveria suprimento de água para os poços e fontes.

Rochas que contém água consistem tanto de depósitos inconsolidados (semelhantes a solo) como rochas sólidas. A superfície da Terra, na maioria dos locais, é formada por solo e depósitos não consolidados que variam de espessura conforme a geologia do local. Os depósitos inconsolidados estão sobrejacentes a rochas sólidas e consistem de material derivado da desintegração de rochas sólidas. O material consiste, em diferentes tipos de depósitos inconsolidados, de partículas de rochas e minerais variando em tamanho desde frações de milímetros (tamanho argila) a muitos metros (matacões). Depósitos inconsolidados importantes para a hidrologia da água subterrânea incluem em ordem crescente de tamanho de grão: argila, silte, areia e cascalho. Um importante grupo de depósitos inconsolidados também inclui fragmentos de conchas de organismos marinhos.

Rochas consolidadas consistem de partículas minerais de diferentes tamanhos e formas que foram soldadas em uma massa sólida por calor e pressão ou por reações químicas. Tais rochas são comumente referidas nos relatórios de água subterrânea como embasamento. Incluem: calcáreo dolomito, siltito arenoso e conglomerado. Rochas ígneas incluem: granito e

basalto. Os vazios ou interstícios compreendem poros, fraturas, cavernas, e podem conter ar, água ou ambos.

Durante o percurso no qual a água percola entre os poros do subsolo e das rochas ocorre à depuração da mesma através de uma série de processos físico-químicos (troca iônica, decaimento radioativo, remoção de sólidos em suspensão, neutralização de pH em meio poroso, entre outros) e bacteriológicos (eliminação de microorganismos devido à ausência de nutrientes e oxigênio que os viabilizem) que agindo sobre a água, modificam as suas características adquiridas anteriormente, tornando-a particularmente mais adequada ao consumo humano, (SILVA, 2002).

#### **4.2.1. Tipos de rochas e suas qualidades de suprir água**

De acordo com SILVA (2002), antes de discutir as qualidades das rochas, é preciso introduzir o conceito de permeabilidade. Permeabilidade é uma medida da capacidade de uma rocha de permitir a passagem de água sob condições fixadas, esta permeabilidade aplica-se à água na zona de saturação que se move devido à inclinação do lençol de água ou à diferença de pressão no sistema artesiano.

Ainda segundo o autor, considerando interstícios originais, o interesse maior é a permeabilidade da formação. É de pouco valor se uma formação tem muita água, mas, se esta passa muito lentamente ao poço. Como exemplo, um silte ou areia fina tem uma porosidade grande e uma descarga específica moderada, mas infelizmente a formação tem uma permeabilidade baixa e produz pouca água aos poços.

Apresenta-se a seguir uma breve descrição dos principais tipos de rochas, baseada no trabalho apresentado por REBOUÇAS *et al.* (2002).

##### **4.2.1.1. Interstícios originais**

Os espaços entre partículas de uma rocha sedimentar são as melhores fontes de água com poucas exceções. Sabe-se que no caso de partículas bem arredondadas a formação possui muitos espaços vazios (poros). O limite teórico é 47,64% do volume total - uma areia fina contém tanta água quanto cascalho desde que ambos sejam bem classificados. Onde a formação é mal classificada, as partículas finas enchem os espaços entre as grandes e o volume vazio é menor.

Mesmo que areia fina possa ter a mesma porosidade de um cascalho, devido aos espaços na areia serem pequenos, a água atravessa o material fino com dificuldade (permeabilidade

baixa), justificando porque um poço na areia fina desenvolve pouca água. Devido ao tamanho dos grãos, silte tem uma permeabilidade menor que a areia e a argila muito menor que ambas.

#### **4.2.1.2. *Interstícios secundários***

Após serem arrefecidas e endurecidas, muitas rochas ígneas desenvolvem diaclases. Essas diaclases podem armazenar e transmitir água. Ocorrem nas rochas sedimentárias, provavelmente muito tempo depois da deposição.

Paraclases (falhas) podem ser extremamente importantes. Uma paraclase com rocha lateralmente muito diaclasada pode transmitir muita água a distâncias longas e pode admitir muita água de superfície. Às vezes a paraclase pode estar preenchida de farinha da rocha pulverizada, funcionando como barreira e impedindo o fluxo de água.

#### **4.2.1.3. *Interstícios de solução***

Segundo LEAL (1992), o calcário dissolve-se facilmente na água tendo CO<sub>2</sub>. Em alguns lugares a solução alarga os interstícios originais produzindo uma rocha muito mais porosa.

#### **4.2.1.4. *Interstícios segundo intemperismo***

LEAL (1992) enfatiza que depois de meteorizadas, algumas rochas cristalinas ficam muito porosas e mais ou menos permeáveis. Armazenam muita água e às vezes dão água em quantidades moderadas.

### **4.2.2. Tipos de rochas**

#### **4.2.2.1. *Cascalho e conglomerado***

O aluvião produz mais água do que todas as outras rochas juntas. O cascalho é depositado por correntes rápidas em um rio ou mar, numa condição pouco especial.

#### **4.2.2.2. *Areia e silte***

A areia e silte ocorrem nos vales ou planaltos de aluvião, na planície costeira, com sedimentos depositados pela geleira ou dos rios que correm das geleiras. A diferença geológica entre cascalho e estas formações é que as camadas de areia e silte geralmente são mais extensas e mais espessas, mas tratando-se de características hidrológicas a diferença é maior. Poços

em cascalho limpo produzem sempre mais água que os em areia fina que, por sua vez são produtores melhores que os de silte. Existem lugares em que as camadas extensas de areia proporcionam um volume de água armazenada que pode suprir poços por muitos anos sem reabastecimento de chuva.

#### **4.2.2.3. Calcário**

Para os autores, o calcário pode produzir muita água ou quase nenhuma. Calcário recentemente depositado tem muitos interstícios e uma grande permeabilidade. Porém o calcário é facilmente dissolvido por água meteórica que contém CO<sub>2</sub> em dissolução. Este processo e deposição do carbonato de cálcio em profundidade tendem a tornar mais porosa a parte acima do nível de água, e a parte abaixo do nível de água, compacta.

Em geral, os calcários recentes têm boa permeabilidade, aberturas primárias e secundárias; mas os mais antigos geralmente dão pouca água devido à compactação e cimentação. As melhores condições para se tornar um bom aquífero são: primeiro uma posição elevada acima do nível da água onde os calcários podem ser dissolvidos pela água que circula; segundo, a-fundando a terra, as cavernas e diaclases alargadas ficam na zona de saturação.

#### **4.2.2.4. Argila, folhelho e ardósia**

A argila pura não produz água, exceto quando raízes antigas deixam canais permitindo a entrada de pouca água. Uma mistura de areia e argila pode produzir quantidades pequenas de água. O folhelho comumente produz muito pouca água, pois é uma formação plástica e as aberturas tendem a fechar-se. Às vezes o folhelho pode ser algo quebradiço e produz um pouco mais. A ardósia sendo mais quebradiça produz um pouco de água nas diaclases.

#### **4.2.2.5. Gipsita**

A gipsita é muito solúvel. Camadas de gesso ou camadas de folhelho ou calcário contendo gipsita como impureza, desenvolvem uma permeabilidade secundária pela dissolução de sulfato de cálcio e podem produzir muita água.

A água dessas formações tem um sabor ruim, mas, esta água pode ser muito boa para a agricultura.

#### **4.2.2.6. Carvão**

O carvão é geralmente diaclasado e produz água em muitos lugares. A água é pouco mineralizada, mas geralmente tem cor castanha ou quase preta.

#### **4.2.2.7. Basalto**

Os suprimento de água subterrânea, mais expressivos do mundo encontram-se em áreas de grandes rochas basálticas.

Basalto com derrames pouco espessos tem muitas diaclases, desenvolvidas por contração durante o esfriamento. Muitos basaltos têm vesículas e onde as vesículas são ligadas, podendo reservar e transmitir água.

#### **4.2.2.8. Rochas cristalinas**

Consideram-se aqui três grupos de rochas cristalinas: *a)* rochas graníticas, *b)* rochas xistosas e *c)* quartzitos. Também é preciso distinguir entre rocha fresca e rocha intemperizada.

#### **4.2.2.9. Rocha granítica fresca**

Granito e gnaisse granítico são rochas duras sem espaços intersticiais; mas quase sempre a rocha tem diaclases interligadas que dão água. Naturalmente, a permeabilidade da rocha varia com o número de diaclases.

Além das diaclases comuns, existem outras aberturas que produzem água. Paraclases ou outras zonas tectônicas podem ter alta importância.

#### **4.2.2.10. Rocha granítica intemperizada**

Em áreas mais ou menos planas há zonas de rochas intemperizadas por toda parte. O volume de água disponível varia com o grau de intemperismo. A rocha pouco intemperizada produzirá muito menos água naturalmente.

#### **4.2.2.11. Xisto**

É uma formação plástica e ali as aberturas tendem a fechar-se, mas o xisto pode ter uma capacidade de produzir tanta água quanto às rochas graníticas.

#### 4.2.2.12. *Xisto intemperizado*

Um xisto verdadeiro deve dar pelo intemperismo um solo muito argiloso. Vendo que um xisto é uma mistura de rochas, deve-se considerar que xisto meteorizado pode ter qualidades para suprir água como as rochas graníticas.

#### 4.2.2.13. *Quartzito*

Um quartzito duro pode funcionar como uma rocha quebradiça e só produzirá água das diaclases, mas onde um quartzito estiver bem fraturado poderá produzir muita água.

### 4.3. POROSIDADE E PERMEABILIDADE

De acordo com CABRAL (apud FEITOSA, 1997), a porosidade total ou a porosidade de um solo ou rocha pode ser definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total,

**Equação 4.1:**

$$\eta = \frac{V_v}{V} \quad (4.1)$$

sendo:  $\eta$  = porosidade total;  $V_v$  = volume de vazios e  $V$  = volume total.

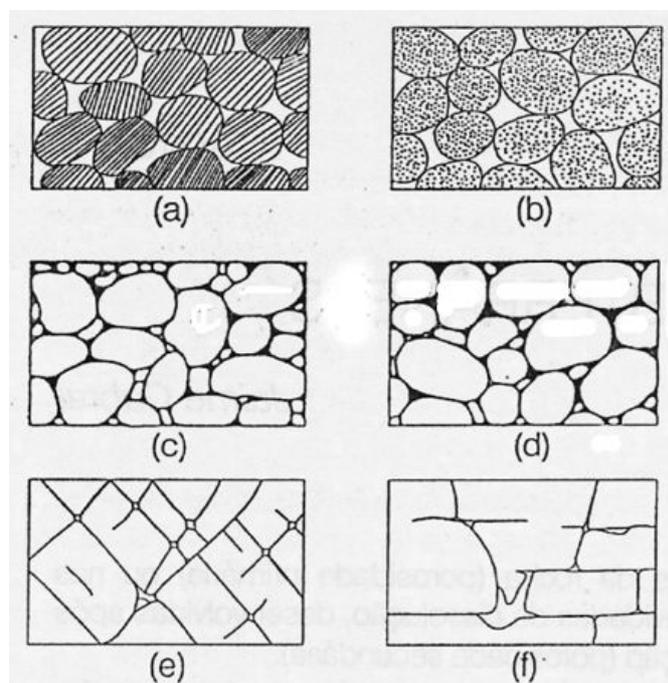
Alguns hidrogeólogos preferem trabalhar com a porosidade expressa em percentagem, bastando para isto multiplicar o valor da porosidade por 100.

A porosidade depende do tamanho dos grãos. Se os grãos são de tamanho variado, a porosidade tende a ser menor do que no caso de grãos uniformes, porque os grãos pequenos ocupam os espaços vazios entre os maiores. Na **Figura 4.1** são mostrados alguns tipos clássicos de porosidade.

De acordo com CAPUCCI (2000), os vazios estão relacionados com a porosidade do solo, e é definida como a capacidade que o solo ou rocha possui de armazenar e transmitir água. É medida pelo percentual de volume ocupado pelos vazios ou poros no volume do corpo rochoso e quantifica a porção relativa de vazios em uma amostra de solo ou rocha, sendo dependente do tamanho dos poros e da intercomunicação entre eles.

Para BORGES e BARRETO (2001), no caso dos solos, a porosidade é controlada pela distribuição granulométrica, a forma e o arranjo dos grãos. Em solos uniformes, a porosidade independe da dimensão dos grãos – em solos de grãos maiores, os vazios são maiores que em solos de grãos menores, mas a porcentagem que estes vazios ocupam em relação ao volume total é a mesma. Solos uniformes têm porosidade mais alta, enquanto que em solos com maior

variação das dimensões das partículas, os grãos menores tendem a preencher os espaços entre os maiores, resultando em um menor volume de vazios (menor porosidade). Solos com arranjos geométricos mais densos têm menor porosidade que solos com arranjos mais soltos.



**Figura 4.1.** Representação esquemática de distintos tipos de rocha, indicando a relação entre a textura e a porosidade: (a) rocha sedimentar com granulometria homogênea (porosidade elevada); (b) rocha sedimentar de granulometria homogênea cujos grãos são porosos (porosidade muito elevada); (c) rocha sedimentar de granulometria heterogênea (baixa porosidade); (d) rocha sedimentar com alto grau de cimentação (porosidade muito baixa); (e) rocha com porosidade secundária devido a fraturas; (f) rocha com porosidade secundária devido à dissolução. Fonte: MEINZER, 1923 in CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983 (apud FEITOSA, 1997).

A **Tabela 4.2** demonstra os valores típicos de porosidade para vários solos e rochas.

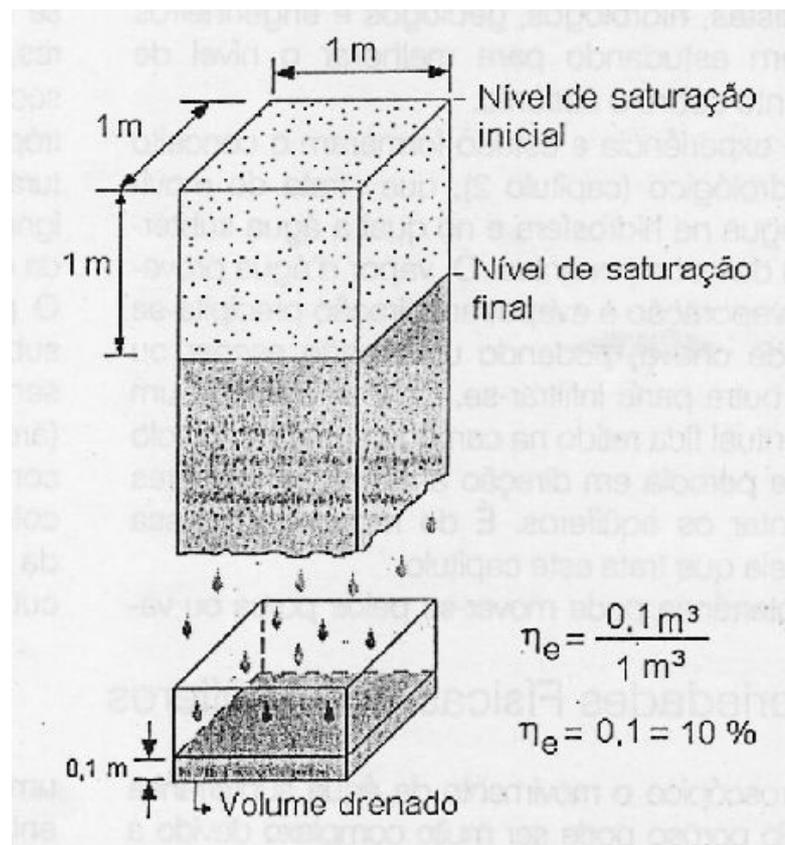
**Tabela 4.2.** Valores típicos de porosidade para alguns solos e rochas.

Material		n (%)
<b>Solos</b>	Esferas uniformes	26,0 - 47,6
	Areia uniforme	29 - 50
	Silte inorgânico uniforme	29 - 52
	Areia siltosa	23 - 47
	Areia fina a grossa	17 - 49
	Areia micácea	29 - 55
	Areia siltosa com pedregulho	12 - 46
	<b>Rochas</b>	
Arenitos	< 5	
Folhelhos	5 - 20	
Rochas carbonáticas (porosidade primária)	20 - 50	
Rochas ígneas e metamórficas sãs	< 2	
Rochas ígneas e metamórficas alteradas	50	

Fonte: LAMBE & WHITMAN, 1979; FRANKLIN & DUSSEAUULT, 1989 (apud BORGES E BARRETO, 2001).

Ainda, segundo BORGES e BARRETO (2001), os poros podem estar ou não interconectados, o que influi diretamente na ocorrência e movimento da água subterrânea. A porosidade efetiva do material é definida como a razão entre o volume de vazios interconectados e o volume total, o que é equivalente a considerar os poros não interconectados como parte da fase sólida. A porosidade total é a razão entre o volume de vazios interconectados ou não e o volume total do solo ou rocha. Em geral, a porosidade efetiva de sedimentos não consolidados é igual à porosidade total, ou seja, todos os vazios estão interconectados, pois o arranjo dos grãos forma um esqueleto em torno do qual permanecem os espaços vazios. As rochas possuem porosidade intergranular, onde ocorrem vazios isolados, como, por exemplo, poros de rochas cristalinas, vesículas ou poros isolados pela cimentação em rochas sedimentares.

De acordo com CABRAL (apud FEITOSA, 1997), porosidade efetiva pode ser definida como a quantidade de água fornecida por unidade de volume do material, ou seja, a razão entre o volume de água efetivamente liberado de uma amostra de rocha porosa saturada e o volume total, conforme pode ser verificado na **Figura 4.2**.



**Figura 4.2.** Conceito de porosidade efetiva, como sendo a quantidade de água efetivamente drenada por gravidade de um volume unitário saturado do aquífero. Fonte: DRISCOLL (apud FEITOSA, 1997).

De acordo com CABRAL (apud FEITOSA, 1997), alguns autores chamam esta porosidade interconectada apenas de porosidade efetiva e usam o termo produção específica (*specific yield*) para definir a porosidade efetiva como aqui definida.

Segundo CAPUCCI (2000), as rochas sedimentares (material não consolidado) têm alta porosidade ao contrário das rochas cristalinas (rochas duras), mas nem todas têm alta permeabilidade. As argilas têm poros tão pequenos que não deixam passar água, sendo consideradas praticamente impermeáveis. Outras rochas sedimentares como os arenitos e areias inconsolidadas possuem tanto porosidade quanto permeabilidades elevadas. Já nas rochas cristalinas, a permeabilidade será proporcional ao número de fraturas e da interconexão entre elas, ou seja, o fluxo de água ocorre através dos vazios interconectados.

#### 4.4. DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO PERFIL DO SOLO E SUBSOLO

De acordo com MANOEL FILHO (apud FEITOSA, 1997), a água que se encontra sob a superfície da terra, também conhecida como água do subsolo ou subsuperficial é a água que após ter se infiltrado no solo, preenche os poros e vazios dos solos e rochas e tem a sua distribuição vertical em duas zonas horizontais saturadas e não saturada, de acordo com a proporção relativa do espaço poroso que é ocupada pela água e representado pela **Figura 4.3**.

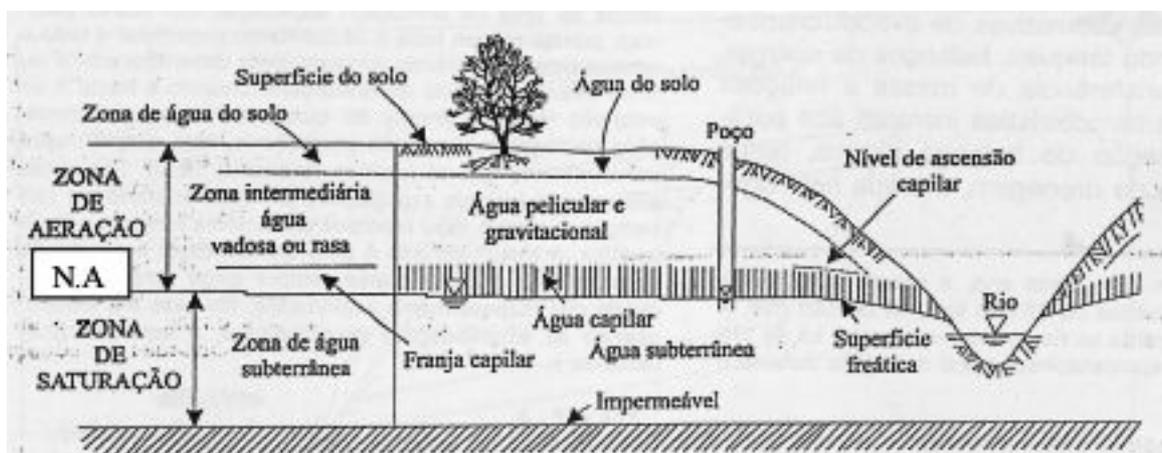


Figura 4.3. Distribuição vertical da água no solo e subsolo.

Fonte: Manoel Filho (modificado de Bear & Verrujuit, apud FEITOSA, 1997).

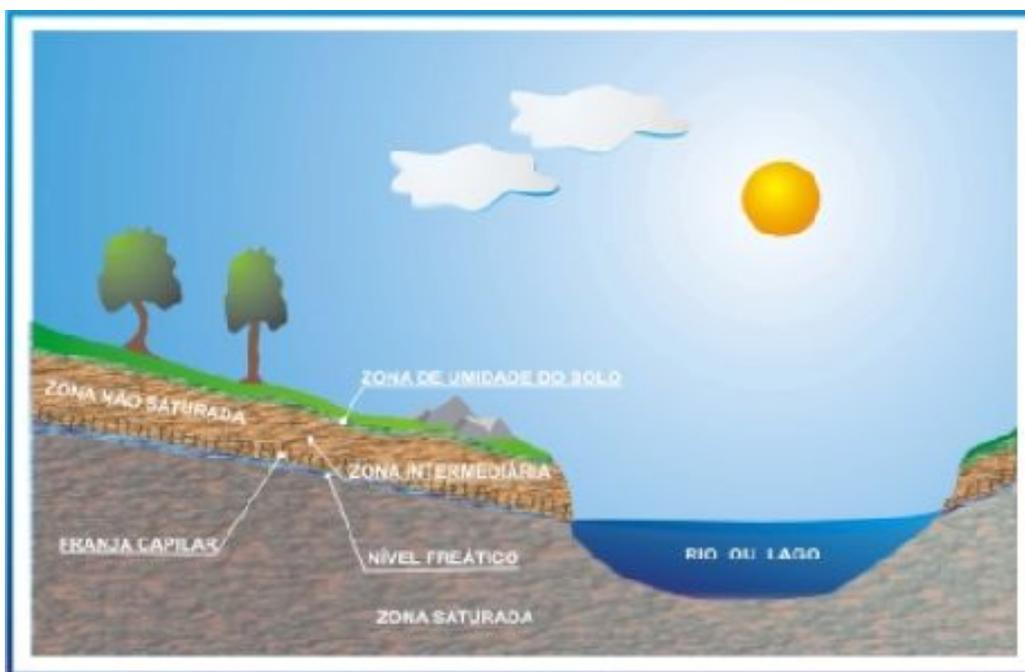
Segundo BORGES E BARRETO (2001) abaixo do nível de água (zona freática ou lençol d'água), todos os poros ou aberturas do solo ou rocha estão saturados com água, que está submetida a pressões maiores que a pressão atmosférica. O nível de água é definido como a cota em que a pressão é igual a pressão atmosférica.

Após a precipitação, parte das águas que atinge o solo se infiltra e percola no interior do subsolo, durante períodos de tempo extremamente variáveis, decorrentes de muitos fatores:

- porosidade do subsolo: a presença de argila no solo diminui sua permeabilidade, não permitindo uma grande infiltração;
- cobertura vegetal: um solo coberto por vegetação é mais permeável do que um solo desmatado;
- inclinação do terreno: em declividades acentuadas a água corre mais rapidamente, diminuindo a possibilidade de infiltração;
- tipo de chuva: chuvas intensas saturam rapidamente o solo, ao passo que chuvas finas e demoradas têm mais tempo para se infiltrarem.

#### 4.4.1. Zona de Aeração ou não saturada

Durante a infiltração, uma parcela da água sob a ação da força de adesão ou de capilaridade fica retida nas regiões mais próximas da superfície do solo, constituindo a zona não saturada. Outra parcela, sob a ação da gravidade, atinge as zonas mais profundas do subsolo, constituindo a zona saturada (**Figura 4.4**).



**Figura 4.4 . Caracterização esquemática das zonas não saturada e saturada no subsolo.**

**Fonte: BOSCARDIN BORGHETTI et al., 2004 .**

De acordo com MANOEL FILHO (apud FEITOSA, 1997), zona de aeração é a parte do solo que está parcialmente preenchida por água. Nesta zona a água ocorre na forma de películas aderidas aos grãos do solo. Solos muito finos tendem a ter mais umidade do que os mais grosseiros, pois há mais superfícies de grãos onde a água pode ficar retida por adesão.

Também chamada de zona de aeração ou vadosa, é a parte do solo que está parcialmente preenchida por água. Nesta zona, pequenas quantidades de água distribuem-se uniformemente, sendo que as suas moléculas se aderem às superfícies dos grãos do solo. Nesta zona ocorre o fenômeno da transpiração pelas raízes das plantas, de filtração e de autodepuração da água. Na zona de aeração podemos distinguir três regiões:

#### **4.4.2. Zona de umidade do solo**

De acordo com REBOUÇAS *et al.* (2002), a zona de umidade do solo é a parte mais superficial, onde a perda de água de adesão para a atmosfera é intensa. Em alguns casos é muito grande a quantidade de sais que se precipitam na superfície do solo após a evaporação dessa água, dando origem a solos salinizados ou a crostas ferruginosas (lateríticas). Esta zona serve de suporte fundamental da biomassa vegetal natural ou cultivada da Terra e da interface atmosfera/litosfera.

De acordo com MANOEL FILHO (apud FEITOSA, 1997) esta zona também denominada zona de água do solo ou zona de evapotranspiração, situada entre os extremos radiculares da vegetação e superfície do terreno. A sua espessura, portanto, pode variar de poucos centímetros (na ausência de cobertura vegetal) até vários metros em regiões de vegetação abundantes.

#### **4.4.3 Franja de capilaridade**

É a região mais próxima ao nível d'água do lençol freático, onde a umidade é maior devido à presença da zona saturada logo abaixo.

Segundo MANOEL FILHO (apud FEITOSA, 1997) a zona capilar se estende da superfície freática até o limite de ascensão capilar da água. A sua espessura depende principalmente da distribuição de tamanho dos poros e da homogeneidade do terreno. Como a umidade decresce de baixo para cima, na parte inferior, próximo da superfície freática, os poros encontram-se praticamente saturados. De acordo com BORGES e BARRETO (2001), uma vez que os poros do solo têm dimensões variáveis, a superfície da água no topo da franja capilar é irregular, a água atinge alturas maiores nos poros mais estreitos.

#### **4.4.4. Zona intermediária**

Região compreendida entre a zona de umidade do solo e da franja capilar, com umidade menor do que nesta última e maior do que a da zona superficial do solo.

Segundo MANOEL FILHO (apud FEITOSA, 1997), esta região está compreendida entre o limite de ascensão capilar da água e o limite de alcance das raízes das plantas. A umidade existente nesta zona origina-se de água capilar isolada, fora de alcance das raízes, e água de retenção por forças não capilares.

De acordo com BORGES e BARRETO (2001), nesta zona, os poros contem, água e ar. A fase aquosa é em grande parte contínua e o teor de umidade (ou seja, a quantidade de água nos poros) aumenta com a profundidade nesta região. A água pode se mover para baixo, sob a ação da gravidade. A capilaridade é maior em terrenos cuja granulometria é muito fina. Em áreas onde o nível freático está próximo da superfície, a zona intermediária pode não existir, pois a franja capilar atinge a superfície do solo. São brejos e alagadiços, onde há uma intensa evaporação da água subterrânea.

#### **4.4.5. Zona saturada**

Esta é a zona onde a água está disponível para suprir poços e fontes, uma vez que todos os poros e vazios estão saturados com água. Na parte superior desta zona localiza-se o lençol freático ou superfície freática e a pressão da água nesta região é pressão atmosférica.

É a região abaixo da zona não saturada onde os poros ou fraturas da rocha estão totalmente preenchidos por água. As águas atingem esta zona por gravidade, através dos poros ou fraturas até alcançar uma profundidade limite, onde as rochas estão tão saturadas que a água não pode penetrar mais. Para que haja infiltração até a zona saturada, é necessário primeiro satisfazer as necessidades da força de adesão na zona não saturada.

Nesta zona, a água corresponde ao excedente de água da zona não saturada que se move em velocidades muito lentas (cm/dia) formando o manancial subterrâneo propriamente dito. Uma parcela dessa água irá desaguar na superfície dos terrenos, formando as fontes, olhos de água. A outra parcela desse fluxo subterrâneo forma o caudal basal que deságua nos rios, perenizando-os durante os períodos de estiagem, com uma contribuição multianual média da ordem de 13.000 km<sup>3</sup>/ano (PEIXOTO e OORT, 1990, citado por REBOUÇAS, 1996), ou deságua diretamente nos lagos e oceanos.

#### 4.5. TIPOS DE AQUIFERO

Os aquíferos são reservatórios naturais de armazenamento de água subterrânea situados em formações rochosas ou geológicas que possuem a capacidade de armazenar e transmitir água que possa ser extraída possuindo assim um valor econômico.

Aquífero é uma formação geológica do subsolo, constituída por rochas permeáveis, que armazena água em seus poros ou fraturas. Outro conceito refere-se a aquífero como sendo, somente, o material geológico capaz de servir de depósito e de transmissor da água aí armazenada. Assim, uma litologia só será aquífera se, além de ter seus poros saturados (cheios) de água, permitir a fácil transmissão da água armazenada.

Um aquífero pode ter extensão de poucos quilômetros quadrados a milhares de quilômetros quadrados, ou pode, também, apresentar espessuras de poucos metros a centenas de metros (REBOUÇAS *et al.*, 2002). Etimologicamente, aquífero significa: aqui = água; fero = transfere; ou do grego, suporte de água (HEINEN *et al.*, 2003).

Os aquíferos mais importantes do mundo por extensão ou pela transnacionalidade, são: o Guarani - Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai (1,2 milhões de km<sup>2</sup>); o Arenito Núbia Líbia, Egito, Chade, Sudão (2 milhões de km<sup>2</sup>); o KalaharijKaroo - Namíbia, Bostwana, África do Sul (135 mil km<sup>2</sup>); o Digitalwaterway vechte - Alemanha, Holanda (7,5 mil km<sup>2</sup>); o Slovak-Karst-Aggtelek - República Eslováquia e Hungria); o Praded - República Checa e Polônia (3,3 mil km<sup>2</sup>) (UNESCO, 2001); a Grande Bacia Artesiana (1,7 milhões km<sup>2</sup>) e a Bacia Murray (297 mil km<sup>2</sup>), ambos na Austrália. Em um recente levantamento, a UNECE da Europa constatou que existem mais de 100 aquíferos transnacionais naquele continente (ALMASSY e BUZAS, 1999 citado em UNESCO, 2001).

A litologia do aquífero, ou seja, a sua constituição geológica (porosidade/permeabilidade intergranular ou de fissuras) é que irá determinar a velocidade da água em seu meio, a qualidade da água e a sua qualidade como reservatório. Essa litologia é decorrente da sua origem geológica, que pode ser fluvial, lacustre, eólica, glacial e aluvial (rochas sedimentares), vulcânica (rochas fraturadas) e metamórfica (rochas calcáreas), determinando os diferentes tipos de aquíferos. Quanto à porosidade, existem três tipos aquíferos (**Figura 4.5**) e quanto a pressão existem 2 tipos (**Figura 4.6**):

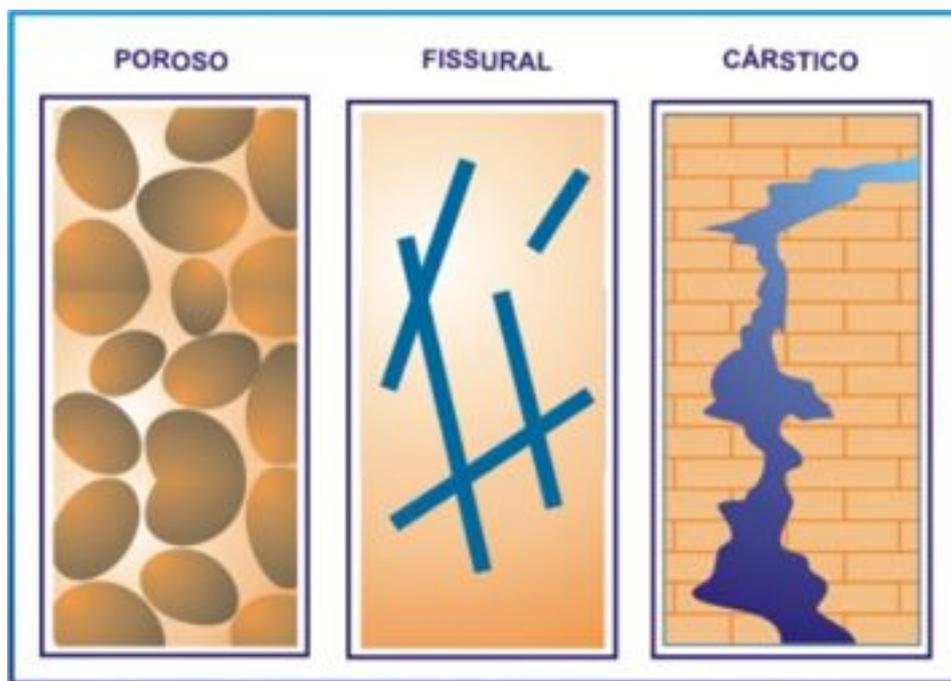


Figura 4.5. Tipos de aquíferos quanto à porosidade Fonte: BOSCARDIN BORGHETTI et al.. (2004).

#### 4.5.1. Aquífero poroso ou sedimentar

É aquele formado por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos, onde a circulação da água se faz nos poros formados entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada. Constituem os mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam, e por sua ocorrência em grandes áreas. Esses aquíferos ocorrem nas bacias sedimentares e em todas as várzeas onde se acumularam sedimentos arenosos. Uma particularidade desse tipo de aquífero é sua porosidade quase sempre homogeneamente distribuída, permitindo que a água flua para qualquer direção, em função tão somente dos diferenciais de pressão hidrostática ali existente. Essa propriedade é conhecida como isotropia. (REBOUÇAS *et al.*, 2002).

#### 4.5.2. Aquífero fraturado ou fissural

Formado por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, duras e maciças, onde a circulação da água se faz nas fraturas, fendas e falhas, abertas devido ao movimento tectônico. Ex.: basalto, granitos, gabros, filões de quartzo, etc. A capacidade dessas rochas de acumularem água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação, permitindo a infiltração e fluxo da água. Poços perfurados nessas rochas fornecem poucos metros cúbicos de água por hora, sendo que a possibilidade de se ter um poço produtivo dependerá, tão somente, desse poço interceptar fraturas capazes de conduzir a água. Nesses aquíferos, a água só

pode fluir onde houver fraturas, que, quase sempre, tendem a ter orientações preferenciais. São ditos, portanto, aquíferos anisotrópicos. Um caso particular de aquífero fraturado é representado pelos derrames de rochas vulcânicas basálticas, das grandes bacias sedimentares brasileiras.

#### 4.5.3. Aquífero cárstico (Karst)

De acordo com REBOUÇAS *et al.* (2002) aquífero cárstico é formado em rochas calcáreas ou carbonáticas, onde a circulação da água se faz nas fraturas e outras discontinuidades (diáclases) que resultaram da dissolução do carbonato pela água. Essas aberturas podem atingir grandes dimensões, criando, nesse caso, verdadeiros rios subterrâneos. São aquíferos heterogêneos, descontínuos, com águas duras, com fluxo em canais. As rochas são os calcários, dolomitos e mármore.

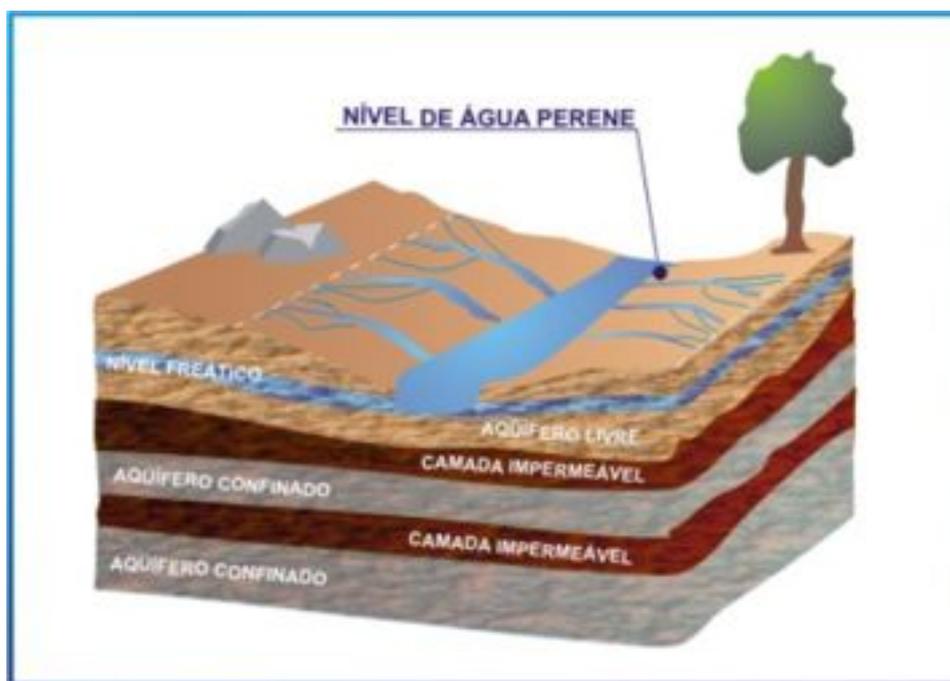


Figura 4.6. Tipos de aquíferos quanto à pressão Fonte: BOSCARDIN BORGHETTI *et al.* (2004).

#### 4.5.4. Aquífero livre ou freático

De acordo com REBOUÇAS *et al.* (2002), é aquele constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável. A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente. Os aquíferos livres têm a chamada recarga direta. Em aquíferos livres o nível da água varia segundo a quantidade de chuva. São

os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população. São também os que apresentam maiores problemas de contaminação.

#### **4.5.5. Aquífero confinado ou artesiano**

REBOUÇAS *et al.* (2002), afirmam que aquífero confinado ou artesiano é aquele constituído por uma formação geológica permeável, confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz com que a água ascenda no poço para além da zona aquífera. O seu reabastecimento ou recarga, através das chuvas, dá-se preferencialmente nos locais onde a formação aflora à superfície. Neles, o nível da água encontra-se sob pressão, podendo causar artesianismo nos poços que captam suas águas. Os aquíferos confinados têm a chamada recarga indireta e quase sempre estão em locais onde ocorrem rochas sedimentares profundas (bacias sedimentares).

O aquífero semi-confinado que é aquele que se encontra limitado na base, no topo, ou em ambos, por camadas cuja permeabilidade é menor do que a do aquífero em si. O fluxo preferencial da água se dá ao longo da camada aquífera. Secundariamente, esse fluxo se dá através das camadas semi-confinantes, à medida que haja uma diferença de pressão hidrostática entre a camada aquífera e as camadas subjacentes ou sobrejacentes. Em certas circunstâncias, um aquífero livre poderá ser abastecido por água oriunda de camadas semiconfinadas subjacentes, ou vice-versa. Zonas de fraturas ou falhas geológicas poderão, também, constituir-se em pontos de fuga ou recarga da água da camada confinada.

Em uma perfuração de um aquífero confinado, a água subirá acima do teto do aquífero, devido à pressão exercida pelo peso das camadas confinantes sobrejacentes. A altura a que a água sobe chama-se nível potenciométrico e o furo é artesiano. Numa perfuração de um aquífero livre, o nível da água não varia porque corresponde ao nível da água no aquífero, isto é, a água está à mesma pressão que a pressão atmosférica. O nível da água é designado então de nível freático (**Figura 4.7**).



**Figura 4.7. Representação esquemática do nível de pressão nos aquíferos.**

**Fonte: BOSCARDIN BORGHETTI et al.. (2004).**

Um aquífero apresenta uma reserva permanente de água e uma reserva ativa ou reguladora que são continuamente abastecidas através da infiltração da chuva e de outras fontes subterrâneas. As reservas reguladoras ou ativas correspondem ao escoamento de base dos rios.

A área por onde ocorre o abastecimento do aquífero é chamada zona de recarga, que pode ser direta ou indireta. O escoamento de parte da água do aquífero ocorre na zona de descarga.

A zona de recarga direta é aquela onde a água da chuva se infiltra diretamente no aquífero, através de suas áreas de afloramento e fissuras de rochas sobrejacentes. Sendo assim, a recarga sempre é direta nos aquíferos livres, ocorrendo em toda a superfície acima do lençol freático. Nos aquíferos confinados, o reabastecimento ocorre preferencialmente nos locais onde a formação portadora de água aflora à superfície.

Já a zona de recarga indireta é aquela onde o reabastecimento do aquífero se dá a partir da drenagem (filtração vertical) superficial das águas e do fluxo subterrâneo indireto, ao longo do pacote confinante sobrejacente, nas áreas onde a carga potenciométrica favorece os fluxos descendentes.

A zona de descarga é aquela por onde as águas emergem do sistema, alimentando rios e jorrando com pressão por poços artesianos.

As maiores taxas de recarga ocorrem nas regiões planas, bem arborizadas, e nos aquíferos livres. Nas regiões de relevo acidentado, sem cobertura vegetal, sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem as enxurradas, a recarga ocorre mais lentamente e de maneira limitada (REBOUÇAS *et al.*, 2002).

Sob condições naturais, apenas uma parcela dessas reservas reguladoras é passível de exploração, constituindo o potencial ou reserva explotável. Em geral, esta parcela é calculada entre 25% e 50% das reservas reguladoras (REBOUÇAS, 1992 citado em ANA, 2001). Esse volume de exploração pode aumentar em função das condições de ocorrência e recarga, bem como dos meios técnicos e financeiros disponíveis, considerando que a soma das extrações com as descargas naturais do aquífero para rios e oceano, não pode ser superior à recarga natural do aquífero.

Além de suprir água suficiente para manter os cursos de águas superficiais estáveis (função de produção), os aquíferos também ajudam a evitar seu transbordamento, absorvendo o excesso da água da chuva intensa (função de regularização). Na Ásia tropical, onde a estação quente pode durar até 9 meses e onde as chuvas de monção podem ser bastante intensas, esse duplo serviço hidrológico é crucial.

Segundo o mesmo autor, os aquíferos também proporcionam uma forma de armazenar água doce sem muita perda pela evaporação - outro serviço particularmente valioso em regiões quentes, propensas à seca, onde essas perdas podem ser extremamente altas. Na África, por exemplo, em média, um terço da água extraída de reservatórios todo ano perde-se pela evaporação. Os pântanos, habitats importantes para as aves, peixes e outras formas de vida silvestre, nutrem-se, normalmente, de água subterrânea, onde o lençol freático aflora à superfície em ritmo constante. Onde há muita exaustão de água subterrânea, o resultado é, frequentemente, leito de rios e pântanos ressecados.

Portanto, os aquíferos podem cumprir as seguintes funções (REBOUÇAS *et al.*, 2002):

- *função de produção*: corresponde à sua função mais tradicional de produção de água para o consumo humano, industrial ou irrigação.
- *função de estocagem e regularização*: utilização do aquífero para estocar excedentes de água que ocorrem durante as enchentes dos rios, regularização dos rios durante a época da seca.
- *função de filtro*: corresponde à utilização da capacidade filtrante e de depuração biogeoquímica do maciço natural permeável. Para isso, são implantados poços a distâncias adequadas de rios perenes, lagoas, lagos ou reservatórios, para extrair água natu-

ralmente clarificada e purificada, reduzindo substancialmente os custos dos processos convencionais de tratamento.

- *função ambiental*: a hidrogeologia evoluiu de enfoque naturalista tradicional (década de 40) para hidráulico quantitativo até a década de 60. A partir daí, desenvolveu-se a hidroquímica, em razão da utilização intensa de insumos químicos nas áreas urbanas, indústrias e nas atividades agrícolas. Na década de 80 surgiu a necessidade de uma abordagem multidisciplinar integrada da hidrogeologia ambiental.
- *função transporte*: o aquífero é utilizado como um sistema de transporte de água entre zonas de recarga artificial ou natural e áreas de extração excessiva.
- *função estratégica*: a água contida em um aquífero foi acumulada durante muitos anos ou até séculos e é uma reserva estratégica para épocas de pouca ou nenhuma chuva. O gerenciamento integrado das águas superficiais e subterrâneas de áreas metropolitanas, inclusive mediante práticas de recarga artificial com excedentes da capacidade das estações de tratamento, os quais ocorrem durante os períodos de menor consumo, com infiltração de águas pluviais e esgotos tratados, originam grandes volumes hídricos. Esses poderão ser bombeados para atender o consumo essencial nos picos sazonais de demanda, nos períodos de escassez relativa e em situações de emergência resultantes de acidentes naturais, como avalanches, enchentes e outros tipos de acidentes que reduzem a capacidade do sistema básico de água da metrópole em questão.
- *função energética*: utilização de água subterrânea aquecida pelo gradiente geotermal como fonte de energia elétrica ou termal.

#### **4.6. MOVIMENTO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA**

De acordo com BORGES e BARRETO (2001) e CABRAL APUD FEITOSA (1997), a água subterrânea pode mover-se pelos poros ou vazios originais da rocha (porosidade primária) ou nas fissuras e cavidades de dissolução, desenvolvidas após a sua formação (porosidade secundária).

Cabe salientar que a porosidade primária ocorre geralmente (excetuando-se algumas rochas vulcânicas) nas rochas sedimentares, dando origem aos aquíferos porosos. A porosidade secundária está associada aos chamados meios aniso-trópicos, originando o aquífero fissural, no caso de fraturas e fissuras em rochas cristalinas (principalmente ígneas e metamórficas), e o aquífero cárstico, no caso da dissolução de rochas carbonáticas.

Ainda segundo o autor, a nível microscópico o movimento da água subterrânea em um meio poroso pode ser muito complexo devido à irregularidade dos poros e canalículos através dos quais o fluido deve passar.

#### 4.6.1. Fluxo em meios porosos

De acordo com BORGES e BARRETO (2001) e Fetter (1997), o fluxo em meios porosos começou a ser estudado por Darcy em 1850, a partir da realização de um experimento com uma amostra de solo utilizando um sistema similar ao esquematizado na **Figura 4.8**. Nesse experimento conclui-se que a vazão do escoamento (volume por unidade do tempo) era:

- proporcional à seção transversal ( $A$ ) do filtro;
- proporcional à diferença de cargas hidráulicas ( $h_1$  e  $h_2$ ), entre os piezômetros 1 e 2)

Ele também determinou que o fluxo de água é proporcional ao coeficiente  $K$ , o qual depende das características do meio.

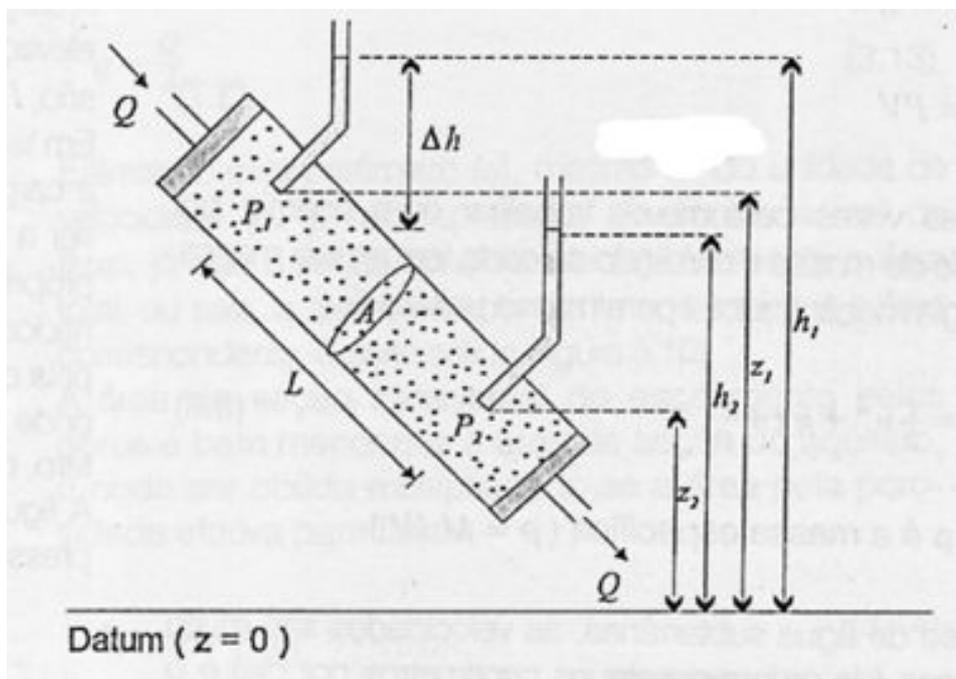


Figura 4.8. Esboço esquemático de dispositivo utilizado por Darcy. Fonte: CABRAL (apud FEITOSA, 1997).

sendo:

$h_1$  - carga hidráulica do piezômetro 1 [L]  
 $h_2$  - carga hidráulica do piezômetro 2 [L]  
 $z_1$  - cota do ponto P1(piezômetro 1 [L]  
 $z_2$  - cota do ponto P2 (piezômetro 2) [L]  
 $Q$  - vazão constante que passa pelo cilindro [ $L^3T^{-1}$ ]  
 $A$  - área de seção transversal do cilindro [ $L^2$ ]  
 $\Delta h$  - variação da carga hidráulica entre os piezômetros 1 e 2 [L]  
 $L$  - distancia entre os piezômetros 1 e 2 [L]

A fórmula de Darcy pode ser descrita pela **Equação 4.2**:

$$Q = K A \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (4.2)$$

onde  $K$  = coeficiente de proporcionalidade, denominado de condutividade hidráulica.

Segundo os autores, a Lei de Darcy, conforme desenvolvida inicialmente, aplicava-se ao escoamento unidimensional, contudo ela pode ser generalizada para escoamento em mais de uma direção (escoamento tridimensional) como ocorre na prática com o fluxo de água subterrânea.

#### 4.6.2. Condutividade hidráulica

De acordo com FEITOSA (1997), o coeficiente de proporcionalidade  $K$  que aparece na lei de Darcy, pode ser chamado de condutividade hidráulica e leva em conta as características do meio, incluindo porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma das partículas, arranjo das partículas, bem como as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica).

Ainda segundo o autor, em um meio isotrópico, a condutividade hidráulica pode ser definida como a velocidade aparente por gradiente hidráulico unitário. Refere-se à facilidade da formação aquífera de exercer a função de um condutor hidráulico. A condutividade hidráulica pode ser definida como a velocidade aparente por gradiente hidráulico unitário. Refere-se à facilidade da formação aquífera de exercer a função de um condutor hidráulico. A condutividade hidráulica depende das características do meio poroso e das propriedades do fluido.

A condutividade hidráulica pode ser expressa em função dos parâmetros do meio e do fluido da seguinte **Equação 4.3** e está representada na **Figura 4.9**

$$K = \frac{k \rho g}{\mu} = \frac{k g}{\nu} \quad (4.3)$$

onde  $k$  - permeabilidade intrínseca do meio poroso [ $L^2$ ];

$\rho$  e  $\mu$  representam as características do fluido, massa específica e viscosidade absoluta, respectivamente.

Pode também ser utilizada a viscosidade cinemática  $\nu = \mu/\rho$  [ $L^2/T$ ]; e  $g$  a aceleração da gravidade [ $LT^{-2}$ ].

A permeabilidade intrínseca ( $k$ ), chamada por alguns autores de permeabilidade específica é função do tipo de material poroso, sua granulometria e sua disposição estrutural. A **Tabela 4.3** apresenta alguns exemplos de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para alguns tipos de sedimentos não consolidados.

Segundo FETTER (1994) e CABRAL (apud FEITOSA, 1997), um aquífero é considerado anisotrópico quando a condutividade hidráulica é diferente para cada uma das direções dos eixos coordenados. Um aquífero heterogêneo é formado por materiais de condutividade diferente. Apesar de muitas vezes considerar-se o aquífero como homogêneo e isotrópico devido à dificuldade de obtenção de dados mais precisos, na verdade, o mais comum é a anisotropia.

**Tabela 4.3. Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para vários materiais não consolidados.**

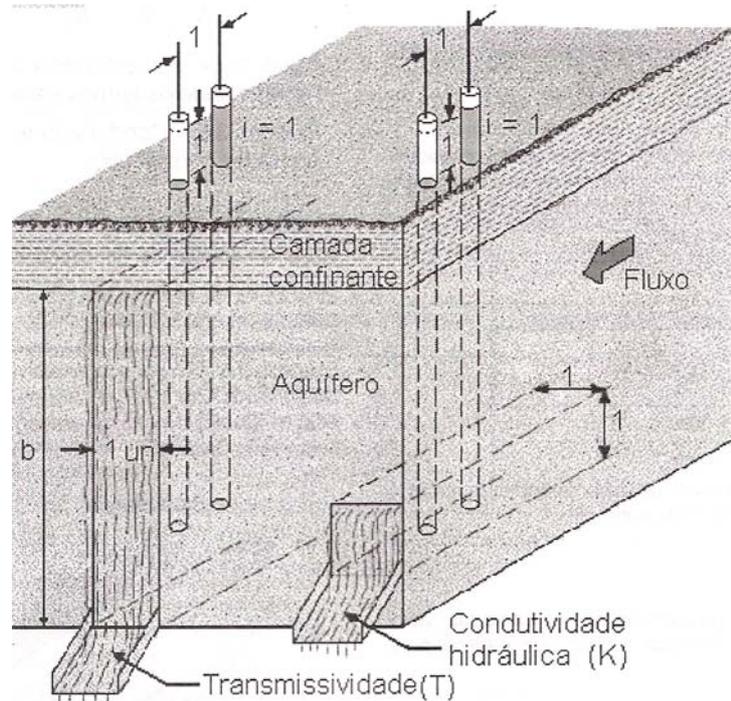
Material	Permeabilidade intrínseca ( $cm^2$ )	Condutividade Hidráulica ( $cm/s$ )
Argila	$10^{-14} - 10^{-11}$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Silte; Silte arenoso	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia argilosa	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia argilosa; areia fina	$10^{-10} - 10^{-8}$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Areia bem distribuída	$10^{-8} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-1}$
Cascalho bem distribuído	$10^{-7} - 10^{-5}$	$10^{-2} - 10^0$

Fonte: FETTER, 1994.

#### 4.6.3. Transmissividade

De acordo com CABRAL (apud FEITOSA, 1997) e FETTER (1997), a transmissividade corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. Pode-se conceituá-la como a taxa de escoamento de água a-

através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário de acordo com a **Figura 4.9**.



**Figura 4.9. Conceitos de condutividade hidráulica e transmissividade**

Fonte: Cabral (modificado de Driscoll, apud FEITOSA,1997)

O conceito de transmissividade é utilizado em estudos bidimensionais. Para aquíferos confinados a transmissividade é o produto da condutividade hidráulica ( $k$ ) pela espessura do aquífero ( $b$ ) e é dada pela **Equação 4.4**:

$$T = K b \quad (4.4)$$

onde  $b$  é a espessura do aquífero [L].

Para um aquífero com multicamadas, a transmissividade total é a soma da transmissividade de cada camada, **Equação 4.5**:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (4.5)$$

De acordo com FETTER (1997), o conceito de transmissividade assume que todo o fluxo que passa pelo aquífero é horizontal. Em alguns casos esta afirmação é válida, em outras não.

#### 4.6.4. Coeficiente de armazenamento

Para CABRAL (apud FEITOSA, 1997), a capacidade de um aquífero armazenar e transmitir água depende das propriedades da água (densidade, viscosidade e compressibilidade) e das propriedades do meio poroso (porosidade, permeabilidade intrínseca e compressibilidade). Estas propriedades são responsáveis por todo o comportamento do aquífero.

Ainda segundo o autor, o mecanismo de liberação de água nos aquíferos confinados é bem diferente dos casos de aquíferos livres. Nos aquíferos livres (não confinados) a água é liberada para poços ou fontes principalmente em função da drenagem dos poros. Os vazios passam a ser ocupados pelo ar e o nível freático fica mais baixo. Nos casos de aquíferos confinados, ao liberar água, os poros não são esvaziados. A pressão é maior que a pressão atmosférica e ao ser perfurado um poço para a extração da água do aquífero, ocorre gradativamente um alívio na pressão hidrostática e conseqüentemente o peso das camadas geológicas superiores passa a apoiar-se mais na estrutura do material poroso, provocando uma compactação do aquífero. Nestes casos, a água é liberada devido a dois fatores: um deles devido à expansão da água proporcionada pela redução da pressão e o outro devido à redução dos vazios do aquífero causada pelo aumento da pressão sobre a estrutura do meio poroso. O armazenamento específico pode ser calculado pela **Equação 4.6**:

$$S_s = \rho g (\alpha + \eta\beta) \quad (4.6)$$

onde  $\alpha$  é a compressibilidade do meio poroso e  $\beta$  a compressibilidade da água.

O coeficiente de armazenamento é um parâmetro adimensional definido pela **Equação 4.7**:

$$S = S_s b \quad (4.7)$$

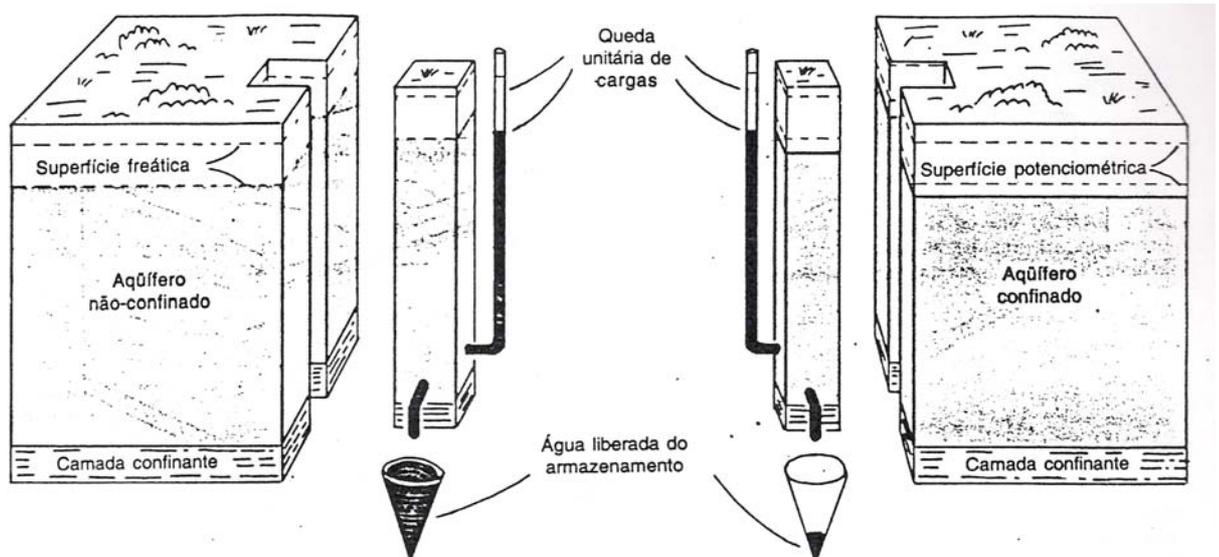
sendo  $b$  a espessura do aquífero [L].

Segundo HEATH (1983), as capacidades dos materiais receptores de água em armazenar e transmitir água são suas mais importantes propriedades hidráulicas. O coeficiente de

armazenamento  $S$  é definido como o volume de água que um aquífero libera ou toma em armazenamento por unidade de área superficial do aquífero por unidade de variação de carga. Como citado anteriormente o coeficiente de armazenamento é adimensional, como também definido na **Equação 4.8**:

$$S = \frac{\text{volume de água}}{(\text{volume de água})(\text{variação unitária da carga})} = \frac{(m^3)}{(m^3)(m)} = \frac{m^3}{m^3} \quad (4.8)$$

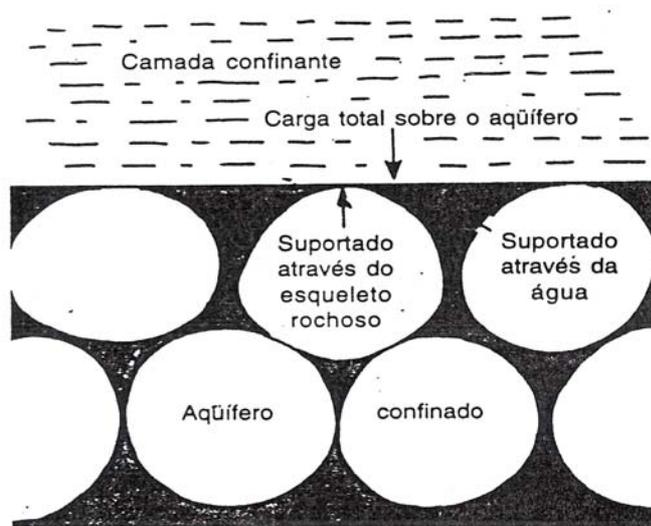
O valor do coeficiente de armazenamento depende se o aquífero é confinado ou não. Na **Figura 4.10** é representada a quantidade de água liberada por uma carga.



**Figura 4.10. Representação do Volume de água Liberada de Aquíferos. Fonte: Health, 1983.**

O valor do coeficiente de armazenamento depende se o aquífero é confinado ou não. Se o aquífero é confinado, a água liberada do armazenamento quando a carga declina vem da expansão da água e da compressão do aquífero. A **Figura 4.11** ajuda no entendimento deste fenômeno ao mostrar uma visão macroscópica do contato entre um aquífero e a camada confinante sobreposta. A carga total sobre o topo do aquífero é suportada parcialmente pelo esqueleto sólido do aquífero e parte pela pressão hidráulica exercida pela água no aquífero. Quando a pressão de água diminui, mais carga tem que ser suportada, pelo esqueleto sólido. Como resultado, as partículas de rocha são deformadas e o espaço poroso é reduzido. A água espremida dos poros quando seus volumes são reduzidos representa a parte do coeficiente de

armazenamento devido à compressão do aquífero. A expansão de um dado volume de água em resposta ao declínio da pressão é muito pequeno. O coeficiente de armazenamento da maioria dos aquíferos confinados varia entre  $10^{-5}$  a  $10^{-3}$ .



**Figura 4.11. Representação esquemática do contato entre um aquífero e a camada confinante sobreposta.**  
Fonte: Heath, 1983.

Se o aquífero é não confinado, a origem predominante da água é a drenagem gravitacional dos sedimentos por onde declina a superfície freática. Em um aquífero não confinado o volume derivado da expansão da água e compressão do aquífero é negligível. Assim, em tal aquífero, o coeficiente de armazenamento é virtualmente igual à produção específica e varia de 0,1 a 0,3.

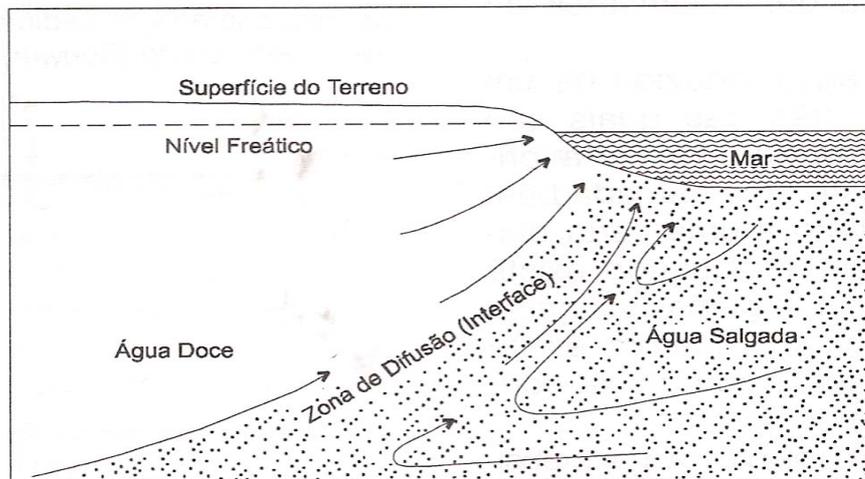
O rebaixamento de longo prazo de água em muitos aquíferos confinados resultou na drenagem da água tanto das camadas de argila dentro dos aquíferos como das camadas confinadas adjacentes. Esta drenagem aumenta a carga no esqueleto sólido do aquífero e resulta em sua compressão e na subsidência da superfície topográfica. Subsidência da superfície topográfica causada por drenagem das camadas argilosas correu no Arizona, Califórnia, Texas e outras áreas.

As diferenças em coeficientes de armazenamento de aquíferos não confinados e confinados são de grande importância na determinação da resposta dos aquíferos a tensões tais como rebaixamento no bombeamento de poços.

#### **4.6.5. Aquíferos em regiões costeiras**

Segundo CABRAL (apud FEITOSA, 1997), a maior parte das grandes cidades brasileiras localiza-se em regiões costeiras e nestes locais a exploração de água subterrânea deve ser feita com os devidos cuidados para evitar os problemas de intrusão marinha. A água salgada encontra-se em contato com água doce, como pode ser observado na **Figura 4.12**. Antes de

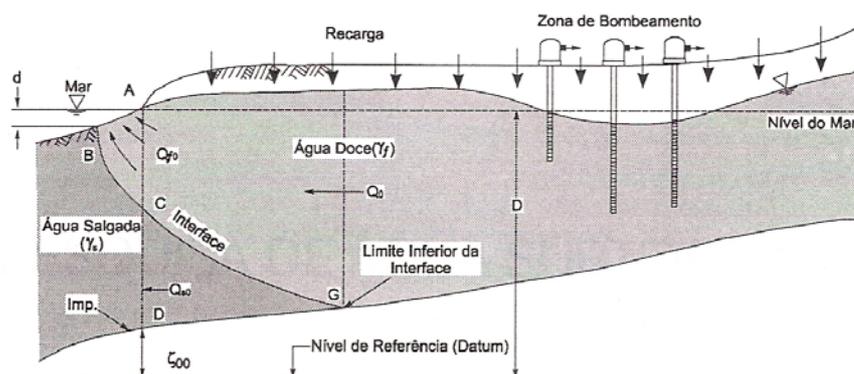
ser iniciada a exploração existe um equilíbrio dinâmico entre as duas regiões. A água salgada, devido a sua maior densidade, forma uma cunha penetrando pela parte inferior da região de água doce. A pressão de água doce e o contínuo escoamento para o mar conseguem manter a posição de cunha salina em equilíbrio. No entanto, quando é feita a exploração do aquífero em regiões costeiras, o bombeamento reduz a pressão de água doce e reduz a sua descarga para o mar. A cunha salina começa a avançar, podendo atingir poços e salinizar todo o aquífero, conforme **Figura 4.13**.



**Figura 4.12.** Aquífero em regiões costeiras.

Água doce, água salgada e cunha salina em equilíbrio hidrodinâmico

Fonte: CABRAL ((modificado de Cooper, apud FEITOSA, 1997).



**Figura 4.13.** Avanço da cunha salina devido a bombeamento excessivo.

Fonte: CABRAL (modificado de Bear, apud FEITOSA, 1997).

## CAPÍTULO 5. MODELOS MATEMÁTICOS PARA SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### 5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

CABRAL e DEMÉTRIO (apud FEITOSA, 1997), enfatizam de forma preliminar que os modelos, de um modo geral, são ferramentas de suma importância para o planejamento e previsões de situações reais. Segundo os autores, atualmente, modelos matemáticos computacionais são extremamente úteis para a realização de análises complexas dos aquíferos e expandir a capacidade do hidrogeólogo de entender e gerenciar os recursos hídricos subterrâneos. Os modelos podem ser classificados de acordo com as características da camada geológica onde a água está armazenada. Neste capítulo são apresentados os principais modelos que se aplicam a meios porosos; os conhecimentos físicos relevantes; os fundamentos hidráulicos e matemáticos; a escolha do método mais adequado ao problema em estudo; a análise dos erros em modelagem e um exemplo de modelo baseado em elementos finitos.

Segundo CIRILO e CABRAL (apud WENDLANDER, 2003), o desenvolvimento de modelos de simulação do movimento de águas subterrâneas tem sido justificado pelos vários objetos associados ao planejamento do uso dessa fonte. A previsão dos efeitos causados pela concentração de poços e vazões bombeadas constitui-se numa das mais importantes aplicações desses modelos.

DOOGE (apud WENDLANDER, 2003) conceituou os sistemas matemáticos como sendo:

*“Sistema é qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado tempo de referência inter-relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação”.*

De acordo com WENDLANDER (2003), modelo matemático é a reprodução idealizada de algumas ou todas as características físicas de um processo natural em escala adequada. WENDLANDER e RUBER (1998) consideram que modelo é o sistema que consegue reproduzir, pelo menos em parte, o comportamento de um processo natural.

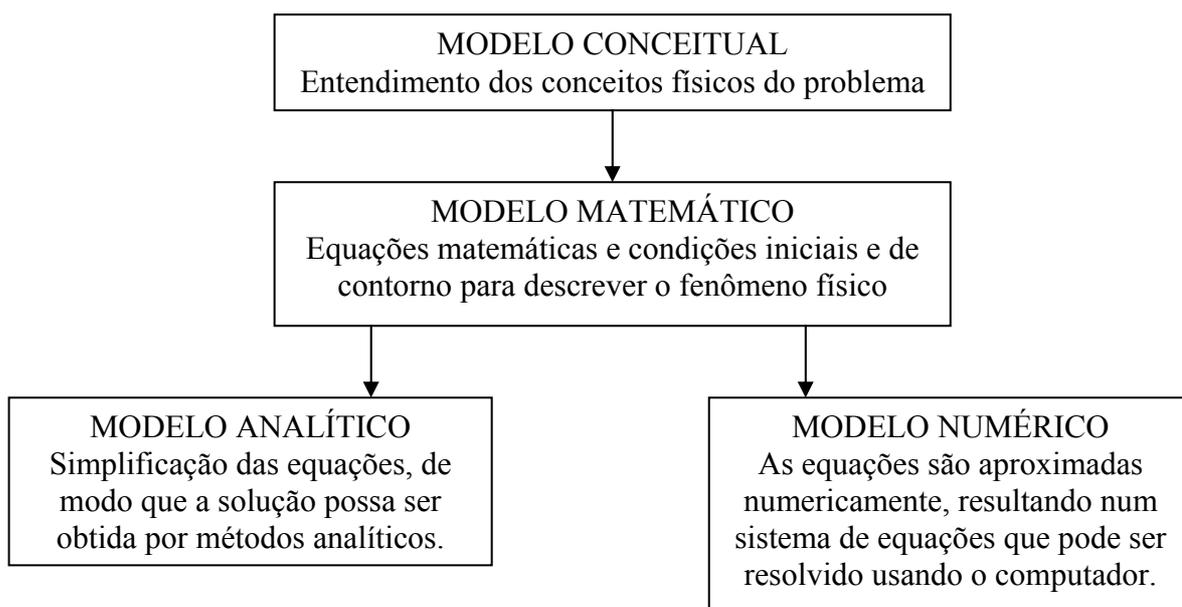
Já para TUCCI (apud WENDLANDER, 2003), trata-se de uma representação de algum objeto ou sistema em uma linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar respostas para diferentes estímulos.

Cabe salientar que o modelo por si só não é um objetivo, mas uma ferramenta para atingir um objetivo. Por exemplo, ele é utilizado para se antecipar aos eventos, representando o impacto da urbanização de uma bacia antes que ele ocorra, para que medidas preventivas pos-

sam ser tomadas, além de facilitar a previsão de uma enchente em tempo real, o impacto da alteração de um rio e a ocorrência de eventos extremos estatisticamente possíveis.

Segundo FETTER (1994), existem duas aplicações da hidrogeologia que podem se beneficiar de modelos de sistemas hidrogeológicos reais: entender o comportamento atual de um sistema de fluxo de água subterrânea e prever como um sistema de fluxo de água subterrânea poderá se comportar no futuro. Os modelos também podem ser usados para analisar uma situação hipotética de fluxo com o objetivo de aumentarmos o conhecimento de um sistema específico.

O termo modelo refere-se a qualquer representação de um sistema real. A modelagem de aquífero envolve diversas etapas em que a simulação computacional é apenas um dos passos, que deve ser realizado de acordo com uma seqüência envolvendo desde a definição dos objetivos até a apresentação dos resultados, conforme pode ser observado na **Figura 5.1**. CABRAL e DEMÉTRIO (apud FEITOSA, 1997).



**Figura 5.1. Modelos Matemáticos. Fonte: CABRAL (apud FEITOSA, 1997).**

De acordo com WENDLANDER (2003) um sistema pode ser classificado segundo vários critérios, tais como conceitual e empírico; estocástico e determinístico. Um modelo é encarado como conceitual, quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. Existem também os modelos intitulados empíricos, nos quais se ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos. Já os estocásticos se caracterizam segundo

CHOW (apud WENDLANDER, 2003), onde a chance de ocorrência das variáveis for levada em conta e o conceito de probabilidade for introduzido na formulação do modelo.

Segundo CABRAL e DEMÉTRIO (apud FEITOSA, 1997), os modelos matemáticos podem ser classificados de acordo com as seguintes características:

- quanto à variação no tempo:
  - permanente - as características não variam ao longo do tempo;
  - transiente - as cargas hidráulicas variam ao longo do tempo.
  
- quanto às probabilidades de ocorrência:
  - determinístico - considera que os eventos não dependem da teoria das probabilidades;
  - estocástico - atribui uma probabilidade de ocorrência a cada evento.
  
- quanto às equações:
  - lineares
  - não lineares.

Adicionalmente, os modelos matemáticos podem ser divididos em duas categorias de solução, analíticas e numéricas.

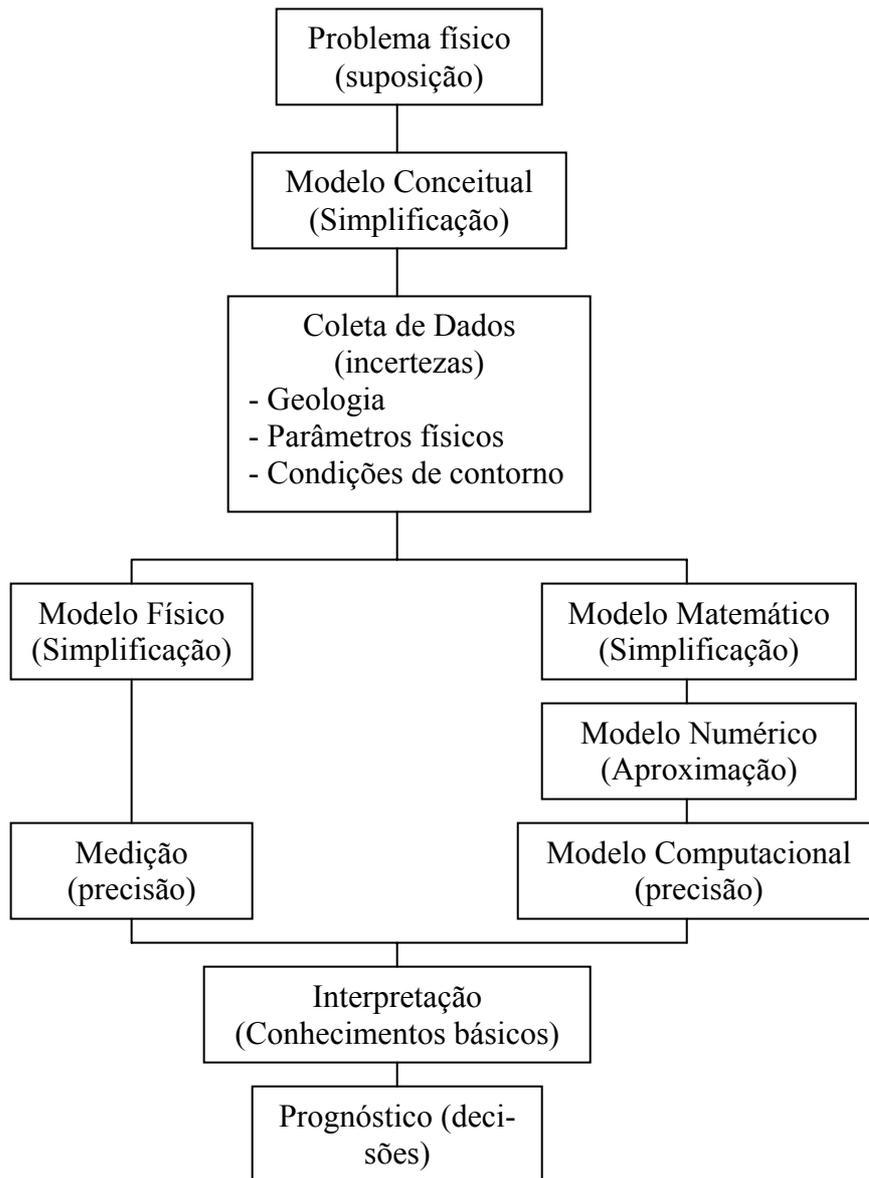
- *soluções analíticas* – normalmente são obtidos em problemas de geometria simples, parâmetros homogêneos e relações lineares. Nelas são empregadas diferentes técnicas matemáticas, tais como a separação de variáveis, a função de Green, a Teoria da perturbação e a transformada de Laplace e Fourier;
  
- *soluções numéricas* - podem ser obtidas para problemas gerais, menos dependentes da complexidade geométrica, dos parâmetros físicos e das relações constitutivas. Nelas são empregadas técnicas numéricas, tais como o método de diferenças finitas (MDF), o método de elementos finitos (MEF), o método de volumes finitos (MVF) e o método de elementos de contorno (MEC).

Segundo WENDLANDER (2003), durante o planejamento do modelo é de suma importância que sejam consideradas algumas questões, tais como: *qual é o problema; qual é o objetivo e quais respostas se necessita; se for necessário um modelo para se resolver o problema; quais são os dados disponíveis conhecidos; é possível verificar os resultados do modelo através de medições e quais os processos que devem ser considerados*. De acordo com o autor deve-se considerar como processos o escoamento do fluido; o transporte de calor; o transporte de gás; o escoamento multifásico e o transporte de vários componentes com reações químicas.

Observa-se assim que existem algumas limitações relacionadas a um modelo. Portanto, após a decisão sobre a utilização de um modelo, deve-se considerar que em todos os modelos sempre existem vantagens e desvantagens, além de se ter consciência de que o modelo é somente uma ferramenta para apoiar decisões. Estas só podem ser tomadas quando existe a familiaridade necessária com os conceitos, as técnicas, os empregos e as limitações da modelagem.

Deve-se, no entanto, ter em mente que nenhum modelo é capaz de descrever exatamente os processos naturais por causa das suas complexidades, da falta de conhecimento dos parâmetros requeridos e das simplificações e generalizações que são introduzidas.

WENDLANDER (2003) enfatiza que na modelagem de um problema físico são importantes diferentes etapas com as respectivas definições. Como podemos observar na **Figura 5.2**, várias etapas são necessárias para a elaboração de um modelo para investigação de um processo natural.

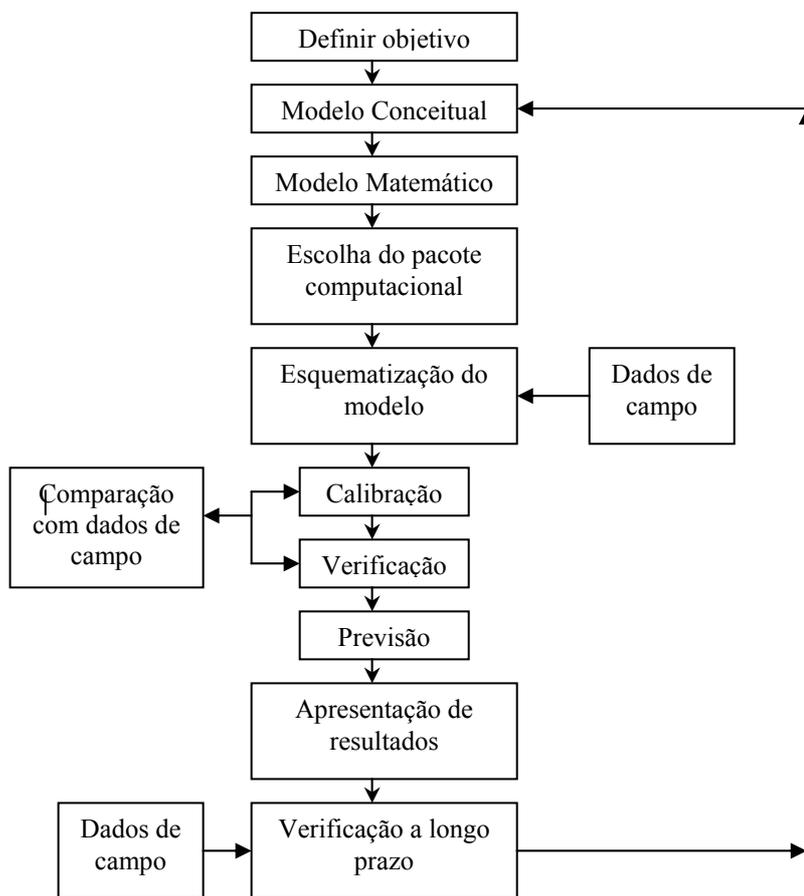


**Figura 5.2. Etapas da modelação. Fonte: WENDLANDER (2003).**

No item problema físico (suposições) são definidas as questões relevantes e é feita uma suposição do processo natural estudado. Já no modelo conceitual (simplificações) são definidas as principais relações causa-consequência e é realizada uma descrição qualitativa do comportamento do sistema natural, através da qual podem ser feitas simplificações. No modelo matemático (simplificações) é realizada a descrição do processo físico através de relações matemáticas, tendo em vista a conservação de massa e energia. Assim são ignorados ou simplificados alguns fenômenos físicos. Além disso, é feita a definição das condições iniciais e de fronteira e, dentro do possível, pode-se resolver o problema analiticamente. No modelo numérico (aproximações) é feita uma descrição aproximada da expressão matemática diferencial, salientando-se que sendo a formulação diferencial aproximada por uma formulação algébrica, ela determina as variáveis (carga hidráulica, por exemplo) em pontos discretos do mo-

delo. O modelo computacional (erros de arredondamento) é a tradução do modelo numérico em linguagem computacional e traz a resolução do sistema com diferentes técnicas matriciais que repercutem em um resultado. Na fase da interpretação (conhecimentos físicos), as grandezas calculadas são interpretadas com base em conhecimentos físicos específicos; existe uma comparação de resultados numéricos com valores medidos; há um ajuste devido ao fato de que os valores de parâmetros físicos não serem números absolutos, mas indicados como intervalo de valores; ocorre a validação do modelo, de preferência frente a uma série de medidas de um período em condições variadas. No item Prognóstico (decisões) é feita uma adaptação do modelo a determinadas perguntas, além de tomada de decisões econômicas baseadas em cálculos e uma análise sensitiva.

CABRAL e DEMÉTRIO (apud FEITOSA, 1997) abordam as etapas da modelagem de uma forma um pouco diferenciada, como pode ser observado na **Figura 5.3**.



**Figura 5.3. Etapas da Modelagem. Fonte: Adaptado de ANDERSON & WOESSNER (apud FEITOSA, 1997).**

Para CABRAL e DEMÉTRIO (apud FEITOSA, 1997), a modelagem de aquífero envolve diversas etapas em que a simulação computacional é apenas um dos passos, que devem ser realizados de acordo com uma seqüência envolvendo desde a definição dos objetivos até a apresentação dos resultados.

Segundo os autores, através do modelo conceitual procura-se estabelecer a geometria do sistema com suas camadas geológicas, seus contornos, suas interconexões hidráulicas, suas recargas e bombeamentos. O passo seguinte é a formulação matemática do problema a ser analisado e a escolha do pacote computacional. Na esquematização do modelo são incluídas as atividades de escolha da discretização do problema, da seleção do intervalo de tempo de simulação, da seleção inicial de tempo de simulação (*time-step*), do estabelecimento das condições de contorno, da seleção inicial dos parâmetros do aquífero e da verificação das recargas e bombeamentos. A fase de ajuste dos parâmetros do modelo para reproduzir as cargas hidráulicas e fluxos medidos no campo é denominada de calibração e verificação. A previsão fornece a resposta que se precisa para entender o funcionamento do sistema aquífero submetido a futuros bombeamentos e recargas. A verificação a longo prazo denota a necessidade da modelagem não parar com a entrega dos resultados. É necessário que haja uma continuidade no monitoramento dos aquíferos, além da repetição das simulações de forma sistemática.

## 5.2. MODELO CONCEITUAL DE AQUÍFERO

De acordo com CABRAL E DEMÉTRIO (APUD FEITOSA, 1997), o objetivo do modelo conceitual é simplificar as informações de campo para permitir a implementação do modelo computacional. Busca-se, dessa forma, conciliar a representação da realidade hidrogeológica da forma mais fiel possível com algumas simplificações que facilitem a aplicação do modelo numérico.

Assim, na elaboração do modelo conceitual, deve ser observada a identificação dos sistemas aquíferos; a identificação das fronteiras do modelo; a identificação das condições de contorno; o levantamento dos valores dos parâmetros hidrogeológicos e o levantamento das entradas e saídas hídricas (recargas e bombeamentos).

Quando se elabora um modelo conceitual, é de suma importância levantar algumas informações sobre geometria, variáveis externas, variáveis de estado, parâmetros e constantes. Através do **Quadro 1** verifica-se como se obtém informações sobre o meio físico.

Segundo CABRAL E DEMÉTRIO (APUD FEITOSA, 1997), os modelos conceituais podem ser classificados como modelo tridimensional, modelo bidimensional horizontal, modelo bidimensional vertical e modelo quasi-tridimensional.

**Quadro 1. Informações do meio físico.**

- Mapa geológico e seções verticais mostrando a espessura da área e contornos do sistema;
- Mapa topográfico mostrando os corpos d'água superficial e os divisores d'água;
- Mapas de contorno mostrando a elevação de base dos aquíferos e camadas confinantes;
- Mapas geológicos mostrando a espessura dos aquíferos e camadas confinantes;
- Mapas mostrando a extensão e espessura dos sedimentos de lagos e de rios.

**Fonte: Adaptado de MOORE, 1979 (apud FEITOSA, 1997).**

**Quadro 2. Informações do meio hidrogeológico.**

- Nível freático e mapas potenciométricos para todos os aquíferos;
- Hidrogramas de carga de água subterrânea e níveis de água superficial e taxa de descarga;
- Mapas e seções verticais mostrando as propriedades de armazenamento dos aquíferos e camadas confinantes;
- Mapas e seções verticais mostrando a condutividade hidráulica e/ou distribuição de transmissividade;
- Valores de condutividade hidráulica e sua distribuição para leitos de sedimentos de lagos e rios;
- Distribuição espacial e temporal de taxas de evapotranspiração, recarga de água subterrânea, superfície de interação de água superficial – água subterrânea, taxa de bombeamento de água subterrânea.

**Fonte: Adaptado de MOORE, 1979 (apud FEITOSA, 1997).**

O modelo conceitual pode ser tridimensional quando os componentes de fluxo vertical são importantes e torna-se necessário levá-los em consideração na modelagem. Tais modelos são mais trabalhosos de serem aplicados e necessitam computadores com mais capacidade de memória e maior velocidade de processamento. Os modelos bidimensionais horizontais têm sido os mais utilizados. Tais modelos podem ser aplicados para os seguintes tipos de aquíferos:

- confinado: quando o topo e a base do aquífero são impermeáveis;

- semiconfinado: quando o topo e/ou a base do aquífero é formada por camadas semipermeáveis que permitem conexão hidráulica com os aquíferos adjacentes;
- não-confinado: quando não existe camada confinante superior e o nível da camada saturada varia de acordo com as recargas e descargas;
- misto: quando o aquífero é formado pela combinação de alguns dos três tipos anteriormente citados.

O modelo bidimensional vertical é verificado quando as características físicas e hidrogeológicas são constantes ao longo de uma direção. Já os modelos do tipo quase-tridimensional simulam uma seqüência de aquíferos superpostos com intercalações de outras camadas semipermeáveis.

Segundo FETTER (1994) para se transformar um modelo conceitual em modelos matemáticos ou análogos é necessário um banco de dados que possa fornecer informações adequadas a serem aplicadas nas equações utilizadas. Deve ser observado que para cada tipo de aquífero, pode ser necessária a utilização de diferentes informações.

No caso da modelagem de fluxo de água subterrânea, é necessário o conhecimento da configuração física do aquífero incluindo sua localização, sua real extensão, a espessuras de todas as camadas contínuas e confinadas; a localização da superfície da água; as fronteiras dos aquíferos. O conhecimento das propriedades hidráulicas incluem a variação da transmissividade, permeabilidade, coeficiente específico de armazenamento e a superfície do aquífero. A energia hidráulica, como indicada pelos lençóis freáticos, e as recargas também são importantes. Para cada caso podem ser necessárias novas informações.

### **5.3. MODELOS MATEMÁTICOS DE FLUXO**

De acordo com WENDLANDER (2003) a equação diferencial que descreve o movimento da água subterrânea é obtida pela combinação da equação da continuidade com a lei de Darcy para meios porosos, que nada mais é do que uma forma da equação da quantidade de movimento para o escoamento laminar. No desenvolvimento da equação básica do fluxo subterrâneo será admitido que as forças de capilaridade são pequenas, e, portanto desprezíveis, e que a força viscosa é proporcional à velocidade do fluxo, de modo a considerar o regime como laminar.

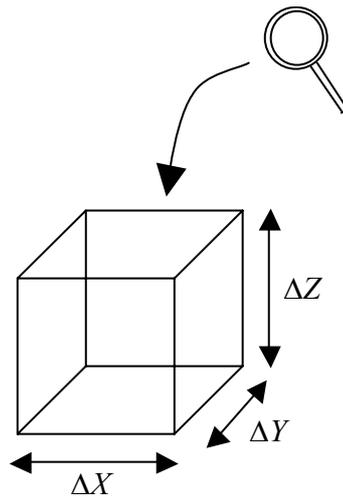
### 5.3.1. Equação diferencial da continuidade

WENDLANDER (2003) afirma que o procedimento de construção da equação de continuidade pode ser iniciado através de uma interpretação física do problema, para em seguida proceder-se à descrição matemática dos fenômenos.

Conforme pode ser verificado na **Figura 5.4**, qualquer processo físico da natureza pode ser descrito matematicamente através de um balanço de volume (fluidos incompressíveis) ou de massa (fluidos compressíveis) em um volume de controle infinitesimal.

Dado o volume de controle elementar ( $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ ), apresentado na **Figura 5.4**, o balanço de massa é definido para fisicamente como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Variação da massa} \\ \text{no volume de controle} \\ \text{no tempo} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo de massa} \\ \text{através da superfície} \\ \text{do volume controle} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Ganho (injeção) ou} \\ \text{perda (produção)} \\ \text{de massa no volume de controle} \end{array} \right\}$$



**Figura 5.4.** Volume de controle para formulação da equação da continuidade. Fonte: WENDLANDER, 2003.

$$\text{Acumulação} = \text{Fluxo} + \text{Fonte}$$

Em termos de acumulação, fluxo e fonte podem ser expressos matematicamente.

$$\text{Acumulação: } \left\{ \begin{array}{l} \text{Variação de massa} \\ \text{no volume de controle no tempo} \end{array} \right\} = \frac{\partial m}{\partial t}$$

Sendo  $t$ , o tempo e  $m$ , a massa de fluido no volume de controle definida como o produto da massa específica ( $\rho$ ) pelo volume de fluido ( $V_f$ ).

$$m = \rho V_f \quad \text{e} \quad V_f = \phi \Delta V \quad (5.1)$$

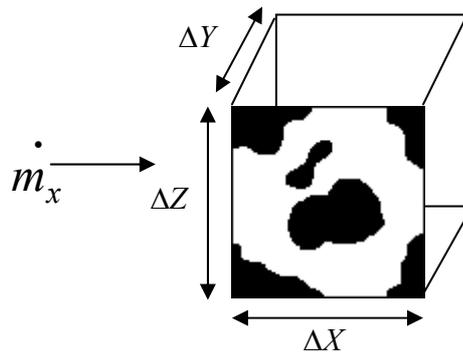
onde  $\phi$  é a porosidade do aquífero.

A formulação final do termo de acumulação resulta em:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Variação de massa} \\ \text{no volume de controle no tempo} \end{array} \right\} = \frac{\partial(\phi \rho)}{\partial t} \Delta V \quad (5.2)$$

Como pode ser verificado na **Figura 5.5**, o fluxo de massa através da superfície do volume de controle, será igual ao produto da massa específica ( $\rho$ ) pelo fluxo volumétrico ( $q_x$ ) através da seção transversal ( $A_x$ ):

$$\dot{m}_x = \rho q_x A_x = \rho q_x \Delta y \Delta z \quad (5.3)$$



**Figura 5.5.** Esquema do fluxo de massa através da superfície do volume de controle.  
Fonte: WENDLANDER, 2003.

A **Figura 5.6** demonstra o esquema de fluxo de massa nas direções x e y, visto que o fluxo em qualquer direção pode sofrer variações dentro do volume de controle.

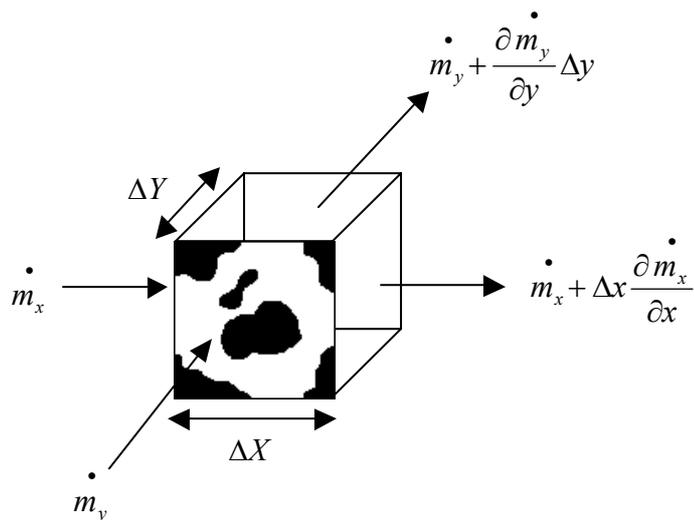


Figura 5.6. Esquema de fluxo de massa nas direções  $x$  e  $y$ . Fonte: WENDLANDER, 2003.

O balanço de fluxo de massa em cada direção é expresso por:

	Entra (+)	Sai (-)	Fluxo total
Direção $x$	$\dot{m}_x$	$-\left(\dot{m}_x + \frac{\partial \dot{m}_x}{\partial x} \Delta x\right)$	$= -\frac{\partial \dot{m}_x}{\partial x} \Delta x$
Direção $y$	$\dot{m}_y$	$-\left(\dot{m}_y + \frac{\partial \dot{m}_y}{\partial y} \Delta y\right)$	$= -\frac{\partial \dot{m}_y}{\partial y} \Delta y$
Direção $z$	$\dot{m}_z$	$-\left(\dot{m}_z + \frac{\partial \dot{m}_z}{\partial z} \Delta z\right)$	$= -\frac{\partial \dot{m}_z}{\partial z} \Delta z$

Assim, o fluxo de massa resultante através do volume de controle pode ser definido como, (Figura 5.7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo de massa} \\ \text{através da superfície} \\ \text{no volume de controle} \end{array} \right\} = -\left( \frac{\partial \dot{m}_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial \dot{m}_y}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial \dot{m}_z}{\partial z} \Delta z \right) \quad (5.4)$$

ou

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo de massa} \\ \text{através da superfície} \\ \text{do volume de controle} \end{array} \right\} = -\left( \frac{\partial \rho q_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial \rho q_y}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial \rho q_z}{\partial z} \Delta z \right) \quad (5.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ganho (injeção) ou} \\ \text{perda (produção)} \\ \text{de massa no volume de controle} \end{array} \right\} = \frac{\partial m}{\partial t} \quad (5.6)$$

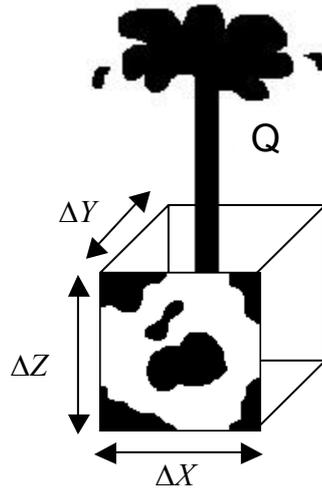


Figura 5.7. Perda de massa no volume do controle. Fonte: WENDLANDER, 2003.

Sendo  $Q$ , a taxa de ganho ou perda volumétrica por unidade de volume do volume de controle, a variação de massa no volume de controle pode ser definida como:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \rho Q \Delta V \quad (5.7)$$

A formulação final do termo de fonte resulta em:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ganho (injeção) ou} \\ \text{perda (produção)} \\ \text{de massa no volume de controle} \end{array} \right\} = \rho Q \Delta V \quad (5.8)$$

O balanço de massa pode finalmente ser escrito matematicamente como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Variação da massa} \\ \text{no volume de controle} \\ \text{no tempo} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo de massa} \\ \text{através da superfície} \\ \text{do volume de controle} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Ganho (injeção) ou} \\ \text{perda (produção)} \\ \text{de massa no volume de controle} \end{array} \right\}$$

*Acumulação = Fluxo + Fonte*

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} \Delta V = - \left( \frac{\partial \rho q_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho q_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho q_z}{\partial z} \right) \Delta V + \rho Q \Delta V \quad (5.9)$$

ou

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{q}) + \rho Q \quad (5.10)$$

Substituindo a definição para o fluxo de água subterrânea, expresso pela Lei de Darcy:

$$\vec{q} = -\vec{K} \cdot \nabla h \quad (5.11)$$

onde

$h$  : carga hidráulica

$\vec{K}$  : tensor de condutividade hidráulica

na equação da continuidade, obtém-se a equação da difusividade.

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \vec{K} \cdot \nabla h) + \rho Q \quad (5.12)$$

### **Simplificações**

A equação geral é válida para fluidos compressíveis, podendo ser simplificada para fluidos incompressíveis através da adoção de uma massa específica constante ( $\rho = \text{cte.}$ ).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (\vec{K} \cdot \nabla h) + Q \quad (5.13)$$

No caso de  $Q = 0$  (ausência de perdas ou ganhos no volume de controle), a equação é simplificada para:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (\vec{K} \cdot \nabla h) \quad (5.14)$$

Em aquíferos homogêneos e isotrópicos a condutividade hidráulica é expressa por um escalar ( $\vec{K} = K \vec{I}$ ). Nesse caso

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = K \nabla^2 h \quad (5.15)$$

Em regime permanente de escoamento, não há variação de carga hidráulica ao longo do tempo e a equação da continuidade resulta na Equação de Laplace:

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (5.16)$$

### **Equação geral do fluxo subterrâneo**

Segundo CABRAL E DEMÉTRIO (APUD FEITOSA, 1997), a conjugação da equação da continuidade (conservação de massa) com a lei de Darcy na forma tridimensional conduz a equação diferencial geral que governa o fluxo subterrâneo nos meios porosos, a qual é expressa como a equação geral do fluxo subterrâneo.

$$S_e \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial(K_{xx} \partial h)}{\partial x^2} + \frac{\partial(K_{yy} \partial h)}{\partial y^2} + \frac{\partial(K_{zz} \partial h)}{\partial z^2} \quad (5.17)$$

onde:

- K = condutividade hidráulica (LT<sup>-1</sup>)
- h = carga hidráulica (L)
- t = tempo (T)
- S<sub>e</sub> = coeficiente de armazenamento específico = (ρg (α + β φ)) (L<sup>-1</sup>)
- ρ = massa específica da água (ML<sup>-3</sup>)
- g = aceleração da gravidade (LT<sup>-2</sup>)
- α = compressibilidade da água (T<sup>2</sup> L M<sup>-1</sup>)
- φ = porosidade
- β = compressibilidade do meio poroso (T<sup>2</sup> L M<sup>-1</sup>)

Esta equação é uma simplificação da equação da difusividade, para o caso de Q=0, e para um aquífero ortotrópico, ou seja:

$$\bar{\bar{K}} = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & K_{xx} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Adicionalmente, considera-se que a porosidade da equação da difusividade está relacionada com a carga hidráulica por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = S_e \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.19)$$

### 5.3.2. Condições de contorno

De acordo com CUMINATO & MENEGUETE JÚNIOR (apud WENDLANDER, 2003), as equações diferenciais parciais (EDP), têm uma família de soluções possíveis. Porém, como esta equação representa um modelo físico, é necessário adicionar condições auxiliares de modo a caracterizar melhor a situação modelada. Essas condições são denominadas, dependendo do problema, de condições iniciais e de fronteira. Se as condições auxiliares forem prescritas em excesso, pode haver incompatibilidade entre elas e o problema não terá solução. Se forem insuficientes, o problema será indefinido, podendo ter infinitas soluções.

Pode-se distinguir na natureza dois tipos básicos de fenômenos físicos: os que evoluem com o tempo (transientes) e os que estão em um estado de equilíbrio. Os problemas de equilíbrio são aqueles nos quais a propriedade de interesse não se altera com o passar do tempo. Matematicamente, esses problemas são, em geral, representados por equações diferenciais parciais elípticas, cujas equações modelo são a de Laplace e a de Poisson. Já os problemas transientes, ou de propagação, envolvem a variação temporal das grandezas físicas de interesse. Quando se resolve um problema transiente, busca-se a evolução temporal da grandeza física. Para que essa evolução seja representativa do problema estudado, necessário se faz que a solução inicial seja fisicamente correta. Qualquer outra condição inicial poderá produzir, a princípio, um resultado diferente, não representativo do escoamento que se quer simular.

No caso de problemas de escoamento de água subterrânea, além das condições de contorno do meio, será necessário conhecer as condições iniciais do aquífero.

## **5.4. MÉTODOS NUMÉRICOS**

Devido à sua própria natureza e variáveis ambientais envolvidas, a grande maioria dos problemas de escoamento subterrâneo não possui tratamento analítico adequado. Na prática, devido às geometrias e condições de contorno a que os problemas estão submetidos, mesmo para aqueles casos onde as equações diferenciais que descrevem o fenômeno já se encontram bastante simplificadas. Assim, o uso de modelos numéricos passa a ser fundamental para os principais problemas a serem estudados. Entre os principais métodos estão: método das diferenças finitas (MDF); método de elementos de contorno (MEC) e métodos dos elementos finitos (MEF).

### **5.4.1. Método das diferenças finitas**

De acordo com CABRAL E DEMÉTRIO (APUD FEITOSA, 1997), entre os métodos numéricos mais usados atualmente para a resolução de equações diferenciais, o método das diferenças finitas é o mais antigo, o mais divulgado e provavelmente o mais bem entendido pelos geólogos e engenheiros em geral. Cabe salientar que os modelos numéricos só possuem as funções definidas para determinados pontos do modelo e a escolha dos pontos é feita aleatoriamente, tanto em posição como em quantidade.

Para WENDLANDER (2003), no método de diferenças finitas, as derivadas existentes na equação diferencial de governo são aproximadas utilizando-se uma expansão truncada da série de Taylor. O autor salienta ainda que a vantagem na utilização de esquemas envolvendo o método de diferenças finitas consiste em tais esquemas serem comparativamente econômicos, em relação a outros métodos numéricos, para a montagem do sistema linear de equações algébricas resultante, devido à simplicidade das operações envolvidas.

### **5.4.2. Método de elementos de contorno**

Segundo WENDLANDER (2003), o MEC foi desenvolvido como sendo uma alternativa possível a algumas das dificuldades e problemas associados aos demais métodos numéricos. Este método requer a discretização apenas do contorno do domínio físico do problema, reduzindo assim enormemente o volume de dados necessários para a modelagem de um determinado problema.

O autor salienta que enquanto o MDF envolve apenas aproximações realizadas sobre a equação diferencial governante do problema na forma dimensional, tanto o método de ele-

mentos finitos quanto o método de elementos de contorno envolvem o cálculo de integrais realizadas ao longo de seus respectivos elementos.

Para a resolução do sistema de equações algébricas resultantes da aplicação e, por conseguinte, a obtenção da solução do problema, aplica-se as condições de contorno associadas a cada ponto nodal. Como neste método a discretização é feita somente utilizando-se do contorno do domínio físico do problema, a dimensão do problema se reduz de uma unidade. Isto, em termos práticos, implica em uma redução considerável da quantidade de dados necessária à definição da malha a ser utilizada e do esforço computacional, já que o sistema de equações, apesar de ser formado por matrizes cheias e não simétricas, é geralmente de dimensão muito menor que as matrizes que seriam produzidas por outros métodos numéricos.

### **5.4.3. Método de elementos finitos (MEF)**

Segundo FETTER (1997) o MEF vem sendo usado, nos últimos anos, em diversas áreas de desenvolvimento tecnológico. Em termos de água subterrânea este método vem se desenvolvendo e apesar de ser mais trabalhoso para implantação, ele apresenta as seguintes vantagens:

- flexibilidade para modelar contornos irregulares
- capacidade de representar meios heterogêneos e anisotrópicos.

WENDLANDER (2003) afirma que o método numérico mais amplamente utilizado atualmente na engenharia é o MEF. Este método apresenta pouca penetração junto às aplicações da geofísica para a simulação da propagação de ondas. Neste método numérico, para a discretização do domínio físico do problema é utilizada uma série de elementos dispostos sobre o domínio cuja forma independe da equação diferencial do problema. Tais elementos são compostos por pontos nodais sobre os quais é equacionado o sistema de equações algébricas resultantes.

Os denominados elementos finitos são pequenas porções do domínio físico do problema, onde a variação das incógnitas do problema no interior de tais elementos é aproximada através da aplicação das chamadas funções de interpolação. Estabelece-se, então, uma sentença de resíduos ponderados, a fim de proporcionar uma distribuição do erro envolvido em tal aproximação ao longo de todos os elementos finitos que compõem o domínio físico do problema, através do uso de funções auxiliares ou de ponderação, que compõem o núcleo das integrais.

Outra forma de interpretação para este processo de minimização do erro pode ser dada como sendo a obtenção do mínimo energético associado a um funcional.

O MEF foi inicialmente utilizado em aplicações relacionadas à aeronáutica, engenharia estrutural e mecânica dos sólidos, mas atualmente apresenta-se altamente difundido nos diversos ramos da engenharia. Possui o intuito de melhor representar problemas possuindo domínios físicos contendo uma geometria intrincada e de forma a simplificar as aplicações das condições de contorno associadas, eliminando assim algumas das dificuldades do MDF.

A implementação computacional do MEF consiste na montagem de sub-matrizes que computam as propriedades de cada elemento, através de coeficientes de influência, para então se formar o sistema de equações algébricas associado ao domínio físico do problema, isto é, ao conjunto de elementos utilizados para a discretização. A aplicação das condições de contorno processa-se de maneira simples, e tem-se a possibilidade da representação de problemas com domínios possuindo uma geometria intrincada. Tais características fazem deste método uma ferramenta numérica muito mais versátil, na maioria das aplicações, quando comparada ao MDF.

As desvantagens do MEF consistem da dificuldade de modelar meios infinitos e na grande entrada de dados necessária para a discretização de todo o domínio físico do problema. Este fato torna-se ainda mais relevante em problemas tridimensionais. Além disso, em algumas situações o método apresenta resultados imprecisos, embora apresente convergência com o aumento do grau de refinamento utilizado na discretização. O fato de o MEF apresentar resultados imprecisos ocorre, principalmente, para os casos onde as incógnitas apresentam descontinuidades, singularidades ou uma elevada taxa de variação. Têm-se também dificuldades para modelar problemas com fronteira móvel.

A implementação baseada em elementos finitos pode ser feita com vários tipos de elementos, em cujos nós são computados os valores com base em funções de interpolação, como pode ser verificado na **Figura 5.8**. O uso de funções de interpolação para definir o potencial através do interior do domínio é um conceito importante que distingue o MEF do MDF.

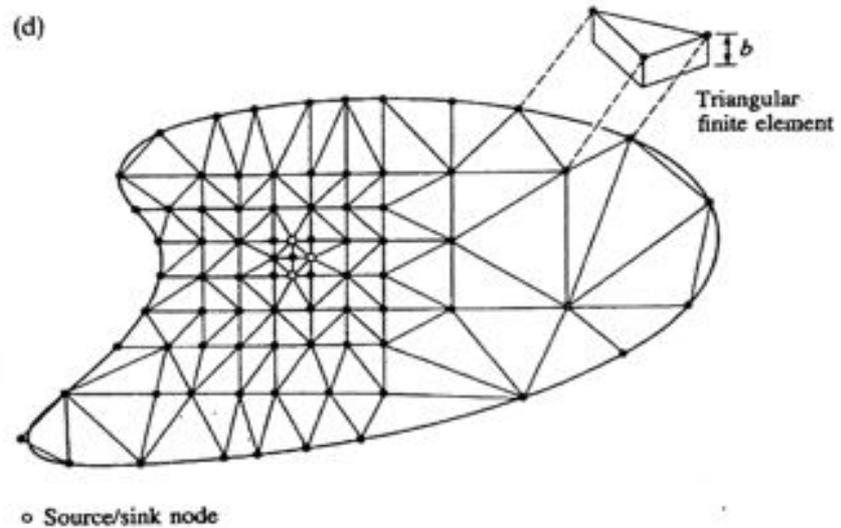


Figura 5.8. Malha de elementos finitos com elementos triangulares. Fonte: WENDLANDER, 2003.

#### 5.4.4. Exemplos de aplicação de elementos finitos em aquíferos

De acordo com RIBEIRO (2004), adaptado pelo autor, problemas de carga hidráulica no aquífero obedecem às equações de Darcy (item 5.2.1) com as condições de contorno definidas anteriormente. O fluxo de água subterrânea, descrito pelo campo vetorial  $\vec{q}(x,y)=(q_x,q_y)$ , é dado pelo produto da condutividade hidráulica  $K$  pelo gradiente da carga hidráulica  $h(x,y)$ :

$$\vec{q} = -K \nabla h \quad (5.20)$$

Sendo  $Q(x,y)$  a fonte ou sumidouro da quantidade envolvida, o balanço de fluxos em duas dimensões resulta na igualdade:

$$\nabla \cdot b \vec{q} = Q(x,y) \quad (5.21)$$

onde  $b$ : espessura do aquífero.

Substituindo (5.20) na expressão acima se obtém a equação de Poisson (ou simplesmente equação de difusão):

$$\nabla \cdot (b K \nabla h) + Q = 0 \quad (5.22)$$

que deve ser satisfeita em todo o domínio.

Nesta seção iremos demonstrar uma aplicação de métodos de elementos finitos na solução da equação geral do fluxo subterrâneo, considerando a espessura do aquífero ( $b$ ) constante.

### Formulação clássica .

A equação do fluxo subterrâneo, para um meio isotrópico, pode ser enunciada na formulação clássica da seguinte maneira. Dados  $K(x,y)$ ,  $Q(x,y)$ ,  $\bar{h}$  e  $\bar{q}$ , determinar a carga hidráulica  $h(x,y)$  tal que:

$$\nabla \cdot (b K \nabla h) + Q = 0 \quad (5.23)$$

onde:

$$Q = -b S e \frac{dh}{dt} \quad (5.24)$$

A equação diferencial acima está sujeita as condições de contorno a seguir:

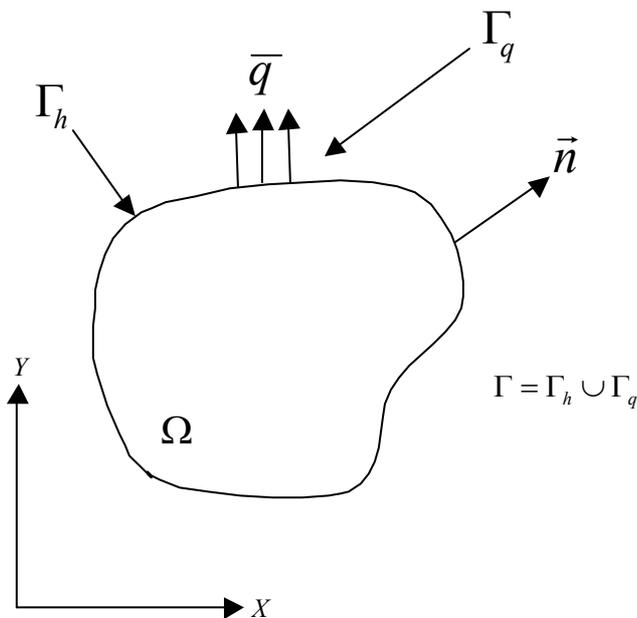
Para completar a definição do problema, é necessário especificar condições de contorno e iniciais. Considere o domínio  $\Omega$ , demonstrado na figura 5.9, limitado por  $\Gamma$ . O contorno  $\Gamma$  é constituído por duas partes. Na primeira,  $\Gamma_h$ , o valor da carga hidráulica é conhecido, portanto:

$$h = \bar{h} \quad \text{em} \quad \Gamma_h \quad (5.25)$$

Na segunda  $\Gamma_q$ , o valor do fluxo é conhecido, portanto

$$b \cdot \bar{q} \cdot \vec{n} = \bar{q} \quad \text{em} \quad \Gamma_q \quad (5.26)$$

onde  $\vec{n} = (n_x, n_y)$  representa a normal externa ao contorno  $\Gamma$  (**Figura 5.9**).



**Figura 5.9.** Contorno  $\Gamma$ . Fonte: RIBEIRO notas de aula, 2004 adaptado pelo autor.

Adicionalmente, a solução deve satisfazer a condição inicial:

$$h(t = 0) = h_0 \text{ em } \Omega \quad (5.27)$$

Aproximando a derivada temporal por diferenças finitas obtém-se:

$$Se \left( \frac{h^{n+1}}{\Delta t} - \frac{h^n}{\Delta t} \right) = \nabla \cdot (K \nabla h) \quad (5.28)$$

### **Formulação variacional**

A formulação variacional da equação geral do fluxo subterrâneo pode ser escrita da seguinte maneira:

Dados  $K$ ,  $Q$ ,  $\bar{h}$  e  $\bar{q}$ , determinar a carga hidráulica  $h \in \Phi \mid \forall w \in W$ ,

$$\int_{\Omega} \nabla w \cdot (K \nabla h) d\Omega = \int_{\Omega} Q w d\Omega - \int_{\Gamma_q} \bar{q} w d\Gamma \quad (5.29)$$

$$\Phi = \left\{ h(x, y) \mid h = \bar{h} \text{ em } \Gamma_h, \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y} \in L_2 \right\} \quad (5.30)$$

$$W = \left\{ w(x, y) \mid w = 0 \text{ em } \Gamma_h, \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y} \in L_2 \right\} \quad (5.31)$$

### **Formulação variacional discreta**

Utilizando-se as aproximações de elementos finitos a equação do fluxo subterrâneo pode ser enunciada na formulação variacional discreta da seguinte maneira:

Aproximações:

$$\hat{h} = \sum_{j=1}^n N_j h_j \quad (5.32)$$

$$\hat{w} = \sum_{i=1}^n N_i h_i \quad (5.33)$$

$$\int_{\Omega} \nabla \hat{w} \cdot (K \nabla \hat{h}) d\Omega = \int_{\Omega} Q \hat{w} d\Omega - \int_{\Gamma_q} \bar{q} \hat{w} d\Gamma, \quad \forall \hat{w} \in \hat{W} \subset W, \quad (5.34)$$

$$\text{onde } Q = -\frac{Se}{\Delta t} (h^{n+1} - h^n) \quad (5.35)$$

$$\sum_{j=1}^n \int_{\Omega} \nabla N_i \cdot (K \nabla N_j) d\Omega \quad h_j^{n+1} = \int_{\Omega} Q N_i d\Omega - \int_{\Gamma_q} \bar{q} N_i d\Gamma, \quad \text{para } i = 1, \dots, n, \text{ onde } (5.36)$$

$$\int_{\Omega} Q N_i d\Omega = -\frac{Se}{\Delta t} \int_{\Omega} N_j N_i \Omega h_j^{n+1} + \frac{Se}{\Delta t} \int_{\Omega} N_j N_i \Omega h_j^n \quad (5.37)$$

O sistema de equações resultante é dado por:

$$\sum_{j=1}^n k_{ij} h_j^{n+1} = f_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (5.38)$$

onde,

$$k_{ij} = \int_{\Omega} K \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega + \frac{Se}{\Delta t} \int_{\Omega} N_i N_j \Omega \quad (5.39)$$

$$f_i = \frac{Se}{\Delta t} \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega h_j^n - \int_{\Gamma} \bar{q} N_i d\Gamma \quad (5.40)$$

A solução do sistema acima permite avançar a solução no tempo, obtendo-se  $h^{n+1}$  a partir de  $h^n$ .

### 5.5. Implementação do sistema para simulação de fluxo subterrâneo utilizando MEF

Foi desenvolvido um sistema de simulação que implementa o método descrito acima. O sistema é baseado em módulos desenvolvidos no Laboratório GESAR (Grupo de Ensaios e Simulações Ambientais de Reservatórios), implementados na linguagem OCTAVE com recursos de linguagem orientada a objeto. Os módulos podem ser utilizados por meio de *scripts* com grande facilidade e flexibilidade. O *script* abaixo descrito no **Quadro 3** exemplifica a utilização do sistema no caso da simulação da exploração de um poço em um aquífero confinado. As linhas que iniciam com %, contém comentários que descrevem a função dos comandos do script.

**Quadro 3 - Script exemplificando o sistema de simulação da exploração de um poço de um aquífero confinado**

```
% definição do nome da pasta que contém os arquivos de dados.
path('C:\Documents and Settings\My Documents\evaristo\aquifers',path)

% definição do número de pontos do modelo.
m1=Model(80,80);

% visualização da malha computacional resultante.
show(m1);

% pausa para visualização
pause;

% construção e inicialização do simulador
s1=Simulator(m1)
s1=init(s1);
% pausa para visualização da solução inicial.
show(s1);
pause;

% laço com 1000 iterações para avanço da solução no tempo
for i=1:1000

% avanço da solução usando dT=0,1
s1=step(s1,0.1);

% pausa para visualização da solução transiente.
show(s1)
pause

end;
```

Fonte: Autor

Neste script, **m1** é um objeto da classe **Model** que contém as informações geométricas e físicas do problema (modelo matemático). Por sua vez **s1** é um objeto da classe **Simulador**, que contém as variáveis do problema, assim como as matrizes que representam o sistema de equações 5.38. O método **init** inicializa o campo da solução e calcula a matriz  $k$  (5.39) e o vetor  $f$  (5.40).

O método **step** recalcula o vetor  $f$  e resolve a equação 5.38 obtendo o campo de carga hidráulica no tempo  $n+1$ .

O método **show** é utilizado para visualização do modelo e da solução.

O sistema foi validado comparando as soluções numéricas com soluções analíticas para problemas com soluções conhecidas, mostrando a correção da implementação e a consistência do método.

## **5.6. UTILIZAÇÃO DO SISTEMA PARA SIMULAÇÃO DE FLUXO SUBTERRÂNEO UTILIZANDO MEF.**

Existem diversas situações nas quais o simulador pode ser empregado no planejamento da exploração dos recursos hídricos subterrâneos.

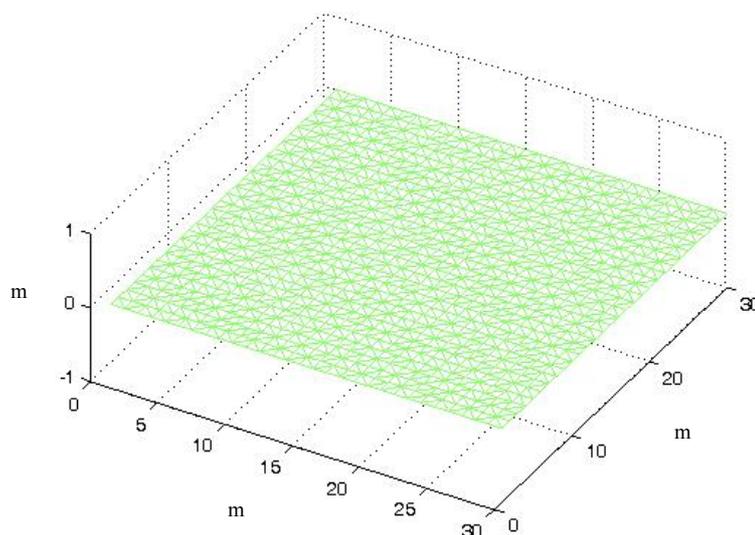
Considere-se, por exemplo, a situação em que se pretende perfurar um poço para exploração em um aquífero confinado em uma região em torno da qual existem outros poços. Antes da perfuração deseja-se simular o escoamento em regime estacionário ou transiente para determinar a extensão do cone de depressão. Esta informação pode ser utilizada para quantificar possíveis interferências entre os poços e ser utilizada no planejamento de perfuração destes poços, na fase de projeto pelo proponente e também pelo órgão responsável pela outorga.

A seguir são ilustrados exemplos de utilização do sistema para casos de estudos hipotéticos, que reproduzem as características principais de situações reais.

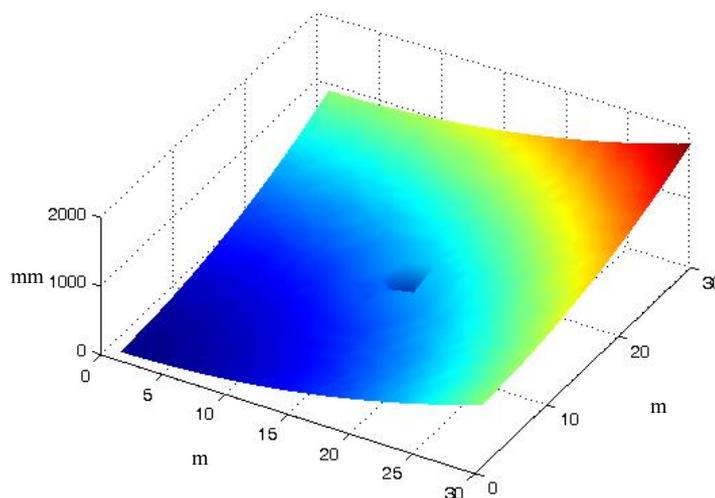
### **5.6.1 Exemplo A**

Neste primeiro caso de estudo foi realizada uma simulação bidimensional na região em volta de um poço hipotético. Na simulação foi considerada uma região quadrada de 30 m por 30 metros com um poço no centro com aproximadamente 1 m de diâmetro e  $K/Se = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ . As condições de contorno consideradas para a simulação foram de carga hidráulica prescrita ao longo de todo o contorno, com um declive de 2 m entre dois vértices diagonalmente opostos, e carga hidráulica prescrita na parede do poço igual a 1 metro, conforme **Figura 5.11**. A malha utilizada na simulação é mostrada na **Figura 5.10**. A **Figura 5.11** mostra o campo de cargas hidráulicas no instante inicial do bombeamento. Na **Figura 5.12** pode-se ver o campo

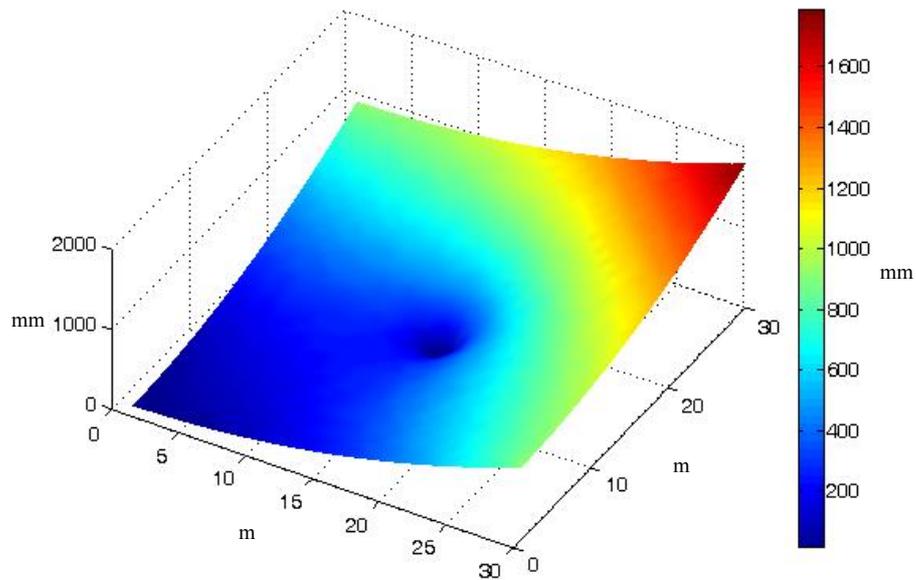
de cargas hidráulicas com o poço em operação em regime estacionário de bombeamento. Pode-se observar o rebaixamento ocorrido no entorno do poço. Nestas condições o raio do cone de depressão é da ordem de menos de 10 m, o que indica que poços fora do perímetro considerado no estudo seriam pouco afetados.



**Figura 5.10. Malha de simulação.**



**Figura 5.11. Condição inicial - Tempo,  $t=0$**



**Figura 5.12. Condição final - Tempo,  $t=t_1$**

### **5.6.2 Exemplo B**

Neste segundo exemplo, considera-se um problema com condições semelhantes as do exemplo A. Nesta simulação foi considerada uma região quadrada de 40 m por 40 metros com um poço no centro com aproximadamente 0,5 m de diâmetro e  $K/Se = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ . As condições de contorno consideradas para a simulação foram de carga hidráulica prescrita ao longo de todo o contorno, com um declive de 2 m entre dois vértices diagonalmente opostos, e carga hidráulica prescrita na parede do poço igual a 10 metros (rebaixamento). Neste caso analisamos as condições do entorno do poço, durante um bombeamento transiente. Utilizamos uma malha mais refinada de forma a poder representar corretamente um poço com diâmetro menor.

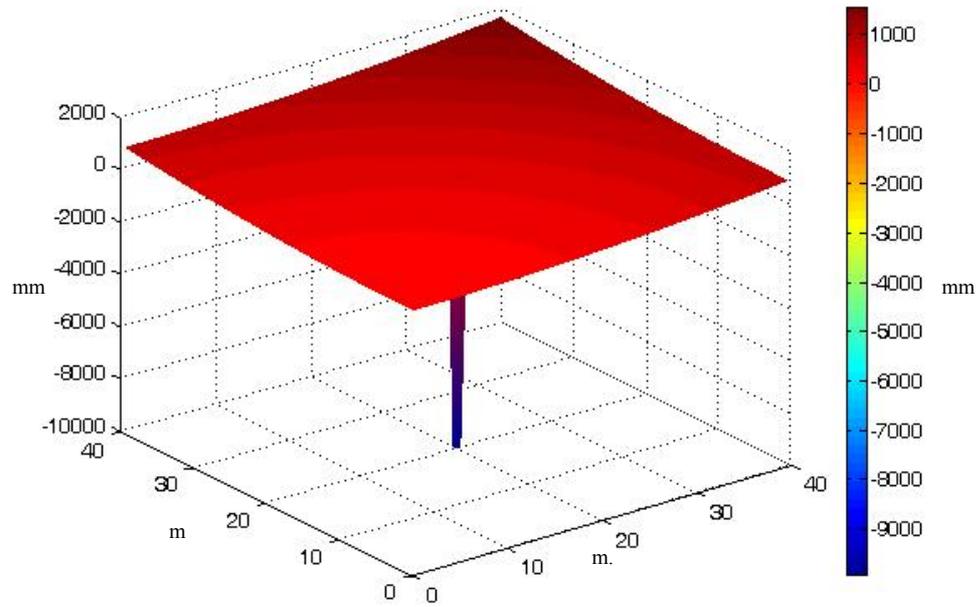


Figura 5.13. Condição inicial da carga hidráulica utilizada no exemplo B

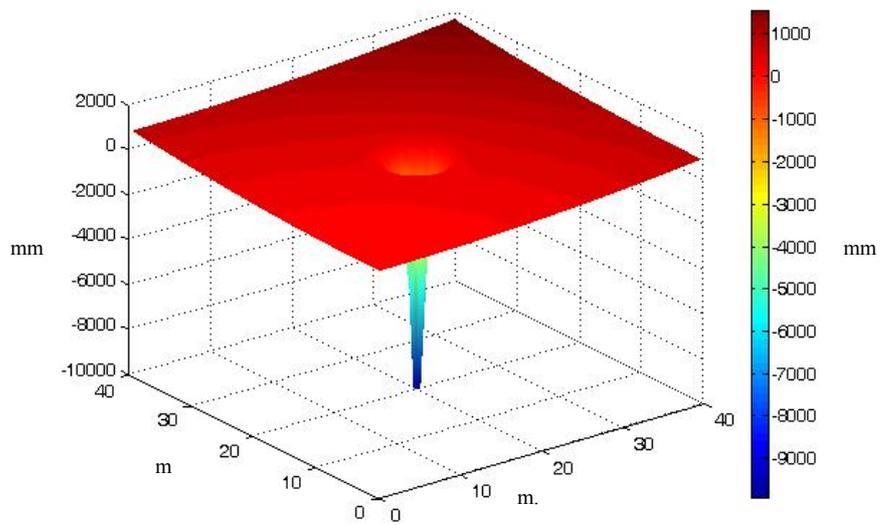


Figura 5.14. Condição transiente da carga hidráulica no tempo  $t_1$ .

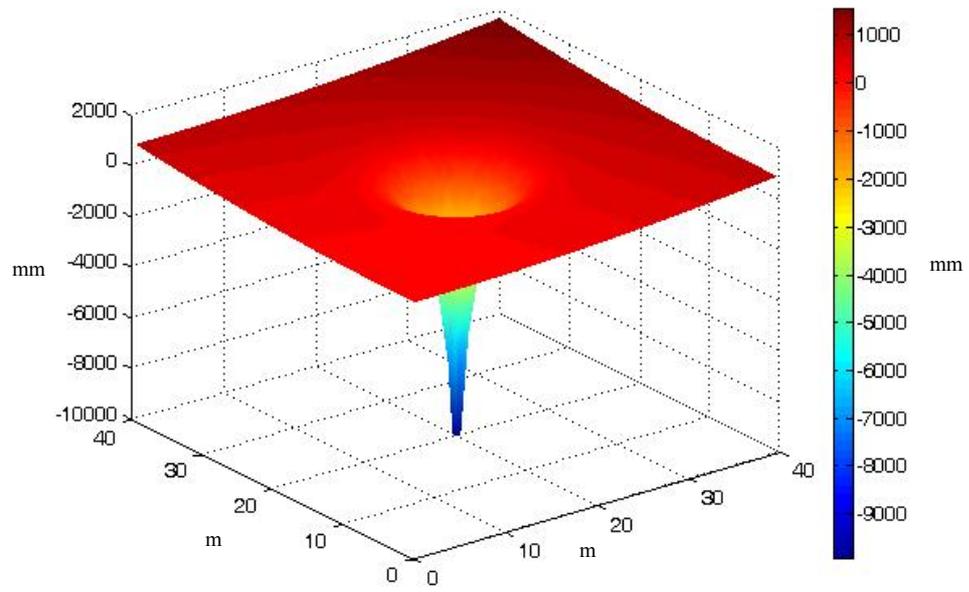


Figura 5.15. Condição transiente da carga hidráulica no tempo  $t_2$ .

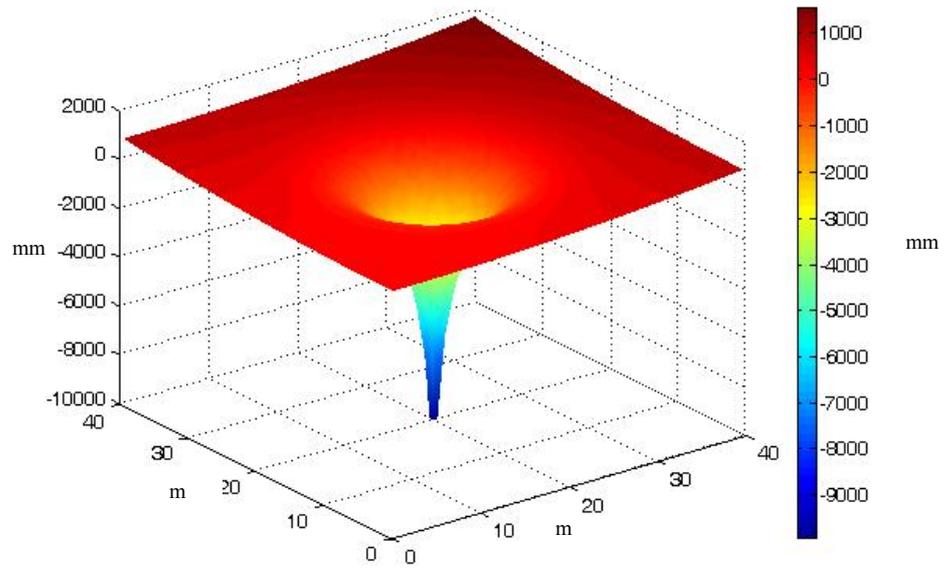
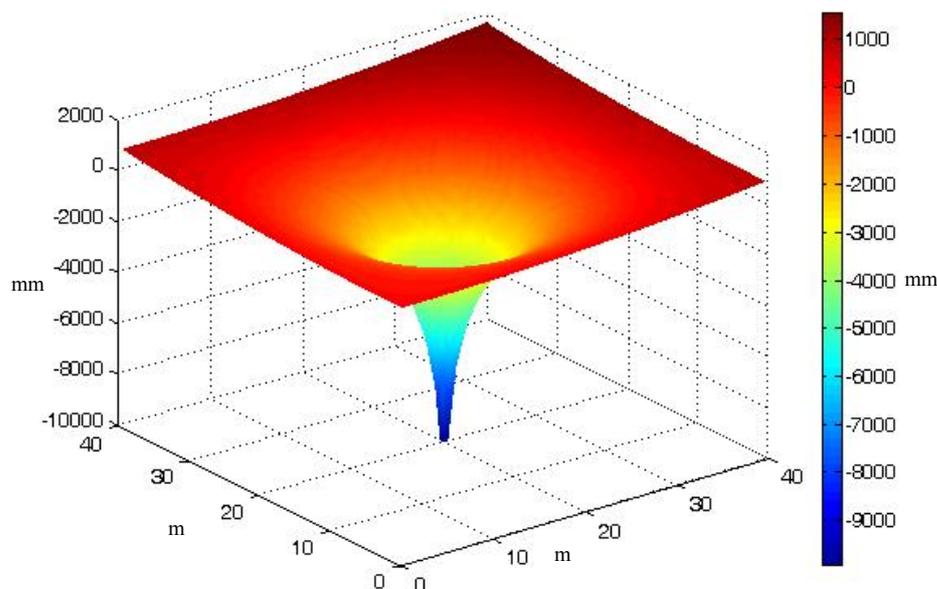


Figura 5.16. Condição transiente na carga hidráulica no tempo  $t_3$ .



**Figura 5.17. Condição Estacionária.**

A **Figura 5.13** mostra o campo de cargas hidráulicas no instante inicial do bombeamento. Podemos observar o aumento gradual do diâmetro do cone de rebaixamento no aquífero nas **Figuras 5.14, 5.15 e 5.16**, até atingir a condição final estacionária na **Figura 5.17**, onde temos a recarga igual ao bombeamento.

Em particular, no tempo  $t = t_3$ , na **Figura 5.15**, o raio do cone é de cerca de 10 m. No entanto para o regime estacionário, **Figura 5.16**, observa-se que o raio cresceu consideravelmente atingindo cerca de 20m. Pode-se concluir que nestas condições um teste de vazão que finalizasse em um tempo  $t = t_3$ , não avaliaria corretamente a região de influência do cone de depressão do poço. Adicionalmente poços próximos do perímetro considerado no estudo podem ser consideravelmente afetados pela operação deste poço.

## 5.7. POTENCIAL DE APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

Os exemplos apresentados ilustram as potencialidades de um sistema de simulação para determinar cargas hidráulicas, rebaixamentos e vazões em situações de interesse. Simuladores constituem importantes ferramentas de apoio aos Sistemas de Suporte a Decisão dos órgãos gestores, uma vez que podem ser simuladas situações de testes de interferência, e esgotamento dos aquíferos, podendo ser simuladas situações atuais e futuras das demandas de recursos hídricos subterrâneo. Esta ferramenta pode ser ainda empregada para avaliar contaminações do aquífero e procedimentos para contenção da pluma de contaminantes e realizar previsões de qualidade de água.

## **CAPITULO 6. PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DE UMA METODOLOGIA DE TRABALHO PARA A UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA SUBTERRÂNEA**

A utilização crescente da água subterrânea é, sem dúvida, produto das vantagens que ela apresenta sobre os recursos de superfície e do avanço alcançado nos últimos anos, tanto do conhecimento de suas condições de ocorrência quanto na tecnologia de captação. Apesar desta importância, a prática da exploração da água subterrânea ainda é ditada, em muitos casos, pela visão imediatista do uso deste recurso, sem a correspondente obediência aos requisitos legais, zelo pelas obras de captação e falta de cuidados técnicos com a operação e manutenção dos poços.

A eficiência de um projeto de gerenciamento de recursos hídricos, utilizando água subterrânea, envolve o planejamento e execução de uma metodologia de trabalho que deverá incluir pelo menos as seguintes macro etapas:

### **i. Estudo de viabilidade inicial**

- Identificar o interessado a utilizar este recurso, o volume necessário e a disponibilidade hídrica do local pela concessionária.
- Identificar a qualidade de água necessária para a utilização
- Realizar um estudo hidrogeológico preliminar com o objetivo de determinar a área potencial para a perfuração dos poços, bem como possíveis fontes de poluição.
- Elaborar um levantamento preliminar dos custos para o projeto, considerando um determinado tratamento em função das premissas estabelecidas (profundidade dos poços a serem perfurados, qualidade da água bruta, tratamento adequado, equipamentos de bombeamento, rede de adução e distribuição e reservatórios).
- Tomada de Decisão – Verificação e comparação dos custos e riscos envolvidos no projeto.

### **ii. Outorga do recurso hídrico subterrâneo**

- A outorga deste recurso é executada em duas etapas. A primeira é a autorização para a perfuração do poço e a segunda a autorização para uso do recurso hídrico

iii. Execução do Projeto – Fase 1

- Estudo hidrogeológico complementar.
- Perfuração, verificação das vazões, identificação da qualidade da água.
- Elaboração do projeto final

iv. Outorga do recurso hídrico subterrâneo (autorização para o uso).

v. Execução do Projeto Final – Fase 2

vi. Execução da obra e Comissionamento

vii. Comparação com as premissas iniciais

viii. Operação e Manutenção dos Poços – Exploração Sustentável

A apresentação desta metodologia, não significa que todos os aspectos foram abordados. É somente uma contribuição sob forma de orientação para aqueles que já utilizam ou pretendem utilizar a água subterrânea como fonte de suprimento alternativo para as suas necessidades.

É importante ser do conhecimento dos prováveis usuários de água subterrânea, que mesmo seguindo todas as recomendações técnicas dos pesquisadores e das empresas de perfuração, este é um processo arriscado, pois existe o risco de que após a perfuração encontre-se cenário abaixo:

- O poço é seco, ou seja, não foi encontrada água ou a vazão encontrada é desprezível.
- O poço possui uma vazão adequada, porém a qualidade da água encontrada inviabiliza a sua utilização em função dos altos custos de tratamento. Por exemplo, uma água com teor de cloreto acima de 1.000 mg/L.

Neste caso é necessário efetuar o pagamento dos custos da empresa de perfuração. Ou seja, não existe um contrato de perfuração que forneça como garantia encontrar a água desejada pelo usuário.

Existem no mercado empresas que trabalham sob a forma de contratos de risco, sendo responsáveis pelo projeto completo do sistema de abastecimento de água e sua operação. Podemos definir um sistema autônomo de abastecimento de água como um sistema que engloba o projeto, locação e perfuração dos poços, projeto e implantação da estação de tratamento de água, redes hidráulicas de adução e distribuição, reservatórios e demais componentes do projeto. Na operação deste sistema está incluso todo o custo operacional como manutenção, produtos químicos, mão de obra, entre outros.

A remuneração pelo sucesso deste modelo de negócio é realizada através da remuneração do volume de água fornecida, durante a vigência do contrato que é de longa duração (geralmente de 5 a 15 anos).

A vantagem deste modelo de negócio é que a empresa contratante não realiza nenhum investimento, não arca com os custos operacionais do sistema autônomo e se exime dos riscos geológicos e construtivos dos poços.

Esta modalidade de negócio é conhecida no mercado como B.O.T. (Built, Operate e Transfer), ou seja, construir, operar e transferir os ativos ao fim do contrato ou B.O.M. (Built, Operate e Maintenance), que é a modalidade na qual os ativos não são transferidos ao fim do contrato.

Outra grande vantagem desta modalidade de negócio é que o contratante através de regras claras e objetivas tem o seu fornecimento de água garantido a um custo menor que o da concessionária pública, não se ocupa com a operação do sistema, deixando este trabalho a cargo de especialistas e pode se dedicar integralmente ao seu ramo de trabalho (core business).

## **6.1. ESTUDO DE VIABILIDADE INICIAL**

O interessado em utilizar a água subterrânea como fonte de abastecimento alternativo pode ser um empreendimento particular (indústria, comércio, shopping centers, agricultura, pecuária, etc.), entidades públicas diversas, prefeituras ou concessionárias públicas.

Iremos descrever as etapas para um empreendimento particular que preferencialmente estará localizado em área urbana, porém a metodologia é válida para a maioria dos casos efetuando-se as modificações necessárias conforme o caso.

### **6.1.1. Identificação do interessado, volume e disponibilidade hídrica**

As empresas situadas em áreas urbanas, normalmente utilizam para seu abastecimento as concessionárias públicas ou privadas para o fornecimento de água potável e tratamento de esgoto.

O custo desta água no Rio de Janeiro está em torno de R\$ 13,00<sup>4</sup> por metro cúbico incluindo o fornecimento de água potável e o transporte e tratamento de esgoto. Se considerarmos somente o custo da água, este custo o valor está em torno de R\$ 7,50 e pode variar se o cliente for residencial, comercial, indústria e também em função da região. Este custo não é uniforme para todas as áreas. A utilização da concessionária como fonte de abastecimento tem

---

<sup>4</sup> Fonte: Dados obtido em conta de água da CEDAE em janeiro 2006

normalmente a vantagem da segurança no fornecimento e na qualidade, a não ser que a empresa esteja localizada em alguma área na qual exista uma irregularidade no fornecimento, por exemplo, a baixada fluminense ou no caso de as empresas estarem situadas fora ou afastadas das áreas urbanas.

Os sistemas de abastecimento próprios, que podem ser tanto de águas superficiais ou subterrâneas, são denominados soluções alternativas de abastecimento de água para consumo humano, de acordo com a Portaria nº 518 do Ministério da Saúde.

Assim, o primeiro passo para uma empresa é mensurar o volume de água total necessária para a sua atividade, separando os consumos por tipo de utilização. Por exemplo, fazendo uma simples separação, poderíamos visualizar em uma atividade industrial de uma determinada empresa, três grandes processos consumidores de água. Restaurante e banheiros, torre de refrigeração e processo industrial. No caso de haver abastecimento por parte da concessionária deve ser verificado o consumo mínimo que o empreendimento é obrigado a pagar. Este consumo varia de acordo com o perfil do consumidor (residencial, industrial, shopping-center, etc.) e é estabelecido pela concessionária quando do pedido de fornecimento de água e em função do projeto.

Outro ponto importante nesta abordagem é a disponibilidade de água pela concessionária na porta da empresa, uma vez que a irregularidade do fornecimento pode obrigar a atividade à freqüentemente recorrer a carros pipas, cujo custo está em torno de R\$ 100,00 a R\$ 150,00 por 10.000 litros, ou seja, R\$ 10,00 a R\$ 15,00 por metro cúbico, podendo chegar a R\$ 50,00 por metro cúbico em épocas de escassez<sup>5</sup>.

Assim, em função do volume consumido, preço e segurança no fornecimento a empresa deve realizar um estudo de viabilidade para a utilização de sistemas alternativos. É importante salientar que mesmo no caso do estudo de viabilidade demonstrar que a utilização de um sistema alternativo poderá substituir a concessionária, o pagamento referente ao transporte e tratamento de esgoto será devido.

Existem casos de atividades poluidoras, geralmente indústrias, que mesmo em área urbana são obrigadas a tratar o seu efluente industrial. Nestes casos se o lançamento é realizado em corpo receptor, como um rio, por exemplo, o pagamento do tratamento do esgoto não é devido. No entanto se este mesmo lançamento é realizado em rede da concessionária o pagamento do esgoto é devido. (CEDAE).

---

<sup>5</sup> Dados obtidos através do setor de Transporte de Água P.H. Fornecimento ao Cenpes - novembro 2005



### **6.1.2 – Identificação da qualidade de água necessária para a utilização**

Como citado no item anterior, além de mensurar o volume total necessário para a atividade é muito importante mensurar as diferentes necessidades de água dentro da empresa, uma vez que na maioria dos casos estes diferentes usos implicam em diferenças de qualidade de água e conseqüentemente em um tratamento adequado para atender as necessidades.

No caso de água potável a regulamentação legal é a Portaria nº 518 do Ministério da Saúde de 25 de março de 2004. Nos demais casos a qualidade muda de acordo com o processo. Como exemplo da necessidade de se conhecer a qualidade necessária, podemos citar os parâmetros cloreto e dureza que na portaria nº 518 apresentam valores máximos permissíveis (VMP) de 250 mg/L e 500 mg/L, respectivamente, valores estes elevados para serem utilizados como água de alimentação de torres de refrigeração.

### **6.1.3 - Estudo Hidrogeológico Preliminar.**

O objetivo é pesquisar e determinar se a área do empreendimento possui um potencial adequado para a perfuração, visando à obtenção de água subterrânea em quantidade e qualidade adequada à necessidade, bem como identificar no local possíveis áreas mais apropriadas para a perfuração dos poços.

De acordo com FEITOSA, E.C. (apud FEITOSA, F.A.C., 1997), pesquisa tem o mesmo significado que “investigação” ou “exploração”. Pode ser definida como o conjunto de operações ou estudos, que permitam a localização e a caracterização de aquíferos, dos quais se pode obter água em quantidade e qualidade ao fim pretendido.

Segundo MARIANO (1994), avaliação hidrogeológica é a comunicação integrada de informações realizada em uma determinada área, cujos resultados obtidos permitem viabilizar ou não a exploração do manancial fornecendo elementos para a elaboração de um projeto específico.

Localizar a água subterrânea significa a determinação dos locais onde a água ocorre sob condições tais que a sua utilização seja fácil e econômica. Os meios práticos de conseguirlo incluem a aplicação de conhecimentos científicos, pesquisa de campo e senso comum. (JOHNSON DIVISION, 1978).

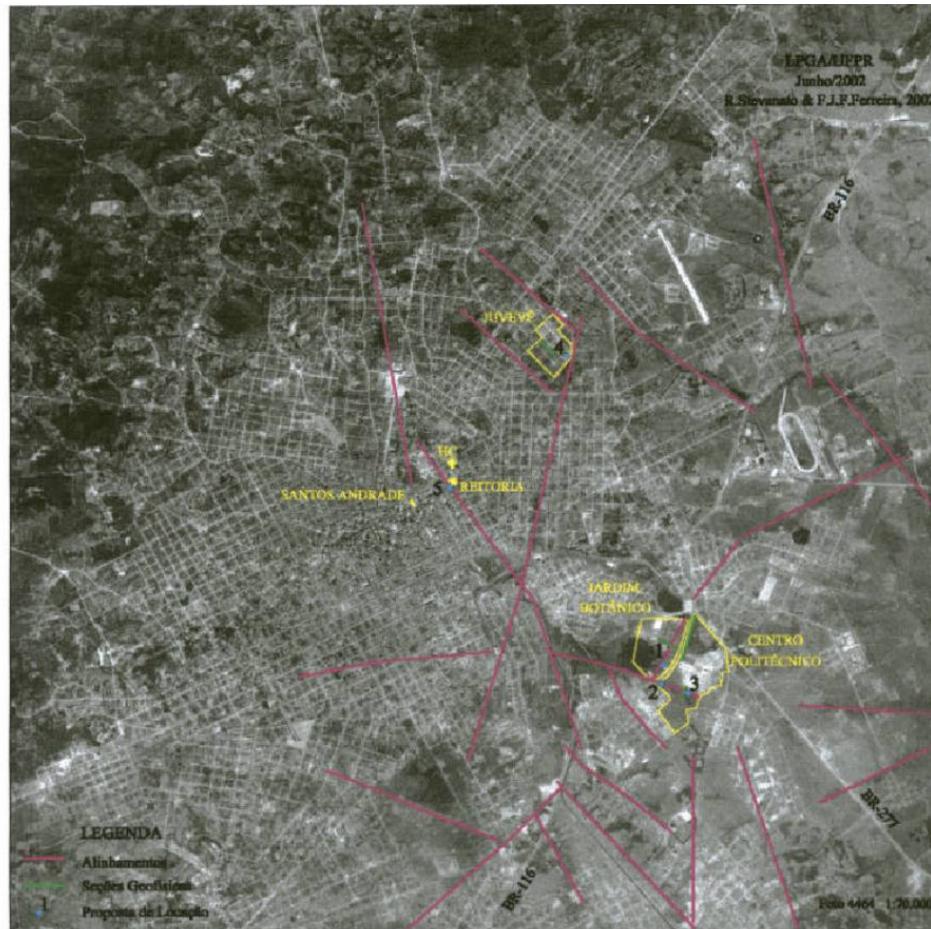
As principais etapas deste estudo estão descritas nos subitens a seguir.

#### **6.1.3.1. Levantamento Inicial**

- Pesquisa em mapas geológicos, topográficos e hidrogeológicos.
- Revisão bibliográfica em estudos já realizados na área em questão.

- Foto interpretação da área ou da região através de fotografias aéreas.
- Logs de sondagens geotécnicas para fundações de edifícios, entre outros.

Na **figura 6.2** podemos observar uma fotografia área.



**Figura 6.2** – Mapa de localização dos *Campi* da UFPR indicando os alinhamentos fotorinterpretados, as seções geofísicas e as propostas de locações de poços tubulares profundos. Fonte: Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA & Universidade Federal do Paraná – UFPR - Proposta de locação de poços tubulares profundos para o abastecimento de águas dos *Campi* da UFPR – 2002

### 6.1.3.2 Levantamento de Campo

- Pesquisa de campo para reconhecimento geológico.
- Cadastramento de poços tubulares profundos e outros tipos de fontes.
- Seleção dos poços de maior interesse para verificação da qualidade de água, profundidade, vazão e níveis de água.
- A existência e localização de possíveis fontes de contaminação para os aquíferos.

Nesta etapa os dados do levantamento inicial são verificados. São realizadas visitas em locais que já possuem poços cadastrados nos banco de dados pesquisados e em outras empresas comerciais e industriais, condomínios, etc.potencialmente consumidoras na área de interesse. Verifica-se a qualidade de água dos poços cadastrados e se necessário novas análises são efetuadas.

### **6.1.3.3 Vulnerabilidade dos aquíferos.**

Os aquíferos, por sua natureza são mais protegidos quanto a contaminação do que as águas superficiais. No entanto, como não são tão “visíveis”, chamam menos atenção dos órgãos gestores e da sociedade como um todo.

A exploração da água subterrânea tem que observar a proteção dos aquíferos durante a fase de perfuração e operação dos poços. GIAMPÁ E GONÇALES (2005)

Segundo MARIANO (2001), a distância mínima de um poço a uma possível fonte de poluição deve ser suficientemente grande para promover uma razoável segurança, a fim de que, uma corrente superficial ou uma infiltração de água contaminada, não alcance o poço.

### **6.1.3.4 – Relatório preliminar – Estudo Hidrogeológico**

Após a consolidação e interpretação dos dados obtidos, elabora-se um relatório sobre a potencialidade ou não de utilização dos recursos hídricos subterrâneo, estimando-se o número de poços necessários para atingir a demanda necessária do interessado, a qualidade da água esperada e sugerindo os métodos de investigação necessários para a realização do estudo final. Um projeto preliminar dos poços a serem perfurados deverá ser especificado com a finalidade de auxiliar no levantamento preliminar dos custos.

### **6.1.4 – Levantamento preliminar dos custos**

O objetivo deste capítulo é apresentar, de uma forma preliminar, as diversas etapas que consolidam os custos do projeto a ser implantado no empreendimento do interessado.

Nesta etapa o custo do investimento e as despesas de operação deverão ser estimados com uma margem de erro de até mais ou menos 20 %. Alguns custos deverão ser estimados em função de algumas premissas estabelecidas previamente e do relatório preliminar do estudo hidrogeológico. Os custos estimados, que podem variar mais estão relacionados com o número de poços, profundidade de perfuração, número de equipamentos de bombeamento, qualidade da água e projeto da Estação de Tratamento de Água (ETA).

Os pontos críticos do projeto estão relacionados com a quantidade final de poços e a profundidade dos mesmos para se atingir com segurança a vazão necessária para o projeto, bem como a qualidade da água encontrada, uma vez que ambos os fatores possuem forte impacto nos custos de investimento. Exemplificando, pode ser que durante a fase da perfuração ocorra a necessidade de se perfurar um ou mais novos poços para se encontrar o volume de água desejado, como também existe a possibilidade de se aumentar à profundidade de perfu-

ração dos poços em relação à inicialmente prevista. A qualidade da água encontrada também pode ser muito diferente do projeto, obrigando a mudança na concepção da Estação de Tratamento de Água (ETA). Estas contingências podem acontecer e devem estar previstas.

No caso da qualidade da água também pode existir um forte impacto nas despesas operacionais, em função do custo do tratamento estar relacionado à qualidade da água a ser tratada.

#### 6.1.4.1 – Investimentos

Como forma de simplificar a abordagem apresentamos abaixo na **Tabela 6.2**, uma planilha com os itens principais a serem levantados, levando em consideração possíveis variáveis e contingências. Os valores não se referem a nenhum projeto específico.

**Tabela 6.2 - Investimentos**

<b>Investimentos</b>	
<b>Cenário m<sup>3</sup>/mês</b>	<b>15.000</b>
<b>Descrição</b>	<b>Valor R\$</b>
<b>1-Estudos Preliminares</b>	<b>22.000,00</b>
Estudos Hidrogeológicos	7.000,00
Geofísica (Eletrorresistividade e VLF)	5.000,00
Consultorias Projeto Executivo	10.000,00
<b>2 - Licenças</b>	<b>29.000,00</b>
Licenças Ambientais	9.000,00
Outorga para captação e uso da água	20.000,00
<b>3-Construção de Poços Tubulares</b>	<b>363.304,03</b>
Perfuração (Mobilização, perfuração, revestimento e completação)	233.480,00
Testes de Vazão (Mobilização, Instalação, Vazão máxima, escalonada e interferência)	40.950,00
Instalação dos conjuntos moto bombas (bomba, material elétrico/hidráulico)	64.874,03
Análise da água	24.000,00
<b>4-Rede Hidráulica</b>	<b>282.479,03</b>
Rede Hidráulica Adução (Projeto, execução e materiais)	104.020,80
Rede Hidráulica Distribuição (Projeto, execução e materiais)	103.708,23
Elevatórias (Projeto, execução e materiais)	33.150,00
Reservatórios (Projeto, execução e materiais)	41.600,00
<b>5-Estação de Tratamento de Água</b>	<b>600.750,00</b>
Unidade de tratamento (Projeto, equipamento e implantação)	535.000,00
Obras Civis/Containers ETA ( Projeto de base de equipamentos, execução e materiais)	53.750,00
Comissionamento, start-up e treinamento	12.000,00
<b>6-Serviços Complementares</b>	<b>63.210,00</b>
Urbanização ( Projeto, implantação e reparo na propriedade do cliente)	33.210,00
Automação (Projeto, instrumentação, montagem, calibração)	20.000,00
Treinamento	10.000,00
<b>7-Gerenciamento</b>	<b>136.074,31</b>
Engenharia de projeto e processo (Projeto, lay-out e fluxogramas)	68.037,15
Engenharia de implantação ( Montagem, comissionamento e start-up)	68.037,15
<b>8-Contingências</b>	<b>74.840,87</b>
<b>Total R\$</b>	<b>1.571.658,23</b>
<b>Prazo para implantação ( meses)</b>	<b>10</b>

Fonte: autor

### 6.1.4.2 Despesas de Operação

Como forma de simplificar a abordagem é apresentado abaixo na **Tabela 6.3**, uma planilha com os itens principais a serem levantados. Os valores se referem a um projeto hipotético.

**Tabela 6.3 – Despesas Mensais de Operação**

<b>Despesas Mensais de Operação</b>	
<b>Cenário m<sup>3</sup>/mês</b>	<b>15.000</b>
<b>Descrição</b>	<b>Valor R\$</b>
<b>1-Pessoal</b>	<b>11.030,00</b>
Custo Mão Obra + Encargos + EPI+ Diversos	11.030,00
<b>2-Análises de Água</b>	<b>645,00</b>
Análises físico- químicas e bacteriológicas	645,00
<b>3 - Produtos químicos</b>	<b>7.980,47</b>
Produtos Químicos	7.980,47
<b>3 - Gerenciamento</b>	<b>1.000,00</b>
Viagens e representação (passagens, taxis, refeições, representações e estadias)	1.000,00
<b>4 - Administrativo</b>	<b>550,00</b>
Comunicações (telefone, internet, malote, encomendas, correios e assinaturas)	300,00
Seguros, fianças ou taxas (Seguro, IPVA, taxas governamentais)	250,00
Material de consumo (escritório/informática)	100,00
<b>5 - Energia Elétrica</b>	<b>2.561,46</b>
Custo da Energia elétrica	2.561,46
<b>6-Manutenções Corretivas</b>	<b>1.650,00</b>
Máquinas e equipamentos e pequenos serviços	900,00
Veículos e predial	250,00
Material de consumo ( combustivel, óleos e lubrificantes)	300,00
Peças de reposição (componentes hidráulicos, elétricos e mecânicos)	200,00
<b>7- Manutenções Preventivas</b>	<b>2.146,61</b>
Equipamentos (bombas submersas e de superfície, medidores de vazão, caldearia e parte elétrica, etc)	147,95
Materiais ( recarga de filtros, cartucho, elementos filtrantes, membranas diversa, lonas de filtração, etc)	948,67
Serviços ( disposição de lodo, retirada de bombas, limpeza de poços, aferições, etc)	1.050,00
<b>Total R\$</b>	<b>27.563,54</b>
<b>Custo/m<sup>3</sup> R\$</b>	<b>1,84</b>

Fonte: (autor)

### 6.1.5. Tomada de decisão

Nesta etapa devemos comparar os custos de investimentos mais as despesas operacionais do projeto e comparar com os custos da concessionária. Em função destes valores deve ser tomada a decisão de avançar ou não no projeto, levando em considerações os riscos envolvidos. Para o cenário que está sendo tratado, podemos observar na **Tabela 6.4** o resultado do estudo de rentabilidade.

**Tabela 6.4 – Estudo da Rentabilidade dos Investimentos**

<b>Estudo de Rentabilidade dos Investimentos</b>	
Consumo (m3/mês)	15.000
Tarifa Concessionária (R\$/m3) -média	7,01
Despesa Mensal com Concessionária (R\$/mês)	105.150,00
Despesa Mensal com Operação Poços	27.564
<b>Ganho Financeiro - Mensal (R\$)</b>	<b>77.586</b>
<b>Ganho Financeiro - Anual (R\$)</b>	<b>931.038</b>
Custo Investimento R\$	1.571.658
<b>Pay-back (Bruto) (*) - anos</b>	<b>2,04</b>

(\*) sem contar o custo de capital

Fonte: Autor

Realizando uma análise dos dados podemos observar que para as premissas apresentadas o projeto é um projeto rentável. Apesar de o resultado apresentar uma boa rentabilidade demonstrando que o projeto é viável deve apresentar para uma decisão da empresa outros cenários conforme a **Tabela 6.5**.

**Tabela 6.5 – Síntese dos cenários de investimento e operação**

<b>Síntese dos Cenários de Investimento e Operação</b>			
	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
<b>Hipóteses :</b>	<b>Projeto</b>	<b>Realista</b>	<b>Pessimista</b>
Investimentos	Conforme Projeto	Acréscimo de 20 %	Acréscimo de 40 %
Despesas de Operação (mensal)	Conforme Projeto	Acréscimo de 20 %	Acréscimo de 40 %
<b>Despesas de Operação (mensal) :</b>	27.564	33.076	38.589
<b>Ganho Financeiro - Mensal (R\$)</b>	<b>77.586</b>	<b>72.074</b>	<b>66.561</b>
<b>Ganho Financeiro - Anual (R\$)</b>	<b>931.038</b>	<b>864.885</b>	<b>798.733</b>
<b>Investimentos :</b>	1.571.658	1.885.990	2.200.322
<b>Pay-back (Bruto) (*) - anos</b>	<b>2,04</b>	<b>2,64</b>	<b>3,33</b>

Fonte: Autor

Em função dos resultados acima, tendo em vista os diferentes cenários e cientes do risco de perder uma parte do investimento, vamos considerar que foi tomada uma decisão favorável ao projeto passaremos para a fase seguinte, Execução do Projeto – Fase um.

## **6.2. EXECUÇÃO DO PROJETO – FASE UM**

Nesta fase do projeto é indicado um roteiro para a obtenção da autorização para a perfuração junto a SERLA, contratação, construção e instalação de poços tubulares profundos e a outorga de direito de uso dos recursos hídricos. A instalação se refere aos equipamentos de bombeamento dos poços.

### **6.2.1. Estudos hidrogeológicos para a locação dos poços.**

Como descrito no item 6.1.3 acima, o objetivo deste estudo é a escolha do local mais adequado para a perfuração dos poços. Segundo CAPUCCI (2001) o estudo da geologia da área ou região pode indicar as formações portadoras de água, assim como dar idéia da vazão a ser obtida. Por sua vez, o estudo da geologia estrutural tornará possível fazer uma adequada escolha do local da perfuração, bem como fornecerá os elementos básicos do projeto técnico construtivo do poço, como método de perfuração, profundidades e diâmetros de perfuração a alcançar, profundidades a serem revestidas, necessidade ou não de aplicação de seções filtrantes, métodos de serviços de limpeza teste de produção, etc.

Para a locação de um poço, uma investigação de geologia de superfície é, em geral menos dispendiosa, mas nem sempre seus resultados dão garantia de êxito. Uma ferramenta de grande valor, principalmente no caso de rochas cristalinas, é a foto interpretação da área ou da região, permitindo obter informações como:

- (a) Direção e características das estruturas geológicas;
- (b) Contatos litológicos;
- (c) Rede e padrão de drenagem, permitindo inferir as condições de subsuperfície.

A interpretação e conclusão dos estudos nesta fase muitas vezes são suficientes para seleccionar corretamente o local exato da perfuração, levando-se em conta as condições de acesso e da infra-estrutura existente.

Na fase anterior descrita no item 6.1.3, já foi realizado um estudo preliminar que identificou ou não a necessidade da realização de novos estudos sobre a geologia local, principalmente através de sondagem geofísicas, buscando uma maior segurança na locação e perfuração dos poços. Assim sendo, havendo esta necessidade seriam utilizados, prioritariamente, os métodos elétricos e eletromagnéticos.

Estes métodos consistem em detectar as anomalias nas propriedades físicas das rochas, baseadas em medições indiretas. As interpretações dos dados em gráficos são muitas vezes difíceis, devendo ser cuidadosamente avaliadas.

Segundo FEITOSA, E.C. (apud FEITOSA, F.A.C., 1997), FETTER (1994) e JOHNSON DIVISION (1978) a água subterrânea, como o petróleo, não é pesquisada diretamente pela geofísica. São pesquisados os litotipos e estruturas favoráveis ao acúmulo e circulação do bem procurado. Considerando as características particulares da água subterrânea, bem como os aspectos econômicos, o método de sísmica refração e particularmente o método de resistividade elétrica em corrente contínua (SEVs e perfis de resistividade) são, classicamente, os mais utilizados em áreas sedimentares.

Em terrenos cristalinos, a sísmica não fornece respostas satisfatórias, enquanto que a resistividade oferece muito boas perspectivas. Mais recentemente, uma grande ênfase vem sendo dada aos métodos indutivos (eletromagnéticos), sobretudo aqueles que utilizam ondas eletromagnéticas de rádio como fonte de energia ou, mais especificamente, como campo primário. Na **Tabela 6.6** abaixo podemos verificar os principais métodos geofísicos utilizando campos artificiais.

**Tabela 6.6 – Classificação dos métodos geofísicos**

Métodos utilizando campos naturais	Gravimetria			
	Magnometria			
	Radiometria			
	Métodos elétricos	Correntes telúricas		
		Potencial espontâneo		
Magnetotélúrico				
AFMAG				
Métodos utilizando campos artificiais	Sísmica			
	Métodos elétricos	Campo constante	Linhas equipotenciais	
			SEVS E PERFIS DE RESISTIVIDADE	
		Campo variável	SEVs frequência	
			Eletromagnéticos	Conv
	VLF			

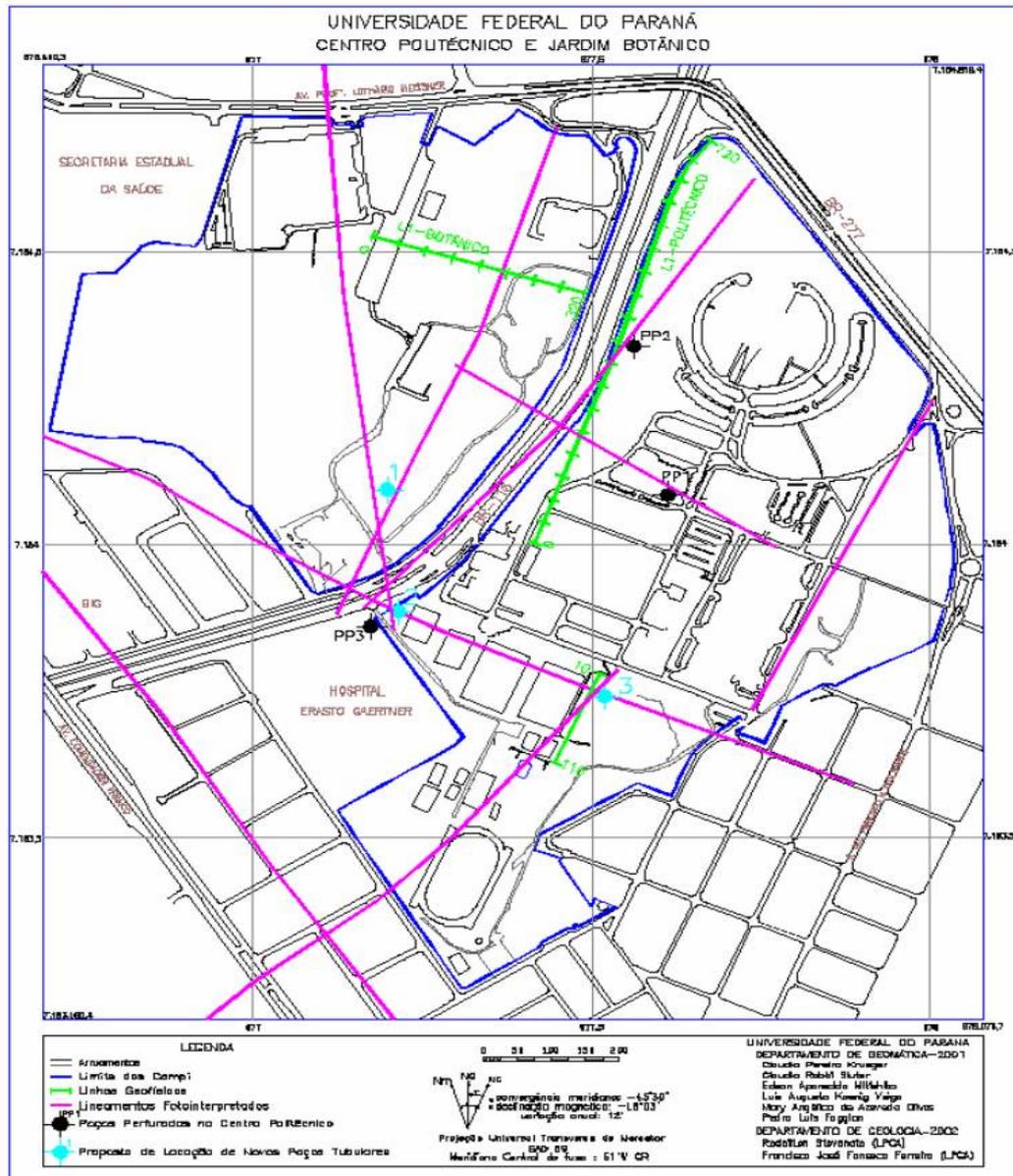
**Fonte: FEITOSA, 1997**

Os métodos geofísicos fornecem indicações indiretas sobre as formações que podem ser aquíferos. Os métodos geofísicos não medem nem determinam diretamente os tipos de rochas, a porosidade, a permeabilidade e a densidade de qualquer formação. Fornecem a medida de algumas outras propriedades dos materiais que variam com os fatores que revelam se a formação é suficientemente porosa e permeável para prestar-se como aquífero. (JOHNSON DIVISION (1978).

Os métodos geofísicos podem ser classificados como sendo do tipo superficial ou do tipo subsuperficial, indicando-se, assim, que as medições podem ser feitas a partir da superfície ou abaixo da superfície, em perfurações do solo.

Como exemplo podemos citar um estudo para a locação de poços que integra estes diferentes critérios, com ênfase na interpretação geofísica, apoiada por fotointerpretação, visan-

do selecionar sistemas de fraturas em uma determinada direção. Os resultados estão demonstrados nas **Figuras 6.3 e 6.4**.



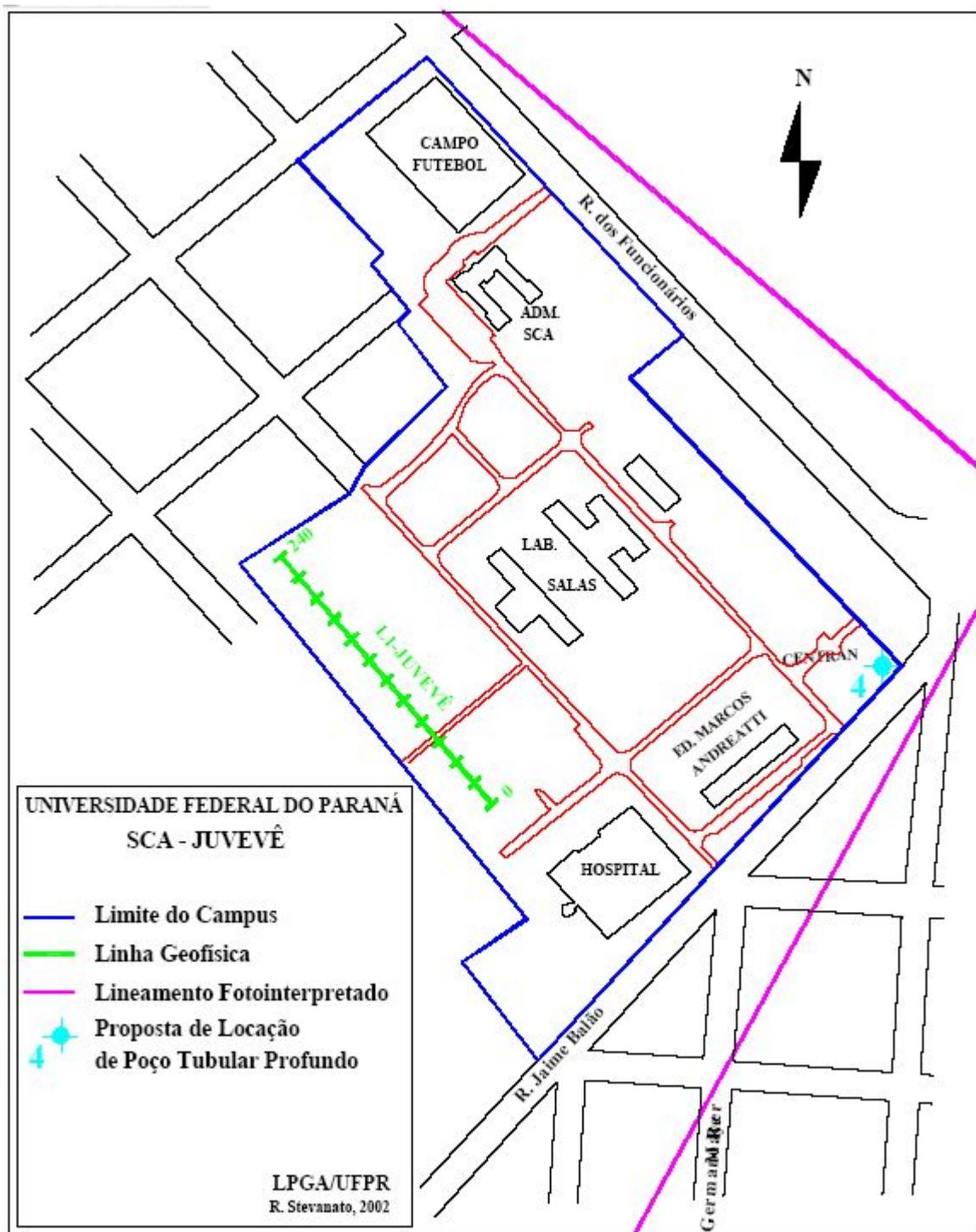


Figura 6.4 – Mapa do *Campus Juvê* indicando a localização da linha geofísica, os lineamentos fotointerpretados e a proposta de localização de poço tubular profundo. Fonte: Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA & Universidade Federal do Paraná – UFPR - Proposta de localização de poços tubulares profundos para o abastecimento de águas do Campi UFPR - 2002

A investigação através da perfuração de um poço é uma outra ferramenta eficaz para validação do estudo hidrogeológico, antes da perfuração dos demais poços, principalmente nos casos onde o estudo definiu a necessidade de perfuração de mais de um poço visando o atendimento da vazão necessária de projeto. Através dessas investigações é possível avaliar a existência de água subterrânea, podendo estimar a quantidade e qualidade dos recursos. Entre-

tanto, o nível de conhecimento final só é possível de ser obtido mediante a perfuração de poços de produção, realização de testes de bombeamento e amostragem para análises da água.

### **6.2.2. Projeto Técnico de Construção de Poços.**

A elaboração de projeto técnico construtivo do poço deve ser realizada por profissional habilitado, levando em consideração principalmente: a geologia do local, a vazão necessária ou esperada, a qualidade físico-química da água. O projeto de um poço de água envolve a seleção dos fatores dimensionais mais adequados à sua estrutura, bem como a seleção de materiais a serem utilizados na sua construção. Um bom projeto tem como objetivo uma ótima combinação do desempenho, de uma longa duração e do custo razoável, além de manter a boa qualidade da água, prevenindo-se de possíveis contaminações.(UOP Division, 1997).De forma a atender os objetivos acima o projeto técnico construtivo deverá conter, de acordo com cada caso: (MARIANO e LINHARES, 1994; DEMÉTRIO e MANOEL FILHO, apud FEITOSA, 1997; (JOHNSON DIVISION, 1978)

- a) As formações geológicas e os tipos de rochas previstos a serem perfurados;
- b) A locação dos poços (localização);
- c) A verificação se a área é livre de contaminação;
- d) Método de perfuração e os respectivos diâmetros de perfuração;
- e) As especificações dos materiais a serem empregados durante a perfuração
- f) As especificações dos materiais a serem aplicados em definitivo no poço (revestimentos, filtros e pré-filtros);
- g) Os serviços de completação (desenvolvimento, limpeza, teste de bombeamento, laje de proteção sanitária, cimentações e desinfecção);
- h) Métodos de investigação de sub superfície, se necessário;

As normas da Associação Brasileira de Normas Técnica que regulamentam o projeto construtivo e a construção de poços são:

- a) NBR 12212 - Projeto de poço tubular profundo para captação de água subterrânea.
- b) NBR 12244 - Construção de poço tubular profundo para captação de água subterrânea.
- c) NBR 13604/13605/13606/13607/13608 - “Dispõe sobre tubos de PVC para poços tubulares profundos”
- d) NBR 13895/1997 – Poços de Monitoramento.

### **6.2.3. Autorização para Perfuração de Poços de Extração de Água Subterrânea**

Para a construção de poços para extração de água subterrânea no Estado do Rio de Janeiro deverão ser obtidas autorizações para perfuração junto à SERLA – Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas, nos termos da Portaria SERLA nº 385, de 12 de abril de 2005. A portaria faz menção a poços tubulares profundos e a poços escavados rasos (até 3 metros). De acordo com o artigo 8º desta portaria, para obtenção de autorização para perfuração de poços tubulares, o interessado deverá apresentar à SERLA os seguintes documentos e informações:

a) Requerimento de autorização para perfuração de poços com dados cadastrais do interessado;

b) Formulário técnico com diversos dados, dentre eles licença ambiental emitida pelo órgão de controle ambiental, quando couber, localização do ponto de perfuração com as coordenadas em mapa topográfico, estudo de avaliação hidrogeológico, projeto do poço tubular profundo de acordo com as normas da ABNT contendo descrição dos materiais a serem utilizados, geologia e hidrogeologia da área e coordenadas do(s) rio(s) mais próximo e informações de poços da região e dados cadastrais da empresa perfuradora;

c) Cópia da ART (Anotação de Responsabilidade Técnica) do responsável técnico pelo projeto, acompanhado da cópia da respectiva guia de pagamento junto ao CREA/RJ, com as coordenadas do local de perfuração;

d) Planta na escala 1:50000 do IBGE, contendo a localização geográfica da área objeto de estudo, bem como a do rio mais próximo;

e) Características hidrogeológicas regionais e locais;

f) Título de propriedade do terreno, documento de posse ou cessão de uso das áreas envolvidas;

g) Comprovante de pagamento de emolumentos (taxas);

h) Requisição de demarcação da faixa marginal de proteção, quando couber.

A critério do interessado, a obtenção de autorização referida poderá ser requerida, através de procuração, pela empresa perfuradora.

Na entrega dos documentos relacionados junto a um dos endereços da SERLA, será emitido protocolo de solicitação. O processo será então avaliado pela Diretoria de Gestão de Recursos Hídricos - DGRH que ficará incumbida de orientar, proceder à análise e emitir parecer final do pedido de Autorização de Perfuração, que sendo considerado deferido, deverá emitir ao requerente Portaria de Autorização para Perfuração de Poços de Extração de Água Subterrânea. A Autorização para Perfuração de Poços para Extração de Água Subterrânea

terá validade de até 6 (seis) meses e em caso de indeferimento, será emitida justificativa técnica, a qual será publicada em boletim de serviço interno e no Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro.

O Ato administrativo de autorização para perfuração de poço deverá incluir, no mínimo, as seguintes informações:

- a) Identificação do requerente;
- b) Localização geográfica da área;
- c) Finalidade do uso;
- d) Prazo de validade.

De acordo com o Art. 13 após a conclusão a obra, e com base nos resultados obtidos, o interessado deverá apresentar os seguintes documentos e informações:

I – No caso de poços tubulares:

- a) relatório final de construção do poço tubular;
- b) análise físico-química e bacteriológica da água do poço atualizada;
- c) cópia da ART do responsável técnico pela obra;
- d) identificação da empresa perfuradora;
- e) formulário de cadastramento no CEUA;
- f) solicitação de outorga, quando couber.

§1º – Para os poços que resultarem secos ou economicamente inviáveis serão apresentados os respectivos Relatórios de Construção à SERLA devendo, nestes casos, serem cadastrados e selados conforme norma ABNT (NBR –12244/92, item 5.5.5).

§2º - O requerente terá o prazo de até 6 (seis) meses, contados da data da autorização, para apresentar toda a documentação necessária, se cadastrar e entrar com requerimento de outorga, estando sujeito à fiscalização, podendo incorrer nas penalidades previstas na legislação em vigor.

§3º - O prazo referido no parágrafo anterior poderá ser prorrogado, à critério da Serla, por meio de requerimento do interessado, justificando o pedido.

A obra de extração de água subterrânea no território do Estado, deverá ser cadastrada no CEUA (Cadastro Estadual dos Usuários de Água), conforme Portaria SERLA nº 339 de 06 de Abril de 2004, apresentando as informações técnicas necessárias e permitindo o acesso da fiscalização ao local - Art. 14 da portaria 385

## 6.2.4 Construção dos Poços

A construção deve ser executada dentro das normas da ABNT, por empresa que esteja registrada no CREA, possua responsável técnico e de preferência esteja credenciada junto a ABAS. Estas precauções visam a assegurar a realização de um serviço dentro das normas, que será fiscalizado pelas entidades competentes e gozará de todas as garantias construtivas.

Segundo GIAMPÁ e GONÇALES (2005) recomenda-se a contratação de uma empresa idônea e capacitada a atender os requisitos de ordem legal, jurídica, financeira e técnica, e para tanto se apresenta, a título de sugestão, um “check list” na **Tabela 6.7**.

**Tabela 6.7 – Orientações para a Utilização de Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo**

RECOMENDAÇÕES		
Na Proposta	Após Fechamento do Contrato	Durante os trabalhos de perfuração
Registro ou visto no CREA-SP	Recolhimento de ART junto ao CREA	Acompanhamento dos serviços
Responsável Técnico: geólogo ou engenheiro de minas	Obtenção de Licença de Execução junto ao DAEE	Correlação entre o descritivo dos serviços propostos e os efetivamente realizados
Atestado de capacidade técnica acervado pelo CREA		
Atestados de idoneidades: administrativas, jurídicas e financeiras		
Relação de Equipamentos		
Relação de Pessoal Técnico		
Projeto Técnico executivo especificando diâmetros de perfuração, litologias atravessadas e eventuais acréscimos de preço em profundidade		
Selo de qualidade ABAS		

Fonte: GIAMPÁ E GONÇALES (2005)

A construção de um poço tubular, em rochas duras ou moles, pode ser desdobrada nas seguintes operações distintas (CAPUCCI, 2001, (JOHNSON DIVISION (1978), MARIANO, 1994)

- a) Perfuração;
- b) Aplicação do revestimento;
- c) Encascalhamento - quando for o caso de aplicar seções filtrantes no revestimento;
- d) Desenvolvimento - destinado a assegurar a produção de água limpa sem carreamento de areia;
- (e) Cimentação - necessária para confecção de uma proteção sanitária ou isolamento de águas de má qualidade; e
- (f) Teste de produção.

De acordo com as características das formações geológicas a serem atravessadas, das características construtivas, custos, diâmetros, profundidade, proteção sanitária e uso pretendido do poço podem se adotar diversos sistemas de perfuração. Desta forma não existe uma resposta única para definir o melhor método de perfuração. Cada método tem suas vantagens que devem ser analisadas caso a caso.

As condições geológicas determinam dois tipos gerais de construção de poços. Um poço que atinge um aquífero de rocha consolidada consiste basicamente em trecho revestido, geralmente atravessando materiais não consistentes, e em um furo na rocha subjacente. Um poço que atinge um aquífero constituído de areia deve ser dotado de um revestimento que atravesse os materiais rochosos e de um filtro apropriado ao aquífero propriamente dito. JOHNSON DIVISION (1978).

Os métodos de perfuração e equipamentos de poços são tão numerosos que somente os princípios básicos e algumas de suas aplicações podem ser aqui descritos. Os princípios básicos em cada caso, contudo permitem dar certa idéia dos limites de uso prático de qualquer método, na várias condições. Basicamente são usados três métodos:

- Percussão
- Rotativo
- Rotopneumático

Serão apresentados a seguir os princípios básicos de construção de poços aplicados às principais formações geológicas do Estado, objetivando dar uma noção de sua forma construtiva e de emprego dos equipamentos disponíveis no mercado e estabelecendo informações básicas para a melhor orientação ao usuário interessado na captação de água subterrânea.

#### **6.2.4.1 Percussão**

Segundo DEMÉTRIO e MANOEL FILHO (apud FEITOSA, 1997), o método de perfuração à percussão baseia-se no movimento contínuo de subida e descida de uma ferramenta pesada, golpeando a formação rochosa, desagregando-a e/ou fragmentando-a.

De acordo com MARIANO (1994) esta operação provoca a produção de uma lama formada pelo material desagregado com a água da formação ou injetado artificialmente quando esta não ocorrer. A lama é retirada por caçambeamento. Quando esta lama se acumula muito no fundo provoca um retardo na queda da ferramenta e um atraso na perfuração.

Para que o resultado da perfuração seja eficiente deve-se sincronizar a velocidade da máquina com a queda das ferramentas e com o alongamento do cabo, enquanto se solda uma

quantidade certa de cabo para o avanço do trépano. O trépano deve percutir o fundo com o cabo esticado e ser rapidamente erguido no movimento ascendente provocado pela máquina.

Os fatores que afetam a eficiência da perfuração são a resistência da rocha, o peso das ferramentas de perfuração, o comprimento do curso, o número de batidas por minuto, o diâmetro do trépano, a folga entre as juntas das ferramentas e as paredes do furo, a densidade e a espessura da camada de lama acumulada no fundo.

Os elementos que intervêm na execução de um poço pela percussão são, fundamentalmente a coluna ou ferramenta o movimento ascendente e descendente e a máquina de perfuração que por meio de um balancim, produz este movimento de vai e vem.

Para CAPUCCI (2001), o sistema à percussão é bastante eficaz em materiais rochosos compactos, correspondentes aos granitos e gnaisses. Consiste na elevação e queda de uma série de pesadas ferramentas sustentadas por um cabo de aço dentro do furo, acionadas por meio de um motor diesel que move um excêntrico conectado a um balancim. A ferramenta cortante, denominada trépano, rompe e esmaga a rocha dura em pequenos fragmentos ou, quando opera em rochas moles não consolidadas, amolece o material. Em ambos casos, a ação de vai e vem das ferramentas mistura essas porções trituradas com água para formar uma lama. A lama é retirada a intervalos, do fundo da perfuração, por meio de uma caçamba de limpeza. O conjunto de ferramentas é assim constituído: trépano, haste de perfuração, percussor, porta cabo, cabo de percussão e balancim. Durante o início da perfuração pelo método de percussão em formações inconsolidadas, é necessário revestir preliminarmente as paredes do poço para evitar desmoronamentos. Esta proteção é efetuada com a aplicação, durante a perfuração nos horizontes inconsolidados, de tubos de revestimento preliminar, telescopados em diversos diâmetros, que deverão ser aplicados na medida em que a perfuração evolui, operação esta semelhante à cravação de estacas.

#### **6.2.4.2 Rotativo**

Segundo MARIANO (1994), o sistema rotativo de perfuração, combina o efeito cortante de uma broca que gira, com o de um fluido em circulação contínua que remove o material cortado e levanta-o até a superfície. De acordo com o autor, existem dois variantes principais do sistema:

- Circulação direta, em que o fluido é injetado no poço através de furos na broca;
- Circulação reversa, em que o fluido e os materiais cortados são retirados por meio dos furos na broca.

DEMÉTRIO e MANOEL FILHO (apud FEITOSA, 1997) salientam que as perfuratri- zes para perfuração pelo método rotativo, ou simplesmente sondas rotativas, podem ser má-

quinas de pequeno ou grande porte, dependendo das profundidades e diâmetros a que se destinam.

De acordo com MARIANO (2001), o sistema rotativo é o mais rápido e indicado para perfuração em rochas sedimentares não consolidadas e sedimentos encontrados nas Bacias de Campos, em Duque de Caxias, Itaboraí e Resende. O sistema opera geralmente por circulação direta de lama injetada por bomba através das hastes, dotadas em sua extremidade de uma broca oca em rotação. A lama ascende pelo espaço anelar do furo até chegar à superfície, onde passa por uma peneira vibratória, sendo depois canalizada para um tanque de sedimentação. A partir daí passa para um segundo tanque de armazenamento, onde é captada por uma nova bomba retornando à perfuração. A perfuratriz é girada por uma mesa rotativa permitindo que a haste de perfuração deslize para baixo, na medida em que o furo evolui.

#### **6.2.4.3 Roto pneumático**

Segundo DEMÉTRIO e MANOEL FILHO (apud FEITOSA, 1997) este método consiste na fragmentação da rocha através da combinação de uma percussão em alta frequência com pequeno curso e rotação. O fluido utilizado e principal agente da operacionalidade desse método é ar comprimido procedente de compressores de alta potência. Em geral é utilizado para a perfuração de rochas compactas (cristalino) com excelente rendimento.

Segundo MARIANO (2001), a principal vantagem do sistema roto-pneumático consiste na velocidade de perfuração. Inicialmente, são utilizadas brocas tricônicas nas formações superficiais não consolidadas, de forma análoga ao sistema rotativo, com emprego de circulação de lama para refrigeração e arraste do material perfurado. Encontrada a rocha sã, o encaixe é realizado com brocas de vídia e a perfuração é aprofundada por martetele acionado a ar comprimido por compressor de grande capacidade, percutindo um martelo pneumático com bit terminal geralmente com 6,5” ou 6”. Para refrigerar o bit é necessário a utilização de água, geralmente armazenada em um carro-pipa, para evitar a formação de poeira, necessitando-se assim de grande espaço para o canteiro de obras.

Ainda, de acordo com o autor, este método é mais adequado quando se perfura poços com pequena cobertura de solo, como os encontrados no Norte e Noroeste do Estado. Tem a vantagem de detectar imediatamente a profundidade aproximada das fraturas produtoras eventualmente ultrapassadas, no momento que a água jorra expelida junto com o ar comprimido na boca do furo. Ao mesmo tempo, permite fornecer um valor aproximado da vazão do poço e conhecer a qualidade expedita da água produzida.

De acordo com CAPUCCI (2001) a principal vantagem do sistema roto-pneumático consiste na velocidade de perfuração. Inicialmente, são utilizadas brocas tricônicas nas forma-

ções superficiais não consolidadas, de forma análoga ao sistema rotativo, com emprego de circulação de lama para refrigeração e arraste do material perfurado. Encontrada a rocha sã, o encaixe é realizado com brocas de vídia e a perfuração é aprofundada por martetele acionado a ar comprimido por compressor de grande capacidade, percutindo um martelo pneumático com bit terminal geralmente com 6,5” ou 6”. Para refrigerar o bit é necessário a utilização de água, geralmente armazenada em um carro-pipa, para evitar a formação de poeira, necessitando-se assim de grande espaço para o canteiro de obras.

Este método é mais adequado quando se perfura poços com pequena cobertura de solo, como os encontrados no Norte e Noroeste do Estado. Tem a vantagem de detectar imediatamente a profundidade aproximada das fraturas produtoras eventualmente ultrapassadas, no momento que a água jorra expelida junto com o ar comprimido da boca do furo. Ao mesmo tempo, permite fornecer um valor aproximado da vazão do poço e conhecer a qualidade expedida da água produzida.

#### **6.2.4.4 Perfilagem Geofísica de Poço**

Segundo NERY (apud FEITOSA, 1997), a perfuração de um poço tubular constitui-se na última fase da prospecção de minérios, petróleo ou suprimento de água subterrânea. Para ele, é imprescindível que, logo aos primeiros metros perfurados, sejam realizados estudos para identificar os vários tipos litológicos atravessados, localizar aqueles intervalos de rocha que possam conter o objetivo (minério, petróleo ou água) e avaliar o significado qualitativo e comercial deste. De acordo com DEMÉTRIO e MANOEL FILHO (apud FEITOSA, 1997), a amostragem do material atravessado durante a perfuração de um poço é uma informação fundamental para o projeto final do mesmo, bem como para o conhecimento da geologia da área. O intervalo de amostragem depende da precisão pretendida, normalmente é utilizado o espaçamento de três metros entre as ameaças.

Ainda segundo os autores, durante a amostragem da calha, vários são os fatores que prejudicam a descrição e o posicionamento da amostra no perfil do poço. Com o objetivo de refinar o conhecimento da seqüência litológica atravessada, vários perfis são corridos ao longo de toda a perfuração, analisando as diferentes propriedades físicas das rochas. A este processo denomina-se de perfilagem geofísica do poço e as propriedades físicas analisadas normalmente são emissão de radiação gama natural, resistividade, potencial espontâneo (Sp), temperatura e salinidade.

De acordo com NERY (apud FEITOSA, 1997), a perfuração de um poço tubular constituiu-se na última fase da prospecção de minérios, petróleo ou suprimento de água subterrânea. É imprescindível que, logo aos primeiros metros perfurados, sejam realizados estudos para identificar os vários tipos litológicos atravessados, localizar aqueles intervalos de rocha que possam conter o objetivo (minério, petróleo ou água) e avaliar o significado qualitativo e comercial deste, se presente.

Ainda, segundo os autores, perfurar poços tubulares para suprimento de água subterrânea é uma operação relativamente fácil. Difícil é a escolha dos intervalos potencialmente produtores (topos e bases) para a colocação de filtros (completação do poço), de modo a garantir a sua vida produtiva futura e a realização de uma drenagem máxima da água contida nos seus poros. Diante disso, as operações de assentamento de filtros, além do aspecto econômico, devem ser executadas atendendo a certos requisitos básicos, tais como:

- Durante, ou logo após, a perfuração do poço é imperativo a obtenção do maior número de informações acerca das características petrofísicas dos aquíferos, tais como: espessuras, granulometrias, qualidades ou potabilidades das águas e teores de argila (a argilidade diminui a permeabilidade dos aquíferos);
- Tentar manter, durante a perfuração, o diâmetro do poço o mais uniforme possível, principalmente defronte, e adjacientemente, aos intervalos produtores de água;
- Tentar manter desobstruído, o máximo possível, a comunicação entre os intervalos produtores de água e o poço, de modo a poder aproveitar racionalmente a energia dos mesmos, durante a fase de drenagem, evitando que suas permeabilidades sejam alteradas quer pelo excesso de invasão do filtrado do fluido de perfuração, quer pela migração de suas próprias argilas ou de aquíferos vizinhos;
- Abrir ao fluxo a maior área possível dos aquíferos economicamente viáveis;
- Manter isolados, entre si, os vários aquíferos de características indesejáveis

De acordo com NERY (apud FEITOSA, 1997), o perfil de raio gama é o registro contínuo dos pulsos (fótons) emitidos pela radiação natural liberada pelos elementos Urânio, Tório e Potássio, existentes em qualquer rocha, ígnea, metamórfica ou sedimentar. A emissão de fótons obedece a uma distribuição gaussiana, isto é, o desvio padrão da curva é igual à raiz quadrada do número das observações realizadas.

#### **6.2.4.5 Instalação de Filtros para poços e Encascalhamento**

A colocação do filtro é parte do processo de acabamento de um poço tubular que, afora a perfuração propriamente dirá, inclui operações indispensáveis para que o poço esteja em condições de um uso satisfatório. A instalação do filtro é, em geral, precedida da cimentação do tubo de revestimento e complementada pelo desenvolvimento do poço e sua desinfecção. (JOHNSON DIVISION (1978).

Os processos de instalação de filtros variam com o projeto do poço e com o método utilizado na sua perfuração. Certos problemas encontrados na operação de perfuração poderão também ditar um método particular de colocação, contrariando o que foi inicialmente idealizado.

O processo conhecido como retração do revestimento é geralmente utilizado quando o poço é perfurado pelo método de percussão e consiste na introdução do filtro por dentro do revestimento, até atingir a profundidade total do poço, após o que se processa a retirada parcial do tubo. O filtro fica, dessa forma, exposto à camada arenosa aquífera.

Cabe também enfatizar que o método rotativo é o meio de retração mais prático de todos. Concluída a perfuração, o tubo de revestimento é introduzido no poço e cuidadosamente limpo por dentro. O filtro é, então, colocado até atingir o fundo e o tubo retirado parcialmente para que o filtro fique exposto à formação aquífera. A principal diferença nesse método é que o tubo de revestimento fica suspenso na superfície por meio de garras e grampos, durante o desenvolvimento do poço.

Segundo CAPUCCI (2001), após a instalação do revestimento do poço, é aplicado cascalho de quartzo com granulometria apropriada em torno do filtro. O cascalho aumenta o diâmetro efetivo do poço, atuando como um pré-filtro. Permite a passagem do material fino para o poço durante a fase de limpeza (desenvolvimento), protegendo o revestimento do desmoronamento das formações produtoras circundantes. A granulometria do cascalho a empregar varia com o tipo da formação, sendo importantíssimo a correta escolha de sua dimensão, considerando que a areia deve ser retida em seu envoltório, onde a velocidade de entrada é mais baixa. Deve haver, entretanto, uma zona bastante permeável em torno dos filtros. O filtro utilizado deverá ter aberturas que retenham de 75% a 90% do material envoltório.

#### **6.2.4.6 Desenvolvimento**

Segundo CAPUCCI (2001), o objetivo do desenvolvimento é melhorar a quantidade e qualidade da água, aumentando a capacidade específica do poço e evitando o bombeamento de areia e alta turbidez. Tais resultados são conseguidos pela remoção do material fino das

formações naturais que envolvem o filtro. Todo o método de perfuração obstrui os poros da formação aquífera em torno do furo aberto, em maior ou menor extensão. Assim, o correto desenvolvimento desobstrui os poros do aquífero, aumentando sobremaneira a sua permeabilidade na vizinhança dos filtros.

Os principais métodos de desenvolvimento de um poço são: pistoneamento, injeção de ar comprimido, bombeamento com injeção de água sob pressão ou com bomba submersa e lavagem com adição de gelo seco. Normalmente, são utilizados métodos combinados, concluindo-se os serviços com aparecimento de água isenta de turbidez.

Segundo DEMÉTRIO e MANOEL FILHO (apud Feitosa, 1997), o desenvolvimento do poço é uma operação cuja finalidade principal é aumentar a condutividade hidráulica natural nas proximidades do poço e corrigir danos causados à formação pela perfuração (compactação, colmatagem, etc). De acordo com os autores, todos os poços novos devem ser desenvolvidos logo após a conclusão.

A operação do desenvolvimento é fundamental para o perfeito acabamento do poço e para lhe assegurar o máximo da capacidade e como vantagens verifica-se a correção de qualquer dano ou obstrução da formação aquífera, decorrente de um efeito marginal da perfuração; aumenta a porosidade e a permeabilidade da formação na vizinhança do poço e estabiliza a formação arenosa em torno de um poço dotado de filtro, permitindo fornecer água isenta de areia.

#### **6.2.4.7 Cimentação**

Para CAPUCCI (2001), a cimentação do poço consiste no enchimento do espaço que se forma entre o tubo de revestimento e a parede da formação, com uma pasta conveniente de água, cimento e areia. A cimentação visa essencialmente o seguinte:

- Evitar a penetração de água superficial contaminada ao longo da face externa do revestimento;
- Isolar a água de qualidade indesejável contida em camada situada acima da formação aquífera desejada;
- Fixar o revestimento; e
- Formar um envoltório protetor ao redor do tubo, para prolongar sua vida útil mediante proteção contra corrosão externa.

De acordo com DEMÉTRIO e MANOEL FILHO (apud FEITOSA, 1997), as principais finalidades da cimentação são:

- Vedação – quando um poço é abandonado, seja qual for o motivo, deve ser totalmente preenchido com pasta de cimento, eliminando um meio de acesso para a penetração de poluentes no aquífero;
- Fixação – é uma das finalidades básicas no que diz respeito à construção do poço e tem como objetivo fixar o revestimento à parede do poço de forma a estabilizar permanentemente a obra;
- Proteção sanitária – a cimentação do espaço anelar da parte mais superior do poço impedirá que águas poluídas da superfície se infiltrem e contaminem a água captada pelo poço;
- Proteção – tem como objetivo proteger o revestimento da ação de águas agressivas;
- Separação de Aquíferos – quando existem vários níveis de aquíferos e entre eles um ou mais apresentam água imprópria para consumo, os níveis indesejáveis são separados por cimentação;
- Correções de desvios de perfuração – quando por algum problema a perfuração sofre desvio de verticalidade que venha comprometer a descida do revestimento ou outras operações, pode-se corrigir este defeito fazendo-se uma cimentação do trecho que sofreu desvio, e posteriormente reabrir o poço.

### **6.2.5 Identificação da Qualidade de Água**

Segundo JORBA (1982) o registro das características físico-químicas e bacteriológicas da água do poço deve ser obtido através de uma análise logo após a sua construção. É um documento indispensável e é recomendado que a primeira análise seja a mais completa possível. De acordo com CAPUCCI (2001), na captação de água subterrânea através de poços, não é importante apenas o aspecto da quantidade, isto é, a vazão a ser obtida. A qualidade da água subterrânea é outro fator a ser considerado, tendo em vista o uso proposto para a água a ser captada. Segundo (JOHNSON DIVISION (1978) e CAPUCCI (2001), o relativamente lento movimento da água subterrânea infiltrando-se no solo propicia-lhe um íntimo e demorado contato com os minerais que formam a crosta terrestre e que nela vão se dissolvendo em maior ou menor proporção. Assim a água subterrânea vai aumentando o seu teor em substâncias dissolvidas à medida que prossegue no seu movimento, até que entre essas seja alcançado um equilíbrio. Muitos fatores do meio influem nos processos químicos e ela pode sofrer a influência de outros fatores como composição da água de recarga, tempo de contato água/meio físico, clima e até mesmo a poluição causada pelas atividades humanas.

Pelas mesmas razões, possui menores teores de matérias em suspensão e matéria orgânica, esta última devida também à ação dos microorganismos presentes no solo. Também, devido às suas condições de circulação, as águas subterrâneas tendem a possuir menor teor de oxigênio dissolvido do que as superficiais. Os minerais dissolvidos na água subterrânea afetam seus usos específicos. Se uma ou mais substâncias dissolvidas estiverem presentes em quantidade em quantidade superior à que pode ser tolerada, a água deve ser submetida a um tratamento que as elimine ou as remova, de modo que possa servir para o fim pretendido.

A maior parte das águas subterrâneas não contém matéria em suspensão e, praticamente nenhuma bactéria. Na maioria dos casos é límpida e incolor. São características que contrastam com as da água superficiais, em geral turvas e com considerável teor de bactérias. A água subterrânea é de superior qualidade sanitária. A qualidade é definida pelas características físicas, químicas e biológicas da água. Dentro dos valores encontrados para cada um dos parâmetros, é possível estabelecer os diferentes usos: consumo humano, irrigação, industrial e outros. O uso a que a água se destina ou o resultado dos testes a que foi submetida indicam, em grande parte, quais os constituintes devem ser investigados. A maior parte das águas subterrâneas, quando suficientemente pobres em sais minerais, é potável e servem para o uso normal sem tratamento ou com tratamento mínimo (filtração e cloração), a menos que se encontrem contaminadas.

A Portaria nº 518 do Ministério da Saúde de 25 de março de 2004 estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Esta portaria abrange a água proveniente de mananciais superficiais e subterrâneos. Define os padrões de potabilidade e seus respectivos Valores Máximos Permissíveis, que estão descritos nas Tabelas 1,2,3,4 e 5 desta portaria. O plano de amostragem está descrito nas Tabelas 6, 7, 8 e 9. Este plano define a quantidade, frequência da amostragem e parâmetros a serem analisados de acordo com o tipo de manancial (superficial ou subterrâneo). **(Tabela 6.8)**

**Tabela 6.8 – Lista de tabelas da Portaria nº 518**

<b>Tabelas</b>	<b>Descrição</b>
Tabela 1	Padrão Microbiológico de potabilidade da água para consumo humano
Tabela 2	Padrão de turbidez para água pós-filtração ou pré-desinfecção
Tabela 3	Padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde
Tabela 4	Padrão de radioatividade para água potável
Tabela 5	Padrão de aceitação para consumo humano
Tabela 6	Número mínimo de amostras para o controle da qualidade da água de sistema de abastecimento, para fins de análises físicas, químicas e de radioatividade, em função do ponto de amostragem, da população abastecida e do tipo de manancial
Tabela 7	Frequência mínima de amostragem para o controle da qualidade da água de sistema de abastecimento, para fins de análises físicas, químicas e de radioatividade, em função do ponto de

	amostragem, da população abastecida e do tipo de manancial
Tabela 8	Número mínimo de amostras mensais para o controle da qualidade da água de sistema de abastecimento, para fins de análises microbiológicas, em função da população abastecida
Tabela 9	Número mínimo de amostras e frequência mínima de amostragem para o controle da qualidade da água de solução alternativa, para fins de análises físicas, químicas e microbiológicas, em função do tipo de manancial e do ponto de amostragem

**Fonte: Portaria nº 518, modificada pelo autor.**

O item III do artigo 4º define a solução alternativa de abastecimento de água para consumo humano como toda modalidade de abastecimento coletivo de água distinta do sistema de abastecimento de água, incluindo, entre outras, fonte, poço comunitário, distribuição por veículo transportador, instalações condominial horizontal e vertical;

Assim sendo o sistema de abastecimento de água através de poços tubulares profundos, sistema considerado alternativo, de acordo com a definição e deve seguir no mínimo a frequência de amostragem e controle de qualidade definida na Tabela 9.

Como o objetivo da Portaria nº 518 é a potabilidade, ela não atende a todos os requisitos que são necessários para uma melhor avaliação hidroquímica do aquífero. Assim sendo é importante que além dos itens constantes da portaria nº. 518, sejam analisados os seguintes elementos e parâmetros: Gás carbônico livre, oxigênio dissolvido, condutividade, sílica, cálcio, magnésio, carbonato, bicarbonato, alcalinidade, resíduo seco. É importante mais uma vez salientar que os parâmetros definidos na Portaria nº 518 do Ministério da Saúde e os descritos acima não exaurem as possibilidades de controle de acordo coma finalidade e uso da água. De acordo com a qualidade da água encontrada, será necessário definir um tratamento de modo a adequar a água captada no manancial subterrâneo ou superficial a sua finalidade de uso.

Como recomendação devemos realizar pelo menos uma análise completa de acordo com a Portaria nº 518, mais os parâmetros descritos acima para cada poço perfurado. De forma a definir a Estação de Tratamento adequada, sugere-se selecionar os parâmetros e elementos mais relevantes e proceder a duas novas análises, em paralelo em dois laboratórios diferentes. Posteriormente a implantação do tratamento deverá ser realizada uma análise completa de acordo com a Portaria nº 518.

#### **6.2.6. Testes de Bombeamento em Poços e Aquíferos**

Em uma classificação ampla, os testes de bombeamento podem ser divididos em teste de produção (bombeamento) e teste de aquífero.

O objetivo do teste de bombeamento de um poço é determinar o comportamento do poço em funcionamento e obter informações sobre o desempenho e eficiência do poço em teste. O resultado é expresso em termos de medições de vazão, rebaixamento e capacidade

específica calculada. Estes dados têm aplicação direta na determinação dos elementos para a escolha e seleção da bomba que melhor se adaptará a operação permanente do poço.

Os testes de bombeamento podem servir para outros objetivos importantes, desde que sejam feitos de modo adequado. Bem planejados e cuidadosamente aplicados, os testes revelam fatos e dados importantes sobre o reservatório de águas profundas, de modo que os principais fatores de desempenho do aquífero possam ser calculados. Este teste é denominado Teste do Aquífero.

De modo a melhor entender o teste é importante conhecer as definições descritas na **Tabela 6.9**:

**Tabela 6.9 - Definições**

<b><i>Nível estático (NE) m</i></b>	Nível piezométrico do poço, posição da água medida com o poço em repouso
<b><i>Nível Dinâmico (ND) m</i></b>	Nível da água durante o bombeamento. Normalmente à medida que reflete melhor este parâmetro é obtida após um tempo pré definido de bombeamento a vazão constante
<b><i>Vazão (Q): m<sup>3</sup>/h ou (l/h)</i></b>	É o volume de água a ser produzida pelo poço
<b><i>Rebaixamento (s) m</i></b>	Quando um poço é bombeado, o nível de água é rebaixado. O rebaixamento de um poço é a diferença entre o nível dinâmico (ND) e o estático (NE) $s = ND - NE$
<b><i>Vazão específica (Q/s):</i></b>	É a medida de capacidade efetiva de produção de um poço
<b><i>Regime de bombeamento</i></b>	É o tempo e a frequência de bombeamento recomendados, após a análise dos parâmetros do poço, volumes outorgados, demanda e etc.

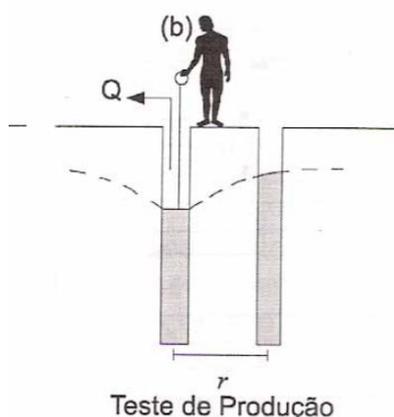
Fontes: GIAMPÁ E GONÇALES (2005) e NBRs 12.212 e 12.244

Para FEITOSA, F. (apud FEITOSA, 1997), em uma classificação mais ampla, os testes de bombeamento podem ser divididos em testes de aquífero e testes de produção. O teste de aquífero, nada mais é, do que um bombeamento que tem por finalidade a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do meio poroso. A sua execução consiste no bombeamento de um poço com uma vazão constante Q e no acompanhamento da evolução dos rebaixamentos produzidos em um (ou mais de um) poço de observação ou piezômetro situado a uma distância r qualquer do poço bombeado.

### 6.2.6.1 Testes de Produção (Bombeamento)

A preparação prévia do teste é fundamental. De acordo com JORBA e ROCHA (1982) é preciso organizá-lo a partir do conhecimento das condições hidrogeológicas locais, e das características de construção do poço, escolhendo o equipamento mais adequado e programando a execução. Ainda segundo os autores, a execução de um teste de bombeamento requer um planejamento prévio que deve incluir não só os equipamentos e aparelhos necessários, mas, fundamentalmente, uma diretriz clara em relação ao tipo de informação que se deseja obter.

Para FEITOSA, F. (apud FEITOSA, 1997), o teste de produção é um bombeamento que tem por finalidade a determinação das perdas de carga totais que ocorre num poço ( $BQ + CD^n$ ). A sua execução consiste na realização de um bombeamento e no registro da evolução dos rebaixamentos no próprio poço bombeado. **(Figura 6.5)**

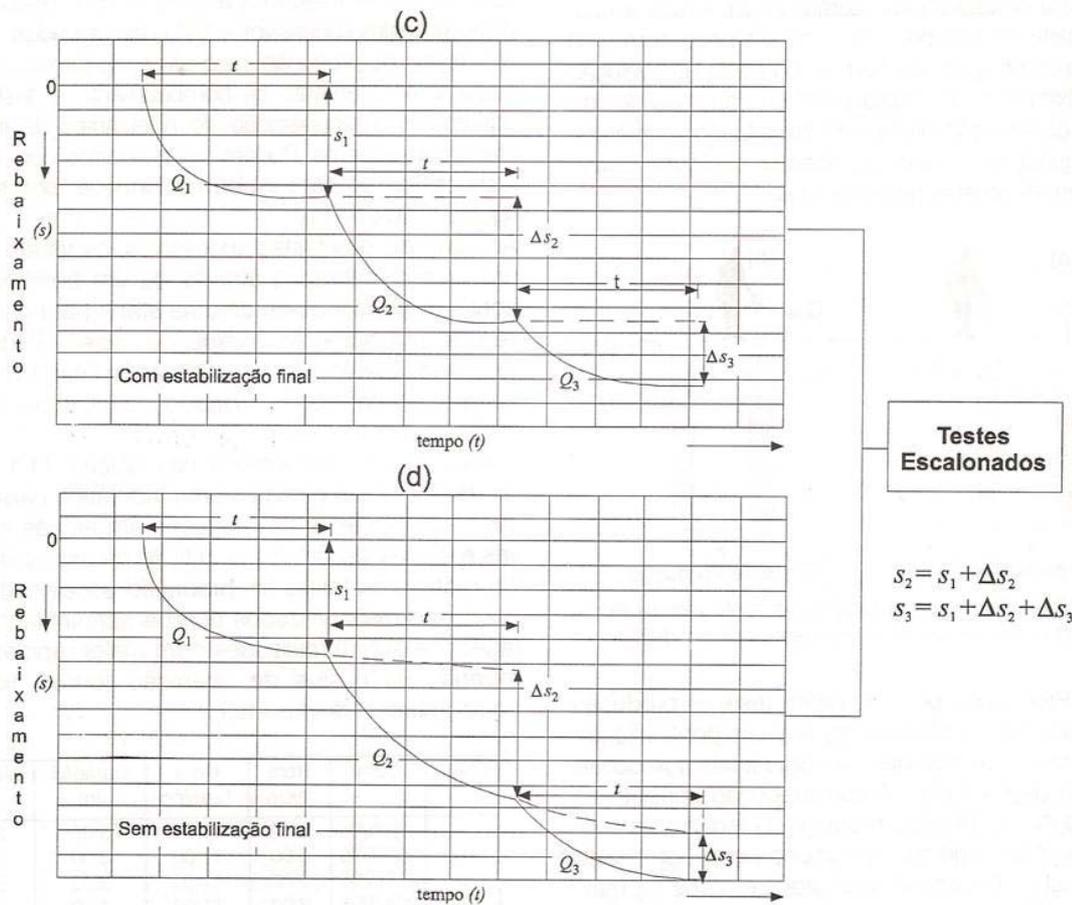


**Figura 6.5 – Teste de Produção. Fonte: FEITOSA, F. (apud FEITOSA, 1997)**

Segundo FEITOSA, F. (apud FEITOSA, 1997), devem ser realizados em três ou mais etapas. A cada etapa a vazão deve aumentar de modo que  $Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_i$  (onde  $Q_i$  é a vazão da etapa  $i$  de bombeamento, sendo  $i = 1, 2, 3 \dots k$ ). Entretanto, durante o período de tempo correspondente a cada etapa, a vazão deve ser mantida constante.

O ideal é que a vazão aumente em progressão geométrica, porém, na prática, muitas vezes isto não é possível, devendo-se, nestes casos, escalonar a vazão entre um mínimo e um máximo, em função do rendimento da bomba. É recomendável que a maior vazão ( $Q_k$ ) seja da mesma ordem de grandeza (ou superior) daquela cogitada como vazão de exploração. Esta recomendação é calcada no fato de ser a curva obtida ( $BQ + CQ^n$ ) rigorosamente válida para o intervalo compreendido entre as vazões extremas ( $Q_1$  e  $Q_k$ ), sendo as extrapolações pouco confiáveis. Podem ser realizados através de duas metodologias distintas: testes sucessivos e testes escalonados.

Nos testes de produção sucessivos, ao término de cada etapa o equipamento de bombeamento é desligado e aguarda-se a recuperação do nível antes do início da etapa subsequente. Ao contrário dos testes sucessivos, os testes escalonados são realizados através de um bombeamento contínuo, passando-se de uma etapa para outra através de um aumento brusco da vazão. Podem ser realizados com ou sem estabilização final do nível em cada intervalo, como ilustrado na **Figura 6.6**, Curva de Rebaixamento x tempo em Testes de Produção Escalonado, abaixo.



**Figura 6.6 - Curva de Rebaixamento x Tempo em Testes de Produção Escalonado. Fonte: FEITOSA, F. (apud FEITOSA, 1997)**

A seguir, são apresentados nas **Tabelas 6.10 e 6.11**, os dados de um planejamento hipotético para a execução de um teste de produção em etapas sucessivas e etapas escalonadas, a título de exemplificação. Na prática, os testes de produção escalonados, em geral, são mais utilizados porque apresentam a vantagem de serem realizados com maior rapidez, minimizando os custos de operação (custo diário de equipamentos, diárias, etc.).

**Tabela 6.10 - Planejamento para um teste de produção em etapas sucessivas**

Etapa	Data	Hora Início	Hora Término	Duração (h)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)
1	19/05/95	8:00	11:00	3:00	2,00
2	20/05/95	8:00	11:00	3:00	3,50
3	21/05/95	8:00	11:00	3:00	5,00
4	22/05/95	8:00	11:00	3:00	7,00
5	23/05/95	8:00	11:00	3:00	10,00

Fonte: FEITOSA, F. (apud FEITOSA, 1997)

**Tabela 6.11 – Planejamento para um teste de produção em etapas escalonadas**

Etapa	Data	Hora Início	Hora Término	Duração (h)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)
1	19/05/95	8:00	11:00	3:00	2,00
2	19/05/95	11:00	14:00	3:00	3,50
3	19/05/95	14:00	17:00	3:00	5,00
4	19/05/95	17:00	20:00	3:00	7,00
5	19/05/95	20:00	23:00	3:00	10,00

Fonte: FEITOSA, F. (apud FEITOSA, 1997)

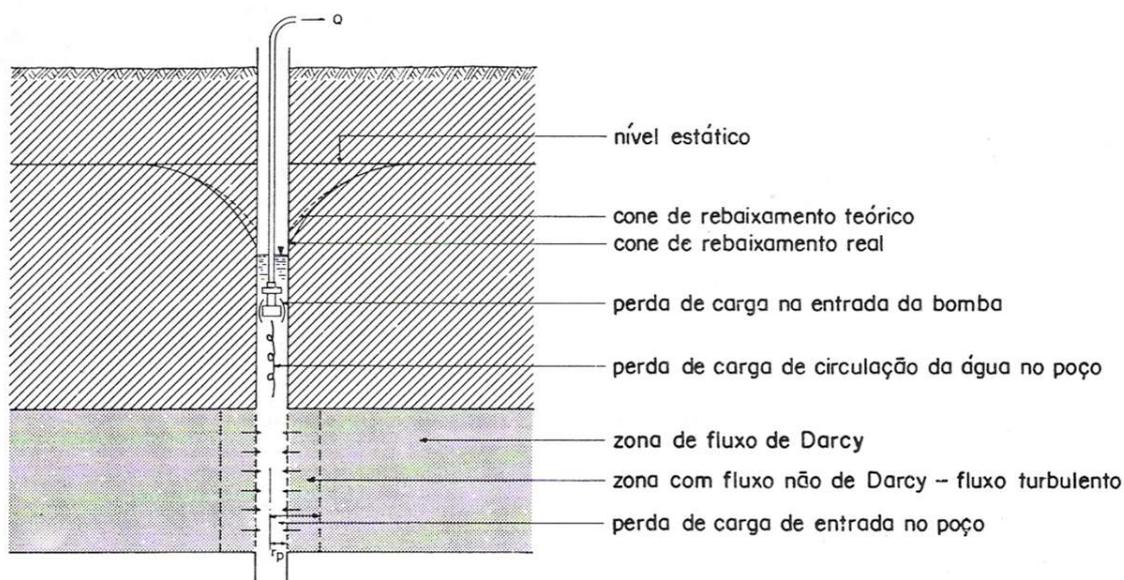
O teste de bombeamento e recuperação deve seguir a metodologia preconizada na Norma NBR 12244, “Construção de poço para captação de água subterrânea”, item 6. Deve ser iniciado com a vazão máxima de projeto e ter a duração de no mínimo 24 horas. Uma vez terminado o teste de produção, deve-se proceder ao teste de recuperação do nível, durante um período mínimo de 4 horas. O teste de produção escalonado deve ser efetuado em etapas de mesma duração, com vazões progressivas em regime contínuo de bombeamento, mantida a vazão constante em cada etapa. A passagem de uma etapa a outra deve ser feita de forma instantânea, sem interrupção do bombeamento.

A vazão determinada por estes testes pode ter a influência da estação seca ou chuvosa durante o ano, no caso de exploração de um aquífero livre, que possui a sua recarga direta pela infiltração. Nestes casos a operação continuada do sistema poderá indicar a necessidade de diminuição da vazão a ser explorada ou um aumento da mesma. No caso de um aquífero confinado, esta influência pode ser desprezível, em função da recarga não ser direta, normalmente ocorrer distante do local da exploração e também em função dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero.

Segundo JORBA (1982), MARIANO e LINHARES (1994), e JOHNSON DIVISION (1978) a determinação da vazão ótima explorável, das perdas de carga e da eficiência de um poço é realizada a partir de um teste de produção em etapas (escalonado). Os procedimentos

para a realização deste tipo de teste são relativamente simples e podem muito bem ser aplicados por um técnico qualificado. Porém, sua preparação prévia é fundamental; é preciso organizá-lo a partir do conhecimento das condições hidrogeológicas locais, e das características de construção do poço, escolhendo o equipamento mais adequado e programando a execução.

O rebaixamento real, medido num poço em bombeamento, é uma somatória de rebaixamentos devidos a perdas de carga no aquífero e as perdas de carga no poço (**Figura 6.7**).



**Figura 6.7 - Causas do rebaixamento em poços. Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 1994**

As perdas de carga no aquífero produzem o rebaixamento necessário para que a água flua para o poço em regime laminar e dependem, fundamentalmente das características do aquífero (permeabilidade e porosidade) e do diâmetro do poço.

As perdas de carga do poço produzem um sobre-rebaixamento que é uma soma dos seguintes fatores:

- Perdas de carga em torno do poço, devido ao aumento de velocidade da água. Este tipo de perda pode ser significativo em poços com filtros subdimensionados, ou mal desenvolvidos;
- Perdas de carga devidas à ascensão da água no poço, desde a zona filtrante até a bomba. Este tipo de perda só é significativo quando essa distância é grande ou quando o diâmetro da tubulação é pequeno em relação à vazão;
- Perdas de entrada na bomba: quando o espaço entre o corpo da bomba e a parede da tubulação é muito pequeno.

Segundo JACOB (apud JORBA,1982) o rebaixamento real em um poço bombeado obedece aproximadamente a equação:

$$s = (BQ + CQ^2). \quad (6.1)$$

onde

s é o rebaixamento real, medido no poço em bombeamento, em metros.

B é o coeficiente de perda do aquífero

C é o coeficiente de perdas do poço

Q é a vazão, em m<sup>3</sup>/hora

O termo BQ da equação representa o rebaixamento devido às perdas do aquífero. O coeficiente B é função do tempo de bombeamento.

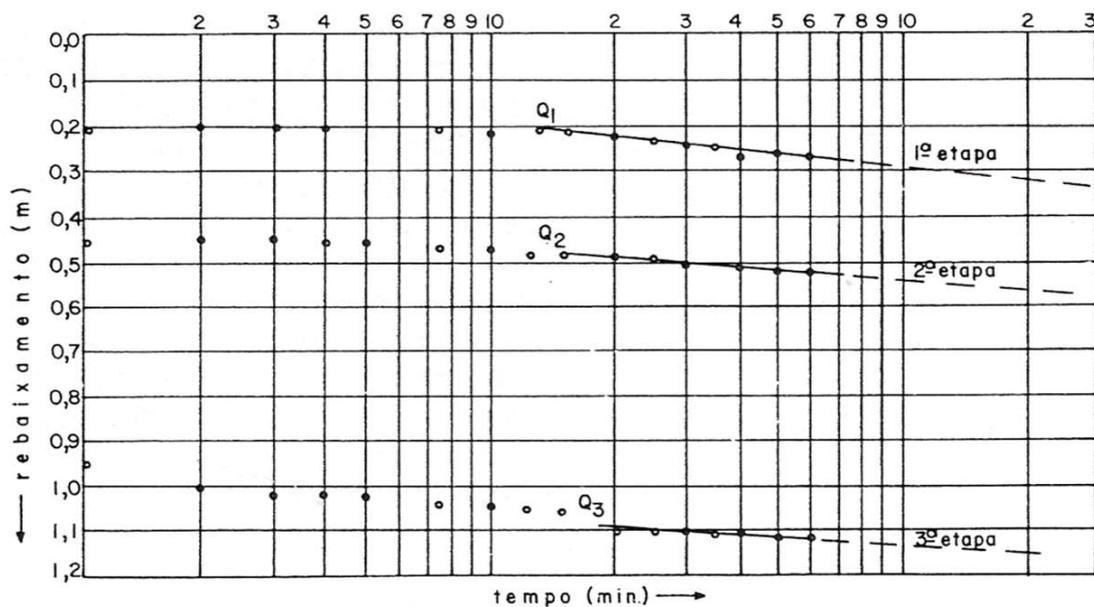
O termo CQ<sup>2</sup> representa o sobre-rebaixamento devido às perdas de carga do poço. O coeficiente C independe do tempo.

Para determinar os coeficientes B e C é necessário conhecer os rebaixamentos correspondentes a três ou quatro vazões distintas, ou seja, é necessário efetuar um teste de bombeamento em etapas ou teste de produção (teste escalonados).

Segundo JORBA (1982), MARIANO e SILVEIRA (1994) a metodologia da execução dos testes deve-se obedecer aos seguintes critérios:

- Antes de ligar a bomba, faça 3 medidas de nível d'água, de meia em meia hora, a fim de se certificar da posição do nível estático.
- Estabeleça o escalonamento das vazões de teste levando em conta a vazão prevista do poço e a capacidade de extração da bomba (a vazão do poço é avaliada durante o desenvolvimento ou por meio de bombeamento expedito). As vazões devem ser aproximadamente de 30 %, 60 % e 100 % da vazão prevista do poço (ou da capacidade máxima da bomba), correspondentes à 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>, e 3<sup>a</sup> etapas. Não se deve programar etapas de vazões muito próximas.
- Ligue a bomba e passe a fazer as medidas de nível d'água na seqüência de tempos indicada. Controle a vazão da 1<sup>a</sup> etapa, por meio de regulagem e medidas constantes. Deve-se contar com pessoa: suficiente para efetuar estas medidas simultâneas, especialmente nos primeiros 10 minutos, quando as leituras são feitas a cada minuto. Importante: não esqueça de acertar os relógios para a mesma hora de início do bombeamento. Na primeira meia hora, os tempos devem ser controlados com cronômetro; depois, pode-se prosseguir com relógio.
- Decorrida a primeira hora de teste, passe a colocar as medidas em gráficos. Em papel "monolog" coloque os pontos de medida de nível d'água (ou de rebaixamento) em ordenadas e os tempos correspondentes em escala logarítmica.

- Uma vez estabilizado o nível dinâmico para a 1ª vazão, passe para a segunda etapa, procedendo da mesma maneira, isto é, obedecendo à seqüência de tempos como se fosse um novo bombeamento. E assim sucessivamente, até o final do teste.
- Concluindo o teste, faça a representação gráfica dos rebaixamentos com o tempo, tal como indicado na **Figura n.º 6.8** - Representação gráfica do teste de rebaixamento em etapas (papel monolog).



**Figura 6.8 - Representação gráfica do teste de rebaixamento em etapas. Fonte JORBA, 1982**

- Organize, a seguir, os resultados do teste postos em gráfico conforme a Tabela 6.12.

**Tabela 6.12 - Disposição dos resultados de teste de bombeamento em etapas.**

n. estático (m)	Etapa	Q (m <sup>3</sup> /h)	ND (m)	s (m)	Duração (h)	Q/s	s/Q
2,71	1ª	12	16,38	13,67	10	0,88	1,14
	2ª	18,86	25,95	23,24	10	0,81	1,23
	3ª	29,33	43,01	40,30	3,5	0,73	1,37
	4ª	31,70	72,21	69,50	4	0,46	2,19

Fonte: MARIANO e SILVEIRA (1994)

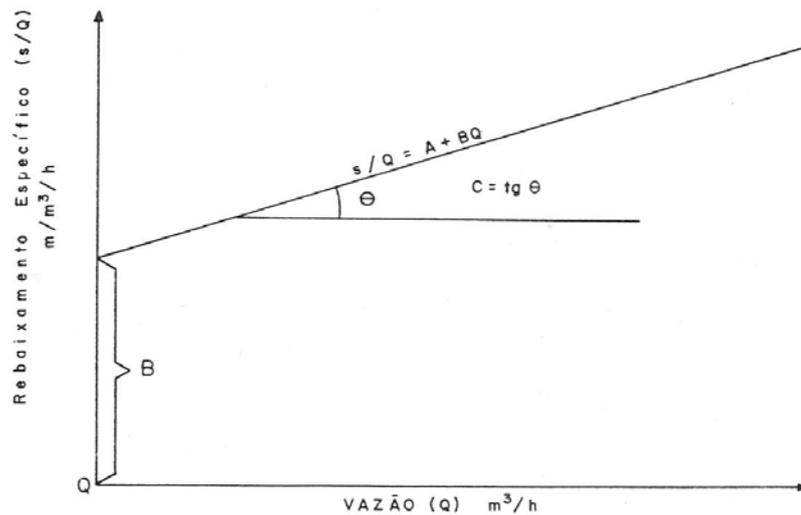
Os valores de s (rebaixamento) correspondentes a cada etapa devem ser tomados os intervalos de tempo aproximadamente iguais e sempre referidos ao nível inicial (estático).

#### 6.2.6.1.1 Determinação das Perdas de Carga e da Vazão Máxima Explotável

De acordo com Mariano e Silveira (1994), a equação dos rebaixamentos (6.1), pode também ser escrita da seguinte forma:

$$S/Q = B + CQ \quad (6.2)$$

Esta equação caracteriza uma reta. Em um gráfico, em papel milimetrado, em escala conveniente colocam-se, em abscissas os valores  $Q_1, Q_2, Q_3$  e  $Q_4$  do teste, e em ordenadas os valores  $s_1/Q_1, s_2/Q_2, s_3/Q_3, s_4/Q_4$ , (rebaixamento específico) calculados (**Figura 6.9**).



**Figura 6.9 - Representação gráfica da equação característica do poço. Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 1994**

Os coeficientes de perda de carga do aquífero ( $B$ ) e do poço ( $C$ ) são determinados graficamente. Os valores determinados são substituídos na Equação (6.1) obtendo-se a **equação característica do poço**.

Com base nos resultados do teste, constrói-se um outro gráfico "vazão-rebaixamento", que é a curva característica do poço (**Figura 6.10**).

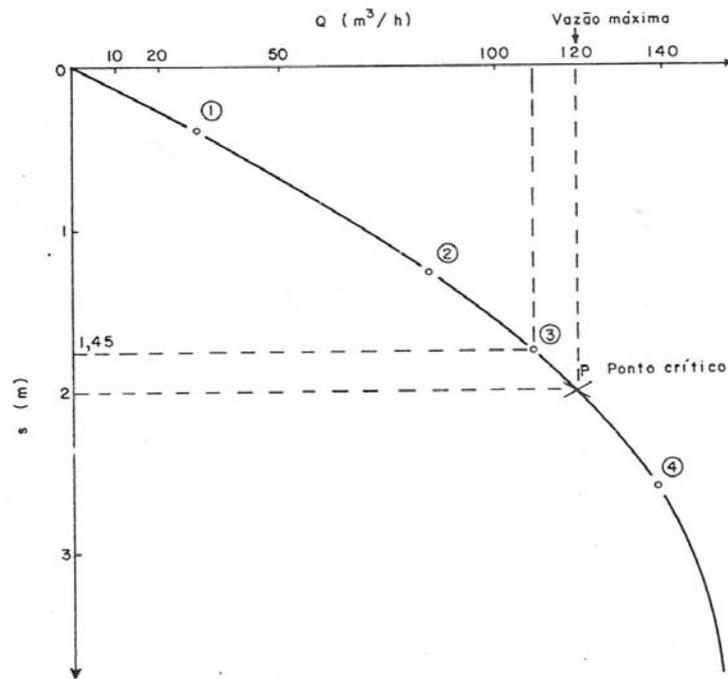


Figura 6.10 - Curva característica de poço. Fonte MARIANO e SILVEIRA, 1994

A curva característica é constituída de duas partes: um setor OP praticamente uma reta, correspondente a rebaixamentos relativamente pequenos. Para rebaixamentos acentuados, a inclinação da curva aumenta rapidamente com o aumento da vazão. Existe um ponto P a partir do qual o aumento dos rebaixamentos é bastante desproporcional a pequenos aumentos de vazão. É o **ponto crítico**. A vazão máxima ou a vazão crítica corresponde ao rebaixamento no ponto crítico e não pode ser ultrapassada na exploração do poço. Acima desta vazão o fluxo entra em regime turbulento. Uma vez conhecidas as perdas de carga e a vazão máxima explorável é, então, possível calcular o rebaixamento correspondente à vazão de extração desejada, de acordo com a equação característica do poço (6.1).

#### 6.2.6.1.2 Determinação da Eficiência

A eficiência  $e$  de um poço é definida como relação entre a vazão específica teórica e a vazão específica real, ambas referidas a um tempo igual de bombeamento. Para o cálculo do rebaixamento teórico é necessário conhecer os coeficientes transmissividade ( $T$ ) e armazenamento ( $S$ ) do aquífero e o raio efetivo do poço, mediante ensaio de bombeamento com piezômetro. Em situações reais bastante freqüentes, quando não se conhece os parâmetros do aquífero, a eficiência pode ser calculada admitindo-se que o termo  $BQ$  da equação do poço ( $s = BQ + CQ^2$ ) representa o rebaixamento teórico. Deste modo:

$$e = BQ / (BQ + CQ^2) = 1 / (1 + (C/B) \times Q) \quad (6.3)$$

A eficiência é um dado importante que permite comparar as características de poços construídos numa mesma formação. Quando, porém, se deseja avaliar o desempenho de um poço ao longo do tempo, o valor absoluto da eficiência carece de maior significado. Procura-se, neste caso, trabalhar com a eficiência relativa do poço, isto é, efetuar determinações periódicas da eficiência e analisar cada resultado em comparação com os valores anteriormente obtidos.

#### **6.2.6.1.3 Determinação da Fixação das Condições de Exploração**

Para dimensionar as condições de exploração de um poço, uma vez conhecidos os resultados do teste de produção, torna-se necessário:

- Determinar a vazão segura ou vazão ótima de exploração; como foi visto, a curva característica indicará o ponto crítico, com a correspondente vazão máxima. A vazão ótima deve ser fixada um pouco abaixo do valor correspondente ao ponto crítico;
- Determinar o rebaixamento total, correspondente à vazão ótima, o que é feito através da equação do poço, e calcular o nível dinâmico a esta vazão;
- Verificar o diâmetro útil e a profundidade da câmara de bombeamento, cuidando para que o ponto de tomada de água (profundidade de colocação da bomba) fique sempre acima das seções filtrantes e não frontalmente a elas;
- Fixar o ponto de colocação da bomba ou da tomada de água abaixo do nível dinâmico. Esta profundidade só pode ser determinada com segurança quando se dispõe:

1) da previsão de evolução dos rebaixamentos no poço com o tempo, para o que são necessários os parâmetros do aquífero;

2) da variação sazonal do nível piezométrico regional, através de mapas piezométricos. Na prática, quando não se dispõe destes dados, como frequentemente ocorre, trabalha-se a favor da segurança colocando a bomba de 6 a 10 metros abaixo do nível dinâmico.

Segundo JORBA (1982), de modo a exemplificar os cálculos resumimos no exemplo A, através da **Figura 6.11**, onde estão resumidas as características técnicas, o perfil litológico e os resultados finais do teste de produção de um poço de 111 metros de profundidade, perfurado em rocha sedimentar. Os procedimentos para dimensionamento das condições de exploração são os seguintes:

a) determinação da equação característica do poço: no gráfico rebaixamento específico ( $s/Q$ ) x vazão ( $Q$ ) determinam-se:

$$B = 0,8 \text{ e } C = 0$$

sendo então, a equação característica:

$$s = 0,8 Q$$

b) análise da curva característica: pela representação gráfica da vazão ( $Q$ ) versus rebaixamento ( $s$ ) e do rebaixamento específico ( $s/Q$ ) versus vazão ( $Q$ ), a análise conjunta das duas curvas permite concluir que:

- O fluxo d'água manteve-se laminar na vazão mais elevada do teste;
- Os rebaixamentos no poço são diretamente proporcionais à vazão bombeada;
- As perdas de carga no poço são desprezíveis, indicando boa construção;
- Os rebaixamentos no poço devem-se unicamente as perdas de carga no aquífero.

c) fixação da vazão ótima: o exame da curva característica permite concluir que o poço pode, teoricamente, ser explorado com vazão superior a vazão final de teste ( $41,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ); todavia, a vazão de exploração foi fixada em  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ , por motivos que serão explicados mais adiante;

d) cálculo do rebaixamento total ( $s$ ):

$$s = BQ = 0,8 \times 40 = 32 \text{ m}$$

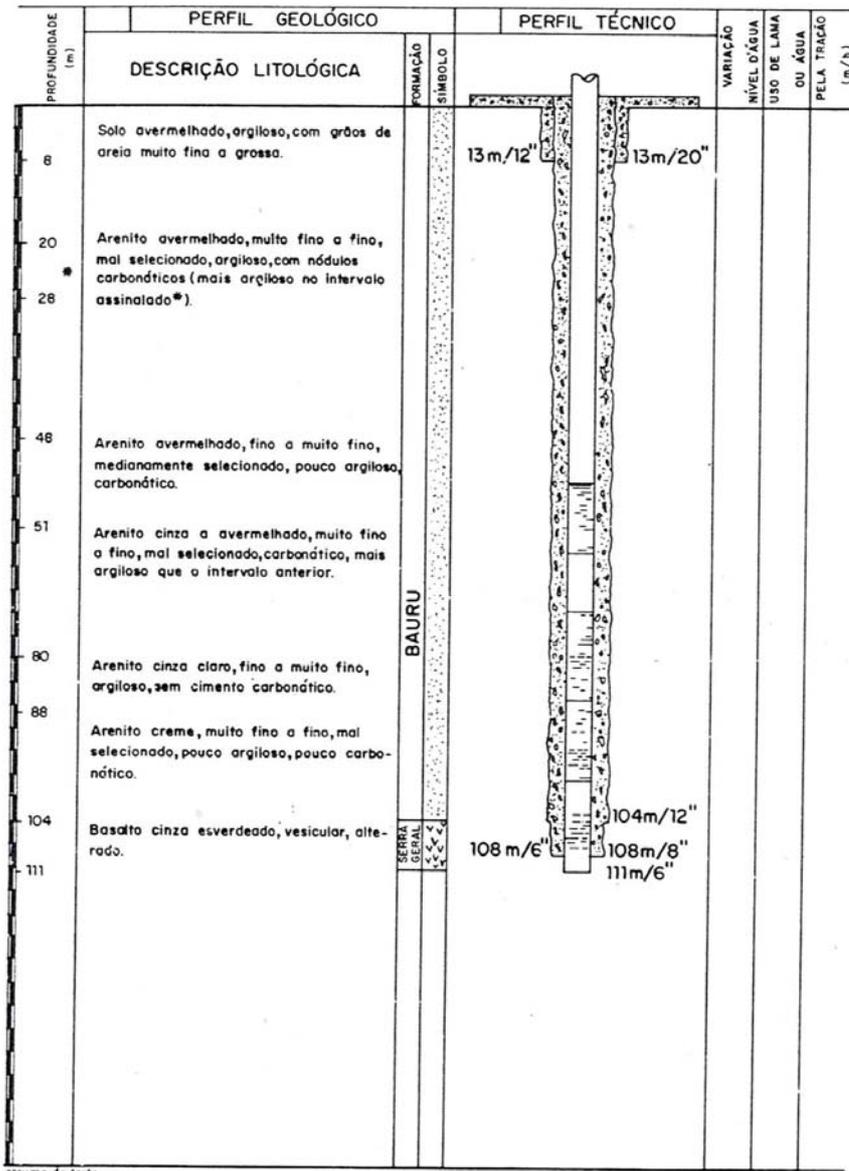
e) cálculo da profundidade do nível dinâmico (ND):

$$ND = s + \text{prof. NE} = 32 + 6,15 = 38,15 \text{ m}$$

f) profundidade de colocação da bomba : 48 m.

Justificativa: Na fixação da vazão de exploração em  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  foram levados em conta os seguintes aspectos:

- a. a tubulação de revestimento tem diâmetros de 150 mm e vai até 55 metros de profundidade; abaixo já se tem filtro;
- b. a oscilação regional do nível d'água não é conhecida
- c. não se dispõe de elementos para prever a evolução dos rebaixamentos com o tempo de exploração.



n. estático (m)	Etapa	Q (m <sup>3</sup> /h)	ND (m)	s (m)	Duração (h)	Q/s	s/Q
6,15	1 <sup>a</sup>	10	14,15	8,0	11	-----	-----
	2 <sup>a</sup>	21	22,95	16,8	11	-----	-----
	3 <sup>a</sup>	41,5	38,45	32,3	13	-----	-----

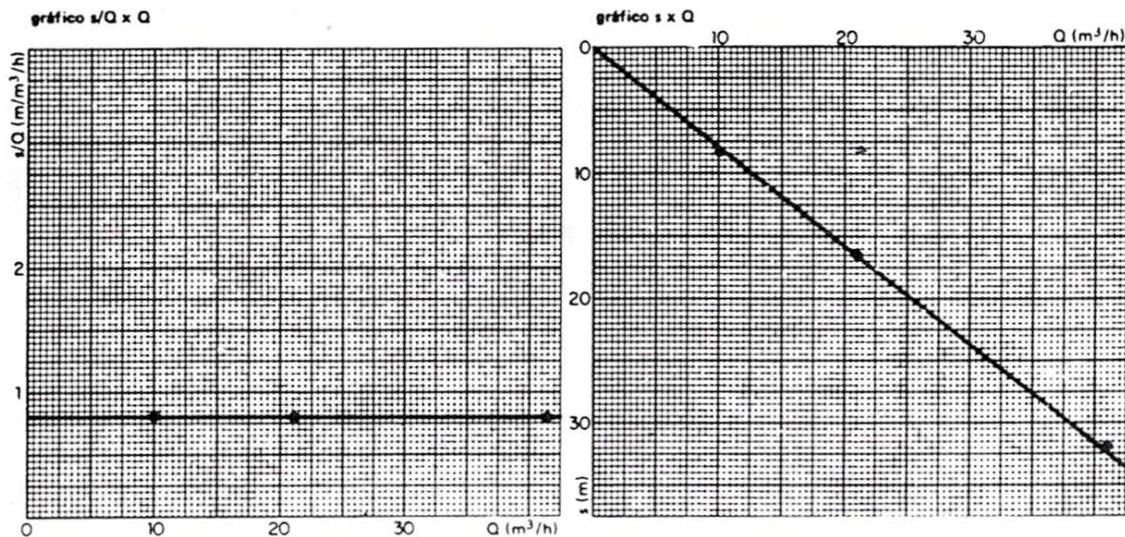


Figura 6.11 - Ficha técnica e resultados do teste de produção em poço. Fonte: JORBA, 1982

Em um outro exemplo em um poço de 132 metros de profundidade, perfurado em rocha cristalina, dura, parcialmente revestido, realizou-se o teste escalonado em 4 etapas sucessivas de vazão. Os resultados do teste, bem como as características do poço são apresentados na **Figura 6.12** - Ficha técnica e resultados de teste de produção em poço, exemplo B. Para determinar as características de exploração procede-se de maneira análoga ao exemplo A.

a) determinação da equação característica do poço: no gráfico  $s/Q \times Q$  determinam-se:

$$B = 0,96 \quad \text{e} \quad C = 0,0145$$

Sendo, então, a equação característica:

$$s = 0,96Q + 0,0145Q^2$$

b) análise da curva característica: a representação gráfica  $Q \times s$  confrontada com o gráfico  $s/Q \times Q$  permite concluir que:

- O fluxo é laminar somente até um trecho da curva próximo a vazão de  $28 \text{ m}^3/\text{h}$ , que é o ponto crítico; a partir deste trecho, os rebaixamentos decaem bruscamente com o aumento da vazão;
- Os rebaixamentos no poço devem-se, em maior grau, as perdas de carga no aquífero (notar que se trata de fluxo em fissuras detectadas durante a perfuração). Os rebaixamentos

xamentos devidos a perdas de carga no poço são relativamente pequenos (notar que o poço não possui revestimentos e filtros, nem envoltório de pré-filtro nos trechos correspondentes as entradas de água);

c) fixação da vazão ótima: pelo exame da curva característica, escolheu-se um ponto ligeiramente à esquerda do ponto crítico, correspondendo a vazão de 25 m<sup>3</sup>/h;

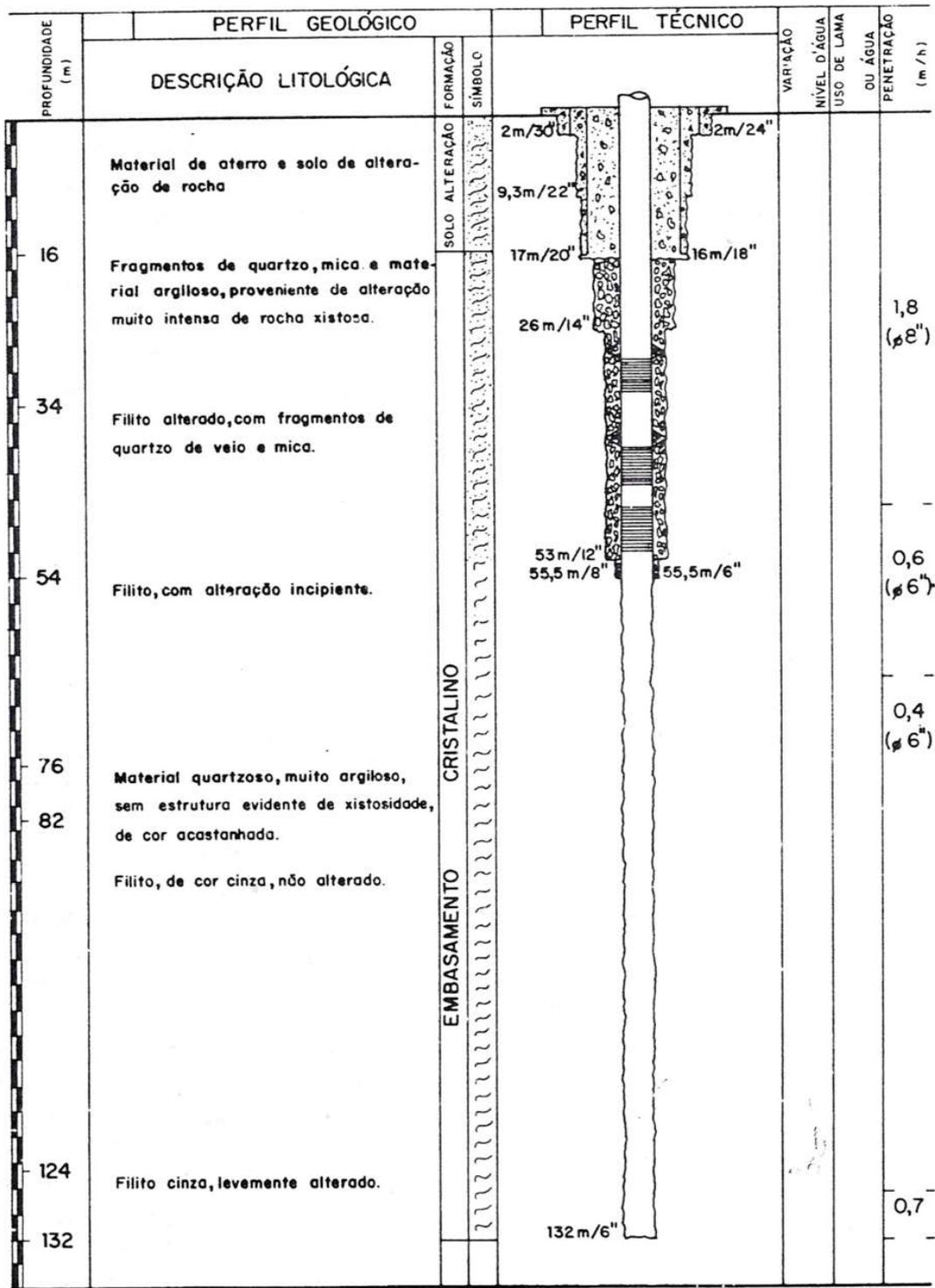
d) cálculo do rebaixamento total (s):

$$s = BQ + CQ^2 = 0,96 \times 25 + 0,0145 \times 25^2 = 24 + 9,06 = 33,06\text{m}$$

e) cálculo da profundidade do nível dinâmico

$$ND - s + \text{prof. NE} = 33,06 + 2,71 = 35,77$$

f) profundidade de colocação da bomba: 44 m



resumo do teste

n. estático (m)	Etapa	Q (m <sup>3</sup> /h)	ND (m)	s (m)	Duração (h)	Q/s	s/Q
2,71	1 <sup>a</sup>	12	16,38	13,67	10	0,88	1,14
	2 <sup>a</sup>	18,86	25,95	23,24	10	0,81	1,23
	3 <sup>a</sup>	29,33	43,01	40,30	3,5	0,73	1,37
	4 <sup>a</sup>	31,70	72,21	69,50	4	0,46	2,19

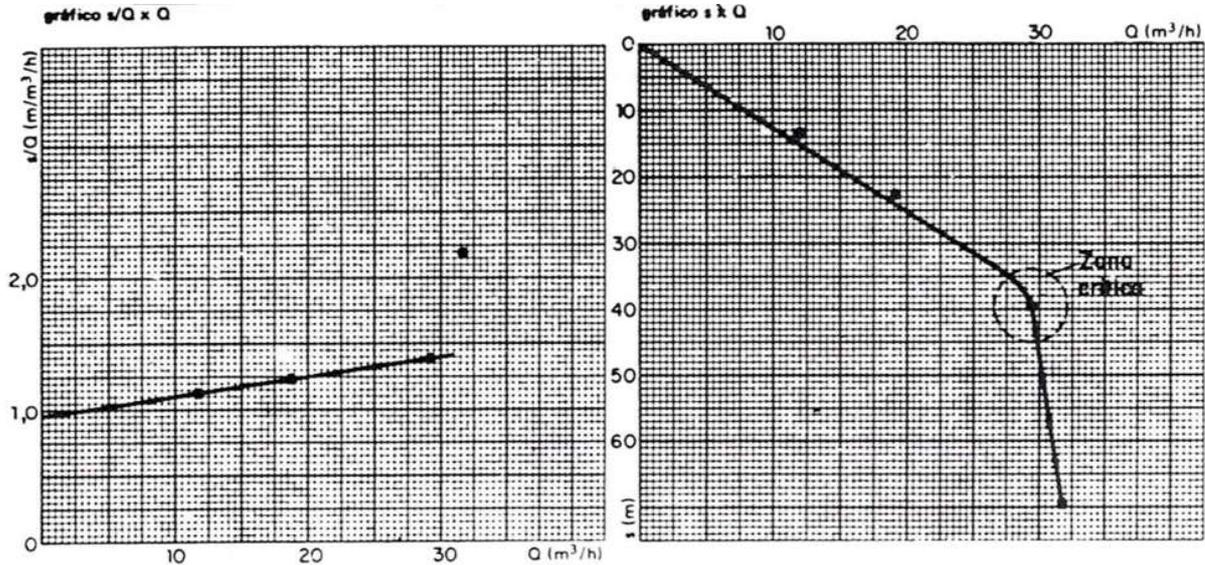


Figura 6.12 - Ficha técnica e resultados de teste de produção em poço. Exemplo B. Fonte: JORBA, 1982

De acordo com JORBA e ROCHA (1982), os testes de produção permitem estabelecer condições relativamente seguras na exploração de poços. Sua realização deveria ser exigência contratual, principalmente por parte dos órgãos públicos, para cada poço que fosse construído. Em um planejamento de operação sistemática é condição fundamental a realização de uma campanha de testes em todos os poços em funcionamento. A análise criteriosa dos resultados obtidos certamente conduzirá ao redimensionamento tanto de volumes de extração como dos equipamentos de bombeamento, contribuindo para a otimização dos sistemas. É preciso advertir que os procedimentos descritos visam, sobretudo, a orientação metodológica e não devem ser entendidos como normas rígidas ou um receituário. O conhecimento das características físicas do aquífero em cada local é o fator que comanda a análise das condições hidráulicas dos poços. Em geral, nos poços perfurados em terrenos granulares, os parâmetros hidráulicos seguem mais de perto as formulações teóricas, ensejando maior margem de segurança na interpretação dos resultados de ensaios.

Segundo MARIANO e LINHARES (1994), com este teste teremos a resposta sobre que quantidade de água poderá ser explorada. Uma vez tendo também a qualidade de água e as condições de bombeamento (distância e altura monométrica, poderão selecionar o equipamento de bombeamento mais adequado)

Segundo CAPPUCCI (2001), no teste de bombeamento definitivo, deve-se definir o tipo de equipamento de recalque a ser utilizado, o número de horas necessárias à efetiva realização do teste de vazão, bem como os procedimentos para conhecer as reais capacidades de produção do poço e de sua capacidade específica e perdas de carga originadas no poço e aquífero. Em geral, é recomendável teste com duração mínima de 24 horas, por 6 horas de recuperação.

### 6.2.6.2 Teste de Aquíferos

Como demonstrado através da equação 5.17, a conjugação da equação da continuidade (conservação de massa) com a lei de Darcy na forma tridimensional conduz a equação diferencial geral que governa o fluxo subterrâneo nos meios porosos, a qual é expressa como a equação geral do fluxo subterrâneo:

$$\frac{\partial(K_{xx}\partial h)}{\partial x^2} + \frac{\partial(K_{yy}\partial h)}{\partial y^2} + \frac{\partial(K_{zz}\partial h)}{\partial z^2} = S_e \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6.4)$$

Onde:

- K = condutividade hidráulica (LT<sup>-1</sup>)
- h = carga hidráulica (L)
- t = tempo (T)
- S<sub>e</sub> = coeficiente de armazenamento específico = (ρg (α + βη))
- ρ = massa específica da água
- g = aceleração da gravidade (LT<sup>-2</sup>)
- α = compressibilidade da água
- φ = porosidade
- β = compressibilidade do meio poroso

A solução analítica da equação geral do fluxo subterrâneo só é possível através da introdução de uma série de simplificações das situações reais, as quais são denominadas condições de contorno. Assim, além das condições específicas para cada situação hidrogeológica, existem condições gerais que abrangem todos os tipos de aquífero, as quais são relacionadas a seguir:

- O aquífero é homogêneo e isotrópico e a água possui viscosidade e densidade constantes
- A espessura do aquífero é constante e a base do mesmo é horizontal.
- Não existe fluxo natural, ou seja, a superfície piezométrica é praticamente horizontal antes do bombeamento.
- No bombeamento o fluxo é radial e horizontal.

- O escoamento é laminar, ou seja, a lei de Darcy é válida em qualquer momento.
- O coeficiente de armazenamento é constante no tempo e no espaço. Para os aquíferos confinados supõe-se que em nenhum lugar, os rebaixamentos produzidos pelo bombeamento rebaixem o nível de água abaixo do topo do aquífero.
- A água retirada do armazenamento do aquífero é liberada instantaneamente e proporcionalmente à diminuição do nível piezométrico.
- Supõe-se que o aquífero tenha extensão infinita e que não existam outras captações.
- O poço é totalmente penetrante.
- raio do poço é suficientemente pequeno e a variação do volume de água armazenada no mesmo não influi na vazão de bombeamento.
- Não existem perdas de carga no poço.
- A vazão de bombeamento é constante.

Ainda segundo FEITOSA, F. (1997), em função das condições físicas de cada tipo de aquífero (confinado não drenante, confinado drenante, livre), associadas ao comportamento da evolução dos rebaixamentos (regime permanente ou regime transitório), existe uma grande quantidade de métodos de interpretação, dos quais, os mais usuais são apresentados na **Tabela 6.13**.

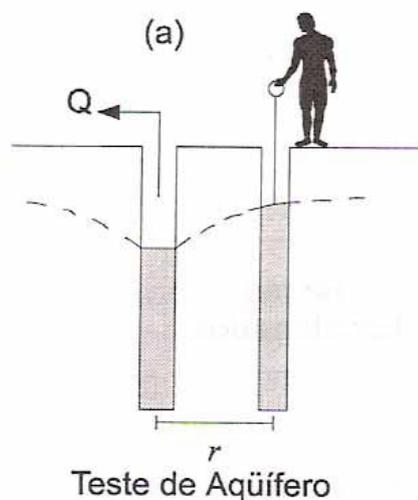
**Tabela 6.13 – Métodos de Interpretação de testes de Aquífero em função do tipo de aquífero e do regime de bombeamento.**

Regime de bombeamento	Tipos de Aquífero		
	Confinado não drenante	Confinado drenante	Livre
Permanente	THIEM	DE GLEE	DEPUIT/THIEM
		HANTUSH/JACOB	
Transitório	THEIS	WALTON	THEIS com correção de JACOB
	JACOB	HANTUSH	BOULTON/PRICKET

Fonte: Feitosa, F, 1997

Segundo FEITOSA (1997), pode-se definir o teste de aquífero como sendo um bombeamento que tem por finalidade a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do meio poroso: transmissividade (T), coeficiente de armazenamento (S) e condutividade hidráulica (K). A sua execução consiste no bombeamento de um poço com uma vazão constante Q e no acompanhamento da evolução dos rebaixamentos produzidos em um (ou mais de um) poço de ob-

servação ou piezômetro situado a uma distância  $r$  qualquer do poço bombeado, conforme ilustrado esquematicamente na **Figura 6.13**.



**Figura 6.13 – Teste de Aquífero. Fonte: Feitosa, 1997**

Segundo MARIANO e SILVEIRA (1994), o teste para obtenção dos parâmetros do aquífero consiste na aplicação de uma força no aquífero (extração ou injeção de água) e medição dos efeitos produzidos por essa força (mudanças dos níveis de água). Os dados obtidos são tratados matematicamente para obter os parâmetros mencionados acima. O tratamento é efetuado fazendo corresponder às mudanças de níveis medidos, com as previstas por equações teóricas e observando as anomalias. É, portanto compreensível a importância de que a geometria, condições de barreiras e condições iniciais do teste sejam as mais próximas possíveis às assumidas na derivação das equações teóricas.

Completado o teste, os dados de rebaixamento contra o tempo podem ser interpretados por vários métodos. Os mais usados e mais testados com resultados satisfatórios são os seguintes:

- Método da Linha Reta (Jacob):

Um sistema simplificado de avaliação dos parâmetros. Ainda que os resultados devam considerar-se como preliminares e sujeitos a confirmação por meio do método descrito a continuação, este é muito prático e fácil de usar:

Em um papel monolog, plotam-se os dados de rebaixamento, no eixo das ordenadas (milimetrado e os tempos correspondentes, no eixo das abcissas).

A descrição dos métodos é feita no sentido unicamente ilustrativo e simplificado. As interpretações deverão ser efetuadas por pessoal experimentado e com os conhecimentos claros

da derivação das equações. As anomalias que aparecem podem ser produzidas por diversos fatores, cuja explicação e interpretação nos gráficos estão fora do escopo deste trabalho. Nos textos de hidrogeologia encontram-se esta teoria em detalhe.

Traça-se a linha reta melhor, unindo os pontos e mede-se a inclinação da dita reta por ciclo logarítmico. A inclinação será a subtração dos dois níveis ao início e final do ciclo;

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta s} \quad (6.5)$$

Onde:

T = Transmissividade em m<sup>3</sup>/hora/metro

Q = Vazão constante em m<sup>3</sup>/hora

Δ = Inclinação da reta em metros com tempo unitário

Para obter o T em m<sup>3</sup>/dia/m multiplica-se por 24. Conhecendo as distâncias em poços de observação calcula - se o coeficiente de armazenamento s.

$$S = \frac{2,246 \times T \times t_0}{r^2} \quad (6.6)$$

Sendo:

t<sub>0</sub> = ponto de prolongação da linha toca a linha de rebaixamento = 0.

r = distância do poço de bombeamento ao poço de observação.

- Método de Theis

$$T = \frac{Q.W(u)}{4.\Pi.s} \quad (6.7)$$

Sendo:

T = Transmissividade, em m<sup>3</sup> /hora/metro;

Q = Vazão do teste, em m<sup>3</sup> /hora;

W(u) = Ordenada do ponto da curva padrão, sem dimensão;

s = Rebaixamento. Ordenada da curva de campo em metros.

Calcula-se o coeficiente de armazenamento, da fórmula.

$$S = \frac{4.T.t.u}{60.t^2} \quad (6.8)$$

Sendo:

s = Coeficiente de armazenamento (sem dimensão)

T = Transmissividade em m<sup>3</sup> /hora/metro

t = Abscissas do ponto na curva de campo em minutos

u = Inverso da abscissas do ponto na curva padrão

r = Distância do centro do poço do bombeamento ao centro do poço de observação, em metros.

Um método clássico, que deu início a todas as técnicas de interpretação e que proporciona os resultados mais confiáveis além de ser confirmatório de qualquer outro método, especialmente o da linha reta.

A seqüência da interpretação é a seguinte:

- prepara-se um gráfico rebaixamento contra o tempo em papel bilogarithmico, usando o eixo das ordenadas para o rebaixamento e o das abscissas para o tempo.
- sobrepõe-se o gráfico de dados de campo, a uma curva padrão da formula de Theis plotada em papel bilogarithmico do mesmo modulo em que foi plotada a curva de campo.
- ajusta-se a curva de campo com o padrão, ate que uma maioria de pontos fique coincidindo com a curva. Os eixos das abscissas e das ordenadas devem manter-se paralelos sempre.
- Seleciona-se um ponto arbitrário (não necessariamente nas curvas) e lê-se as coordenadas do mesmo na curva padrão. Simultaneamente lêem-se na curva de campo as coordenadas do mesmo ponto (s e t).
- Calcula-se a transmissividade da fórmula.
- Calcula-se o coeficiente de armazenamento, da formula.

O método descrito brevemente não é outra coisa que um sistema gráfico de determinação de valores muito usados em matemática, quando se tem variáveis dependentes na equação.

Os dados de todos os poços de observação podem ser plotados no mesmo gráfico. Frequentemente as propriedades de um aquífero obtidas através de testes em vários poços não concordam completamente por vários motivos, incluindo as variações espaciais das ditas propriedades, recarga retardada, componentes verticais de fluxos e erros experimentais. Deve ser lembrado que o método proporciona valores médios de T e S. Portanto as pequenas heterogeneidades podem estar mascaradas ou fornecer seus valores médios.

### ***6.2.6.3 Resultados de um Teste de Aquífero***

De forma a ilustrar um teste de aquífero podemos descrever um teste realizado na região metropolitana do Rio de Janeiro por Mariano e Silveira (2004). O trabalho tem como objetivo principal determinar através de testes de bombeamento a capacidade de exploração dos poços tubulares profundos perfurados na área de uma empresa na região metropolitana do Rio de Janeiro.

Com o objetivo de se obter as características hidrodinâmicas do aquífero fraturado, representado pelas rochas gnáissicas do Complexo Paraíba foram realizados:

- teste de aquífero com bombeamento através de rebaixamento e recuperação, nos poços P3, P4, P5, P6, P8 e P18;
- testes de interferência:
  - poço bombeado P8 com medidas no P4, P5, P11 e P13
  - poço bombeado P3 com medidas no P6, P11 e poço da ETA
- teste de produção no P8.

A fim de se atingir os objetivos os testes de bombeamento seguiram os procedimentos discutidos a seguir.

- Os poços foram paralisados 24 horas antes do início dos testes para se ter como referência o nível estático relativamente recuperado e representativo do aquífero. Em todos os poços foram instalados placas de orifício para medição de vazão e aparelho para medição de nível de água, através de multivoltímetro e fios paralelos numerados de metro em metro, tendo uma sonda na extremidade. Após reconhecimento de campo, em função das distâncias entre os poços, o sis-

tema de produção foi distribuído em duas baterias, sendo a primeira composta pelos poços P4, P5, P8 e P13 e a segunda bateria representada pelos poços P3 e P6, sendo que os poços P11 e ETA apenas foram utilizados como poços de observação já que os mesmos não têm equipamento de bombeamento instalado. Antes do início dos bombeamentos foram medidos os níveis estáticos de todos os poços.

- O primeiro poço a ser bombeado foi o poço P8, medindo-se também níveis nos poços P4, P5, P13 e P11, utilizados no momento como piezômetros. O início se deu as 15:30hs do dia 14/08/04.
- Após 12hs de bombeamento do P8, ou seja, 3:30hs do dia 15/08/04, como não havia se detectado rebaixamento por interferência nos piezômetros foi colocado em bombeamento o poço P13, permanecendo o P8 em bombeamento e continuando-se a medir níveis no P4, P5 e P11. Os piezômetros continuaram a não apresentar rebaixamento por interferência.
- As 11:30hs do dia 15/08/04 foi colocado em bombeamento o poço P5. Os piezômetros P4 e P11 continuaram a não apresentar rebaixamentos.
- O poço P4 entrou em funcionamento às 18hs do mesmo dia. O piezômetro P11 continuou a não apresentar rebaixamento.
- Após o bombeamento foram efetuadas as medidas de recuperação simultaneamente em todos os poços depois de sua paralisação.
- As 16:40hs do dia 16/08/04 foi iniciado o bombeamento do poço P3, com medidas de interferência junto aos poços P6, P11 e ETA.
- Como o poço P6 não indicava nenhum efeito de interferência, as 22 hs o mesmo foi colocado em bombeamento através de rebaixamento, continuando-se as medidas junto aos poços P11 e ETA.
- No dia 17/8/04 porquanto prosseguia os testes de rebaixamento nos poços P3 e P6, efetuava-se o teste de produção no poço P8. Após o tempo regulamentar de bombeamento dos poços P3 e P6 efetuou-se as medidas de recuperação.
- Durante a execução dos testes de aquíferos, apenas o poço P11 apresentou um rebaixamento em patamares totalizando 0,68m quando do bombeamento do poço P13.

Em geral os aquíferos de rochas cristalinas são de baixa produtividade devido à descontinuidade do meio fissurado e ao armazenamento de água limitado. As vazões mais frequentes variam de 1 a 20m<sup>3</sup>/h, ainda que locados em sistemas de fraturamento. As vazões específicas

obtidas nos testes de bombeamento variaram de 0,068 a 1,090m<sup>3</sup>/h/m sendo a média de 0,385m<sup>3</sup>/h/m.

Quanto às características hidrodinâmicas em meio fissurado, não tem grande significado regional, devido à heterogeneidade e anisotropia do meio aquífero. Os valores de transmissividade são baixos, sempre inferiores a 30m<sup>2</sup>/dia. Porém na zona alterada onde existe uma porosidade de interstício encontram-se valores de permeabilidade variando entre 10<sup>-6</sup> e 10<sup>-9</sup> m/s com porosidade efetiva entre 5 e 15%.

Para avaliar as características hidrodinâmicas do aquífero fraturado, as condições hidráulicas reinantes, as condições de circulação e produção foram efetuados testes de aquífero nos poços da área, através de rebaixamento, recuperação e produção. Na **Tabela 6.14** o são resumidos os testes realizados:

**Quadro 4 - Resumo dos resultados dos testes**

Poço	Teste/Tipo	Método	Duração (min)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)
P3	Aquífero	Rebaixamento	1440	12,18
		Recuperação	180	
P4	Aquífero	Rebaixamento	1440	2,80
		Recuperação	870	
P5	Aquífero	Rebaixamento	1440	2,56
		Recuperação	780	
P6	Aquífero	Rebaixamento	1440	2,20
		Recuperação	120	
P8	Aquífero	Rebaixamento	1590	17,65
		Recuperação	1080	
	Produção	1 etapa	60	11,72
		2 etapa	60	13,81
		3 etapa	60	15,61
		4 etapa	60	17,78
P13	Aquífero	Rebaixamento	1620	8,06
		Recuperação	540	

Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 2004

A interpretação dos testes de aquífero foi feita empregando-se vários métodos, inclusive de meio fraturado horizontal circular, fraturado vertical, zona condutora homogênea preferencial, condições aos limites com barreiras negativas ou positivas, fenômeno de drenança, descompressibilidade do meio aquífero, etc. A confrontação dos resultados demonstrou que o método da linha reta de Jacob pode ser aplicado de forma satisfatória.

Os testes de bombeamento foram realizados em agosto de 2004, através de rebaixamento à vazão constante de 17,65m<sup>3</sup>/h, com medições efetuadas através de um orifício circu-

lar (2" x 1 1/2"). O nível estático medido foi de 6,42m a partir do tubo de boca tendo o poço permanecido paralisado durante 72 horas. O teste teve uma duração de 1590min e apresentou um nível dinâmico em 22,86m.

O teste de recuperação foi feito em seguida observando-se os níveis durante 1080min com um nível residual a 7,71m de profundidade.

O gráfico de rebaixamento apresenta um comportamento típico de um sistema fraturado com características de heterogeneidade e isotropia do meio aquífero o que provoca um rebaixamento em regime transitório com baixo gradiente hidráulico até o tempo analisado. Podemos identificar algumas fraturas de contribuição localizadas em diversas profundidades de rebaixamento de 14, 16 e 17 metros de profundidade, mascaradas pelo revestimento do poço através de seção filtrante. Observa-se até o minuto 40 uma reta com valor de transmissividade de 19,37m<sup>2</sup>/dia e após esse intervalo até o minuto 300 uma transmissividade de 13,50m<sup>2</sup>/dia. No minuto 330 houve necessidade de reduzir a vazão para que o nível dinâmico não chegasse ao crivo do equipamento de bombeamento, sendo que após o poço passar pelo processo de recuperação rebaixou novamente em função da perda de espessura saturada.

O gráfico de recuperação não evidencia sintomas de exaustão. Observa-se que durante os primeiros minutos de recuperação residual existe o preenchimento das fraturas identificadas em 15 e 13 metros. O coeficiente de transmissividade é definido por uma única reta com valor de 23,85 m<sup>2</sup>/dia, quando a transmissividade passa a representar o valor real do aquífero, representado pelo manto de alteração em regime laminar.

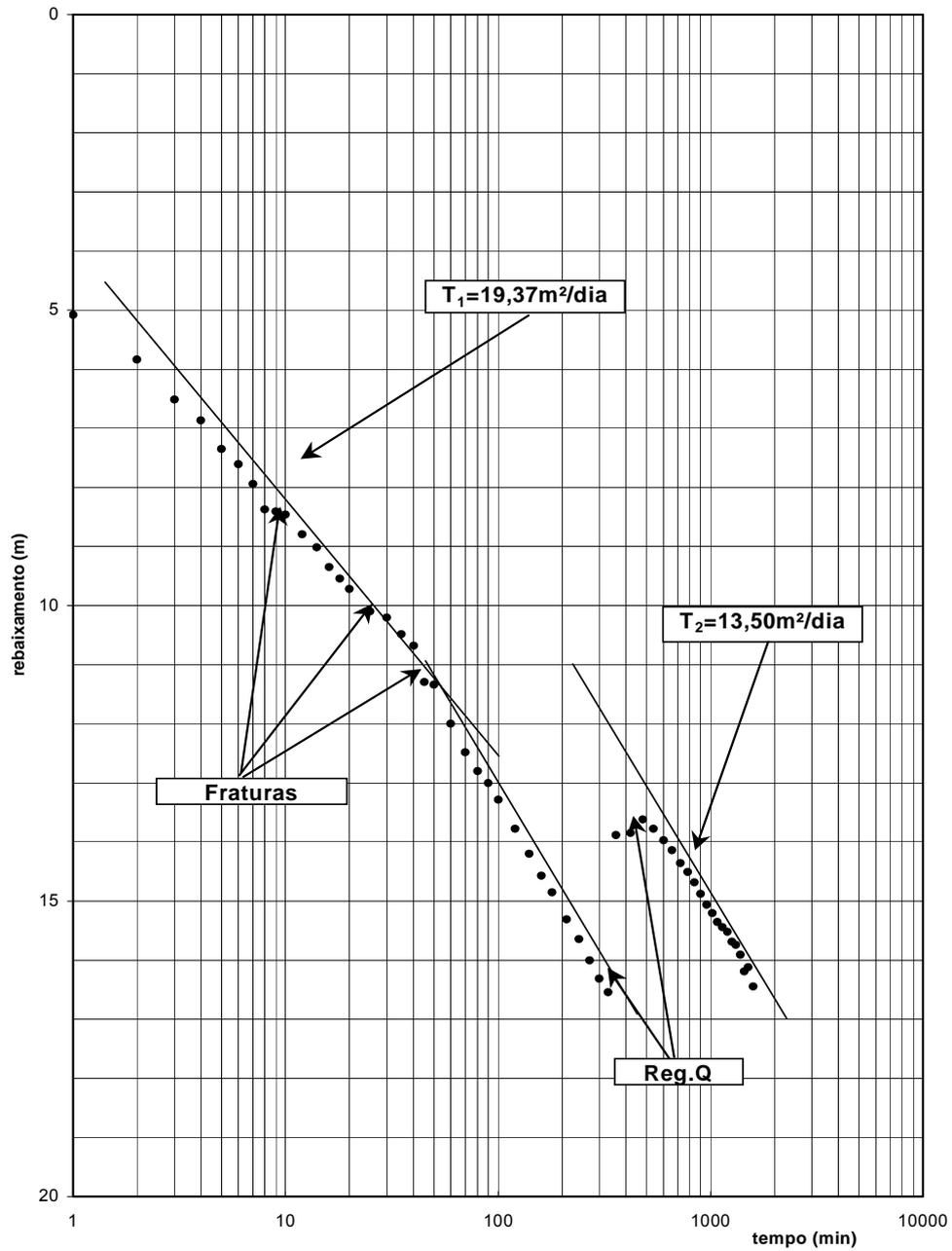
No gráfico  $t/t'$  o comportamento da curva de recuperação evidencia uma variação do coeficiente de armazenamento e da transmissividade em função da contribuição do sistema aquífero superior. A regressão da curva de recuperação anterior ao minuto 200 ( $t/t'$ ) e ascendente terminaria junto ao tempo real (zero), mas no minuto 3 ( $t/t'$ ) existe uma mudança do coeficiente angular, imputando uma chegada antes de zero, decorrente de uma contribuição da zona superior.

**PLANILHA DE TESTE DE BOMBEAMENTO**

Município:	xxxx	local:	xxx		
Proprietário:	Eco Aqua Soluções S A				
Tipo de teste:	REBAIXAMENTO				
EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO (TIPO)	Bomba Submersa	Potência CV:	7,5		
Diâmetro em polegadas:	6	Modelo	BHS51-104 Prof.(m) 24,00		
LOCAL DE MEDIÇÃO	POÇO LOCAL 8				
Poço Bombeado:	4	5	11 13		
Poço Observado:					
Distância entre poços (m):					
Nível Estático (m):	6,42	Sistema de medição de vazão: Orifício Circular 2" x 1 1/4"			
		Referência de medidas: Tubo de Boca			
Data	Hora	Tempo (minutos)	Nível d'água Rebaixamento (metros)	Vazão (m3/h.)	Observações
14/8/2004	15:30	0	6,42	0,00	18,950
		1	11,50	5,08	
		2	12,26	5,84	
		3	12,93	6,51	
		4	13,29	6,87	
		5	13,77	7,35	
		6	14,03	7,61	
		7	14,36	7,94	
		8	14,79	8,37	
		9	14,83	8,41	
		10	14,88	8,46	
		12	15,21	8,79	
		14	15,43	9,01	
		16	15,77	9,35	
		18	15,96	9,54	
		20	16,14	9,72	
		25	16,52	10,10	
		30	16,62	10,20	
		35	16,90	10,48	
		40	17,10	10,68	
		45	17,71	11,29	
		50	17,76	11,34	
		60	18,42	12,00	
		70	18,90	12,48	
		80	19,22	12,80	
		90	19,42	13,00	
		100	19,70	13,28	
		100	20,20	13,78	
		120	20,62	14,20	
		140	20,99	14,57	
		160	21,27	14,85	22,000
		210	21,73	15,31	
		240	22,06	15,64	18,760 Reg. Q
		270	22,42	16,00	
		300	22,73	16,31	22,130
		330	22,96	16,54	Reg. Q
		360	20,30	13,88	18,160
		420	20,27	13,85	Reg Q
		480	20,04	13,62	
		540	20,20	13,78	
		600	20,39	13,97	18,110
		660	20,56	14,14	
		720	20,78	14,36	
		780	20,93	14,51	
		840	21,10	14,68	
		900	21,30	14,88	17,910
		960	21,48	15,06	
		1020	21,62	15,20	
		1080	21,77	15,35	
		1140	21,86	15,44	
		1200	21,94	15,52	
		1260	22,11	15,69	
		1320	22,16	15,74	
		1380	22,33	15,91	
		1440	22,61	16,19	
		1500	22,54	16,12	
15/8/2004	18:00	1590	22,86	16,44	17,650

**Figura 6.14 - Planilha de teste de Aquífero - Tipo de Teste – Rebaixamento. Fonte: MARIANO e SIL-VEIRA,2004**

INTERPRETAÇÃO  
Jacob



REBAIXAMENTO - POÇO 08

Figura 6.15 - Planilha de teste de Aquífero - Interpretação do Teste de Rebaixamento Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 2004

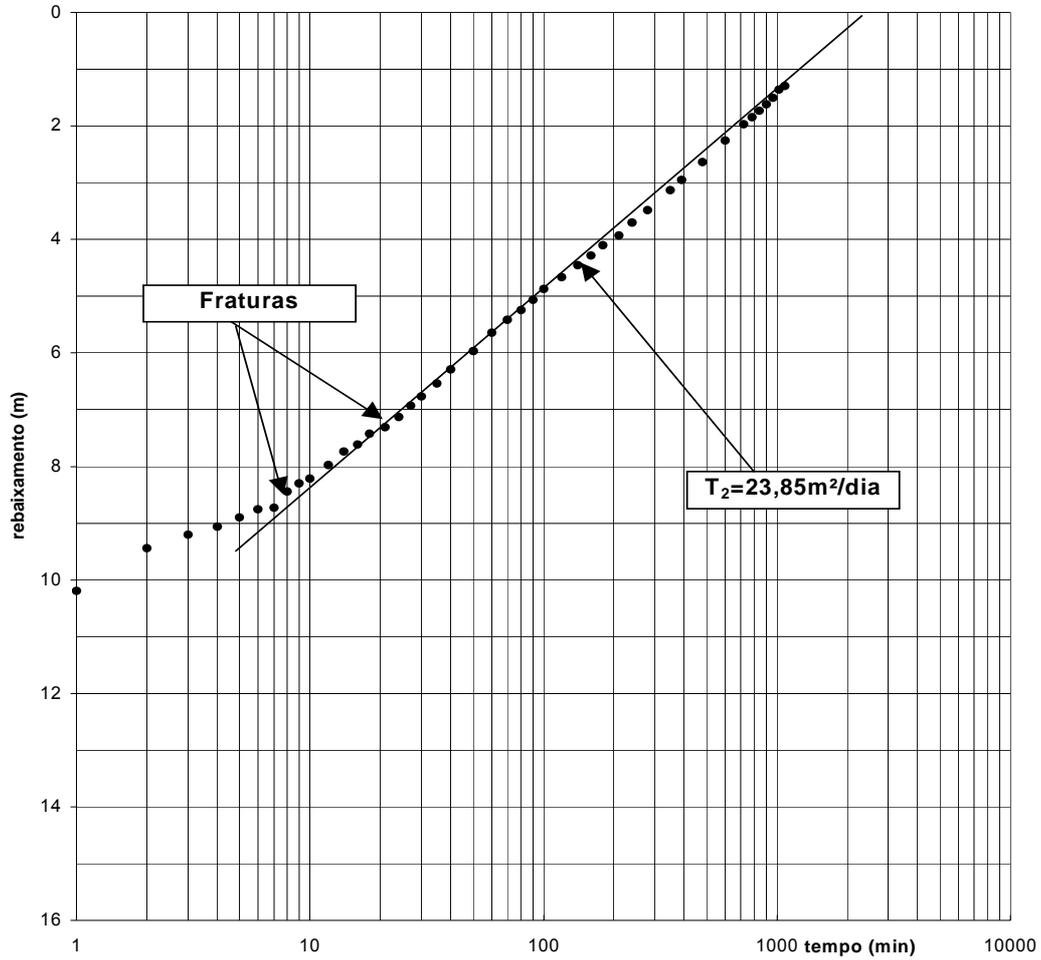
**PLANILHA DE TESTE DE BOMBEAMENTO**

Município: **xxxx** local: **xxx**  
 proprietário: **Eco Aqua Soluções S A**  
 Tipo de teste: **RECUPERAÇÃO**  
 EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO (TIPO) **Bomba Submersa** Potência CV: **7,5**  
 Diâmetro em polegadas: **4** Estágio: **BHS51-104** Prof.(m) **24,00**  
 LOCAL DE MEDIÇÃO  
 Poço Bombeado: **POÇO LOCAL 8**  
 Poço Observado:  
 Distância entre os poços: **5 11**  
 Sistema de medição de vazão:  
 Nível Estático metros: **6,42** Referência de medidas: **Tubo de Boca**

Data	Hora	Tempo (minutos)	Nível d'água (metros)	rebaixamento (metros)	vazão (m3/h.)	observações
15/8/2004	15:30	0	22,86	16,44	<b>17,65</b>	
		1	16,61	10,19		
		2	15,86	9,44		
		3	15,62	9,20		
		4	15,48	9,06		
		5	15,32	8,90		
		6	15,18	8,76		
		7	15,15	8,73		
		8	14,86	8,44		
		9	14,72	8,30		
		10	14,63	8,21		
		12	14,40	7,98		
		14	14,16	7,74		
		16	14,03	7,61		
		18	13,84	7,42		
		21	13,73	7,31		
		24	13,55	7,13		
		27	13,35	6,93		
		30	13,19	6,77		
		35	12,96	6,54		
		40	12,71	6,29		
		50	12,39	5,97		
		60	12,06	5,64		
		70	11,84	5,42		
80	11,66	5,24				
90	11,48	5,06				
100	11,29	4,87				
120	11,08	4,66				
140	10,87	4,45				
160	10,70	4,28				
180	10,52	4,10				
210	10,35	3,93				
240	10,12	3,70				
15/8/2004	19:50	280	9,90	3,48		
		350	9,55	3,13		
		390	9,37	2,95		
		480	9,06	2,64		
		600	8,68	2,26		
		720	8,39	1,97		
		780	8,27	1,85		
		840	8,15	1,73		
		900	8,04	1,62		
		960	7,92	1,50		
16/8/2004	12:00	1020	7,78	1,36		
		1080	7,71	1,29		

**Figura 6.16 - Planilha de teste de Aquífero - Tipo de Teste – Recuperação. Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 2004**

INTERPRETAÇÃO  
Jacob



RECUPERAÇÃO - POÇO 08

Figura 6.17 - Planilha de teste de Aquífero - Interpretação do Teste de Recuperação. Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 2004

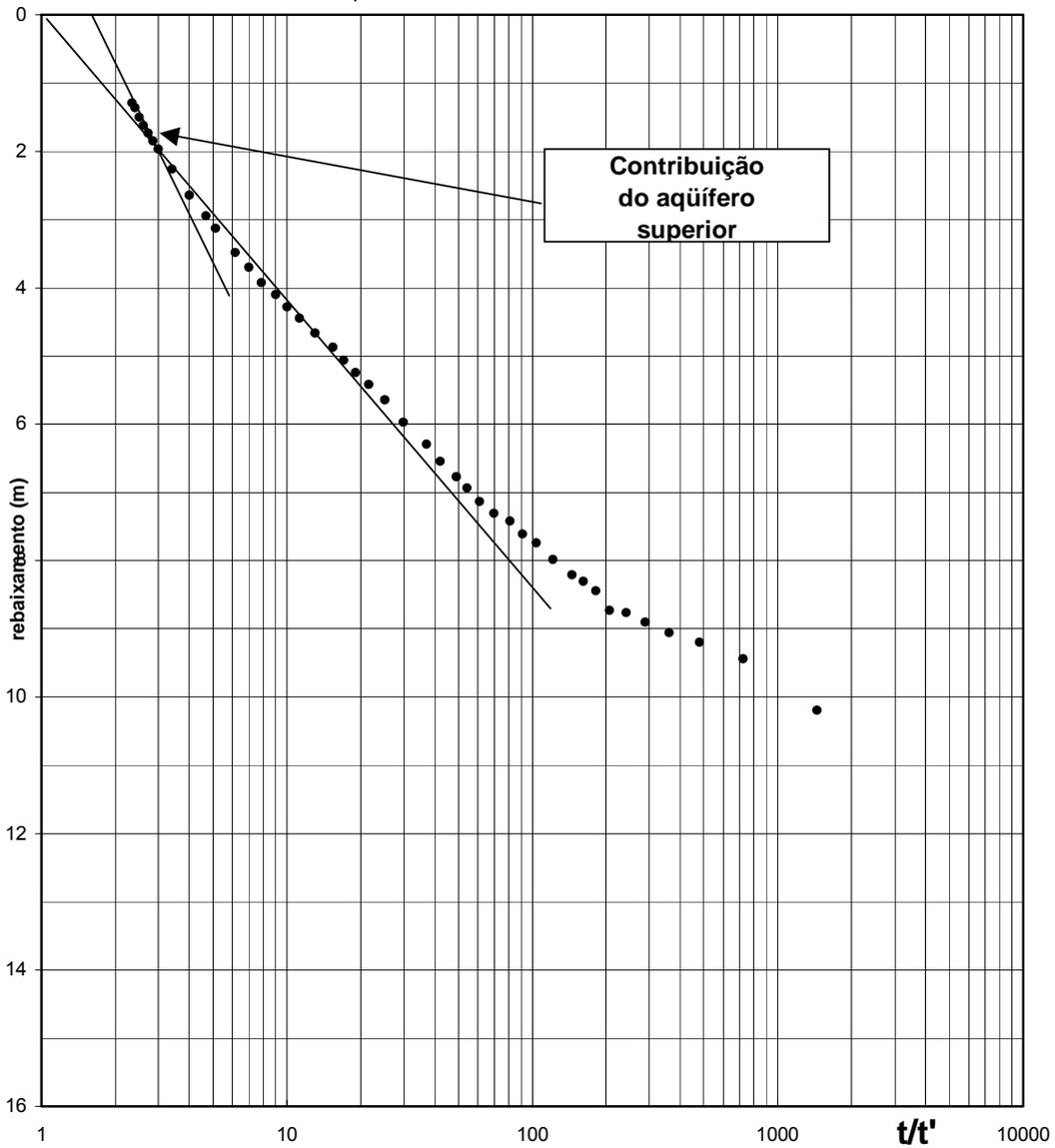
## PLANILHA DE TESTE DE BOMBEAMENTO

Município: **São João do Meriti - RJ** local: **Sendas-Rod.Presid.Dutra, 4674**  
 proprietário: **Eco Aqua Soluções S A**  
 Tipo de teste: **RECUPERAÇÃO t/t'**  
 EQUIPAMENTO DE BOMBEAMENTO (TIPO) **Bomba Submersa** Potência CV: **7,5**  
 Diâmetro em polegadas: **6** Estágio: **BHS51-104** Prof.(m) **24,00**  
 LOCAL DE MEDIÇÃO  
 Poço Bombeado: **POÇO LOCAL 8**  
 Poço Observado:  
 Distância entre os poços: Sistema de medição de vazão: **Orifício Circular 2" x 1 1/4"**  
 Nível Estático metros: **6,42** Referência de medidas: **Tubo de Boca**

Data	Hora	Tempo (minutos)	Nível d'água rebaixamento		Tempo t/t"	observações
			(metros)	(metros)		
15/8/2004	15:30	1440	22,61	16,19		
		1	16,61	10,19	1441,00	
		2	15,86	9,44	721,00	
		3	15,62	9,20	481,00	
		4	15,48	9,06	361,00	
		5	15,32	8,90	289,00	
		6	15,18	8,76	241,00	
		7	15,15	8,73	206,71	
		8	14,86	8,44	181,00	
		9	14,72	8,30	161,00	
		10	14,63	8,21	145,00	
		12	14,40	7,98	121,00	
		14	14,16	7,74	103,86	
		16	14,03	7,61	91,00	
		18	13,84	7,42	81,00	
		21	13,73	7,31	69,57	
		24	13,55	7,13	61,00	
		27	13,35	6,93	54,33	
		30	13,19	6,77	49,00	
		35	12,96	6,54	42,14	
		40	12,71	6,29	37,00	
50	12,39	5,97	29,80			
60	12,06	5,64	25,00			
70	11,84	5,42	21,57			
80	11,66	5,24	19,00			
90	11,48	5,06	17,00			
100	11,29	4,87	15,40			
120	11,08	4,66	13,00			
140	10,87	4,45	11,29			
160	10,70	4,28	10,00			
180	10,52	4,10	9,00			
210	10,35	3,93	7,86			
240	10,12	3,70	7,00			
280	9,90	3,48	6,14			
350	9,55	3,13	5,11			
390	9,37	2,95	4,69			
480	9,06	2,64	4,00			
600	8,68	2,26	3,40			
720	8,39	1,97	3,00			
780	8,27	1,85	2,85			
840	8,15	1,73	2,71			
900	8,04	1,62	2,60			
960	7,92	1,50	2,50			
1020	7,78	1,36	2,41			
1080	7,71	1,29	2,33			

Figura 6.18 - Planilha de teste de Aquífero - Tipo de Teste – Recuperação t/t'. Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 2004

## INTERPRETAÇÃO



### RECUPERAÇÃO - POÇO 08 t/t'

Figura 6.19 - Planilha de teste de Aquífero - Interpretação do Teste – Recuperação t/t'. Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 2004

Para avaliar a produção do poço 08 e as condições reinantes de exploração, foi realizado um teste de produção, após o teste de recuperação com o objetivo de determinar a equação

característica do rebaixamento, a eficiência hidráulica da captação e a vazão ótima de exploração, ou seja, determinar as características hidráulicas do poço 8.

Os parâmetros foram obtidos através das interpretações gráficas das vazões e dos rebaixamentos específicos x vazões dados pela equação simplificada de Jacob (6.1), onde

$$S = BQ + CQ^2 \text{ sendo:}$$

s = rebaixamento em m

Q = vazão em m<sup>3</sup>/h

B = perdas de carga do aquífero

C = perdas de carga do poço

e = eficiência hidráulica em % =  $(BQ \times 100)/(BQ + CQ^2)$

No dia 17/08/04 foi executado um teste de produção com 4 (quatro) etapas distintas de bombeamento a vazões constantes e crescentes com duração de 60min cada. Salienta-se que a vazão máxima obtida foi limitada pela capacidade do equipamento de bombeamento instalado e a profundidade do poço, conforme **Tabela 6.14**:

**Tabela 6.14 – Avaliação das características hidráulicas do poço 8**

<b>Tempo</b>	<b>1ª Etapa</b>	<b>2ª Etapa</b>	<b>3ª Etapa</b>	<b>4ª Etapa</b>
<b>Minuto</b>	<b>Nível Din.</b>	<b>Nível Din.</b>	<b>Nível Din.</b>	<b>Nível Din.</b>
1	9,39	12,71	14,28	16,00
2	9,83	12,84	14,43	16,12
3	10,20	12,90	14,49	16,20
4	10,41	12,91	14,56	16,27
5	10,57	13,01	14,60	16,33
6	10,70	13,07	14,66	16,35

7	10,75	13,11	14,69	16,41
8	10,83	13,15	14,70	16,45
9	11,00	13,16	14,73	16,47
10	10,97	13,20	14,75	16,51
12	11,11	13,26	14,78	16,57
14	11,19	13,27	14,86	16,60
16	11,28	13,35	14,88	16,65
18	11,37	13,36	14,92	16,69
21	11,48	13,45	14,98	16,74
24	11,60	13,48	15,02	16,77
27	11,66	13,57	15,05	16,84
30	11,76	13,59	15,13	16,89
35	11,87	13,64	15,15	16,95
40	11,98	13,70	15,22	27,03
50	12,13	13,84	15,32	27,15
60	12,23	13,90	15,29	17,27
<b>Vazão</b>	<b>11,72</b>	<b>13,81</b>	<b>15,61</b>	<b>17,78</b>
<b>Nível Estático</b>	<b>6,42</b>	<b>6,42</b>	<b>6,42</b>	<b>6,42</b>
<b>Rebaixamento</b>	<b>5,81</b>	<b>7,48</b>	<b>8,97</b>	<b>10,85</b>
<b>Q/s</b>	<b>2,017</b>	<b>1,846</b>	<b>1,740</b>	<b>1,639</b>
<b>s/Q</b>	<b>0,496</b>	<b>0,542</b>	<b>0,575</b>	<b>0,610</b>

Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 2004

A equação característica e o gráfico de rebaixamento específico x vazão (**Tabela 6.15**), mostram que o poço possui uma eficiência hidráulica pequena da ordem de 63,8%. Essa eficiência hidráulica está intimamente associada ao tipo de aquífero ensaiado e da porosidade do meio. Entretanto esse valor é relativamente alto para um aquífero fraturado/fissurado tendo um comportamento similar de um aquífero isotrópico, uma vez que existe certa proporcionalidade no decaimento da vazão específica entre as etapas, quase de forma linear, ou seja, existe um fluxo laminar, não imputando ao sistema ponto de inflexão.

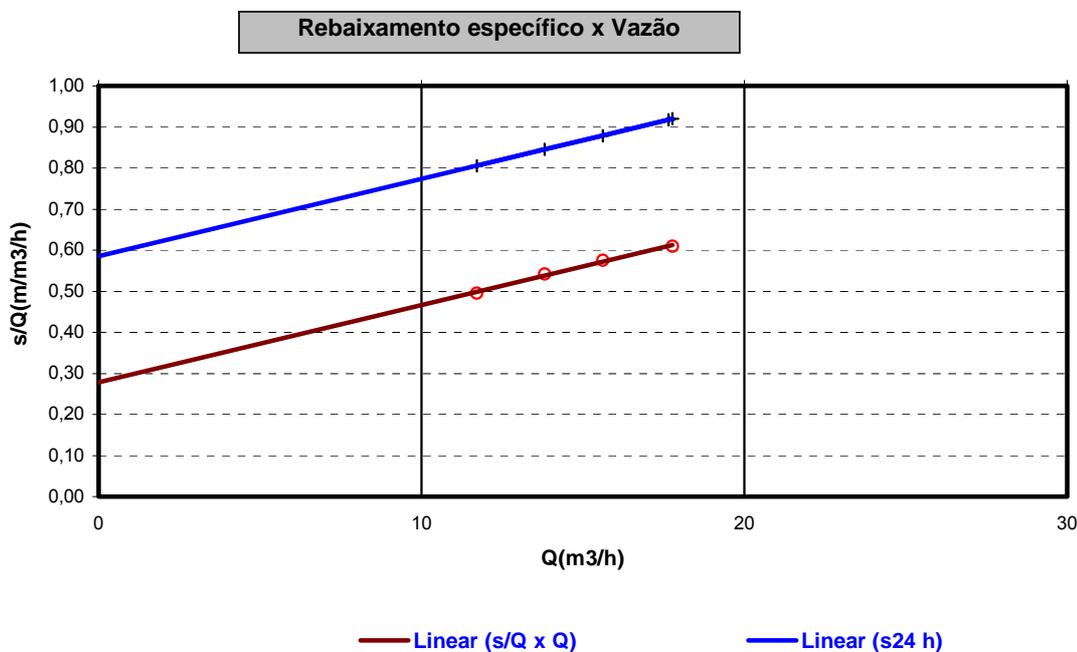
A equação característica para bombeamento de 24 horas é:

$$s = 0,5849*Q + 0,0188*C*Q^2.$$

Levando em consideração esse comportamento hidráulico foi definida uma vazão de exploração de 15m<sup>3</sup>/h com período de funcionamento de até 20 h/dia e o equipamento de bombeamento instalado a 24m de profundidade, com o objetivo de manter as condições de equilíbrio dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero e uma espessura saturada suficiente.

**Tabela 6.15 - Interpretação do Teste de produção do poço 8**  
**Equação característica e o gráfico de rebaixamento específico x vazão**

INTERPRETAÇÃO DE TESTE DE PRODUÇÃO							
Poço:	xxx			Município:	xxx		
Proprietário:	Eco Aqua Soluções S A				Local: xxx		
Aquífero:	fraturdo						
Nome:	Embasamento crisatalino						
Prof. N.E.(m):	# 6,42						
Início				Término			
Data:	18.11.00	Hora:	10:00	Data:	18.11.00	Hora:	15:00
Q (m3/h)	N.D.(m)	s med (m)	s/Q (m/m3/h)	Q/s (m3/h/m)	duração (h)	s calc (m)	s/Q calc (m/m3/h)
11,72	12,23	5,81	0,496	2,017	1,00	5,85	0,499
13,81	13,90	7,48	0,542	1,846	1,00	7,43	0,538
15,61	15,39	8,97	0,575	1,740	1,00	8,93	0,572
17,78	17,27	10,85	0,610	1,639	1,00	10,90	0,613
17,65	22,61	16,19	0,917	1,090	24,00	10,78	0,611



INTERPRETAÇÃO			
Equação tipo:	$s=B*Q+C*Q^2$	Q/s (m3/h/m) =	1,090
B =	0,2782	s/Q (m/m3/h) =	0,917
B(24h)=	0,5849	Eficiência (BQ/(BQ+CQ^2)x100)=	63,8%
C=	0,01883	T (m²/dia) =	
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO PREVISTAS			
Vazão (m3/h)	<b>15,00</b>	Nível dinâmico (m):	<b>20,18</b>
		Prof. Instalação da bomba (m).	<b>24,00</b>

Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 2004

De acordo com os resultados do Teste de Aquífero, com todos os poços podemos calcular os parâmetros hidrodinâmicos. Os valores mais representativos de transmissividade do

aquífero obtidos na interpretação dos testes de aquífero foram sintetizados no quadro abaixo (Tabela 6.16)

**Tabela 6.16 – Valores de transmissividade do aquífero**

Poço bombeado	Tipo de teste	Transmissividade (m <sup>2</sup> /dia)	Q/s (m <sup>3</sup> /h/m)
<b>P3</b>	Rebaixamento	26	0,659
	Recuperação	7,15-11,40-26	
<b>P4</b>	Rebaixamento	ND	0,135
	Recuperação	1,75-7,00	
<b>P5</b>	Rebaixamento	ND	0,068
	Recuperação	>1,00	
<b>P6</b>	Rebaixamento	ND	0,155
	Recuperação	1,60	
<b>P8</b>	Rebaixamento	13,50-19,37	1,090
	Recuperação	23,85	
<b>P13</b>	Rebaixamento	ND	0,204
	Recuperação	5,00	

ND – Não determinado tendo em vista as condições de fluxo turbulento

Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 2004

De modo a identificar se existe interferência entre poços, durante os testes de bombeamento foram utilizados os poços mais próximos como piezômetros, como segue na Tabela 6.17.

**Tabela 6.17 – Descrição dos Piezômetros**

Poço Bombeado	Poço Observado	Interferência
08	04	Sem resposta
	05	Sem resposta
	11	Sem resposta
	13	Sem resposta
03	06	Sem resposta
	ETA	Sem resposta
	11	Rebaixou 0,68m

Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 2004

O valores das medidas do rebaixamento por interferência no Poço P11, encontra-se na Tabela 6.18:

**Tabela 6.18 – Rebaixamento por interferência do poço 11**

Data	Hora	Tempo (minuto)	Nível de água (metro)	Rebaixamento (metro)
16/08/04	16:40	0	1,70	0,00
		20	2,00	0,30
		30	2,00	0,30
		50	2,00	0,30
		80	2,00	0,30
		110	2,00	0,30
		140	2,10	0,40
		180	2,10	0,40
		260	2,15	0,45
		290	2,16	0,46
		350	2,21	0,51
		410	2,30	0,60
		560	2,30	0,60
		650	2,30	0,60
		760	2,31	0,61
		880	2,36	0,66
		940	2,38	0,68
		1100	2,38	0,68

Fonte: MARIANO e SILVEIRA, 2004

### 6.3. ELABORAÇÃO DO PROJETO FINAL – FASE 2

Em função dos resultados de vazão e qualidade da água podemos passar ao dimensionamento das demais etapas do projeto:

- Dimensionamento dos equipamentos de bombeamento dos poços;
- Rede hidráulica de captação e distribuição;
- Reservatórios e obras civis;
- Estação de tratamento de água (ETA)
- Automatismo
- Serviços complementares (Urbanização, Treinamento, entre outros)

Simultaneamente entramos com o pedido de outorga junto a SERLA. É prudente não iniciar qualquer tipo de obra antes da outorga, pois podem aparecer exigências complementares. O projeto do sistema, apesar de não estar claramente descrito é importante, pois demonstrará o compromisso com o tratamento da água de modo a adequá-la aos padrões da Portaria 518 do Ministério da Saúde, principalmente no caso de a qualidade da água bruta apresentar um ou mais parâmetros acima dos valores máximos permitidos na Portaria 518.

### **6.3.1. Outorga do recurso hídrico subterrâneo (autorização para o uso).**

Para se obter o direito de operar o poço para extração de água subterrânea no Estado do Rio de Janeiro, o interessado deverá entrar novamente com o pedido de outorga de direito de uso junto à SERLA – Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas, nos termos da Portaria SERLA nº 307, de 23 de dezembro de 2002.

De acordo com o artigo 22º e 24º desta portaria, para obtenção de autorização para perfuração de poços tubulares, o interessado deverá apresentar à SERLA os seguintes documentos e informações:

- a) Documento de identidade do requerente, qual seja RG e CPF, no caso de pessoa física, e CNPJ, para pessoa jurídica;
- b) Requerimento assinado pelo responsável pelo empreendimento ou seu bastante procurador, juntamente com respectiva procuração;
- c) Comprovante de pagamento dos emolumentos a serem recolhidos;
- d) Título de Propriedade do terreno;
- e) Licença Ambiental, quando couber;
- f) Formulários fornecidos pela Coordenação de Gestão de Recursos Hídricos,, dispostos no art.16 desta Portaria
- g) Planta, na escala 1:50.000, do IBGE, com localização geográfica do poço, objeto do pedido de outorga, incluindo nome dos corpos hídricos e bacia hidrográfica, além dos outros poços nas imediações bem com a presença de fontes poluidoras
- h) Cópia do projeto de perfuração e construção de poço,
- i) Relatório Técnico contendo a avaliação da sustentabilidade do Aquífero, assinada por profissional habilitado, informando:

- Tipo de aquífero (fissurado ou granular);
- Perfil geológico;
- Perfil construtivo do poço;
- Teste de produção do poço (bombeamento);
- Registro de nível estático e dinâmico até estabilização do nível dinâmico;
- Interferência com outros poços existentes na área;
- Teste de vazão executado segundo as normas da ABNT (NBR 12212 E 12244);

- Gráfico de vazão, em função da diferença entre o nível estático e dinâmico ( $Q \times sw$ ), do tempo ( $Q \times t$ ) e da razão entre as duas vazões calculadas;
  - Justificativa técnica acerca da vazão solicitada, comprovando que esta não irá alterar o nível dinâmico do poço;
  - Planilhas de campo e representação gráfica dos testes mencionados, assim como de vazão para detectar entrada de água;
  - Foto do poço;
  - Vazão de lançamento dos rejeitos dos poços, com foto do local;
  - Construção do barrilete de controle operacional, o qual permitirá o futuro monitoramento das respectivas condições;
  - Cálculo da capacidade de recarga do aquífero;
  - Exploração máxima admissível;
  - Análise físico - química e bacteriológica da água;
- j) Cópia da ART (Anotação de Responsabilidade Técnica) do responsável técnico pelo projeto, acompanhado da cópia da respectiva guia de pagamento junto ao CREA/RJ, com as coordenadas do local de perfuração;
- k) Protocolo da Requisição de demarcação da faixa marginal de proteção, quando couber.

Na entrega dos documentos relacionados junto a um dos endereços da SERLA, será emitido protocolo de solicitação. O processo será então remetido à Diretoria de Gestão de Recursos Hídricos - DGRH para conhecimento e envio a Coordenação de Outorga e Cobrança – COUC que ficará incumbida de orientar, proceder à análise e emitir minuta do decreto de outorga e que junto com o processo deverá ser encaminhado à Assessoria Jurídica da SERLA - AJUR, para exame dos aspectos jurídicos da documentação apresentada, bem como a minuta elaborada. Após a autorização do Governador e a sua publicação no Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, o processo retornará a SERLA para entrega do original do Decreto ao requerente, introdução dos dados no Sistema de Informações de Recursos Hídricos e arquivamento do processo administrativo.

De acordo com o Art.31 no ato administrativo de outorga deverá constar, no mínimo, as seguintes informações:

- a) Identificação do outorgado;

- b) Localização geográfica (latitude e longitude) e hidrográfica (corpo d'água, bacia);
- c) Finalidade do uso da água;
- d) Vazões outorgadas e sua distribuição temporal;
- e) Prazo de validade;
- f) Obrigação de recolher os valores da cobrança pelo uso dos recursos hídricos nos termos a serem definidos por regulamento próprio;
- g) Obrigação de instalar dispositivos de medição para registro das vazões captadas, derivadas, extraídas e lançadas, bem como de monitorar a quantidade e qualidade dos efluentes;
- h) Obrigação de adaptar suas atividades e obras ao Plano de Bacia Hidrográfica superveniente;

Cláusula condicionando a eficácia da outorga de direito de uso à:

- a) Aprovação da SERLA do projeto básico de engenharia para captação, ou derivação de água, lançamento de efluentes e das demais medidas que venham a ser necessárias ao uso pretendido;
- b) Obtenção, junto ao órgão ambiental competente, da Licença Ambiental quando for o caso.

O outorgado obterá direito e deveres. Direito de ter prioridade no uso da água, em relação a futuros vizinhos interessados em novas perfurações. Deveres como proteger o poço e o aquífero, tomando cuidados para que não haja infiltrações de qualquer tipo, enxurradas ou outras causas para dentro deles. Comunicar a SERLA eventuais anomalias ou anormalidades verificadas no seu poço ou de outros próximos. Pedir renovação da outorga a cada 5 anos.

#### **6.4. EXECUÇÃO DO PROJETO FINAL – FASE 2**

Com os poços outorgados, deverá ser executada a obra seguindo um planejamento e cronograma pré – estabelecido, de modo a acompanhar o prazo e desembolso. Somente para ilustrar foi incluído um exemplo, na **Tabela 6.19**, de cronograma físico e financeiro de Execução da obra e Commissionamento.

**Tabela 6.19 - Cronograma de obra**

Cronograma Físico-Financeiro			ATUALIZAÇÃO: 15/08/005										
Atividade			Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Total
Levantamentos técnicos preliminares	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto	2.000										2.000
	Financeiro	Realizado	2.250										2.250
Estudo hidrológico e geofísico	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto	10.000										10.000
	Financeiro	Realizado		10.550									10.550
Perfuração de poços	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto			35.000	55.000	55.000	55.000	33.480				233.480
	Financeiro	Realizado			35.000	56.250	59.530	49.350	33.500				233.630
Teste de Vazão e Avaliação dos po	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto			20.000	10.950	10.000						40.950
	Financeiro	Realizado			10.000	11.000	11.000	13.500					45.500
Outorga dos poços	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto	1.000	1.500			7.500	2.500					20.000
	Financeiro	Realizado	850	1.000			3.500	8.000	7.000				20.350
Instalação dos poços	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto					64.874						64.874
	Financeiro	Realizado					59.850						59.850
Amostras e ensaios laboratoriais Análises de Água	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto			4.000	4.000	4.000	4.000			4.000	4.000	24.000
	Financeiro	Realizado				1.850	5.550	1.850	3.500	1.000	2.000		15.750
Obtenção das Licenças Ambientais	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto					3.000				3.000	3.000	9.000
	Financeiro	Realizado					2.850			3.264	2.500		8.614
Projeto de rede hidráulica	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto					5.000	5.000					10.000
	Financeiro	Realizado					2.000	3.186					5.186
Projeto da ETA	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto					10.000	10.000					20.000
	Financeiro	Realizado					8.000	8.000	2.500				18.500
Construção da rede hidráulica	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto					50.000	54.000	85.000	54.240	39.239		282.479
	Financeiro	Realizado						80.000	80.000	80.000	53.000		293.000
Construção da ETA	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto						100.000	150.000	150.000	188.750		588.750
	Financeiro	Realizado						55.000	180.000	256.000	103.560		594.560
Urbanização	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto					20.210					13.000	33.210
	Financeiro	Realizado					2.000		12.000	8.000		15.200	37.200
Comissionamento, Partida e Treinamento	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto								10.000	12.000		22.000
	Financeiro	Realizado								5.500	15.200		20.700
Gerenciamento e implantação	Físico	Previsto											
	Físico	Realizado											
	Financeiro	Previsto	2.000	5.000	10.000	22.000	27.000	27.000	32.000	32.000	32.000	21.915	210.915
	Financeiro	Realizado	120	1.850	2.550	18.630	6.351	26.874	18.923	22.458	35.891	26.586	160.233
<b>Total</b>	Financeiro	Previsto	15.000	6.500	69.000	91.950	186.374	178.710	221.980	267.000	253.240	281.904	1.571.658
	Financeiro	Realizado	3.220	13.400	47.550	87.730	150.631	112.760	217.923	292.958	381.655	218.046	1.525.873
<b>Total Acumulado</b>	Financeiro	Previsto	15.000	21.500	90.500	182.450	368.824	547.534	769.514	1.036.514	1.289.754	1.571.658	
	Financeiro	Realizado	3.220	16.620	64.170	151.900	302.531	415.291	633.214	926.172	1.307.827	1.525.873	

Legenda:  

 Previsto Inicial  
 Previsto Revisado  
 Realizado

Fonte EcoaAqua Soluções (adaptado pelo autor)

## 6.5. COMPARAÇÃO COM AS PREMISAS INICIAIS

Após a conclusão da obra, podemos realizar uma comparação com as premissas iniciais e verificar a rentabilidade real. Nesta fase ainda não teremos o custo real de operação, porém o custo do investimento será o real. Realizando uma análise de retorno com os custos realizados podemos observar que o projeto atingiu os seus objetivos de rentabilidade de acordo com os resultados demonstrados na **Tabela 6.20**.

Tabela 6.20 - Rentabilidade dos investimentos Após Obra

<b>Rentabilidade dos Investimentos Após Obra</b>	
Consumo (m3/mês)	15.000
Tarifa Concessionária (R\$/m3) -média	7,01
Despesa Mensal com Concessionária (R\$/mês)	105.150,00
Despesa Mensal com Operação Poços	27.564
<b>Ganho Financeiro - Mensal (R\$)</b>	<b>77.586</b>
<b>Ganho Financeiro - Anual (R\$)</b>	<b>931.032</b>
Custo Investimento R\$	1.525.873
<b>Pay-back (Bruto) (*) - anos</b>	<b>1,99</b>

(\*) sem contar o custo de capital

Fonte : (autor)

## **CAPÍTULO 7. MODELOS PRÁTICOS PARA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE POÇOS TUBULARES PROFUNDOS**

Preliminarmente cabe salientar que a construção de poços tubulares para a captação de água subterrânea, por se tratar de uma obra de hidrogeologia, deve ser executada segundo normas de elaboração de projetos, bem como de normas para a construção de poços tubulares profundos. Nos procedimentos a serem adotados, dois pontos básicos a serem avaliados são: viabilidade técnica de captação do recurso hídrico subterrâneo e a viabilidade econômica do empreendimento. A viabilidade técnica da captação do recurso hídrico está caracterizada pela elaboração de um projeto construtivo que atenda ao binômio “o que eu tenho”, “o que eu quero” e ao atendimento de normas que otimizem a exploração racional e sustentável do recurso hídrico subterrâneo.

Com base na vazão requerida, na existência do aquífero na área em questão, através de mapas geológicos, mapas temáticos de tendências, cadastramento de dados de poços perfurados no entorno do ponto em estudo é elaborado um projeto básico para a perfuração de um poço tubular profundo. Neste projeto estarão contemplados todos os dados possíveis, os geológicos, hidrogeológicos, características dos materiais para a perfuração bem como dos materiais para a completação, equipamento de bombeamento, potência a ser instalada, adução ao ponto de distribuição, controle da produção e esquema de manutenção preventiva. Com todos estes dados coligidos se elabora o estudo da viabilidade econômica do empreendimento e se define sua exeqüibilidade ou não.

A situação de carência quase absoluta de subsídios no campo de operação e manutenção de poço, sob a forma de normas e diretrizes técnicas tem sido freqüentemente apontada pelos profissionais e entidades do setor em encontros técnicos, simpósios e congressos. Frente a esta necessidade e, levando em conta a complexidade do assunto e a grande variedade de situações, JORBA (1982) elaborou um manual que reunisse as linhas metodológicas de pesquisa e tratamento dos problemas e propusesse critérios e procedimentos a serem adotados, de modo a se constituir em instrumento de efetiva aplicação prática.

O material descrito neste capítulo não representa uma obra completa e definitiva. O texto apresenta o resultado da pesquisa na literatura e transmite a experiência de profissionais, inclusive o autor, no trabalho executado na EcoAqua Soluções, empresa que opera sistemas de abastecimento autônomos baseados em poços tubulares profundos. O objetivo deste texto é apresentar um material de fácil implementação e que poderá ser interpretado pelo profissional responsável pela operação e manutenção dos poços sem, no entanto dispensar a orientação e análise de um geólogo e/ou hidrogeólogo. Existem poucos materiais na literatura que abordem

o tema de uma forma prática. A disseminação deste tipo de material deve ser incentivada pelas entidades de classe tipo, Federação de Indústrias (FIESP, FIRJAN, Associação Brasileira de Águas Subterrânea, ABAS) e órgãos responsáveis pela outorga de água subterrânea como forma de orientar e educar os usuários finais.

Segundo JORBA (1982), é importante salientar que os critérios e procedimentos indicados não devem ser tomados como normas rígidas; eles comportam adaptações compatíveis com as particularidades locais e a diversidade de situações.

A organização de um serviço permanente de operação e manutenção de poços, em que o acompanhamento sistemático prevaleça sobre a prática aleatória de tipo corretivo ou emergencial, requer a elaboração de programas adequados, com base na uniformização de critérios e procedimentos, na implantação da infraestrutura necessária e na eficiente articulação das equipes encarregadas.

A operação sistemática é concebida como um processo de obtenção e armazenamento de dados que permita avaliar o desempenho do sistema aquífero-poço-bomba ao longo do tempo, em comparação com suas características iniciais. Assim, o conjunto de atividades de operação deve estar orientado para o conhecimento do problema fundamental de exploração de poços, que é o de saber a vazão segura que o aquífero pode fornecer permanentemente, ao longo dos anos e, em decorrência, otimizar as condições de exploração. A manutenção, por sua vez, consiste em assegurar inspeção regular nos sistemas, efetuar o registro sistemático das condições do poço, equipamentos e materiais em uso, detectar as causas dos problemas e saná-los, de modo a garantir a eficiência e o bom funcionamento dos sistemas.

Operação e manutenção guardam, portanto, uma estreita relação e interdependência: na operação, a análise da massa de dados produzidos serve para detectar os tipos de problemas apresentados pelo sistema, fornecendo subsídios e pistas para sua solução; cabe à manutenção individualizar o problema, identificar suas causas e aplicar a solução adequada. Nos fluxogramas apresentados nas **figuras 7.1 e 7.2** – Fluxogramas de operação e manutenção de poços, respectivamente – mostram-se, em cada domínio, a seqüência de atividades requeridas e suas relações de dependência e complementaridade.

Para implantar um programa de operação torna-se necessário, numa primeira etapa, reunir todos os dados históricos de cada poço, complementá-los com medidas e testes atuais e fixar as condições de exploração referidas ao ano base de execução do programa. A segunda etapa, que corresponde à programação propriamente dita, consiste em estabelecer a periodicidade de inspeções e medições, os critérios de processamento e avaliação dos dados e a articulação prática com o setor de manutenção. O programa de manutenção preventiva tem como ponto de partida o levantamento dos problemas previsíveis do sistema, cujos indicadores po-

dem ser detectados na fase pré-operatória; estabelece a seguir, a sistemática de execução de medidas, observações e revisões, tanto no poço como no equipamento de bombeamento e prevê a avaliação periódica de desempenho do sistema.

O enlace operação - manutenção é condição básica para garantir a real aplicação dos programas. No caso de haver separação física entre os setores, devido à estrutura do órgão encarregado deve ser assegurado o fluxo de dados e informações e o acesso ao acervo de dados.

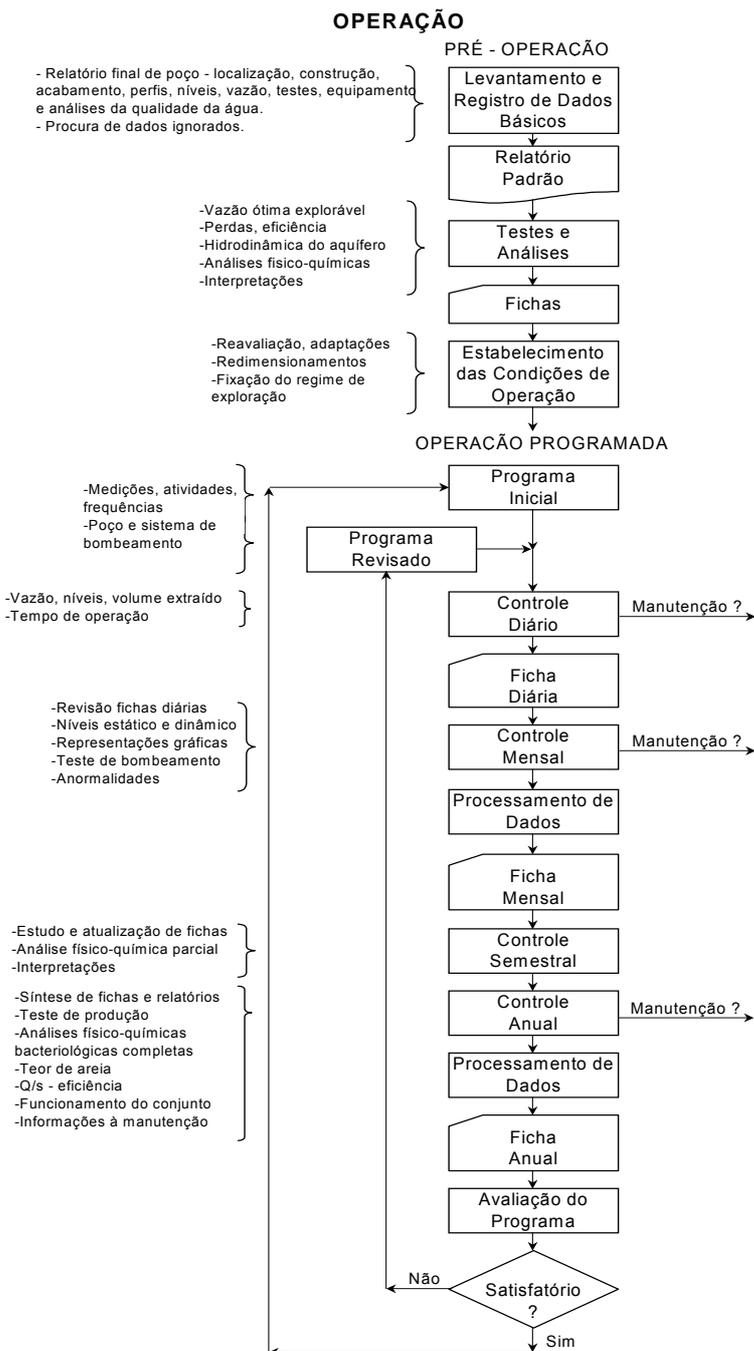
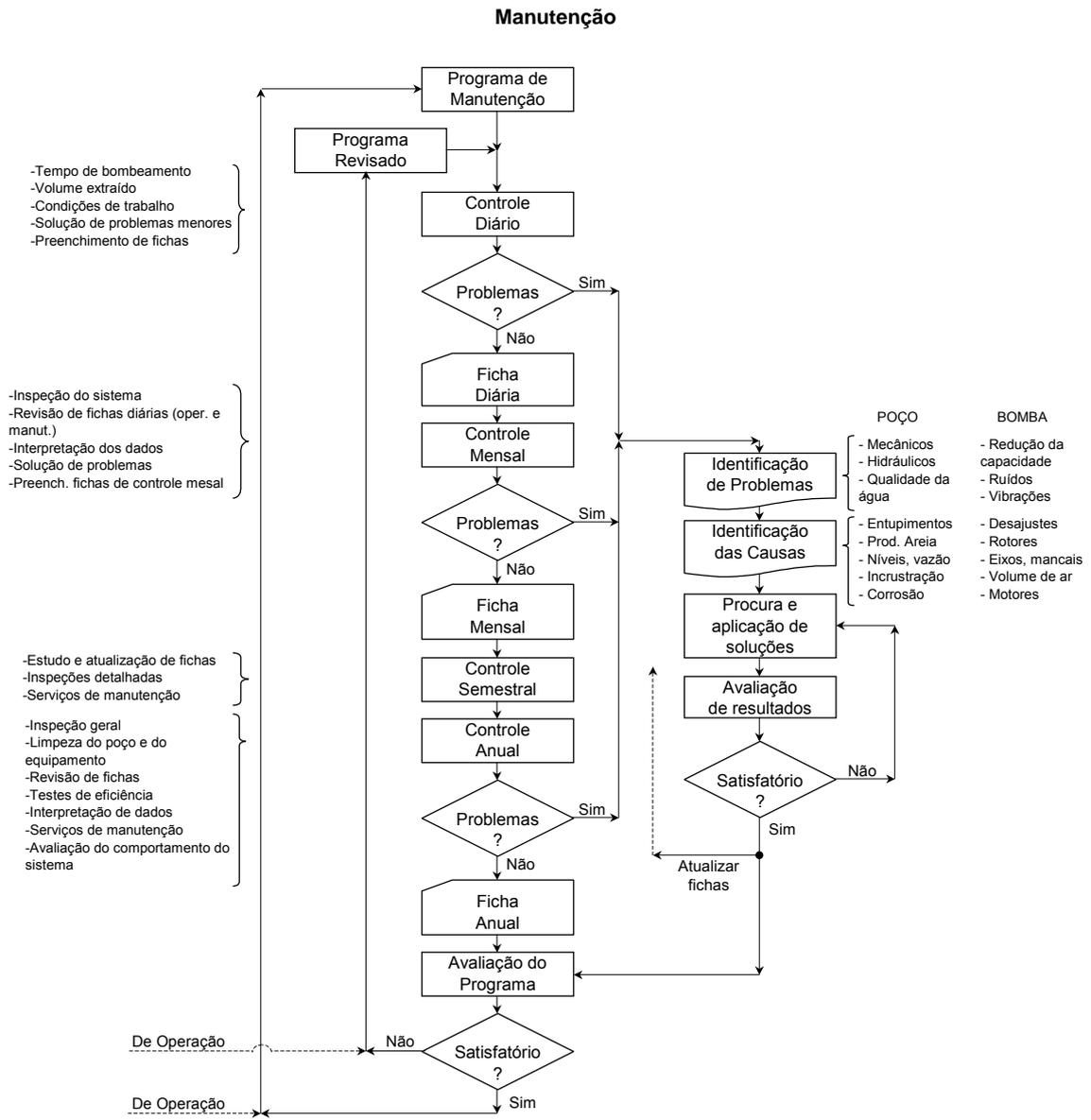


Figura 7.1 – Operação e Pré Operação. Fonte: JORBA (1982)



**Figura 7.2 – Manutenção. Fonte: JORBA (1982)**

O manancial, independentemente de sua forma de ocorrência, é o coração de um sistema de abastecimento de água. Seria, pois, de se esperar que tanto as captações de água de superfície quanto às de água subterrânea tivessem controle adequado de operação e manutenção, mas, infelizmente, não é o que ocorre. Os sistemas baseados em captação de água superficial são via de regra adequadamente inspecionados e operados, ao passo que os que exploram água subterrânea, através de poços e outras formas de captação, são comumente negligenciados. Quando se trata de poço, geralmente só é dada alguma atenção ao equipamento de bombeamento e, mesmo assim, quando ocorre alguma avaria. Devido ao fato de tanto o poço

quanto partes essenciais dos equipamentos estarem situadas abaixo da superfície, vigora nestes sistemas o adágio popular “o que não é visto não é lembrado”.

O problema de operação de poços deve ser focado num domínio apropriado, abrangendo desde as condições de ocorrência e circulação da água subterrânea até as condições hidráulicas e de construção do poço. Isto é, a questão mais importante que se deve ter em mente é conhecer a vazão segura que o aquífero numa determinada área pode fornecer permanentemente, ao longo dos anos, e não só durante um dia, um mês ou um ano. Assim, o objetivo fundamental da operação de poços consiste em estabelecer um programa de obtenção e armazenamento de dados que permita avaliar o desempenho do sistema aquífero-poço-bomba ao longo do tempo, em comparação com as características iniciais. O programa deve incluir a coleta de uma variada gama de dados e medidas que, criteriosamente analisados, são de importância inestimável na avaliação do comportamento do aquífero e do poço com a exploração, na determinação dos volumes produzidos e dos custos de produção da água e na indicação da frequência adequada de manutenção preventiva do poço e do conjunto motor-bomba.

## **7.1 LEVANTAMENTO E REGISTRO DE DADOS BÁSICOS**

De acordo com JORBA (1982), a organização inicial de um cadastro atualizado e completo dos poços e equipamentos de cada sistema são medidas fundamentais para o estabelecimento das condições iniciais de uma operação sistemática. O cadastro deve abranger basicamente, os seguintes blocos de informações.

- Relatório final de poço, fornecido pela empresa perfuradora;
- Resultados das primeiras análises físico-químicas e bacteriológica da água;
- Estabelecimento das condições iniciais de operação (Vazão, Nível Dinâmico e Estático)
- Características do equipamento de bombeamento e instalações auxiliares.

### **7.1.1. Relatório Final de Poço**

O relatório de poço deve ser completo e detalhado, pois é o documento básico de referência no acompanhamento do poço durante a sua exploração. Deve conter pelo menos as seguintes informações.

- Dados de identificação e localização;
- Características de construção: métodos de perfuração, intervalos e diâmetros de perfuração, posição e diâmetros dos tubos de revestimento e filtros, especificação dos materiais;
- Características de acabamento: material de pré-filtro, tipo de cimentação, métodos e duração de desenvolvimento;
- Registros elétricos (perfilagens) e observações específicas;
- Descrição litológica e perfil geológico;
- Perfil construtivo em escala;
- Características do teste de produção: tipo e capacidade da bomba, duração, níveis d'água e vazão, gráficos de representação dos resultados, teor de areia;
- Dados interpretados: perdas de carga, vazão específica, tipo de aquífero captado.

Em São Paulo, o Departamento de Águas e Energia Elétrica padronizou as informações mínimas do Relatório Final de Poço através do anexo 7 da Portaria DAEE 717/96, de 12/12/96. O objetivo desta padronização é evitar que o DAEE, órgão responsável pela outorga receba um relatório diferente de cada empresa perfuradora dificultando transposição destes dados.

### **7.1.2 Resultado de Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas da Água**

Segundo JORBA (1982), o registro das características físicas químicas e bacteriológicas da água do poço, analisadas logo após a sua construção, é documento indispensável na organização de dados básicos. É recomendado que a primeira análise seja a mais completa possível. No item 6.3.3 Identificação da Qualidade de Água, é citado que a Portaria 518 do Ministério da Saúde é a norma que regula a potabilidade da água. O DAEE, exige para a outorga as tabelas 1, 3 e 5 desta portaria. Para uma melhor acompanhamento e avaliação hidroquímica do aquífero é importante que além dos itens constantes da portaria nº 518, seja analisados os seguintes elementos e parâmetros: Gás carbônico livre, oxigênio dissolvido, condutividade, sílica, cálcio, magnésio, carbonato, bicarbonato, alcalinidade, resíduo seco.

Posteriormente a implantação do tratamento deverá ser realizada uma análise completa de acordo com a Portaria nº 518 e dos parâmetros necessários para o acompanhamento do tratamento e dos poços, após a Estação de Tratamento de Água.

### 7.1.3 Estabelecimento das Condições Iniciais de Operação

De acordo com JORBA (1982), a implantação de um programa de operação de poços passa por uma etapa preliminar cujo objetivo é determinar as condições iniciais de exploração de cada poço, fixada após análise dos dados execução e interpretação dos ensaios necessários. No item 6.3.4 Testes de Bombeamento em Poços e Aquíferos, foi detalhada toda a metodologia para execução destes testes, que deverá ser executada após a perfuração. Através destes ensaios será possível determinar:

- Vazão explotável;
- Nível Dinâmico e Estático;
- Número de horas de funcionamento do poço

Estas condições iniciais, deveriam ter sido estabelecidas quando da entrada do poço em funcionamento, no entanto, no caso de não existir uma definição precisa destas condições será necessário proceder a uma campanha de vistoria dos poços em funcionamento, com a realização de medidas e ensaios cujos resultados, convenientemente analisados, servirão para fixar as condições de exploração.

As condições de exploração de um poço são determinadas mediante o conhecimento da vazão ótima explotável, das perdas de carga e eficiência do aquífero captado e da qualidade físico-química da água. Uma vez conhecidas às características do poço e do aquífero, será necessário reavaliar as condições atuais de exploração, efetuar as adaptações ou redimensionamentos necessários dos equipamentos de bombeamento e fixar o regime mais adequado de funcionamento do sistema.

### 7.1.4 Instalação e Características do Equipamento de Bombeamento e Materiais Auxiliares

Para JORBA (1982), CAPUCCI et al (2001) e GIAMPÁ E GONÇALES (2005), após a execução dos testes de aquífero e produção, teremos a determinação da vazão explotável ideal e do nível dinâmico. Com estes dados e de posse de informações construtivas tais como: características físico-químicas e bacteriológicas da água, vazão de exploração ideal e a altura manométrica para onde a água será transferida será possível dimensionar o equipamento de bombeamento e o painel elétrico.

O Conjunto, ilustrado nas **Figuras 7.3 e 7.4**, usualmente, devem ser compostos por:

- Conjunto moto bomba submersível.

- Quadro Elétrico de Comando e Proteção.
- Cabo Elétrico: condutor elétrico que interliga a bomba no interior do poço ao quadro.
- Tubulação Adutora: Geralmente de aço galvanizado, PVC ou até mesmo de mangueiras flexíveis, conectando a bomba até o cavalete na superfície, por onde sai a água bombeada;
- Cavalete ou Barrilete montado na superfície e conectado à rede adutora, normalmente em material de aço galvanizado com tubo, união, curva, registro gaveta ou outro, ventosa, saída lateral, válvula de retenção, hidrômetros, filtro do hidrômetro (opcional) e manômetro (opcional)
- Tubulação para medição do nível d'água (tubo piezométrico), usualmente em PVC de 3/4"
- Eletrodos de proteção de níveis instalados para a proteção do grupo moto bomba
- Torneira para coleta de amostras

Deverão ser instalados no quadro de comando, horímetro, equipamentos elétricos de proteção da bomba (relê de falta de fase, relê de nível, proteção para descargas, etc.), voltímetro e amperímetro.

Além destes materiais fixos a equipe que acompanha a operação dos poços deverá possuir dependendo das condições de cada poço e sistema os seguintes equipamentos de uso móvel:

- Medidores de nível de água elétricos
- Kits para análise de ferro, dureza total e cloretos
- Condutivímetro
- Omhmímetro
- Termômetro

Como prevenção para os trabalhos de operação é recomendável que seja instalado um simples sistema de desinfecção por retro-lavagem, conforme ilustrado na Figura 7.5.

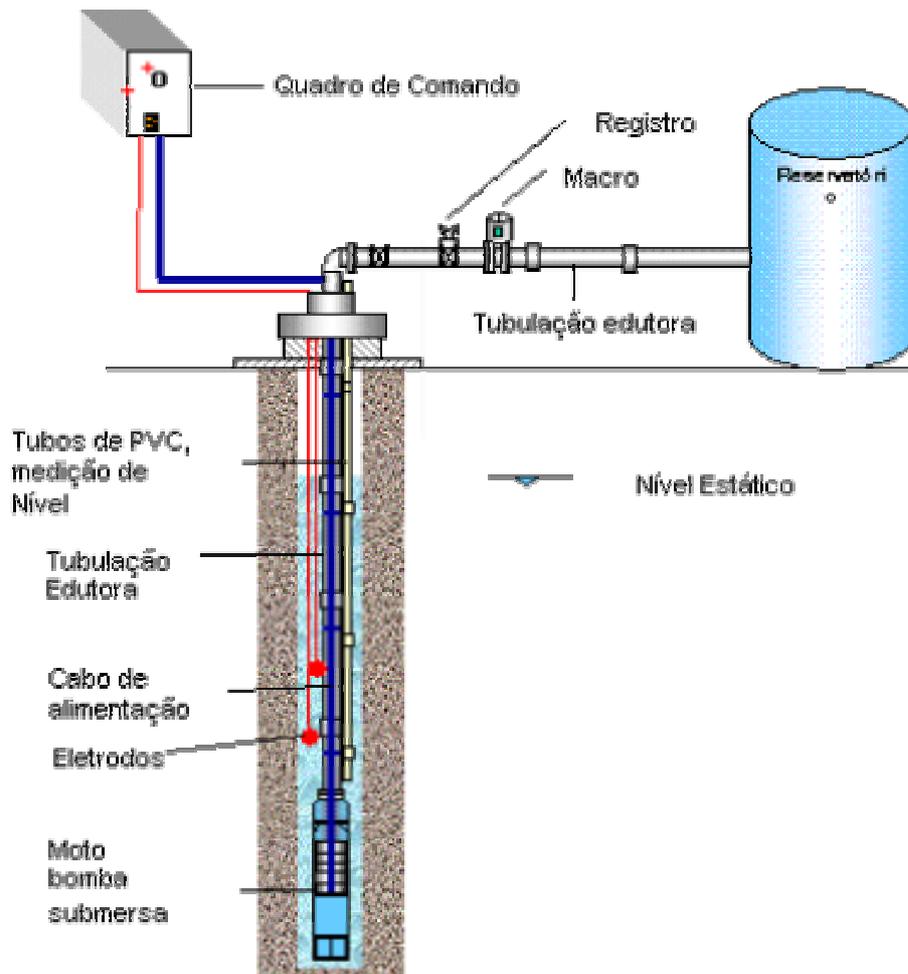


Figura 7.3 Desenho Esquemático da Instalação de Poço Tubular. Fonte: GIAMPÁ E GONÇALES (2005)

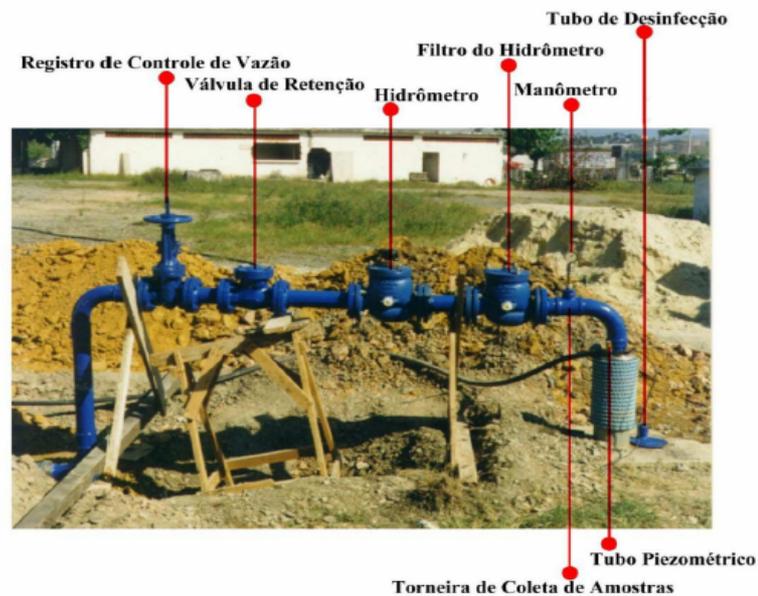


Figura 7.4 Barrilete de controle operacional. .Fonte Capucci et al, 2001



**Figura 7.5 Barrilete de controle operacional. Fonte Capucci et al, 2001**

O registro das características do conjunto de bombeamento instalado em cada poço é fundamental no planejamento da operação e no controle da manutenção. Não obstante ser uma das partes inspecionadas de um sistema, pelos freqüentes defeitos que pode apresentar, seu controle é, em muitos casos, negligenciado. É comum ver-se bombas e motores instalados sem plaquetas de identificação; às vezes ocorre troca ou remanejamento de equipamento de um poço para outro, sem o necessário registro; há, ainda, casos freqüentes de bombas que sofrem recondicionamento, perdendo partes de suas características originais, sem que haja registro histórico do fato. A falta de controle dificulta a avaliação periódica da eficiência do equipamento, dos tipos de defeitos que apresenta com o tempo de funcionamento e de sua vida útil. Mais ainda dificulta o julgamento da natureza do problema que o poço venha a apresentar durante a exploração, aumentando o grau de incerteza quanto, a saber, se trata de problema da bomba ou do próprio poço. JORBA, (1982) e JOHNSON DIVISION (1978).

Os dados abaixo discriminados reúnem os elementos essenciais do equipamento de bombeamento e dos equipamentos auxiliares destinados ao controle da operação, dispostos nos seguintes itens:

- Elementos característicos do poço: profundidade total, ano de perfuração, diâmetro útil e profundidade da câmara de bombeamento; resultados do teste de produção;
- Características do conjunto motor-bomba: tipo de bomba, marca, modelo, números de estágios, vazão nominal, altura manométrica-nominal, diâmetro externo máximo; tipo de motor, potência, rotação, corrente;
- Características de instalação: profundidade real do crivo, nível estático, nível dinâmico, vazão, altura manométrica total;

- Croquis de instalação, incluindo a linha de recalque;
- Características dos equipamentos auxiliares: dispositivo para medição de nível d'água, medidor de vazão, totalizador de horas de funcionamento, dispositivos de segurança.

Como exemplo é apresentado a **Tabela 7.1**, um resumo das principais características do poço, equipamentos de bombeamento e instalações auxiliares.

**Tabela 7.1 – Característica do Poço, Equipamentos de Bombeamento e Instalações Auxiliares**

Características do Poço, Equipamentos de Bombeamento e Instalações Auxiliares			
Item	Descrição	Poço 1	Poço 2
01	Ponto de Referência	Próximo a Paletização	Próximo ao prédio da manutenção
02	Profundidade do Poço (m)	104,00	60,00
03	Nível Estático (m)	2,86	2,33
04	Nível Dinâmico (m)	21,07	18,59
05	Vazão Final (m³/h)	12,00	2,50
06	Entradas de Água	entre 15 -20 m	20 m
07	Profundidade da Bomba (m)	42,00	48,00
08	Cimentação	0,00 à 15,00 m	0,00 à 15,00 m
09	Diâmetro	Ø 4"	
10	Revestimento		
10.1	Material e Diâmetro	Tubo Geomecânico Ø 4"	Tubo Geomecânico Ø 4"
10.2	Instalação (m)	0,00 à 104,00 m	0,00 à 60,00 m
10.3	Tipo de União	rosca	rosca
11	Entrada de Água Filtros		
11.1	Instalação (m)		
12	Bomba		
12.1	- Fabricante	Ebara	Ebara
12.2	- Modelo	BHS 232-23 - Ø 4"	BHS 222-9 - Ø 4"
13	Motor	M4	M4
13.1	- Tensão	380 v - trifásica	380 v - trifásica
13.2	- Força (kw) / (HP)	5 Kw / 7,00 HP	1,1 Kw / 1,5 HP
13.3	- Frequência (Hz)	60	60
13.4	- Corrente Nom. I nom		
13.5	- Corrente Max. I max	0,00	17 A
14	Tubulação Eductora		
14.1	Material	Aço galvanizado BS	Aço galvanizado BS
14.2	Diâmetro	Ø 2"	Ø 2" c/ red. p/ 1.1/2" na bomba
15	Tubo Piezométrico		
15.1	Material	PVC com luvas de FG	PVC com luvas de FG
15.2	Diâmetro	Ø 1/2" FG	Ø 1/2" FG
16	Cabos Elétricos		
16.1	Bitola	PPP 4 x 16 mmm	PPP 4 x 16 mm
17	Hidrômetro - Marca	Bermad	LAO
17.1	Diâmetro	Ø 2"	Ø 2"
17.2	Tipo	Woltman	Woltman
18	Eletródos ( superior/ inferior)	12 m / 47 m	6 m / 47 m
19	Paneis		
19.1	Fuzíveis	Diazed 25 A	Diazed 25 A
19.2	Contactora	Siemens modelo 3TF32	Siemens modelo 3TF32
19.3	Relé térmico	Siemens (10 - 16 A)	Siemens (16 - 25 A)
19.4	Relé de Nível	Jaciri	Jaciri
19.5	Relé de Fase	Jaciri	Jaciri

Fonte: EcoAqua

## 7.2 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO - LEVANTAMENTO E REGISTRO DE DADOS BÁSICOS – AVALIAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Segundo GIAMPÁ E GONÇALES (2005), a operação de poços consiste num conjunto de atividades que, uma vez observadas, permitirá o acompanhamento da vida útil do poço,

tanto no que diz respeito a sua produção, quanto à eficiência do sistema constituído pelo poço propriamente dito, o aquífero e o sistema de bombeamento. O monitoramento de uma unidade de produção pode se dar de maneira manual ou automática, na dependência dos recursos disponíveis em termos de registro e transmissão de informações.

Usualmente são objetos de registro diário, semanal, mensal ou mesmo em períodos maiores, (semestre ou ano), os seguintes parâmetros:

- Produção em m<sup>3</sup>/hora
- Pressão na saída do poço
- Nível Estático e Dinâmico
- Nível de cloro e flúor (quando se tratar de águas de abastecimento público)
- Tempo de funcionamento dia
- Leituras de consumo de energia e dos parâmetros envolvidos (tensão, amperagem etc)
- Coleta e análise periódica de água do poço, segundo os padrões indicados pelos órgãos gestores de recursos hídricos.

O planejamento e controle operacional de sistemas de abastecimento de água, através de poços tubulares profundos têm por objetivos:

- Otimização do sistema, objetivando uma produção a menor custo;
- Redução de intervenções emergenciais
- Planejamento de substituições e redução do risco
- Obtenção de melhor condição de funcionamento com aumento da eficiência do sistema como um todo

Segundo JORBA (1982), CAPUCCI et al (2001) e GIAMPÁ E GONÇALES (2005), a implantação de um programa de operação, tendo como base o conhecimento das condições iniciais de funcionamento do sistema e a instalação permanente de dispositivos e equipamentos de medição, permite avaliar regularmente o desempenho do sistema, otimizar sua eficiência total, identificar problemas e fornecer indicações para a manutenção preventiva.

Em geral, a sistemática de medições, análises e interpretações são uniformizadas nos programas básicos. As variações mais importantes ocorrem na frequência de obtenção dos dados e no registro de informações adicionais impostas pela operação regular, uma vez que as condições de conjunto tendem a variar com a intensidade e o tempo de exploração. É imprescindível que as unidades de exploração sejam auto-suficientes na coleta dos dados; que a e-

quipe responsável produza os melhores dados possíveis e que as interpretações obedecem a técnicas e padrões definidos.

A operação de poços abrange dois grupos principais de atividades, que são:

- O controle de funcionamento dos equipamentos de bombeamento;
- O processo de coleta, controle e interpretação de dados.

A **Tabela 7.2** apresenta um sumário com as principais informações e testes que devem ser realizados no sistema, bem como a frequência. Esta tabela não é exaustiva e pode ser adaptada para cada sistema, com alterações da frequência de realização das atividades.

**Tabela 7.2 – Sumário com as principais informações e testes**

Medições e atividades	Frequência			
	diária	mensal	semestral	Anual
Vazão	x			
Nível inicial	x			
Nível estático		x		
Nível Dinâmico	x			
Volume total extraído	x			
Tempo de operação	x			
Leitura dos parâmetros elétricos tensão/corrente	x			
Teste de bombeamento		x		
Consumo de energia (Kw)		x		
Teste de produção				x
Análise físico-química		x	x	x
Análise bacteriológica		x		x
Teor de areia				x
Processamento de dados		x		
Interpretação		x		
Recomendações à manutenção		Sempre que necessário		

**Fonte: JORBA, 1982 (adaptado pelo autor)**

A frequência da visita poderá ser diária, semanal, quinzenal ou qualquer outro período, de acordo com a complexidade do sistema, disponibilidade de mão de obra, etc. O importante é que a coleta de dados seja a mais rigorosa possível de modo a permitir uma interpretação e avaliação dos dados.

Segundo CAPUCCI (2001) é essencial não superexplorar o poço, mantendo-se sempre a vazão e o nível dinâmico recomendado nos testes de bombeamento. Assim, os dados coletados serão interpretados visando comparar eventuais anomalias, como aumento do teor de ferro, cloretos ou dureza, variação do nível dinâmico, gastos excessivos de energia, etc.

Segundo GIAMPÁ E GONÇALES (2005), quando do início da operação do poço, deve-se seguir as recomendações da empresa perfuradora, assim como, a vazão permitida e regulamentada na outorga, recomendando-se que seja feito um monitoramento técnico periódico do sistema. Trata-se de observações e medições de itens fundamentais para acompanhar e avaliar o comportamento do poço e do conjunto de bombeamento, relativo às suas eficiência e qualidade da água.

### **7.2.1 Medições e Testes**

Segundo JORBA (1982), CAPUCCI et al (2001) e GIAMPÁ E GONÇALES (2005), a medição da vazão extraída do poço deve ser feita diariamente e sempre ao final do período de bombeamento. A medida instantânea pode ser feita por qualquer método, dependendo do tipo de instalação de bombeamento; porém, na operação sistemática é de todo recomendável o emprego de hidrômetro junto com o totalizador de horas.

Para a determinação do volume total extraído, no caso de medição instantânea de vazão adota-se a vazão média do período multiplicada pelo tempo efetivo de bombeamento; no caso de medição com hidrômetro totalizador, a leitura é feita diretamente ao final de cada período de bombeamento, referindo o resultado ao tempo de operação indicado no totalizador de horas.

#### **7.2.1.1 – Principais Medições**

São apresentados a seguir apenas os aspectos metodológicos básicos, ficando para cada usuário decidir a forma mais adequada ao seu caso específico. Baseado neste conceito, a implantação de um programa mínimo de controle operacional requer uma estrutura simplificada, acompanhada de vistorias periódicas.

Durante a visita (que poderá ser diária, semanal ou quinzenal) será preenchida uma planilha de controle, constando o volume bombeado no período, vazão ( $m^3/hora$ ), total de horas bombeadas e de repouso, nível estático, nível dinâmico, resultado da análise físico-química expedida, leitura dos parâmetros elétricos (tensão / corrente), consumo mensal (kwh )

e observações quanto a anormalidades verificadas no conjunto motor bomba e no funcionamento do sistema.

Estas são as principais medições sugeridas, cujas anotações devem ser colocadas em planilhas, datadas e arquivadas para avaliações semanais, mensais e anuais, conforme cada sistema.

A medição da vazão extraída do poço deverá ser feita de acordo com a frequência estabelecida no programa de monitoramento da operação. A medida instantânea pode ser feita por qualquer método, dependendo do tipo de instalação de bombeamento; porém, na operação sistemática é de todo recomendável o emprego do hidrômetro junto com o totalizador de horas (horímetro).

Para determinação do volume total extraído, no caso de medição instantânea de vazão adota-se a vazão média do período multiplicada pelo tempo efetivo de bombeamento; no caso de medição com hidrômetro totalizador, a leitura é feita diretamente ao final de cada período de bombeamento, referindo o resultado ao tempo de operação indicado no totalizador de horas.

A medição diária dos níveis d'água no poço deve ser feita no início e no fim de cada período de funcionamento, anotando-se os respectivos tempos de descanso e de bombeamento. Dada a importância fundamental das medições de nível d'água, são necessários alguns esclarecimentos adicionais.

O nível estático é comumente definido como a posição (profundidade) do nível d'água de um poço em repouso, medida em relação à superfície do terreno, no local. A posição real do nível estático depende do tempo de recuperação do poço, após a parada da bomba, o qual, por sua vez, é função da vazão extraída, do rebaixamento atingido e das características do aquífero. Assim, um nível d'água medido a um dado tempo após desligar a bomba pode ou não ser o nível estático real. Em poços de recuperação rápida e de curto período de bombeamento é provável que o nível estático seja atingido diariamente, o que não ocorrerá com os poços de recuperação lenta e longo bombeamento diário. Por esta razão é preciso distinguir nível estático, que deve ser medido após um período suficientemente longo de descanso do poço e o nível inicial, medido diariamente.

A medida do nível d'água inicial, antes de começar cada bombeamento, é um dado muito importante para referência e interpretação e deve ser feita com cuidado.

Para a medição do nível estático real sugere-se uma frequência mensal, coincidindo com os testes rotineiros de recuperação e bombeamento que exigem interrupção prolongada do sistema. Para obter uma medida fiel, procede-se da seguinte forma:

- Analisam-se as medidas de nível inicial e de nível dinâmico feitas em condições similares, verificando possíveis anomalias;
- Efetua-se um teste de recuperação;
- Ao final do teste, anota-se o nível obtido; se a parte final da recuperação for muito lenta, colocam-se os dados em papel monologarítmico a fim de verificar a tendência da curva e extrapolá-la, em correspondência com a escala dos tempos;
- Se o aquífero for confinado, anota-se a hora exata da medida e registra-se a pressão atmosférica, de modo a possibilitar as correções necessárias.

O nível dinâmico, para efeito de operação, significa a profundidade mais baixa do nível d'água no poço atingida ao final de um período de bombeamento a uma dada vazão. A medida deve ser feita pouco antes de desligar a bomba, simultaneamente com a medida de vazão, sempre com o cuidado de registrar o tempo de duração do bombeamento.

Na prática os poços operam dependendo da necessidade de um reservatório, o que pode ocasionar distorções nas medidas de nível dinâmico e vazão que não sejam realizadas após um determinado período de funcionamento do sistema, uma vez que estas medidas não estarão sendo realizadas sempre após um mesmo período de bombeamento. No entanto este acompanhamento é importante para sinalizar alguma tendência do sistema. Podemos observar no item 7.3.2.1 o acompanhamento diário ND x Vazão x Número de horas de Funcionamento.

#### ***7.2.1.2 – Teste de Bombeamento e Recuperação***

Como sugestão encontra-se no item 7.3.2.1, Formulário 1 as verificações que são realizadas em um sistema operado pela EcoAqua Soluções S/A. Além das verificações usuais é importante que a organização e limpeza dos poços e Estação de Tratamento de Água estejam sempre adequadas.

Mensalmente, ou em uma frequência pré-estabelecida deverão ser realizados os testes de bombeamento e de recuperação dos poços, visando a determinar o nível estático (NE), nível dinâmico (ND), vazão (Q), rebaixamento (s), vazão específica (Q/s). Estes parâmetros estão definidos na **Tabela 6.9**.

Segundo JORBA (1982), estes testes são do tipo expedito, a vazão constante. As indicações para sua realização são idênticas às descritas no item 6.2.6 Testes de Bombeamento em Poços e Aquíferos, procedendo-se como se fosse uma só etapa de bombeamento, nas condições de funcionamento do sistema. A duração do bombeamento não deve ser inferior a 8 horas. A recuperação deve-se processar durante um tempo igual ou maior, com a devida atenção para a medida do nível estático real. Segundo a GIAMPÁ E GONÇALES (2005), este tempo deveria ser de no mínimo de 12 horas.

Segundo MARIANO e SILVEIRA (2004), o nível dinâmico e a vazão seriam anotados ao fim de 20 horas de bombeamento a cada 30 dias. O nível estático, também seria medido a cada 15 dias, após um tempo de paralisação constante de 4 horas. No entanto segundo o mesmo autor se as condições operacionais do sistema não permitirem este tempo de paralisação, o tempo de bombeamento e a frequência poderão ser redefinidos. O importante é que o tempo de bombeamento e frequência definidos sejam sempre respeitados e repetidos. A informação do poço deverá ser representada conforme o item 7.2.2 Processamento e Controle dos Dados e **Tabela 7.5 e 7.6**. Monitoramento dos Poços.

### ***7.2.1.3 Análise Físico-Química***

Segundo JORBA (1982) e adaptações da EcoAqua a determinação periódica da qualidade físico-química da água extraída é de importância básica na operação e manutenção, a fim de detectar a tempo efeitos nocivos da água no poço que geralmente, se processam de maneira lenta e gradativa.

### ***7.2.1.4 Análise bacteriológica da água.***

A água de um poço bem construído, protegido e desinfetado logo após a perfuração, dificilmente poderia apresentar qualquer problema de qualidade bacteriológica. Porém, frequentemente ocorrem casos de contaminação, ignorados e não detectados porque em geral coleta-se água para análise no reservatório ou na rede de distribuição, após passar por cloração, e não na saída do poço.

É necessário efetuar com rigidez, sempre que haja suspeita de contaminação e pelo menos uma vez por ano, o exame bacteriológico da água amostrada na boca do poço. Os principais motivos para isto são os seguintes:

- A possível existência de fonte de poluição do aquífero, não detectada no estudo de locação do poço ou desenvolvida após sua construção; este fator é particularmente importante em poços perfurados em aquíferos fissurados;
- O desenvolvimento de contaminações durante a operação:
  - a) na substituição ou reparo do equipamento de bombeamento, sem desinfecção posterior;
  - b) Na introdução de fios no poço, para medição de nível d'água;
  - c) Na execução de reparos no poço, como a complementação de material de pré-filtro, re-desenvolvimento, sem desinfecção posterior.

Sugere-se efetuar duas categorias de análise, a saber:

- Controle Diário do Cloro Livre após a Estação de Tratamento de Água e um ponto de Consumo
- Análise mensal conforme o estabelecido no **Tabela 7.7**. Padrão Análises Físico – Químicas e Bacteriológicas EcoAqua, que engloba os 21 parâmetros definidos por Jorba (1982) e outros parâmetros após a Estação de Tratamento de Água.
- Análise mensal de Cor, Turbidez, pH, coliformes totais, fecais e bactérias heterotróficas em um ponto de consumo conforme o estabelecido na tabela nº 9 da Portaria nº518 do Ministério da Saúde.
- Análise Anual de cada poço do sistema de acordo com a **Tabela 7.7**. Padrão Análises Físico – Químicas e Bacteriológicas EcoAqua.
- Análise Anual de acordo com a Portaria nº518 do Ministério da Saúde da água após a Estação de Tratamento de Água

## **7.2.2 Processamento e Controle dos Dados**

### ***7.2.2.1 Acompanhamento Diário do ND x Vazão x Número de horas de Funcionamento***

Segundo JORBA (1982), o registro diário, ou na frequência definida para cada sistema, das medições é a atividade mais fundamental na operação sistemática dos poços e do Sistema de Abastecimento Alternativo (Solução Alternativa). Considerando que este trabalho

fica a cargo de um operador, é muito importante e necessário mostrar-lhe a importância de sua missão e realizar um programa de treinamento e reciclagem quanto aos procedimentos de medição e a anotação correta dos dados.

Como exemplo é sugerido o formulário LV001 (**Tabela 7.3**) – Lista de Verificação executada pela EcoAqua, e o Formulário – Registro Diário de Operação, segundo JORBA (1982) – formulário nº 1.

**Formulário 1 – Registro diário de operação**

Registro Diário de Operação							Mês/Ano	
<b>1 - Identificação</b>								
N. poço:				Local:				
Prof. (m):				Diâmetro (mm):				
Equipamento de Bombeamento Instalado:						Potência(CV):		
Prof. Crivo (m):				Tubulação da água (Diam. mm):				
<b>2 - Medições</b>								
Colunas	1	2	3	4	5	6	7	8
Dia	Início		término		Horas de Funcionamento	Vazão medida (m³/h)	Vol. Produzido (m3)	Operador
	hora	n. inicial(m)	hora	ND (m)				
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
30								
31								
				Totais				
Observações :								
<b>3 - Instruções</b>								
coluna 1: marcar as horas de 1 a 24								
coluna 2: medir o nível antes de ligar a bomba								
coluna 3: marcar as horas de 1 a 24								
coluna 4: medir o nível antes de desligar a bomba								
coluna 5: coluna 3 menos 1								
coluna 6: medir a vazão antes desligar a bomba								
coluna 7: Diminuir o valor do hidrômetro ao desligar a bomba do valor inicial								
Observações - Não esquecer de anotar:								
a) Qualquer interrupção no bombeamento, tempo decorrido e motivo.								
b) ruídos, vibrações e qualquer outra anormalidade no bombeador (conjunto motor bomba)								
c) dias de chuva do mês								

Fonte: JORBA, 1982 (adaptado pelo autor)

É importante observar que também diariamente deverão ser coletados os dados sobre o funcionamento dos equipamentos eletromecânicos, que também serão registrados na LV001 (**Tabela 7.3**) ou no Formulário – Registro Diário de Manutenção, sugerido por JORBA (1982) – formulário nº 2.

**Formulário 2 – Registro Diário de Manutenção**

Prof. (m):			Diâmetro (mm):					
<b>2 - Características do Conjunto Motor/bomba</b>								
Bomba:	Marca:	Tipo:	Ano:	Nº. Patrimônio:				
Motor:	Marca:	Modelo:	Nº. Patrimônio:					
Potência(CV):	Tensão(V):	Corrente	Partida (A):					
Velocidade (rpm):	Data:	Trabalho (A):						
Instalação	Responsável:	Hm (m)	Hm total (m):					
Vazão (m³/h):	ND (m):	Duração (h):						
Produndidade do crivo (m):	Diâmetro de tubulação de água (mm):							
<b>3 - Controle de Manutenção</b>								
<b>Colunas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Dia	Horas Func.	Consumo de Energia (Kw/h)			Corrente de trabalho (A)	Tensão (V)	Operador	
		Leitura Inicial	Leitura Final	Consumo				
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
<b>4 - Ocorrências e Serviços Executados</b>								
Responsável:						Supervisor:		Data:

Fonte: Jorba, 1982 (adaptado pelo autor)

Esses dados são de particular importância para a operação e, por isso deverão ser coletados no mesmo horário das medições e também pelo operador do sistema e verificados semanalmente por um profissional capacitado.

**Tabela 7.3 – LV0001**

EcoAqua												LISTA DE VERIFICAÇÃO ETA - ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA				Referência LV-0001	
Departamento Técnico			Cliente:			Mês de Referência:			Nome do verificador:								
<b>ETA</b>																	
Dias da Semana	Data	Hora	Hidrômetro Eco-Aqua (m³)			Vazão Instant. (m³/h)	Horas Reais de Func. (h) (3)	Vazão Real (m³/h) (1)/(3)	Hidrômetro Grande Rio (m³)		Leitura Sondas Distribuidora (m³)						
			Atual	Medição diárias (1)	Acum. do mês (2)				Medição diária (4)	Acum. do mês (5)	Medição diária (1) - (4)	Acum. do mês (2)-(5)					
Seg																	
Ter																	
Qua																	
Qui																	
Sex																	
Sáb																	
Dom																	
<b>ETA</b>																	
Dias da Semana	Hidrômetro Concessionária			Análises Químicas			Pressão										
	Atual	Medição diária	Acum. do mês	Cloro Livre residual (mg/l)	Saída ETA		Pressão dos filtros (Kgf/cm²)										
				Saída ETA	Torneira Cliente	pH	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4	Filtro 5						
Seg																	
Ter																	
Qua																	
Qui																	
Sex																	
Sáb																	
Dom																	
Padrão				1 a 1,5	0,5 a 1,5	6,0 a 9,5											
Data de criação 29/04/03		Edição 005		Data da Revisão 27/12/04									Pag. 1/5				

EcoAqua												LISTA DE VERIFICAÇÃO ETA - ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA				Referência LV-0001	
<b>Container</b>																	
<b>Container 1</b>																	
Dias da Semana	Medidas Elétricas			Horímetro (h)													
	Bomba	Voltagem (V)		Amperagem (A)		Atual	Medição diária		Acum. do mês								
Seg																	
Ter																	
Qua																	
Qui																	
Sex																	
Sáb																	
Dom																	
<b>Container 2</b>																	
Dias da Semana	Medidas Elétricas			Horímetro (h)													
	Bomba	Voltagem (V)		Amperagem (A)		Atual	Medição diária		Acum. do mês								
Seg																	
Ter																	
Qua																	
Qui																	
Sex																	
Sáb																	
Dom																	
Data de criação 29/04/2003		Edição 005		Data da Revisão 27/12/2004									Pag. 2/5				



EcoAqua		LISTA DE VERIFICAÇÃO ETA - ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA							Referência LV-0001			
<b>Poços</b>												
Poço 1	Voltagem (V)	Amperagem (A)	Hidrômetro Eco-Aqua (m³)			Horímetro (h)			Vazão Instant.	Vazão Teórica	Vazão Real	ND
			Atual	Medição (6)	Acum. mês	Atual	Medição (7)	Acum. Mês	(m³/h)	(m³/h) (6) / (3)	(m³/h) (6) / (7)	(m)
Seg												
Ter												
Qua												
Qui												
Sex												
Sáb												
Dom												
<b>Poço 2</b>												
Poço 2	Voltagem (V)	Amperagem (A)	Hidrômetro Eco-Aqua (m³)			Horímetro (h)			Vazão Instant.	Vazão Teórica	Vazão Real	ND
			Atual	Medição (6)	Acum. mês	Atual	Medição (7)	Acum. Mês	(m³/h)	(m³/h) (6) / (3)	(m³/h) (6) / (7)	(m)
Seg												
Ter												
Qua												
Qui												
Sex												
Sáb												
Dom												
<b>Poço 3</b>												
Poço 3	Voltagem (V)	Amperagem (A)	Hidrômetro Eco-Aqua (m³)			Horímetro (h)			Vazão Instant.	Vazão Teórica	Vazão Real	ND
			Atual	Medição (6)	Acum. mês	Atual	Medição (7)	Acum. Mês	(m³/h)	(m³/h) (6) / (3)	(m³/h) (6) / (7)	(m)
Seg												
Ter												
Qua												
Qui												
Sex												
Sáb												
Dom												
Data de criação 28/04/03		Edição 005		Data da Revisão 27/12/04							Pag. 3/5	

**Fonte: EcoAqua (2004)**

O controle mensal e anual da operação deverá ser realizado por um profissional capacitado que deverá supervisionar o trabalho do operador, fazer cumprir o Programa de Monitoramento das Condições de Bombeamento, Programa de Controle de Qualidade da Água e acompanhar o Programa de Manutenção. Para tal os controles descritos nas **Tabelas 7.5 a , 7.5 b e 7.5 c** são de fundamental importância. Os **Formulários 3 e 4** também são exemplos de controle que podem ser realizados.

### Formulário 3 – Controle Mensal de Operação

Controle Mensal de Operação		Mês/Ano
<b>1 - Identificação</b>		
N. poço:	Local:	
<b>2 - Nível Inicial, Nível Dinâmico e Vazão</b>		
Medidas	Dias	
Tempo repouso(h)		
Nível Inicial (m)		
T. Bombeamento Contínuo (h)		
Nível Dinâmico(m)		
Vazão (m <sup>3</sup> /h)		
<b>Representação Gráfica</b>		
<b>2 - Observações gerais e instruções para a manutenção</b>		
Data:	Anormalidade:	Instrução:
Responsável:	Supervisor:	Data:

Fonte: JORBA, 1982 (adaptado pelo autor)

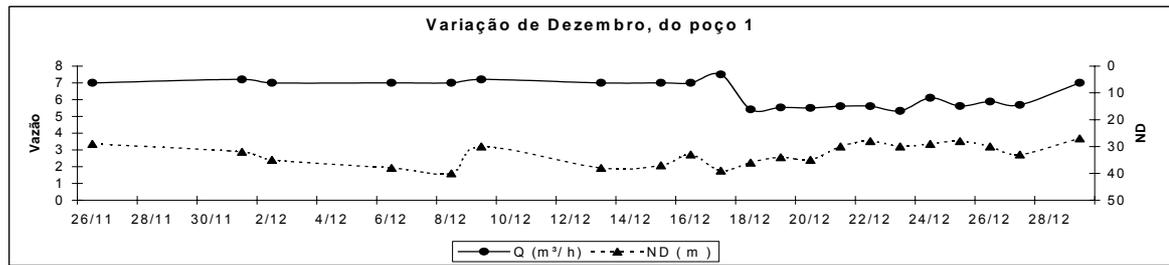
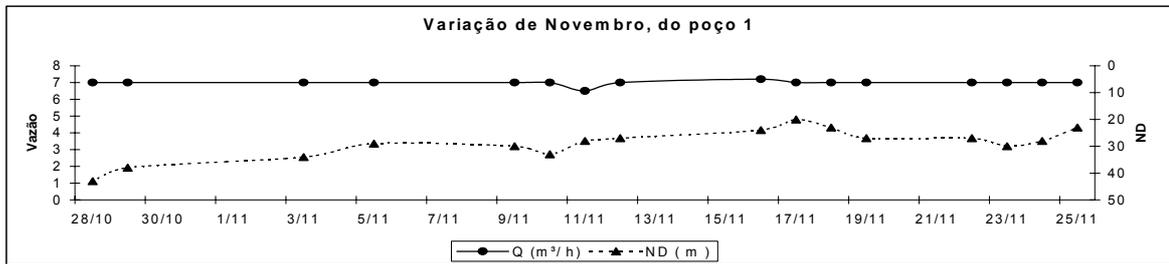
**Formulário 4 – Controle Anual de Operação**

Controle Anual de Operação				Mês/Ano			
<b>1 - Identificação</b>							
N. poço:		Local:					
Prof. (m):		Diâmetro (mm):					
Equipamento de Bombeamento Instalado:				Potência(CV):			
Prof. Crivo (mm):		Tubulação da água (Diam. mm):					
<b>2 - Sumário de produção</b>							
Vol. Total Extraído (m³):				Total de Horas de Bombeamento:			
Vazão Média:		Mês mais Seco:		Mês mais Chuvoso			
<b>3 - Níveis d'água, vazão e vazão específica</b>							
Media de teste		Dia/Mês					
T. recuperação (h)							
NE (m)							
T. bombeamento (h)							
ND (m)							
Vazão (m³/h)							
Q específica (m³/h/m)							
<b>Representação Gráfica</b>							
<b>4 - Resultado do teste de produção</b>							
Teste original	mês/ano	Coef. de perda de carga no poço (A)					
Teste atual	mês/ano	Coef. de perda de carga no poço (A1)					
Eficiência (%)		Coef. de perda de carga no poço (B)					
Eficiência (%)		Coef. de perda de carga no poço (B1)					
<b>5 - Observações</b>							
Responsável:				Supervisor:		Data:	

Fonte: JORBA, 1982 (adaptado pelo autor)

**Tabela 7.4 a - Acompanhamento Diário dos Níveis dinâmicos x Vazão**

	ANALISE DA VARIAÇÃO MENSAL DE VAZÃO E NÍVEL DINÂMICO ETA - ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA	Referência LV-0003 -A
	Departamento Técnico	Cliente:

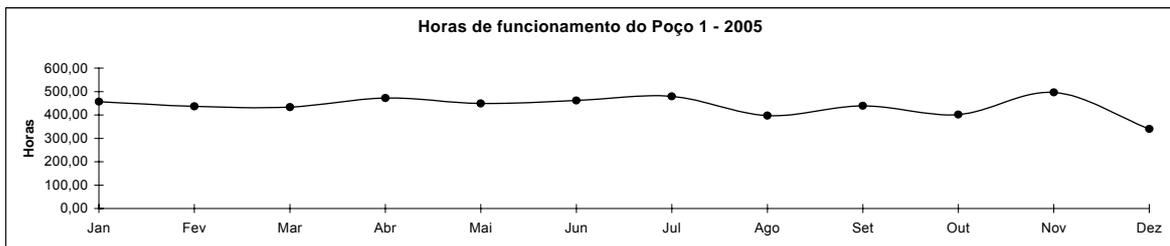
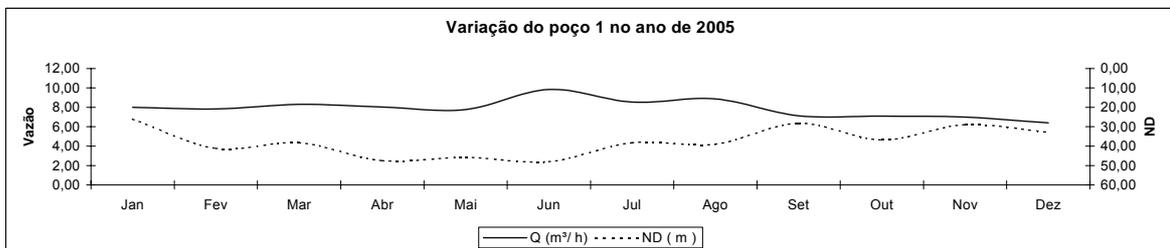


Data de criação 04/03/04	Edição 1	Data de Revisão
-----------------------------	-------------	-----------------

Fonte: EcoAqua

**Tabela 7.4 b - Acompanhamento Mensal dos Níveis dinâmicos x Vazão e Número de horas de Funcionamento do poço**

	ANALISE DA VARIAÇÃO MENSAL DE VAZÃO E NÍVEL DINÂMICO ETA - ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA	Referência LV-0003 -A
	Departamento Técnico	Cliente:



Data de criação 04/03/04	Edição 1	Data de Revisão
-----------------------------	-------------	-----------------

Fonte: EcoAqua

**Tabela 7.4.c - Relatório Diagnóstico de Manutenção**

EcoAqua		RELATÓRIO DE MANUTENÇÃO										Referência		
		ETA - Relatório Diagnóstico de Manutenção										RM - 0001		
Departamento Técnico		Cliente:			Mês de Referência:			Nome do verificador:						
Data	Local (equipam.)	Natureza Problema	Resolução problema	Tipo problema (M=mecânica; E=elétrica; H=hidráulica)	Manut. (C=corretiva; P=preventiva)	Tempo (h)		Parou ETA? (S / N)	n° horas da parada (h)	Custo (R\$)	Fornecedor	Faltou água no cliente? (S / N)	Fomos Acionados? (S / N)	
						Parada equipam.	Reparo equipam.							
28/05/04	poço 5	Limpeza dos Poços	Efetuada limpeza com solução Easy-Clean	H	P	24		Não				Não	Não	
06/07/04	poço 5	Queima do motor	Troca de bomba do poço 11 para o poço 5	E	C			Não				Não	Não	
12/04/05	poço 5	Queima do motor	Aguardar equipamento novo	E	C			Não				Não	Não	
08/05/05	poço 5	Quebra do tubo de medição e queda para o fundo do poço	Sacar bomba e resgatar o tubo	H	C			Não				Não	Não	
18/10/05	poço 5	Necessidade de Limpeza e manutenção dos Poços	Limpeza e manutenção, adequação da tubulação e teste de vazão		P	72		Não		R\$7.420	Wasser + Foxcel+Fort lider	Não	Não	
18/10/05	poço 5	Queima da Bomba	Instalação da bomba Ebara modelo BHS 222-18 , M4 pela Wasser.	M	C			Não		R\$1.919	Ebara	Não	Não	
Data de criação 29/04/03		Edição 001											Pág. 1/1	

**Fonte: EcoAqua**

O processamento e controle anual dos dados de operação consistem num cuidadoso trabalho de síntese dos relatórios mensais, com freqüente recorrência aos registros diários. É mais conveniente adotar como referência o ano hidrológico, abrangendo por inteiro uma estação seca e uma estação chuvosa, de modo a avaliar melhor a resposta do poço e do aquífero com a seqüência de períodos climáticos. No caso de ser adotado o ano civil como é de praxe, recomenda-se assinalar os meses do ano correspondentes a ambas as estações.

A ficha modelo sugerida para controle anual inclui: elementos de identificação do poço; dados totais de produção; medidas mensais de nível estático, nível dinâmico e vazão, com os respectivos gráficos de acompanhamento; resultados do teste anual de produção; parâmetros químicos calculados e observações decorrentes da análise de conjunto dos dados. Sugere-se os seguintes critérios para preenchimento da ficha:

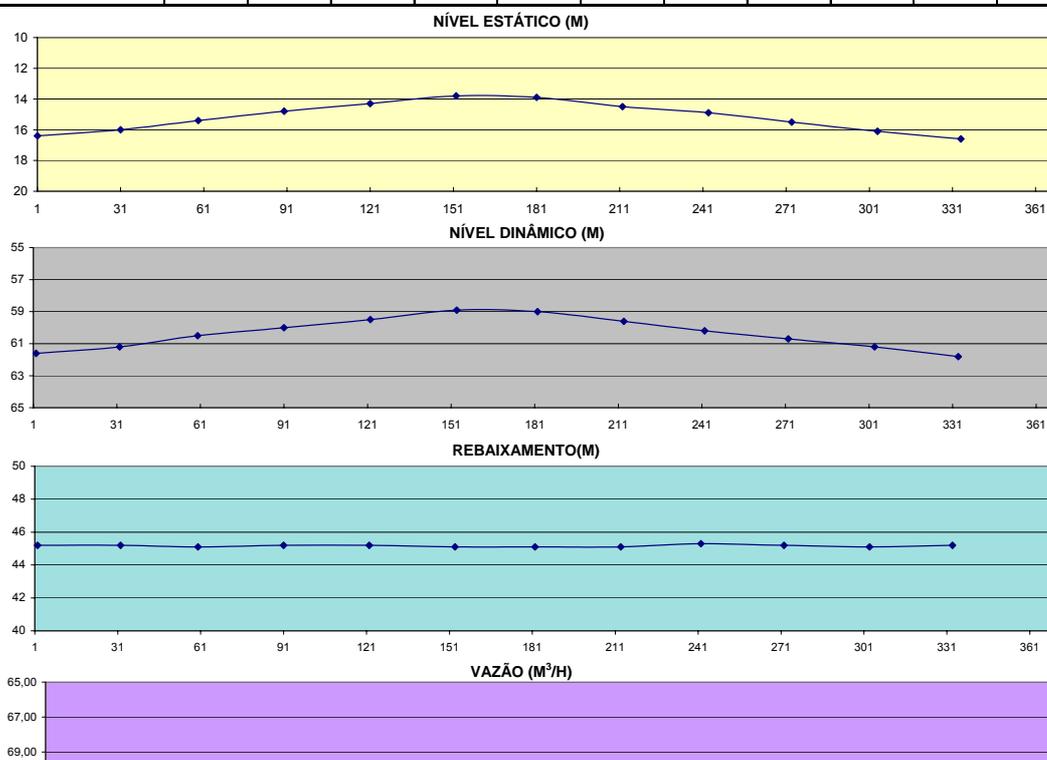
- Escolher pelo menos uma medida de nível estático mensal, obtida após um tempo de recuperação suficientemente longo; no caso de não haver sido feito o teste mensal de recuperação, recorrer ao registro diário e escolher a medida mais adequada;
- De igual modo, escolher medidas de nível dinâmico referentes a tempos de bombeamento suficientemente longos, com a correspondente medida de vazão;

- Grafar os dados de nível estático, nível dinâmico e vazão;
- No item "observações", registrar: variações bruscas ou gradativas de qualquer parâmetro hidráulico (nível d'água, vazão, vazão específica, eficiência), data ou mês e possível motivo; anormalidades verificadas no equipamento de bombeamento; indicações para controle, pela manutenção.

De forma monitorar os parâmetros obtidos no Teste de Bombeamento e Recuperação, item 7.2.1.2, a saber, Nível Estático, Nível Dinâmico, Vazão – Q (m<sup>3</sup>/h), Rebaixamento (m) e Vazão Específica (Q/s), MARIANO e SILVEIRA (2004) definiu o acompanhamento de acordo com a **tabela 7.5**.

**Tabela 7.5 - Monitoramento sem Perda**

MONITORAMENTO DO POÇO												
Ano	2005											
MESES	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Data leitura NE	1	1	1	1	1	1	29	1	1	1	1	1
Data leitura ND												
Dias corridos NE	1	31	59	90	121	152	181	212	243	273	304	334
Dias corridos ND	2	32	60	91	122	153	182	213	242	272	303	333
Nível estático	16,40	16,00	15,40	14,80	14,30	13,80	13,90	14,50	14,90	15,50	16,10	16,60
Nível Dinâmico	61,60	61,20	60,50	60,00	59,50	58,90	59,00	59,60	60,20	60,70	61,20	61,80
Rebaixamento	45,20	45,20	45,10	45,20	45,20	45,10	45,10	45,10	45,30	45,20	45,10	45,20
Vazão	69,80	70,00	69,90	70,10	69,95	70,00	69,90	69,80	69,90	70,00	69,95	70,00
Vazão específica	1,54	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,54	1,55	1,55	1,55

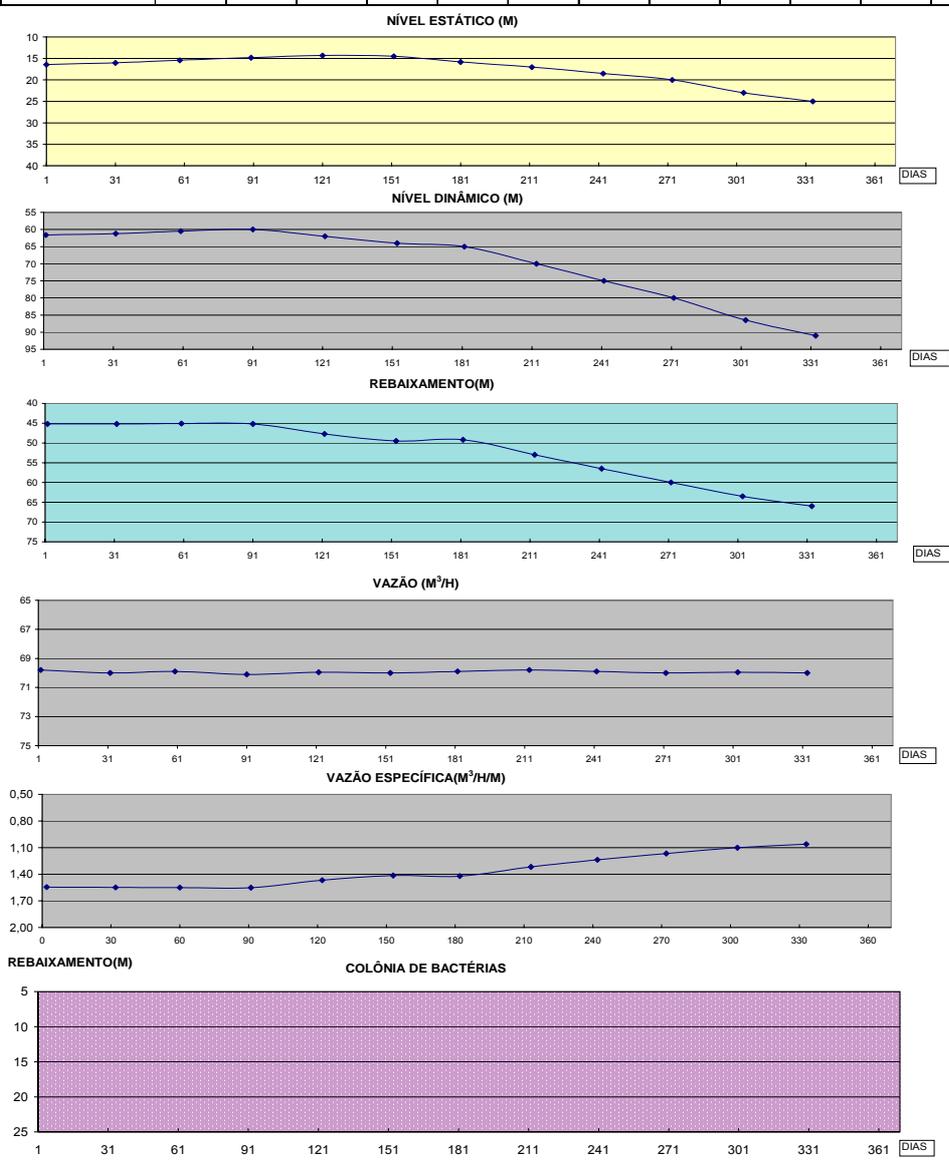


Fonte MARIANO e SILVEIRA, 2004

Como exemplo, estamos apresentando a **Tabela 7.6**, que para manter a vazão do poço praticamente inalterada, a operação foi obrigada a aumentar o Nível Dinâmico e conseqüentemente diminuir a vazão específica, indicando que neste poço está ocorrendo um problema.

**Tabela 7.6 - Monitoramento com Perda**

MONITORAMENTO DO POÇO												
2005												
ANO												
MESES	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Data leitura NE	1	1	1	1	1	1	29	1	1	1	1	1
Data leitura ND												
Dias corridos NE	1	31	59	90	121	152	181	212	243	273	304	334
Dias corridos ND	2	32	60	91	122	153	182	213	242	272	303	333
Nível estático	16,40	16,00	15,40	14,80	14,30	14,50	15,80	17,00	18,50	20,00	23,00	25,00
Nível Dinâmico	61,60	61,20	60,50	60,00	62,00	64,00	65,00	70,00	75,00	80,00	86,50	91,00
Rebaixamento	45,20	45,20	45,10	45,20	47,70	49,50	49,20	53,00	56,50	60,00	63,50	66,00
Vazão	69,8	70	69,9	70,1	69,95	70	69,9	69,8	69,9	70	69,95	70
Vazão específica	1,54	1,55	1,55	1,55	1,47	1,41	1,42	1,32	1,24	1,17	1,10	1,06



Fonte MARIANO e SILVEIRA, 2004

Segundo CAPUCCI (2001), para cada captação deverá ser elaborado um conjunto de medidas corretivas, permitindo sanar a tempo os problemas que poderão ocorrer nos anos seguintes. De uma maneira geral, recomenda-se, mesmo que não ocorram anormalidades, retirar a bomba pelo menos uma vez por ano ou uma vez a cada dois anos (necessidade de manutenção, no caso de águas muito mineralizadas) e limpar o poço utilizando-se sonda à percussão, pistoneando-se os filtros e entradas de água com produtos químicos adequados. Por vezes é utilizada uma simples injeção de ar comprimido o que, todavia, poderá ocasionar danos ao poço. Desta forma, feita a avaliação do conjunto do sistema através da implantação de uma rotina de visita periódica, os serviços de operação se tornarão mais seguros ao longo do tempo, caso se estabeleça uma história anual documentada de cada captação.

#### ***7.2.2.2 – Controle da Qualidade Físico Química da Água – Acompanhamento Mensal e Anual***

A realização de análises deve ser realizada de acordo com a frequência prevista no item 7.3.1.3, não só para verificar possíveis mudanças de composição química, mas também para determinar seu potencial de incrustação ou corrosão, de acordo com o regime de bombeamento do poço.

De acordo com Jorba (1982), durante a operação e por ocasião de reparos no equipamento de bombeamento é importante observar e anotar todo e qualquer sintoma de corrosão ou incrustação, como: consumo anormal de energia, material precipitado ao longo das tubulações, diminuição da vazão específica, saída de água ferruginosa.

Como exemplo, colocamos o acompanhamento das análises de um sistema alternativo de abastecimento (**Tabela 7.7**)

**Tabela 7.7 - Padrão Análises Físico – Química e Bacteriológica EcoAqua**

Resultados de Análises													
Cliente: Ano: 2005 Laboratório:	Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	Data do Coleta N° Laudo	01/02/05 05/01478	28/02/05 05/02927	01/04/05 05/04559	29/04/05 05/06041	29/04/05 05/06891	24/06/05 05/08599	21/07/05 05/09552	29/08/05 05/11390	08/10/05 05/13297	25/10/05 05/14245	30/11/05 05/15992	26/12/05 05/17353
<b>Parâmetros</b>	<b>VMP</b>												
Aspecto	Limpido	Limpido	Limpido	Limpido	Limpido	Limpido	Limpido	Limpido	Limpido	Limpido	Limpido	Limpido	Limpido
Odor	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Cor	15	5	5	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
pH	6,0 9,5	6,64	6,97	6,49	7,61	7,17	7,71	6,19	6,57	7,8	6,26	6,41	7,76
Temperatura	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Turbidez	5	0,65	1,26	0,1	0,1	0,17	0,02	0,09	0,02	0,08	0,12	0,01	0,09
Sólidos totais dissolvidos	1000	260	273	232,7	248,3	251,5	233,3	219,7	213,8	251,5	228	262,6	313,9
Alcalinidade de Hidróxido	0	<LQ											
Alcalinidade de Carbonatos	125	<LQ											
Alcalinidade de Bicarbonatos	250	48	46	50	42	46	48	40		44	44	44	46
Alcalinidade Total	48	46	50	42	46	48	40			44	44	44	46
Dureza Cálcica	45,5	35	53	50,2	51	42,9	55,6			56,5	51	44,6	47,8
Dureza Magnésio	12,5	19,4	12,3	15,8	15	5,2	8,4			11,5	11	11,4	12,2
Dureza Total	70	59	55,4	65,3	66	48	64	58	68	68	62	56	60
Oxigênio Consumido	3,5	0,4	0,4	1,5	0,3	0,5	0,7	1,1		0,9	0,3	0,8	0,4
Nitrogênio Amoniacal	1,5	0,02	0,01	<LQ	0,21	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,03	<LQ	0,24
Nitrato	1	<LQ											
Nitrato	10	4,03	4,76	5,11	3,72	2,24	2,92	3,55	0,84	0,76	0,79	0,92	0,85
Alumínio	0,2	<LQ											
Cálcio	18	14	21	20	20,4	17	23			22	20	17,8	19
Cloretos	53	44	42	44	46	46	42	42	40	42	46	42	44
Cobre	2	0,02	<LQ										
Ferro	0,3	<LQ	<LQ	0,08	<LQ	0,15	0,06	<LQ	0,28	<LQ	<LQ	<LQ	0,05
Fluoretos	1,5	0,18	0,15	0,16	0,23	0,14	0,16	0,21	0,1	0,23	0,2	0,13	0,09
Magnésio	4,93	7,73	4,86	6,3	6	4,45	3,34			4,58	4,32	4,55	4,85
Manganês	0,1	0,01	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,01	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Silica	54	35,01	40,9	34,16	38,06	51,2	22,8	35,4		17	18,91	17,69	18,66
Sulfato	250	15,36	13,2	3,57	4,28	1,7	1,36	2,85	3,89	25,6	26,55	19,5	18,08
Zinco	5	0,08	0,05	0,05	0,08	0,03	0,06	0,03	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Cloro Residual Livre	2,5	1,3	1,2	1,4	1,6	1,2	1,3	1,4	<LQ	1,3	1,2	1,2	1,2
Condutividade	400	400	420	358	382	387	359	338		387	351	404	483
Bactérias do grupo coliforme	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bactérias do gr. Colif. fecal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bact. Heterotróficas (48hs)	500	<LQ											

Fonte: EcoAqua

### 7.3. PROGRAMA DE MANUTENÇÃO

Para REBOUÇAS (1996), em vista dos parâmetros observados na operação dos poços, será possível se efetuar intervenções programadas nos poços, de tal maneira que se reduzirão os custos diretos e indiretos de tal procedimento. Uma intervenção programada permitirá uma atuação direta na questão central do que estiver ocasionando uma perda de eficiência do sistema. Assim, os indicadores observados no monitoramento, deverão possibilitar a intervenção no conjunto ou parte dele, quando e onde for desejável para o usuário do sistema. A intervenção poderá ocorrer isoladamente no poço, no conjunto de bombeamento e ainda no próprio aquífero. Para cada situação os indicadores obtidos e registrados durante a operação permitirá a identificação da provável causa e das soluções que poderão ser adotadas, bem como de ferramental mais adequado a cada caso. Situações decorrentes de problemas em equipamento de bombeamento são as mais frequentes e em nível de gravidade podem decorrer de problemas de incrustação, corrosão, produção de areia, produção de pré filtro, assoreamento etc. O fato de o poço ocupar local de pequena dimensão, acaba por fazer com o mesmo fique “escondido” dos responsáveis, e não em poucas vezes se trata de uma área que acaba “virando” espaço de guarda de materiais, inclusive alguns de alto risco para o poço e o sistema que ali funciona (caso de reservatórios de combustíveis, defensivos agrícolas e outros).

Segundo Jorba (1982) e GIAMPÁ E GONÇALES (2005), um serviço permanente de operação e manutenção de poços, baseado em programas sistemáticos de caráter preventivo, certamente proporcionará benefícios na diminuição das despesas de energia e de depreciação de materiais e

equipamentos; na racionalização do trabalho das equipes, padronização de materiais e equipamentos e redução dos estoques necessários, de modo a garantir a eficiência dos sistemas de abastecimento de água e assegurar o padrão sanitário exigido.

Um programa de manutenção preventiva consiste em assegurar inspeção nos poços nos prazos certos; efetuar o registro sistemático de medidas e informações sobre o comportamento do lençol subterrâneo, sobre as perdas hidráulicas nas captações e sobre a eficiência e durabilidade dos equipamentos e materiais em uso; detectar as prováveis causas dos problemas do poço e da bomba; organizar um serviço eficiente de suprimentos, baseado em almoxarifados regionais e locais, adequadamente localizados e dimensionados em função da distribuição geográfica dos poços em operação. Deste modo, a racionalização dos serviços minimiza a probabilidade de ocorrerem situações de emergência no abastecimento, como frequentemente ocorrem nas horas de máxima demanda de água, quando a manutenção é baseada em medidas aleatórias, de caráter duramente corretivo.

A prática de manutenção de tipo corretivo, adotada de forma rotineira e predominante em toda a parte, consiste em atacar os problemas pelos efeitos imediatos, sem procurar investigar suas causas. E, mesmo assim, de forma parcial, dando atenção só às falhas mecânicas apresentadas pelos equipamentos e descuidando do que possa estar ocorrendo com o poço.

A natureza do problema que ocorre num poço durante a operação não é facilmente discernível. O processo de deterioração geralmente se desenvolve de forma lenta e gradual até um ponto crítico a partir do qual se acelera rapidamente até o colapso. Se a natureza da deterioração for reconhecida a tempo, antes que atinja o ponto crítico, é possível reabilitar o poço. Dai porque assumem especial importância os procedimentos de operação sistemática na previsão de problemas e, por consequência, na indicação de pistas para a manutenção preventiva.

### **7.3.1 Problemas mais freqüentes em Poços**

A detecção da natureza do problema apresentado por um poço e, principalmente, de suas causas mais prováveis, requer o exame cuidadoso das variações das medidas e observações periódicas efetuadas, em associação com os registros de desempenho do equipamento de bombeamento. Para facilidade de abordagem da questão convém discriminar os poços tubulares em duas categorias, a saber:

- a) poços perfurados em terrenos sedimentares;
  
- b) poços perfurados em rochas duras, compactas.

Esta distinção é útil visto que uns e outros são em geral construídos segundo métodos e técnicas diferentes e, em decorrência, podem apresentar problemas peculiares durante a exploração.

Com efeito, nas perfurações em terrenos sedimentares o fluxo d'água para o interior do poço se realiza através de aberturas na tubulação de revestimento, que incluem a abertura da extremidade inferior e os mais variados tipos de seções filtrantes (tubos rasgados, perfurados, ranhurados ou tubos filtros);

Nas perfurações em terrenos duros, compactos, a passagem de água se dá diretamente através das fendas, fraturas, fissuras e canais da própria rocha. Tendo em mente esta distinção, são analisados os problemas mais comuns e freqüentes que podem ocorrer em poços e, a seguir, são fornecidos critérios para a procura e aplicação de soluções.

De modo geral, para efeito de análise, os problemas que ocorrem em poços podem ser classificados como de origem mecânica, hidráulica e de qualidade da água. Na prática esses processos atuam de forma combinada, tornando difícil a identificação do fator predominante.

O objetivo deste item não é abordar exhaustivamente todos os problemas de manutenção em poços e sim citar e descrever sucintamente os principais problemas e as causas

### ***7.3.1.1 Problemas Mecânicos***

As obstruções das seções filtrantes refletem-se em rebaixamentos progressivos do nível dinâmico, podendo ser detectadas nas interpretações dos dados de operação. A diminuição da vazão específica e o incremento da perda de carga, termo  $CQ^2$  da equação do poço (6.1) são determinantes na detecção do problema. A procura das causas das obstruções, quando não são evidentes ou não foram previstas após a construção do poço, segue um processo de dedução e exclusão com base nas características do poço e na composição química da água. As obstruções podem ser causadas por acúmulo de argila, silte ou areia no filtro e no pré-filtro. Outra causa são os subprodutos da corrosão que se depositam nas seções filtrantes e no fundo do poço. A produção de areia também é forte indício da corrosão. Os subprodutos do metabolismo bacteriano podem, também, produzir obstruções. Às vezes, quando se trata de bactérias de ferro, esta causa pode ser indicada por mudança de coloração da água bombeada, porém na maioria dos casos, é de difícil detecção e requer a execução de análises bacteriológicas.

A deterioração da estrutura do poço é um problema cujo cujos sintomas podem ser observados à superfície, manifestando-se em abatimento do terreno e na formação de gretas e sulcos convergentes em torno do poço. Em alguns casos, o problema poderá estar relacionado a uma taxa de bombeamento acima da capacidade do aquífero. Na maioria das vezes, no entanto, resulta do bom-

beamento excessivo de areia em poços mal desenvolvidos ou, mesmo, de colapso parcial ou total da coluna de revestimento e filtros.

Os defeitos no equipamento de bombeamento durante a operação podem mascarar a detecção da verdadeira natureza do problema, induzindo à conclusão equivocada quanto à existência de defeito no poço. A diminuição da vazão de bombeamento, acompanhada de leve ascenso do nível dinâmico, é indicio de defeito no equipamento instalado. As falhas mais comuns, cujos sintomas ajudam na identificação do problema são as seguintes:

- Desregulagem do conjunto de rotores e demais partes da bomba, com vibrações anormais do equipamento, devido a desgastes por abrasão, corrosão ou uso intensivo;
- Cavitação nos rotores, devido à presença de ar ou gases na água bombeada (rotores "pipocando");
- Furos no tubo de descarga, produzindo ruído de "cachoeira";
- Entupimento do crivo da bomba;

Freqüentemente estas falhas se refletem em aquecimento anormal dos motores e consumo excessivo de energia elétrica ou combustível.

### **7.3.1.2 Problemas Hidráulicos**

Os problemas de natureza hidráulica são aqui entendidos, por simplificação e facilidade de abordagem, como aqueles associados à queda de produção de água e à diminuição da vazão de bombeamento.

A queda de produção de um poço tem, em geral, as seguintes causas:

- Taxa de bombeamento superior à taxa de recarga do aquífero;
- Taxa de bombeamento superior ao limite de produção do poço (superbombeamento);
- Interferências provocadas por poços vizinhos;
- Obstruções das seções filtrantes.

No primeiro caso, a detecção é feita através do exame da hidrógrafa do nível estático correspondente a um ciclo hidrológico completo; se houver decaimento progressivo e permanente do nível estático é sinal de bombeamento excessivo, "minando" o aquífero. Os sintomas de superbombe-

amento se manifestam em decaimento acentuado do nível dinâmico sem queda significativa do nível estático, resultando em rebaixamentos excessivos do poço. Para confirmar esta causa, é necessário efetuar um teste de produção, comparar os resultados com os do teste anterior a verificar se o ponto crítico foi ultrapassado.

Os fenômenos de interferência podem influir na queda de produção de um poço, podendo ser detectados por oscilações bruscas e irregulares dos níveis d'água, durante o controle de operação.

Se nenhuma destas três causas ficarem evidenciadas, a investigação deve ser voltada para a possível obstrução das seções filtrantes ou do fundo do poço.

A diminuição da vazão de bombeamento do poço, sem que haja modificação apreciável dos níveis d'água é, geralmente, causada por defeitos no equipamento de bombeamento, tal como mencionado em item anterior.

Em poços perfurados em terrenos cristalinos o problema de queda de produção está, em geral, associado ao "esgotamento" parcial de uma ou mais zonas aquíferas (entradas d'água), devido ao mecanismo restrito de circulação da água no decorrer da exploração; neste caso, a detecção se orienta pelo exame da curva de recuperação do poço, cuja conformação geral é anômala.

### ***7.3.1.3 Problemas de Qualidade de Água***

Durante a exploração podem surgir problemas de corrosão ou de incrustação no poço, no aquífero e no sistema de bombeamento, geralmente causados por mudanças nas características físico-químicas e bacteriológicas da água. Estas modificações podem estar associadas aos seguintes fatores:

- Influência das condições de bombeamento da água, alterando o estado natural de equilíbrio físico-químico;
- Expansão do cone de rebaixamento, atingindo zonas com água de composição físico-química diferente; incrementos acentuados de recarga no aquífero;
- Contaminações produzidas durante a operação e manutenção do poço.

As modificações nas características físicas da água, embora não possam por si próprias, servir para detectar por inteiro a natureza do problema, produzem efeitos que ajudam no diagnóstico.

A água bombeada pode apresentar coloração indicando, na maioria das vezes, um processo de obstrução. As colorações vermelhas de "ferrugem" resultam da presença de compostos de ferro e/ou das chamadas "bactérias do ferro", indicando provável incrustação. Águas de coloração mar-

rom ou parda indicam a presença de bactérias redutoras ou de compostos de manganês; em regiões de mangues, indicam a presença de matéria orgânica combinada com tanatos e gelatos. Águas amareladas geralmente indicam a presença de compostos derivados de oxidação do ferro, que podem ser produtos da corrosão.

Odor e gosto são indícios da presença na água de microorganismos, de gases dissolvidos (gás sulfídrico, metano, dióxido de carbono ou oxigênio), de substâncias minerais (cloretos, compostos de ferro, carbonatos e sulfatos e de fenóis). Uma água que apresenta odor e gosto característicos poderá estar ativando processos de corrosão ou de incrustação.

Variações de temperatura das águas subterrâneas podem acentuar o desenvolvimento de processos de deterioração de poços. Aumentos de temperatura provocam um decréscimo da viscosidade da água, incrementando a difusão de oxigênio e ativando o processo de corrosão. Um incremento de temperatura da ordem de 4 a 5 °C pode duplicar o potencial de corrosão da água.

A condutividade específica está diretamente relacionada ao total de sólidos dissolvidos (TSD) na água; qualquer incremento de TSD é um acelerador da corrosão, que se torna severa quando este parâmetro é superior a 1000 mg/l. A condutividade está também associada ao aumento do teor de cloretos, notadamente em áreas litorâneas ou semi-áridas, o que aumenta a probabilidade de corrosão.

A turbidez da água de poços mais antigos é indicadora de problemas de natureza mecânica, como o colapso de seções filtrantes. Em poços novos, freqüentemente resulta de desenvolvimento insuficiente durante a construção. A turbidez leitosa, quando provém de gases dissolvidos na água, pode produzir cavitação nos rotores da bomba.

A atividade bacteriana acarreta quase sempre problemas de incrustação e/ou corrosão em poços. A detecção da existência de bactérias na água é feita, inicialmente, com base em suas propriedades organolépticas e em análises bacteriológicas de rotina. As bactérias aeróbias *Esterichia Coli*, *Aerobacter Aerogens*, *Proteus Vulgaris* podem, também, causar corrosão. As chamadas "bactérias do ferro", *Gallionella* e os gêneros filamentosos *Clonotrix*, *Crenotrix* e *Leptotrix*, são muito importantes nos processos de incrustação.

A incrustação química consiste na precipitação e deposição do material nas seções filtrantes, no pré-filtro, no próprio aquífero, na bomba e até nas tubulações de água; o material incrustante é constituído principalmente por carbonato de cálcio acompanhado de silicato de alumínio, sulfato de ferro e outros minerais contidos no aquífero.

## **7.4 APLICAÇÃO DE SOLUÇÕES – RECONDICIONAMENTO DE POÇOS**

Segundo Jorba (1982), como relatado nos subitens anteriores, a investigação das causas dos processos de deterioração em poços é complexa, uma vez que , freqüentemente, atuam diversos fatores inter-relacionados. Uma vez detectado o problema, ao se procurar o método mais adequado de solucioná-lo e ao executar os serviços necessários, uma dificuldade objetiva se antepõe: os filtros e demais partes vulneráveis do poço não podem ser submetidos à inspeção visual, a não ser por filmagem que possui um alto custo, nem os reparos efetuados podem ter o controle direto, na maioria dos casos. Desta maneira o recondicionamento de poços, quando requer a execução dos serviços em sua estrutura interna, está sujeito a riscos.

Deve ser realizado um planejamento dos trabalhos a serem efetuados, visando garantir a sua eficácia e diminuição da margem de risco. Para tal devem ser verificados os registros iniciais do poço e o seu controle periódico.

São dadas, a seguir, algumas linhas orientadoras para o recondicionamento de poços, de acordo com a causa predominante do problema apresentado. Convém lembrar que cada poço tem sua própria história e, portanto, deve ser objeto de um plano específico de trabalho, quando se trata de recondicionamento; por isso as indicações aqui apresentadas têm certo grau de generalidade, requerendo tratamento mais pormenorizado em cada caso específico.

### **7.4.1 Obstrução**

O tipo de obstrução aqui referido é o de natureza mecânica, resultante da colmatação de filtros e deposição de materiais no perímetro do poço (frontalmente aos filtros) ou no fundo do poço. Neste caso, trata-se de proceder à sua estimulação, utilizando métodos semelhantes aos de desenvolvimento de poços durante a construção. O método mais recomendável é o de pistoneamento com pistão de válvula, nos trechos correspondentes às seções filtrantes, devendo o trabalho obedecer aos seguintes procedimentos:

- Medir a profundidade real do poço; se for constatada redução da profundidade por acúmulo de material no fundo do poço a primeira atividade a ser feita é removê-lo com a utilização de caçamba;
- Efetuar o trabalho de pistoneamento partindo do topo da primeira seção filtrante, de cima para baixo, tendo o cuidado de, em cada trecho colocar o pistão 1,0 m acima do filtro;

- Fazer a limpeza com caçamba depois de pistonear cada trecho e verificar a quantidade de material removido.

Quando o material de obstrução for constituído principalmente de lama, é conveniente utilizar polifosfato, de modo a tornar a estimulação mais eficiente; antes de iniciar o pistoneamento, coloca-se a solução de polifosfato (hexametáfosfato de sódio) no poço, na proporção de 20 kg para cada 500 l d'água, agita-se a solução dentro do poço com pistão, aguarda-se de 2 a 3 horas e, então, inicia-se a operação de pistoneamento.

A confirmação da melhoria das condições do poço é feita por comparação de suas características hidráulicas (principalmente a vazão específica) imediatamente antes da estimulação e depois dela.

#### **7.4.2 Queda de Vazão ou de Produção**

A queda de produção motivada por problemas de natureza hidráulica no aquífero e no poço tem soluções relativamente simples; embora, quase sempre, resultem em redução do volume total de água desejado e, por isso mesmo, as pessoas resistam em aplicá-las, são necessárias para garantir a operação normal do poço.

Num poço com evidência de superbombeamento e de taxa de extração excessiva, o único remédio adequado é reduzir e regular a vazão de exploração. Se isto implicar em déficit em relação à demanda de água exigida, devem-se perfurar mais poços, o que não é correto, embora seja largamente praticado, é simplesmente recorrer à "solução" de descer o crivo da bomba à maior profundidade. Esta medida paliativa resultará em aumento do rebaixamento, para uma vazão igual ou levemente superior à que vinha sendo bombeada, com maior probabilidade de deterioração e diminuição da vida útil do poço e, além disso, tornando o bombeamento anti-econômico.

Quando se trata de queda de vazão no poço, sem evidência de decaimento significativo dos níveis d'água, o defeito deve estar relacionado ao equipamento de bombeamento. Torna-se necessário retirar a bomba e fazer os reparos necessários.

#### **7.4.3 Prevenção e tratamento da incrustação**

Não existe maneira de evitar por completo a incrustação produzida em poço, mas é possível atenuar os processos através das seguintes medidas:

- Reduzir a vazão de bombeamento, mantendo o menor rebaixamento possível, e aumentar o tempo de operação; para esta providência talvez seja necessário trocar a bomba por outra de menor capacidade que possa funcionar continuamente;
- Se houver déficit no volume total de água requerido pelo sistema, efetuar a exploração com mais poços, convenientemente distribuídos e com vazões e rebaixamentos moderados;
- Efetuar limpeza e tratamento periódicos, quando da realização da manutenção geral do sistema.

## 7.5 Limpeza e Desinfecção

Uma vez ao ano e sempre que for realizado algum serviço de manutenção do poço e do equipamento de bombeamento, é necessário proceder à limpeza e desinfecção da unidade.

Uma limpeza de poço significa:

- Remover com caçamba ou ar comprimido todo o resíduo acumulado no fundo do poço, restabelecendo a profundidade original;
- Pistonear o poço com pistão de válvula, a baixa velocidade (cerca de 30 batidas por minuto), durante 2 ou 3 horas e, verificar os resultados; se não houver acúmulo de resíduos no fundo do poço, passar o pistão por toda a coluna e, mais uma vez limpar;
- Fazer a limpeza da bomba, do tubo de descarga e dos cabos e eletrodos.

Após a execução de qualquer serviço no poço, é fundamental proceder a sua desinfecção com hipoclorito de sódio.

Segundo MARIANO e SILVEIRA (2004) é recomendado a cloração dos poços a intervalos de 120 dias, a fim de eliminar incrustações devidas a ação de ferro bactérias que provocam perdas de carga e conseqüentes perdas de vazão.

Podemos efetuar o cálculo do volume de água contida em poço através de uma maneira prática e aproximada descrita abaixo

$$V = d^2/2 \times H, \text{ onde}$$

V é o volume de água em metros cúbicos

D é o diâmetro do poço, em polegadas

H é o comprimento da coluna de água no poço

Com o volume do poço calculado, definir a quantidade de hipoclorito de sódio a ser utilizado para cada m<sup>3</sup> de água do poço de acordo com as **Tabelas 7.8 e 7.9**.

**Tabela 7.8 – Quantidade de hipoclorito de sódio para cada m<sup>3</sup> de solução**

Concentração de cloro (mg/l)	Hipoclorito de sódio (g)
100	145
150	217
200	289
300	434
400	579
500	723

**Fonte JORBA, 1982**

**Tabela 7.9 - Volume de alvejante para cada m<sup>3</sup> de solução**

Concentração de cloro (mg/l)	Litros de alvejante a		
	5%	8%	12%
100	2,00	1,25	0,83
150	3,00	1,88	1,25
200	4,00	2,50	1,67
300	6,00	3,75	2,50
400	8,00	5,00	3,33
500	10,00	6,25	4,17

**Fonte JORBA, 1982**

O procedimento de desinfecção segundo Jorba (1982) é:

- Efetuar a desinfecção com o equipamento de bombeamento instalado;
- Verter a solução de cloro no poço e, após 30 minutos, ligar a bomba, fazendo com que a descarga retorne ao poço durante algum tempo; a seguir, testar o teor de cloro na água do poço e, se for inferior à concentração requerida, adicionar mais solução;
- Deixar a solução no poço por um período de 6 horas;
- Bombear, então, o poço até que a água saia sem gosto ou odor de cloro e a concentração de cloro residual seja muito baixa.

A Ecoaqua adota um procedimento parecido e descrito abaixo: (**Tabela 7.10**)

**Tabela 7.10 - Instrução de Trabalho Desinfecção de Poços**

		<h2>Instrução de Trabalho</h2>			
<b>Assunto:</b> Desinfecção dos poços <b>Estação:</b> <b>Data da Criação:</b> 06/12/2004 <b>Revisão:</b> 0					
		<b>Data da Revisão:</b> <b>Autor:</b> Evaristo			
<b>Objetivo:</b> Desinfecção dos poços com Hipoclorito a fim de eliminar incrustações devido ação de ferro-bactéria.					
<b>Informações Gerais Sobre a Dosagem de Cloro:</b>					
1) A dosagem utilizada é de 0,5 Kg de NaClO /m <sup>3</sup> correspondente a 500 ppm. 2) A densidade do hipoclorito a 11%(p/v) é de 1,22 g/ L. 3) A solução utilizada é o hipoclorito de sódio comercial de 10 a 12 %(p/v). 4) Para a aplicação do hipoclorito deve se levar em consideração o volume do poço e a concentração do produto químico. Essa relação já está previamente estabelecida para cada poço, individualmente, na planilha em anexo.  5) Para manipulação deste produto químico é necessário o uso de equipamentos de proteção individual (EPI), como luvas de proteção com resistência química, óculos de proteção, vestuário de proteção e botas.					
<b>Procedimento para a Desinfecção:</b>					
1) Aplicar a quantidade de hipoclorito estabelecida para cada poço de acordo com a planilha em anexo, respeitando a necessidade prevista ao longo do monitoramento dos poços. 2) Manter o poço recirculando durante 1 hora e em seguida manter o poço parado durante 2 horas. 3) Durante esta recirculação, testar o teor de cloro e, se for inferior a concentração desejada adicionar mais cloro 4) Novamente manter o poço recirculando durante um intervalo de 2 a 3 horas. 5) Durante esse segundo momento de recirculação deve se medir o residual, a fim de atingir concentração determinada pela portaria MS-518/2004. Essa medição deverá ser feita no intervalo de 1 e 1 hora dentro do limite de horas de bombeamento com o hipoclorito. 6) Atingindo se o residual desejado, <b>2 ppm</b> de hipoclorito, deve abrir a rede para que o poço jogue água para a alimentação do sistema. 7) Caso após a recirculação de 2 a 3 horas a concentração de hipoclorito não diminuir ao estabelecido no item 5, drenar a água até o limite de 2ppm e depois abrir a rede para que o poço jogue água para a alimentação do sistema. 8) Após a retirada de água clorada, deverá se jogar bastante água limpa nas peças metálicas fora do poço de modo evitar corrosão. 9) O processo de cloração deverá ser feito com intervalos de <b>120 dias</b> , segundo acompanhamento dos poços ou sempre que necessário.					
<h3>Cálculo para Dosagem de Hipoclorito (NaClO)</h3>					
					
<b>Assunto:</b> Dosagem por Poços <b>Estação:</b> <b>Data da Criação:</b> 06/12/2004 <b>Revisão:</b> 0					
		<b>Data da Revisão:</b> <b>Autor:</b> Evaristo			
Numero do Poço	Profundidade do Poço (m)	Diâmetro do Poço (cm)	Volume do Poço (m <sup>3</sup> )	Dosagem Kg HClO Puro (100%)	Dosagem em Litros de HClO (11%)
1	216	15,24	3,94	1,97	18,00
3	222	15,24	4,05	2,02	19,00
5	300	15,24	5,47	2,74	25,00
6	150	20,32	4,86	2,43	23,00

Fonte: EcoAqua

## 7.6 DEFEITOS MAIS COMUNS EM BOMBAS E PARTE ELÉTRICA

Segundo JORBA (1982) e GIAMPÁ E GONÇALES (2005), não é possível tratar em menor todo e qualquer tipo de defeito que possa ocorrer em um poço com equipamentos de bombeamento e parte elétrica.

Em um Sistema Elétrico os quadros de comando podem ter acionamento manual ou automático. Para ligar e desligar a bomba: identificar no painel a chave de acionamento, que se trata de uma chave de 3 estágios.

Acionamento manual: acionar a chave deslocando-a para a posição manual devendo ocorrer um pequeno estalo no painel, indicando a armação do relê. Neste momento o amperímetro existente no painel frontal deverá estar indicando a amperagem de trabalho.

Acionamento automático: o sistema pode ser adequadamente automatizado interligando reservação ao poço e equipamentos associados (dosadoras, medidor de nível, volume e etc), permitindo a gestão integrada do sistema.

Em um poço tubular profundo podem ocorrer 3 tipos principais de problemas, sendo importante a determinação das causas principais para buscar-se encontrar as soluções possíveis, conforme a **Tabela 7.11**.

**Tabela 7.11 – Tipos de problemas que podem ocorrer em um poço tubular profundo**

<b>Problemas</b>	<b>Possíveis causas</b>	<b>O que fazer</b>
Bomba não liga	<ul style="list-style-type: none"><li>• Defeito no quadro elétrico</li><li>• Defeito na bomba</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Verificar se tem corrente elétrica</li><li>• Verificar fusíveis</li><li>• Chamar assistência técnica</li></ul>
Perda de vazão	<ul style="list-style-type: none"><li>• Defeito na bomba</li><li>• Problemas no poço (obstrução nos filtros ou na zona saturada)</li><li>• Problemas no aquífero (queda regional de vazão e nível)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Troca e/ou reparo da bomba</li><li>• Serviços de manutenção no poço</li><li>• Reavaliação do poço: teste de bombeamento</li></ul>
Turbidez na água	<ul style="list-style-type: none"><li>• Problemas de estrutura do poço: desmoronamento, tubos.</li><li>• Qualidade da água</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Reencamisamento do poço</li><li>• Cimentações</li><li>• Serviços de limpeza e recondicionamento</li><li>• Manutenções corretivas</li><li>• Instalação de equipamentos de tratamento de água</li></ul>

Fonte: GIAMPÁ E GONÇALES (2005)

É importante advertir que algumas das falhas freqüentemente apresentadas pelos equipamentos decorrem de instalação deficiente. Particularmente no caso das bombas de motor submersível, alguns problemas podem ser minimizados se forem tomados certos cuidados na instalação e operação, como:

- Instalação de eletrodos de controle de nível d'água; a disposição dos dois eletrodos deve ser tal que, uma vez desligada a bomba, decorra um período mínimo de 8 minutos para o reinício do funcionamento;
- Regulagem do relé de nível a cada 2 ou 3 meses;
- Instalação de pára-raios, com o cuidado de que sua ligação seja feita completamente independente do quadro de comando.

## **7.7 DIRETRIZES DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA**

A implantação de um programa de manutenção preventiva requer uma estreita articulação com as atividades de operação. A avaliação sistemática dos dados de operação de poços conduz a previsão dos problemas que poderão ocorrer no sistema e a conseqüente indicação de pistas e alertas para o setor de manutenção. Se as atividades de manutenção preventiva forem programadas em correspondência com as de operação, será possível diagnosticar a causa do problema e efetuar a correção adequada no devido tempo. Na **Tabela 7.3** – Lista de Verificação, são indicadas algumas das atividades essenciais de manutenção a serem desenvolvidas de forma sistemática, com o tempo de funcionamento do sistema, volume extraído, consumo de energia se necessário, condições de trabalho do conjunto, que conjuntamente com a inspeção dos serviços e interpretação dos dados permitem a avaliação de desempenho do sistema.

## **7.8. AVALIAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS**

Segundo JORBA (1982), a avaliação global da massa de dados produzidos no decorrer de um ano de operação regular orienta-se para a detecção de problemas, de limitação das causas mais prováveis e determinação das providências a serem tomadas pelo setor de manutenção. Num primeiro nível, o processamento mensal e anual dos dados nas fichas apropriadas, tal como indicado, já implica num certo grau de avaliação de desempenho do sistema.

Trata-se, ademais, de proceder a uma avaliação de conjunto, integrando todos os aspectos que influem no desempenho do sistema. Esta tarefa requer a coordenação de pessoal experiente, junto aos supervisores responsáveis pela operação e pela manutenção.

A seqüência de atividades necessárias na avaliação anual abrange:

- Estudo do comportamento do nível estático no poço, em associação com os ciclos de bombeamento e as condições climáticas da área;
- Estudo do comportamento do nível dinâmico em correlação com a vazão de bombeamento;
- Estudo do comportamento da vazão específica e da eficiência do poço;
- Exame das condições de funcionamento do conjunto de bombeamento ao longo do ano;
- Determinação de possíveis modificações nos parâmetros físico-químicos da água, em associação com as condições de funcionamento do poço;
- Listagem dos problemas ocorridos em cada unidade, durante o ano, e identificação das prováveis causas;
- Revisão da frequência de inspeções e medições e otimização do programa de operação;
- Indicação de medidas necessárias ao programa de manutenção.

O comportamento do nível estático é analisado com base na forma da hidrógrafa, referida ao ano hidrológico. Interessa, sobretudo, observar as variações mais prolongadas de nível que, em geral, são de 4 tipos:

- a) decaimento contínuo e progressivo do nível, significando que se está extraindo um volume de água superior à capacidade de recarga e armazenamento do aquífero;
- b) oscilação contínua, com os ramos ascendente e descendente correspondendo, mais ou menos, aos períodos de chuva e de seca, respectivamente;
- c) oscilação irregular, ao longo do tempo, podendo indicar mudanças de ciclo de bombeamento em diferentes épocas do ano ou interferência causada pelo bombeamento de poços vizinhos;
- d) relativa estabilidade do nível, indicando que o volume de água que está sendo extraído do aquífero é compensado pela recarga.

A hidrógrafa dos níveis dinâmicos, quando estes são medidos de acordo com os critérios indicados, deve assumir uma forma concordante com a dos níveis estáticos e, portanto, suas oscilações podem ser interpretadas de modo correlato. Frequentemente, porém, a hidrógrafa poderá apresentar anomalias devidas a 3 causas principais:

- a) medida inadequada, isto é, medição feita antes do nível atingir estabilização ou em horário diferente da medição de vazão;
- b) anormalidade nas condições de trabalho do conjunto de bombeamento, por ocasião da medida;
- c) variação da vazão;

Para verificar a causa da anomalia recorre-se ao registro diário; se os pontos anômalos forem devidos às duas primeiras causas, desprezam-se as medidas e corrige-se o gráfico; se a anomalia estiver associada à variação de vazão, deve ser avaliada junto com os dados de vazão específica e eficiência.

A vazão específica é um dos parâmetros mais úteis na avaliação de desempenho de um poço; quedas acentuadas no valor deste parâmetro são, em muitos casos, sinal de colmatção de seções filtrantes ou de um processo de incrustação. Em geral, quando o decréscimo ultrapassa os 10 %, devem-se investigar as causas e alertar o setor de manutenção.

O valor da eficiência obtido do teste anual de produção deve ser comparado com o dado anterior; ao mesmo tempo, pela equação do poço, determinam-se os rebaixamentos devidos as perdas do poço e as perdas do aquífero que, comparados aos valores anteriores, permitirão avaliar qual dos dois predomina na variação do rebaixamento total (ver item 3.1, capítulo II).

A verificação das condições de funcionamento do conjunto motor-bomba orienta-se para a detecção de anormalidades refletidas nas medidas de nível d'água e vazão (problemas ligados a avarias ou desgaste de peças são encaminhados diretamente à manutenção). O exame comparado das fichas de registro diário de operação e de manutenção o permitirá saber as causas das anormalidades. Em sistemas com motores elétricos, o estudo da variação da corrente de trabalho permite não somente saber a natureza do problema operacional, mas, também, conferir a coerência das medidas de nível d'água e vazão. O consumo diário de energia tem relação direta com a vazão e o volume total bombeado e pode dar indicação adicional sobre a anormalidade.

A composição química é um dos fatores que ajudam a diagnosticar se uma água será incrustante ou corrosiva. Águas duras, com mais de 300 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  e fortemente bicarbonatadas, com alcalinidade superior a 250 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  são potencialmente inconstantes. De igual modo, águas com pH acima de 7,5 ou teores de ferro e/ou manganês acima de 1 mg/l podem produzir incrustações. Águas de baixa salinidade, baixa alcalinidade, baixa dureza, baixo pH e elevado teor de  $\text{CO}_2$  são potencialmente corrosivas. Não há, todavia, regras precisas para decidir se uma água será incrustante ou corrosiva. A investigação deve levar em conta outros fatores associados, como: as características construtivas do poço, suas condições hidráulicas e o regime de bombeamento.

A água subterrânea move-se no aquífero em condições de fluxo laminar, lento, estando normalmente saturada de carbonato de cálcio em equilíbrio com certa quantidade de CO<sub>2</sub> dissolvido. Qualquer mudança nestas condições rompe o equilíbrio, dando origem a precipitações pela perda de CO<sub>2</sub>. Quando a água é bombeada de um poço provoca-se um rebaixamento de modo a produzir a pressão diferencial necessária para gerar o fluxo através do poço. A diferença de pressão favorece a liberação de CO<sub>2</sub> que, dependendo do ambiente, precipitará o carbonato de cálcio nas vizinhanças do poço, no pré-filtro e/ou nas seções filtrantes. Poços com rebaixamento acentuados são mais suscetíveis à incrustação, tanto pela liberação de CO<sub>2</sub> quanto pela existência de um trecho maior de aeração (a partir do nível dinâmico até a boca do poço) que favorece a precipitação de ferro. Em idênticas condições, dependendo do ambiente, podem ter lugar os fenômenos de corrosão. Assim, ao se comparar os dados químicos de sucessivas análises deve-se, simultaneamente, verificar as possíveis mudanças nas condições de operação do poço.

Tendo examinado, um a um, todos os fatores da operação dos poços, o coordenador fará uma síntese dos problemas ocorridos durante o ano e reavaliará o programa de operação, ajustando-o às particularidades locais. Ao mesmo tempo, encaminhará as indicações e sugestões cabíveis ao setor de manutenção.

## **CAPÍTULO 8. GESTÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA - RECURSO HÍDRICO**

De acordo com CAETANO (2005), em termos científicos, a água subterrânea é parte integrante do ciclo hidrológico e constitui um recurso hídrico subterrâneo. A gestão da água subterrânea sempre foi desvinculada da gestão de recursos hídricos, talvez porque essa água nunca foi tratada como um recurso que deva ser gerenciado. No Brasil, a gestão das águas sempre foi diretamente voltada à água superficial, pois os grandes programas de investimentos (saneamento básico e hidrelétricas – grande poderes setoriais do governo) eram relativos à disponibilidade deste recurso.

Esta visão ainda possui grande influência no atual Código das Águas (Lei de Recursos Hídricos número 9.433 de 1997), que apesar de propor uma gestão integrada de todos os tipos de recursos hídricos, possui formatação vinculada às águas superficiais.

### **8.1. ASPECTOS HISTÓRICOS DA POLÍTICA DE RECURSOS HÍDRICOS – BASE LEGAL E INSTITUCIONAL**

Segundo COSTA (2003), até o início do século XX, o aproveitamento da água no Brasil se dava, essencialmente, por iniciativa dos agentes privados e para o abastecimento público. Vigorava de forma absoluta o modelo de propriedade conjunta terra-água, sendo virtualmente ausente o papel de regulação do poder público. Com a evolução de tecnologia, que permitiu um uso mais intenso da água e uma conseqüente maior geração de cargas poluidoras, assim como a implantação de obras de engenharia de maior porte, passou a ser mais necessária uma ação de gerenciamento. O Código de Águas, estabelecido pelo Decreto Federal 24.643, de 10 de julho de 1934, foi a primeira tentativa de regular o aproveitamento da água. Esse Código, julgado inovador para a época, já assegurava o uso gratuito de qualquer corrente ou nascente de água, para as primeiras necessidades da vida, permitindo a todos usar de quaisquer águas públicas, conformando-se com os regulamentos administrativos. Era impedida a derivação das águas públicas para aplicação na agricultura, indústria e higiene sem a existência de concessão, no caso de utilidade pública, e de autorização nos outros casos; em qualquer hipótese, dava-se preferência à derivação para abastecimento das populações.

De acordo com CAETANO (2005), a legislação brasileira, voltada aos recursos hídricos teve seu início com o Decreto nº 24.643, de 10 de julho, publicado no DOU, Diário Oficial da União, de 24 de julho de 1934, denominado "Código das Águas". A intenção do então chefe do governo provisório brasileiro, Getúlio Vargas, foi dotar o país de uma legislação adequada que permitisse ao poder público controlar e incentivar o aproveitamento industrial das águas.

Esse Decreto Federal impôs condições para o aproveitamento da água superficial, em particular, à voltada à energia hidráulica.

1. Definiu águas em: públicas, como as que nascem em terreno público ou qualquer corrente, lago, mar que possibilite a navegação ou flutuação, ou mesmo nascente ou braço de qualquer corrente, desde que influam na navegabilidade ou fluabilidade; comuns, todas as águas não navegáveis e fluáveis e particulares, como as nascentes e todas as águas situadas em terrenos particulares e as que não estiverem enquadradas nas demais situações.

2. Definiu também a propriedade das águas públicas em relação à União, os Estados e Municípios:

Estas águas pertencem à União quando marítimas, situadas em Território, quando servem de limites da República, ou se estendem por território de países vizinhos; quando estabelecem de limites entre Estados, percorrem territórios de mais de um Estado, entre outros. Aos Estados, quando sirvam de limites entre municípios ou percorram parte de territórios de mais de um município. Apenas quando as águas públicas se situam no território de um único município, e são navegáveis, ou fluáveis é que pertencem ao Município.

Esse Decreto, que enfatiza a utilização das águas públicas para energia hidráulica, define algumas regras para a navegação, assim como para outras aplicações. Especificamente para agricultura, indústria e higiene, a utilização de águas derivadas dependerá de concessão administrativa, por tempo limitado a 30 (trinta) anos. As águas comuns e particulares, para que sejam utilizadas, no interesse da saúde e da segurança pública, dependerão de autorização administrativa.

Já naquela época, 1934, garantir o direito à utilização gratuita da água superficial para a necessidade da vida, ficava patente no artigo 34, do Decreto em estudo, assim como a preocupação com a proteção das águas é visível no artigo 109 que diz: "A ninguém é lícito conspurcar ou contaminar as águas que não consome, com prejuízo de terceiros". A punição aos responsáveis pela contaminação é tratada nos artigos 110, 111 e 112.

O Decreto nº 24.643/34 aborda detalhadamente a utilização das águas para energia hidráulica. Dos 205 artigos do Decreto, mais de 60 referem-se especificamente à normatização para o aproveitamento industrial, tanto de águas de domínio público como de particulares ou de fontes de energia hidráulica.

É interessante observar que à época da criação desta legislação federal, o órgão competente para autorizar e fiscalizar as concessões de energia elétrica era o Departamento Nacional da Produção Mineral, vinculado ao Ministério da Agricultura, através do seu Serviço de Águas. Hoje, esse trabalho é executado pelo Departamento Nacional de Energia Elétrica (DNAEE), órgão do Ministério de Minas e Energia.

Em relação à água subterrânea, este Decreto, apesar de referir-se a esse respeito em apenas 6 artigos, estabelece importantes diretrizes, das quais se destacam:

1 – O dono do terreno poderá apropriar-se da água subterrânea existente no seu terreno, desde que não altere as condições dos demais usuários (art. 96 e parágrafo único do art. 96);

2 – A abertura de poços deverá possuir distância suficiente para que não ocorra prejuízo à vizinhança (art. 97);

3 – É proibido poluir a água do poço ou nascente alheia (art. 98);

4 – Depende de concessão, a abertura de poços em terrenos de domínio público (art. 101).

É interessante destacar que, com esse Decreto, o governo federal da época determinou a obrigatoriedade de concessão administrativa para a utilização da água subterrânea em terras públicas, assim como demonstrou sua preocupação durante a exploração da água subterrânea, no que se refere a:

1. prejuízo e perda de águas superficiais;
2. poluição e inutilização da água do poço;
3. prejuízos a prédios vizinhos.

A água subterrânea, já em 1934, era tida como um recurso importante e de uso regulado.

Segundo CAETANO (2005), a gestão de recursos hídricos também sofreu modificações, seguindo diferentes momentos históricos da política e situação de mundo e do Brasil, aprimorando-se e se tornando mais complexa à medida que a sociedade cresce e se desenvolve; assim também com sua demanda que se altera em função do desenvolvimento populacional, somado ao sócio-econômico, científico e tecnológico.

Os modelos utilizados no Brasil podem ser um retrato da sociedade da época, da política vigente e de suas necessidades de consumo de água.

Assim, LANNA e YASSUDA (apud CAETANO, 2005) distinguem 3 modelos de gestão brasileiros e expostos na **Tabela 8.1**.

**Tabela 8.1 – Modelos brasileiros de gestão de recursos hídricos e breve caracterização**

<b>Modelo</b>	<b>Momento Histórico</b>	<b>Características Gerais</b>
Burocrático	Criado na década de 30 (Código das Águas de 34). Segunda Grande Guerra, período da Ditadura de Getúlio Vargas. Brasil ainda possuía uma grande população vivendo em áreas rurais.	Criado na década de 30, o código possui, como instrumentos, uma grande quantidade de leis, decretos, portarias, regulamentos e normas sobre uso e proteção ambiental. Visão fragmentada do processo de gerenciamento; centralização do poder decisório em altos escalões; Este grande número de documentos foi necessário, à medida que os problemas de demanda e conflitos se desenvolveram durante o período de vigência do modelo.
Econômico Financeiro	Época de Getúlio Vargas até 1988 – grandes investimentos de construção de grandes infra-estruturas para promover a industrialização do país Início de grandes investimentos de infraestrutura para o desenvolvimento industrial no país. A partir da década de 50 – migração populacional para centros urbanos Ditadura Militar. “Milagre brasileiro” (até 1973) e período de grande	Fundamentado nas prioridades setoriais do governo, é baseado em negociações políticas-representativas e econômicas. Os programas eram grandes projetos de investimento do governo. Programas de saneamento, irrigação, eletrificação, mineração, reflorestamento, foram desenvolvidos neste período, com visão de

	crise econômica (pós 1973)	bacia hidrográfica, porém sob o ponto de vista de intervenção para construção de obras.
Sistêmico de Integração Participativa	Advento da Constituição de 1988 até hoje. Início da democratização e abertura política do país; consolidação da política do meio ambiente, início de estudos integrados para planejamento territorial, ambiental, de planejamentos estratégicos. Sucateamento das instituições; falta de investimento em todos os setores devido à crise econômica. Problemas de quantidade e qualidade das águas.	Integração das negociações, divididas em quatro tipos: econômica, política direta, político-representativa e jurídica (Leal 2000). Estrutura sistêmica baseada na concepção ambiental, e possui como unidade básica de gerenciamento a bacia hidrográfica, o comitê de bacias, como fórum de discussões e deliberações. A visão integrada dos recursos hídricos, considerando o ciclo hidrológico, das interações entre meio físico, social, econômico e biótico, é a fundamentação deste modelo de gestão. Os instrumentos são: planejamento estratégico por bacia hidrográfica; tomada de decisão por deliberações multilaterais e descentralizadas, e estabelecimento e instrumentos legais e financeiros.

Fonte: Adaptado por LEAL (apud CAETANO 2005)

Segundo COSTA (2003), a administração dos problemas de recursos hídricos, levando-se em conta os limites de uma bacia hidrográfica, não foi, historicamente, uma tradição no Brasil. Até os anos 70, as questões de recursos hídricos eram sistematicamente consideradas a partir de perspectivas próprias aos setores usuários das águas ou segundo políticas específicas de combate aos efeitos das secas e das inundações. A exceção foi a criação, ao final dos anos 40, da Comissão do Vale do São Francisco, com uma proposta de desenvolvimento integrado dessa bacia.

Os grandes projetos hidráulicos e as políticas de recursos hídricos eram concebidos em cada um dos setores usuários: programa de geração de energia hidrelétrica, plano nacional de saneamento, programas nacionais de irrigação, programas de transportes hidroviários e outros. Esses programas foram implantados, a partir dos anos 40, com forte participação estatal e, sobretudo da área federal. Alguns estados, das regiões Sul e Sudeste, mais ricos em potencial hidrelétrico, como São Paulo, Minas Gerais e Paraná, também criaram suas próprias empresas de produção de energia.

A partir dos anos 70, no entanto, a ocorrência de sérios conflitos de uso da água começou a suscitar discussões no meio acadêmico e técnico-profissional sobre como minimizar os problemas decorrentes. Os conflitos envolviam não só diferentes setores usuários, como também os interesses de unidades político-administrativas distintas (estados e municípios).

Nesse período, o poder se achava muito concentrado na área federal, tendo partido justamente de técnicos do Governo Federal a iniciativa de se criarem estruturas para gestão dos recursos hídricos por bacia hidrográfica. Nesse campo, uma primeira experiência significativa foi à assinatura, em 1976, do Acordo entre o Ministério das Minas e Energia e o Governo do Estado de São Pau-

lo para a criação do Comitê do Alto Tietê, cujo objetivo era o de buscar, a partir da operação das estruturas hidráulicas existentes para produção de energia, melhores condições sanitárias nas bacias dos rios Tietê e Cubatão, no Estado de São Paulo.

A partir do processo de redemocratização no Brasil e da nova Constituição, de 1988, que deu maiores poderes para estados e municípios, assiste-se, hoje, no País, a uma nova etapa no processo de gestão dos recursos hídricos. Novas organizações foram criadas, fruto tanto da evolução do quadro político-institucional do País, quanto da evolução da natureza dos próprios problemas de recursos hídricos, que passaram a ser mais complexos e a demandar uma maior participação direta da sociedade para sua solução.

Em 1991, é aprovada a lei de recursos hídricos do estado de São Paulo. Nesse mesmo ano, o governo federal encaminha ao legislativo o primeiro projeto de lei criando o Sistema Nacional de Recursos Hídricos e definindo a Política Nacional de Recursos Hídricos.

A tramitação do projeto de lei Federal prossegue, com ocorrência de debates, seminários e audiências públicas. Como marco do reconhecimento político da importância da área de recursos hídricos, o Presidente Fernando Henrique Cardoso cria, em 1995, o Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, com uma Secretaria de Recursos Hídricos. O Deputado Aroldo Cedraz substitui o Deputado Fábio Feldmann nas funções de relator do projeto de lei federal, apresentando um substitutivo em fevereiro de 1996, no qual incorpora uma proposição mais flexível de gestão das bacias hidrográficas, propiciando contemplar as diversidades regionais do país. Finalmente, votada pela Câmara e pelo Senado, foi promulgada e publicada no DOU a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos(PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Essa lei culminou em um longo processo de avaliação das experiências de gestão de recursos hídricos e de formulação de propostas. Trata-se de um marco histórico, de grande significado e importância para a gestão dos recursos hídricos no Brasil.

De acordo com CAETANO (2005), esta lei confere à água a importância de um bem de domínio público, limitado, de valor econômico, cujo uso prioritário é o consumo humano e que deve, sempre que possível, ter uso múltiplo, assim como define a bacia hidrográfica como unidade territorial de gestão dos recursos hídricos e determina que, além do poder público, haja a participação de usuários, comunidades e entidades civis, de uma forma que a gestão seja descentralizada.

Determina como objetivos (art. 2º) principais da PNRH: assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, a utilização racional e integrada dos recursos hídricos e a prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos de qualquer origem seja natural ou provocado pelo homem.

Segundo MIYASHITA (apud RAMOS, 2005), uma das principais dificuldades na implantação de um sistema nacional de gestão de recursos hídricos é a articulação entre as ações da União, Estados e Municípios e o desenvolvimento da co-responsabilidade público-privada, na gestão e no financiamento das ações e projetos na área de recursos hídricos.

Para LANNA & MOLINAS (apud RAMOS, 2005), a descentralização das iniciativas para a gestão dos recursos hídricos no Brasil demanda novas formas de convivência e de articulação entre o interesse público, privado e comunitário. Isso demanda uma nova concepção para o planejamento de recursos hídricos, com uma abrangência adequada para abordar todos os aspectos de interesse, sem tornar-se tarefa hiperdimensionada.

Segundo REBOUÇAS (1998)<sup>6</sup> "O manejo integrado das águas, representa a forma mais avançada e racional de solução dos problemas de abastecimentos das demandas de água - doméstica, industrial ou agrícola - de uma determinada área".

De acordo com ASSIS (1997)<sup>7</sup>, "a Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997, inova em muitos conceitos. Ela visa a garantir sustentabilidade ecológica, administrativa e financeira, repactuando o compromisso da sociedade brasileira com os corpos hídricos...".

Além dos fundamentos e objetivos, esta lei destaca as diretrizes (art. 3º) gerais de ação, das quais se destacam: a gestão sem dissociação da quantidade e qualidade; a adequação às diversidades das regiões; a integração com a gestão ambiental e com os sistemas estuarinos e zonas costeiras e a articulação do planejamento dos recursos hídricos(RH) com o dos setores de usuários, com o planejamentos regional, estadual e nacional, assim como os do uso do solo.

O art. 5º trata dos instrumentos da PNRH, que são os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos predominantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; a compensação a municípios e o Sistema de Informação sobre Recursos Hídricos.

Os Planos de Recursos Hídricos são planos de longo prazo, com horizonte de planejamento compatível com o período de implantação de seus programas e projetos e deverão executar pelo menos (art. 7º) o diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos; a análise de alternativas de crescimento demográfico, de evolução de atividades produtivas e de modificações dos padrões de ocupação do solo; o balanço entre disponibilidades e demandas futuras dos recursos hídricos, em quantidade e qualidade, com identificação de conflitos potenciais; as metas de racionalização de uso, aumento da quantidade e melhoria de qualidade dos recursos hídricos disponíveis; as medidas a serem tomadas, programas a serem desenvolvidos e projetos a serem implantados, para o atendimento das metas previstas; as prioridades para outorga de direitos de uso de recursos hídricos; as

---

<sup>6</sup> REBOUÇAS, Aldo Cunha. In: Boletim informativo da ABAS nº 76, de março de 1998

<sup>7</sup> Anais do Seminário Nacional sobre a Gestão dos Recursos Hídricos, realizado no CREA-RJ em agosto de 1997

diretrizes e critérios para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos e as propostas para a criação de áreas sujeitas à restrição de uso, com vistas à proteção dos recursos hídricos.

O fundamental desses planos é que, por determinação do art. 8º da Lei, eles serão elaborados por bacia hidrográfica.

Segundo CAETANO (2005) “A unidade de gestão ideal é justamente a bacia hidrográfica no âmbito da qual se pode controlar o fluxo e uso da água”. O que consta de um planejamento é toda uma bacia que pode conter diversos municípios e Estados. Tecnicamente essa questão é perfeita, pois não há como separar as características físico-químico-biológicas dos recursos hídricos, através de fronteiras político - geográficas.

A presente lei instituiu a outorga de direito de uso de recursos hídricos, não só no caso de utilização da água superficial ou subterrânea para consumo final, como de insumo de processo produtivo ou de aproveitamento dos potenciais hidrelétricos; incluiu também, qualquer outro uso que altere o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água, assim como o lançamento de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final (artigo 12).

Além de condicionar a outorga, às prioridades de uso estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos que deverão preservar o seu uso múltiplo, a lei delega aos Estados e ao Distrito Federal, a competência de outorga de direito de uso do recurso hídrico (art. 13, 14 e 30). Determina também que a outorga poderá ser suspensa, em definitivo, ou por prazo determinado, caso, além de outras situações, houver necessidade premente de água para atender calamidades, necessidade de se prevenir ou reverter degradação ambiental e necessidade de se atender a usos prioritários de interesse coletivo (art. 15). Através do artigo 16 ficou mantido o prazo máximo de concessão em 35 anos, renovável. O Decreto de 1934 determinava 30 anos, renovável (art. 43).

Um fato que merece atenção especial nesta lei é a criação de taxaço pelo uso da água, reconhecendo-a como bem econômico e dando ao usuário uma indicação de seu real valor. Visa, além disso, incentivar a racionalização de seu uso (art. 19).

A lei impõe a taxaço por volumes lançados de esgotos e demais resíduos líquidos e gasosos, assim como em função de suas características físico-químicas, biológicas e de toxicidade (art. 20 e 21). O dinheiro arrecadado será utilizado em estudos, programas, projetos e obras incluídas nos Planos de Recursos Hídricos, na implantação e custeio dos Órgãos e entidades integrantes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (art. 22).

É criado o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos, que tem por objetivo coletar, tratar, armazenar e recuperar informações sobre recursos hídricos. Dentre os princípios básicos para seu funcionamento, destacamos o de garantir a toda a sociedade, o acesso aos dados e informações do Sistema (art. 25, 26 e 27). Além desse Sistema, o artigo 32 criou o Sistema Nacional de Gerenci-

amento de Recursos Hídricos, cujo objetivo é coordenar a gestão integrada das águas, implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos e promover a cobrança pelo uso dos Recursos Hídricos.

O SINGREH é integrado (art. 33) pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos; Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal; Comitês de Bacias Hidrográficas; Agências de Água e outros Órgãos.

Ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos (art. 34, 35 e 36) compete, entre outros, promover a articulação do planejamento de recursos hídricos, com os planejamentos nacionais, regionais, estaduais e dos setores usuários.

Aos Comitês de Bacia Hidrográfica (art. 37 a 40) compete, entre outros, promover o debate das questões relacionadas a recursos hídricos, aprovar e acompanhar a execução do Plano de Recursos Hídricos e estabelecer os mecanismos de cobrança pelo uso dos recursos hídricos. Sua atuação restringe-se à área da bacia hidrográfica.

Seguindo a tendência do Governo Fernando Henrique Cardoso, de criação de Agências reguladoras, essa lei cria, em seus artigos de 41 a 42, as Agências de Água. A essa Agência, compete, entre outras coisas, manter balanço atualizado da disponibilidade de recursos hídricos; manter o cadastro de usuários de recursos hídricos; efetuar a cobrança pelo uso dos recursos hídricos; promover os estudos para a gestão dos recursos hídricos; elaborar o Plano de Recursos Hídricos; gerir o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos; administrar financeiramente os recursos arrecadados, com a cobrança pelo uso de recursos hídricos; propor o enquadramento dos corpos de água nas classes de uso e atribuir os valores a serem cobrados pelo uso de recursos hídricos.

Segundo a lei, todo esse sistema complexo ficará a cargo da Secretaria Executiva do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que será exercida por Órgão integrante do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal (art. 45 e 46).

A presente lei, além de definir Organizações Cíveis de Recursos Hídricos, que podem ser quaisquer organizações legalmente constituídas, governamentais ou não (art. 47 e 48), impõe infrações e penalidades no que se refere, principalmente, à falta de autorização para utilização dos recursos hídricos sejam eles superficiais ou subterrâneos (art.49 e 50).

De acordo com GARCIA (2004)<sup>8</sup> o fechamento do arcabouço jurídico de proteção ao meio ambiente e especialmente às águas, foi estabelecido com a Lei de Crimes Ambientais (nº 9.605, de 12-02-98). A tutela penal desta lei abrange o meio ambiente em geral. No que se refere aos recursos hídricos, ela mira a poluição em todas as suas modalidades. No entanto a água merece atenção especial. Para repressão aos infratores, ela comina penas de até 5 anos de reclusão. Além das sanções

---

<sup>8</sup> GARCIA, Augusto Ribeiro, Congresso Internacional de Direito Amazônico, realizado em Boa Vista, no período de 28/03/04 a 02/04/04, acesso na internet <http://www.advagroambiental.adv.br/Amazonia.pdf> em 04/01/2006

administrativas, que vão até às interdições e fechamento de empresas poluidoras, ela também comina penas pecuniárias de até 50 milhões de reais.

Para CAETANO (2005) apesar da amplitude da Lei 9433/97 o recurso hídrico subterrâneo, praticamente, não foi contemplado. Algumas situações têm gerado conflito tais como: a dominialidade e gestão dos recursos hídricos subterrâneos (atribuído aos estados), a questão da gestão do Aquífero Guarani (trans-fronteiriço), a consideração da água mineral (atribuição do Ministério de Minas e Energia), vista como recurso mineral e como recurso hídrico (água subterrânea), e a própria unidade de gerenciamento definida, a bacia hidrográfica, que deve ser discutida para a questão das águas subterrâneas.

Estes conflitos institucionais e jurídicos, assim como problemas reais, ocorrentes devido a essas incompatibilidades, levaram à criação de fóruns de discussão e deliberação, que hoje são as Câmaras Técnicas de Água Subterrânea. Em nível federal, a Câmara Técnica de Água Subterrânea (CTAS) pertence ao Conselho Nacional de Recursos Hídrico (CNRH), vinculado ao Ministério do Meio Ambiente, MMA, de acordo com Resolução nº 9 do CNRH (2000).

O gerenciamento das águas subterrâneas vem sendo desenvolvido em alguns estados brasileiros, em decorrência da própria constituição de 1988. O Estado de São Paulo, e logo após Pernambuco foram os primeiros estados a possuírem uma legislação específica para água subterrânea. Atualmente os estados de Goiás, Distrito Federal, Minas Gerais e Pará também possuem legislações específicas. Nos estados de Alagoas e Ceará esta legislação encontra-se em elaboração. Nos demais estados, a questão da outorga e capítulos especiais relativos às águas subterrâneas encontram-se inseridos na lei de recursos hídricos. Em alguns estados, a regulamentação da outorga já se encontra elaborada.

Em alguns estados foram criadas as Câmaras Técnicas. No estado do Rio de Janeiro, além de outras, existe a Câmara Técnica de Água Subterrânea vinculada ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH), da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano (SEMADUR).

Instituída pela Resolução nº 9, de 21 de junho de 2000, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, a Câmara Técnica de Água Subterrânea tem, entre outras, as seguintes competências:

- I) discutir e propor a inserção da gestão de águas subterrâneas na Política Nacional de Recursos Hídricos;
- II) compatibilizar as legislações relativas à exploração e à utilização destes recursos e
- III) propor mecanismos institucionais de integração da gestão das águas superficiais e subterrâneas.

É formada por representantes dos Ministérios de Meio Ambiente, de Ciência e Tecnologia, da Saúde, de Minas e Energia, da Defesa, da Agricultura Pecuária e Abastecimento, dos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos, de Usuários (empresas de abastecimento de água), Consórcios de Bacias e Organizações não Governamentais.

Segundo COSTA (2003) e CAETANO (2005), em linhas gerais, é este o atual estado da arte da gestão dos recursos hídricos no Brasil, em termos dos avanços legais e institucionais já obtidos. Sob uma perspectiva histórica mais ampla, a **Tabela 8.2** Síntese Histórica da Evolução do Uso das Águas, apresenta uma súmula comparativa sobre a temática ambiental e os estágios alcançados na gestão dos recursos hídricos, observados nos países de maior desenvolvimento institucional e no Brasil.

De acordo com CAETANO (2005), a tabela não contempla o histórico do gerenciamento das águas subterrâneas, cuja preocupação da quantidade de água a ser explorada dos aquíferos e o rebaixamento crítico dos níveis de água já era discutida, desde o começo do século passado, em países como os Estados Unidos e Espanha. Nos Estados Unidos, o termo *safe yield* foi utilizado em 1915 (LEE, apud FETTER 2004) e é definido como “*a quantidade de água que pode ser bombeada regularmente e permanentemente sem ocorrência de depleção danosa da reserva armazenada*”. O conceito, que evolui com o conhecimento e desenvolvimento dos conhecimentos ambientais, passou de uma conotação de exploração econômica (MEINZER apud FETTER 2004) para sustentável (FETTER 2004).

FETTER (2004) define este conceito como “*o volume de água subterrânea que ocorre naturalmente, que pode ser retirada de um aquífero ou uma bacia sustentável, economicamente e legalmente, sem prejudicar a qualidade original da água subterrânea ou criar um efeito indesejável, como dano ambiental*”.

Ainda este pesquisador relata a dificuldade das autoridades em usar este conceito de *safe yield*, pois impactos ambientais incluem valores ecológicos, econômicos, sociais, culturais e políticos, além de definir qual a quantidade de água que pode ser explorada, sob padrões não só de regimes diferentes de bombeamento, como de aquíferos.

A questão do gerenciamento da qualidade da água subterrânea ganhou força, no século passado, a partir da década de 70 (nos países desenvolvidos) e 80 no Brasil, com os estudos de contaminação das águas subterrâneas, que se desenvolveram nas décadas seguintes, assim como as tecnologias, tanto de investigação, quanto de remediação de aquíferos. As políticas ambientais tomaram impulso a partir desta época.

Apesar dos conhecimentos de sobreexploração de aquíferos e gerenciamento da quantidade ser um tema mais antigo em países desenvolvidos, a gestão quantitativa dos recursos hídricos sub-

terrâneos, no Brasil, está sendo discutida somente agora, conjuntamente com os níveis de qualidade, com o advento do novo modelo de gestão de recursos hídricos.

De acordo com MACHADO (apud RAMOS, 2005), a água potável consumida na França provém principalmente de mananciais subterrâneos (60%), ao passo que somente 40% são de águas de superfície. Cada uma das seis grandes bacias hidrográficas francesas possui um comitê de bacia e uma agência de água. Essas últimas têm a função de motivação dos serviços públicos da bacia para a utilização racional dos recursos hídricos, apoiada em ajudas financeiras oriundas de taxas de cobrança pagas pelos usuários, principalmente taxas de poluição e de captação de água.

**Tabela 8.2 – Síntese histórica da evolução do uso das águas**

<b>Período</b>	<b>Países Desenvolvidos</b>	<b>Brasil</b>
1945 – 60 Engenharia com pouca preocupação ambiental	Abastecimento, navegação, hidroeletricidade; Qualidade da água dos rios; Medidas estruturais de controle das enchentes	Inventário dos recursos hídricos; Início dos empreendimentos hidrelétricos e projetos de grandes sistemas
1960 – 70 Início da pressão ambiental	Controle de efluentes; Medidas não estruturais para enchentes; Legislação para qualidade da água dos rios	Início da construção de grandes empreendimentos hidrelétricos; Deterioração da qualidade da água de rios e lagos próximos a centros urbanos.
1970 – 80 Controle ambiental	Usos múltiplos Contaminação dos aquíferos; Deterioração ambiental de grandes áreas metropolitanas; Controle na fonte de drenagem urbana; Controle da poluição doméstica e industrial; Legislação ambiental	Ênfase em hidrelétricas e abastecimento de água; Início da pressão ambiental; Deterioração da qualidade da água dos rios devido ao aumento da produção industrial e concentração urbana;
1980 – 90 Interações do ambiente global	Impactos climáticos globais; Preocupação com conservação das florestas; Prevenção de desastres; Fontes pontuais e não pontuais; Poluição rural; Controle de impactos da urbanização sobre o ambiente; Contaminação de aquíferos;	Redução do investimento em hidrelétricas devido à crise fiscal e econômica; Piora das condições urbanas: enchentes, qualidade da água; Fortes impactos das secas do Nordeste; Aumento de investimentos em irrigação; Legislação ambiental
1990 – 2000 Desenvolvimento Sustentável	Desenvolvimento sustentável; Aumento do conhecimento sobre o comportamento ambiental causado pelas atividades humanas; Controle ambiental das grandes metrópoles; Pressão para controle de emissão de gases, preservação da camada de ozônio; Controle da contaminação dos aquíferos das fontes não pontuais;	Legislação de recursos hídricos Investimento no controle sanitário das grandes cidades; Aumento do impacto das enchentes urbanas; Programas de conservação dos biomas nacionais: Amazônia, Pantanal, Cerrado e Costeiro; Início da privatização dos serviços de energia e saneamento.
2000 – Ênfase na água	Desenvolvimento da Visão Mundial da Água Uso integrado dos recursos hídricos; Melhoria da qualidade da água das fontes não pontuais: rural e urbana; Busca de solução para os conflitos trans-fronteiriços; Desenvolvimento do gerenciamento dos recursos hídricos dentro de bases sustentáveis;	Avanço do desenvolvimento dos aspectos institucionais da água; Privatização do setor energético; Aumento de usinas térmicas para produção e energia; Privatização do setor de saneamento; Aumento da disponibilidade de água no Nordeste; Desenvolvimento de Planos de Drenagem Urbana para as cidades;

REBOUÇAS (2005)<sup>9</sup> destaca a questão da gestão integrada das águas subterrâneas como "um desafio da virada do século", na "necessidade de inserção da água subterrânea na política de gerenciamento dos recursos hídricos, conforme estabelece a Lei 9.433 de 1997, a Lei das Águas. A outorga e o conceito de usuário - pagador das águas subterrâneas já é contemplado pela legislação vigente e vem sendo praticado em vários estados brasileiros. No entanto, faltam proceder a um amplo levantamento, sistematização e disponibilização dos conhecimentos sobre as águas subterrâneas, tanto no nível dos usuários, como dos administradores e "tomadores de decisão".

POMPEU (apud GRAF, 2000) também critica a disciplina constitucional do domínio hídrico, que reputa centralizadora, confusa e eivada de lacunas. Relata esse autor que, desde 1984, realizaram-se no Brasil vários seminários e congressos por entidades públicas e privadas ligadas ao setor hídrico, que concluíram pela necessidade de aperfeiçoar, na futura Constituição, o domínio e a competência normativa sobre recursos hídricos, no sentido de que fossem devolvidas aos Estados as competências para legislar sobre águas, supletiva e complementarmente à legislação federal. No entanto, todas as proposições encaminhadas à Assembléia Nacional Constituinte foram rejeitadas.

No caso das águas subterrâneas, os aquíferos, entendidos como estruturas que retêm águas infiltradas, podem ter prolongamentos além das fronteiras estaduais, passando, portanto, a ser de domínio federal. Essas águas, assim, podem ser federais ou estaduais, diferente do que se popularizou como titularidade dos Estados. A caracterização vai depender das direções dos fluxos subterrâneos e das áreas de recarga (alimentação) e se as obras para sua captação foram contratadas pelo Poder Público Federal. Está em elaboração um Projeto de lei que complementa a lei recentemente sancionada, no que se refere às águas subterrâneas, que permitirá por outro lado avaliar o tipo de aquífero. Se for um aquífero livre, a alimentação ocorre em toda a sua área de exposição. Caso seja confinado, há áreas restritas de alimentação que devem ser avaliadas para caracterização de seu domínio. Não parece, contudo, que o texto constitucional permita uma interpretação tão extensiva a respeito do domínio das águas subterrâneas. A Lei n. 9.433 dispôs sobre a utilização de recursos hídricos subterrâneos. Conforme o seu art. 49, constitui infração iniciar a implantação ou implantar empreendimento relacionado com a derivação ou a utilização de recursos hídricos, superficiais ou subterrâneos, que implique alterações no regime, quantidade ou qualidade dos mesmos, sem autorização dos órgãos ou entidades competentes e perfurar poços para extração de água subterrânea ou operá-los sem a devida autorização. As leis estaduais de recursos hídricos já editadas contêm capítulos específicos que contemplam o uso e o gerenciamento das águas subterrâneas<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Disponível em [http://www.perfuradores.com.br/index.php?pg=info\\_cientificas&sub=info\\_cientificas\\_tb&sub\\_tb=infocie\\_tb\\_30](http://www.perfuradores.com.br/index.php?pg=info_cientificas&sub=info_cientificas_tb&sub_tb=infocie_tb_30), acesso 09/10/2005

<sup>10</sup> Disponível em <http://www.ead.fea.usp.br/cad-pesq/arquivos/c12-art07.pdf> acesso em 05/01/2006

## **8.2. COORDENAÇÃO REGULATÓRIA COM OS SETORES USUÁRIOS E AVANÇOS NA CONSTITUIÇÃO DE UMA BASE LEGAL**

Segundo COSTA (2003), transcorridos mais de cinco anos da promulgação da Lei Federal nº 9.433/97, pode-se proceder a uma avaliação sobre sua implementação. Embora seja inegável a evolução do quadro legal e institucional, observam-se atrasos e deficiências significativas no processo de implementação da lei. Parte dessas dificuldades são devidas às próprias características da Lei 9.433, que remeteu à legislação complementar o detalhamento e a regulamentação de uma série de aspectos essenciais do novo modelo institucional proposto. Outra parte dessas dificuldades se originou da própria limitação da administração federal em se organizar para coordenar o processo de implementação do SINGERH, processo esse que demandava (e demanda) grande capacidade de planejamento e negociação.

Com vistas a superar essas dificuldades, algumas estratégias foram adotadas. Uma delas consistiu em avançar na regulamentação pela via de resoluções do CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Essa opção tem gerado questionamentos relativos ao que deveria ser pauta de deliberação do Conselho e ao que deveria ser objeto de regulamentação por intermédio de decretos do Executivo. As dificuldades em se prosseguir na implementação da lei têm proporcionado lacunas de regulamentação que persistem como grandes fragilidades do SINGREH, a exemplo da lei que deveria tratar sobre as Agências de Água. Uma outra estratégia adotada para buscar superar as deficiências associadas à implementação do SINGREH consistiu em conceber a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, como instituição reguladora do uso e do aproveitamento da água. A ANA é uma agência com autonomia administrativa e financeira vinculada ao Ministério do Meio Ambiente, com a principal missão de implementar o SINGREH. A Agência foi criada pela Lei Federal nº 9.984, de 18 de julho de 2000, e instalada por intermédio do Decreto nº 3.692, de dezembro de 2000.

Em adição à regulamentação específica do sistema de recursos hídricos, cabe ressaltar que muitos dos problemas presentes somente poderão ser efetivamente equacionados mediante a consolidação de regulamentação própria aos setores usuários das águas, com destaques particulares para a geração hidrelétrica e para o saneamento. O estabelecimento de uma regulação própria ao setor saneamento passa a ser relevante para a gestão dos recursos hídricos quando se considera que, dado o caráter monopolista da prestação de serviços, é possível que parte das ineficiências operativas dos concessionários seja encoberta pela parcela relativa à cobrança pelo uso da água, e incorporado às tarifas e simplesmente repassada aos consumidores finais, sem considerações sobre o desempenho dos operadores de sistemas.

Segundo COSTA (2003), vinte e dois estados brasileiros e o Distrito Federal já aprovaram leis que instituem políticas e sistemas estaduais de gerenciamento de recursos hídricos, definindo as entidades governamentais responsáveis pelo desempenho das tarefas próprias ao poder público estadual.

Tendo em vista a dimensão continental do país, suas especificidades regionais, regime político federativo e a divisão constitucional de titularidade das águas, dividida entre a União e os estados, fica evidente a importância dos órgãos estaduais gestores de recursos hídricos, parceiros fundamentais na implementação de um Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) integrado e competente. A avaliação qualitativa das capacidades institucionais instaladas nas diversas unidades da federação torna-se, então, fundamental para o delineamento da Estratégia aqui em pauta. Diante da inexistência de levantamentos recentes, com a abrangência necessária para os propósitos de uma Estratégia de Gerenciamento dos recursos Hídricos no Brasil (EG-RHB), o autor adotou para uma avaliação em primeira aproximação, uma metodologia baseada em entrevistas com profissionais selecionados, detentores de conhecimento privilegiado a cerca das realidades locais, de modo a capturar suas percepções quanto à base legal, ao aparato institucional e à base de informações existentes em cada um daqueles estados e no Distrito Federal. Ainda segundo o autor, foram entrevistadas 60 pessoas, três em cada unidade pesquisada, duas pertencentes ao órgão gestor (uma em cargo de direção e outra, técnico-operacional) e uma não diretamente ligada à instituição, de forma a obter uma avaliação externa. Os principais problemas identificados nessa pesquisa são apresentados no **Tabela 8.3**.

**Tabela 8.3 Avaliação Institucional Qualitativa dos Órgãos Gestores Estaduais**

<b>Principais Problemas</b>		<b>Evidências, observações e exemplos associados</b>
<i>Base Legal</i>	Houve expressivo avanço na aprovação das leis, mas ainda há problemas associados às regulamentações.	Em apenas 5 das 20 UFs houve consenso ao considerar a base legal consistente e completa. Em 12 UFs, a base legal foi considerada em consolidação, com a lei tida como consistente, porém carente de melhor regulamentação. A grande maioria dos entrevistados, no entanto, acredita que as inconsistências legais remanescentes não são determinantes para as dificuldades principais associadas à gestão de recursos hídricos.
<i>Aparato Institucional</i>	Ausência de efetiva autonomia administrativa e financeira.	A maioria dos órgãos gestores é da administração direta, Secretarias de Estado específicas de recursos hídricos (AL, CE, PE, RN), de meio ambiente e recursos hídricos (PB, PI, DF, GO), ou departamentos em outras secretarias (MA, SE, ES, SC, RS). Outros estão na administração indireta, porém em departamentos do órgão ambiental (MT, MS). Outros estados adotaram a solução de autarquias estaduais (BA, MG, SP, PR), que, apesar de legalmente autônomas, também sofrem com as amarras administrativas impostas pelos regimentos do direito público. A COGERH (CE) e a SERLA (RJ) são regidas pelo direito privado, mas pouco têm usufruído desta condição, tendo suas administrações fortemente condicionadas pelas secretarias a que estão vinculadas.

	Instituições ainda pouco consolidadas como gestoras dos recursos hídricos.	Em apenas 5 UFs a visibilidade e importância institucional do órgão gestor foram consideradas alta. Em 13 UFs, os órgãos foram considerados não consolidados e com atribuições e responsabilidades pouco reconhecidas no governo e/ou sociedade em geral. Em 2 estados (MG e DF) não houve consenso quanto a esse quesito.
<i>Aparato Institucional</i>	Equipes técnicas inadequadas para responder às atribuições e responsabilidades dos órgãos gestores.	Em 9 das 20 UFs, as equipes técnicas foram consideradas inadequadas, em 10 foram consideradas altamente inadequadas e em 1 (MS) não houve consenso. Em nenhum Estado houve consenso considerando a equipe apropriada. Dos 60 entrevistados, apenas 4, em diferentes Estados, consideraram suas equipes condizentes em face às responsabilidades da instituição.
	Os Estados ainda dependem fortemente de recursos financeiros federais, com a segurança e regularidade do aporte de recursos sendo, em geral, média a baixa.	Em 11 Estados, houve consenso quanto à origem federal preponderante dos recursos que sustentam as atividades da instituição. Nesses Estados, a segurança e a regularidade do aporte de recursos foram consideradas de média a baixa, com grande incerteza quanto à disponibilidade de recursos a cada ano. Em apenas um caso (RS), o fluxo de recursos foi considerado regular e garantido, tendo sua origem identificada como repasses federais da compensação financeira do setor elétrico. Entre os 7 Estados em que a origem principal dos recursos foi identificada como estadual, apenas em 2 a segurança e regularidade do fluxo de recursos foram consideradas altas (SP e RJ).
	Atividades de monitoramento e fiscalização e a manutenção da infra-estrutura existente são as mais prejudicadas por falta de recursos regulares.	Monitoramento e fiscalização foram as atividades mais citadas (38 em 136 citações) entre as mais prejudicadas pela falta de um aporte regular de recursos financeiros. A manutenção da infra-estrutura existente foi a segunda atividade mais citada (24 em 136). Considerando apenas as entrevistas nos estados nordestinos, o item mais citado como prejudicado foi a manutenção da infra-estrutura (20 em 75), o que revela o estado de abandono da infra-estrutura existente e põe em dúvida a segurança e a sustentabilidade das disponibilidades hídricas mobilizadas por essa infra-estrutura hidráulica.
<i>Base de Informações</i>	As redes de monitoramento de quantidade e qualidade da água são deficientes.	Em todas as UFs, as redes de monitoramento da quantidade de água (fluviometria, pluviometria, níveis de reservatórios, etc.) foram consideradas insuficientes em termos de cobertura. Em 12 UFs, no entanto, a rede foi considerada bem operada e em 8, mal operada. Quanto à qualidade da água, a situação se repete com uma exceção, Pernambuco, em que os entrevistados consideraram a rede suficiente e bem operada. Nas demais UFs, o conceito prevalecente foi o de insuficiente, bem operada em 12 e mal operada em 7.
	A fiscalização dos usos da água não é sistemática, dificultando a atualização e verificação dos cadastros de usuários e o fortalecimento da outorga.	Em nenhuma das UFs foi apontada a existência de fiscalização sistemática dos usos da água. Em 9 UFs existe fiscalização eventual, normalmente em função de denúncias. Em 11 Estados, a fiscalização é praticamente inexistente.
	A maioria dos Estados não dispõe de sistemas de informação implantados.	Em 11 UFs foi apontada a inexistência de sistemas de informações implantados capazes de auxiliar os processos de tomada de decisão dos órgãos gestores. Em 5 estados (CE, RN, MG, SP, PR) foi relatado que os sistemas existem e são atualizados regularmente. Em outros 4 estados (PB, PE, PI, SE), existem sistemas de informações, porém sem atualização regular.

Fonte: Costa, 2003

### **8.3. A SITUAÇÃO NO RIO DE JANEIRO**

Nesse item são apresentadas a estrutura pública estadual de recursos hídricos e a situação oficial do uso da água subterrânea, no Estado, de acordo com Caetano (2005) e pesquisa do autor.

A seguir são descritos os poderes, as instituições, seus papéis e as formas legais e institucionais que possibilitam ao estado do Rio de Janeiro executar um trabalho de gestão voltada aos recursos hídricos.

#### **8.3.1. A Base Legal do Poder do Estado do Rio de Janeiro**

A Constituição do Estado do Rio de Janeiro de 1989, logo em seu art. 67, define como bens do Estado, além de outros recursos, os recursos hídricos, ressalvando, naturalmente, os que estiverem sob obras da União. Nos itens VI e XI do artigo 73, a Constituição fluminense, salienta a competência do Estado, em comum com a União e os Municípios, na proteção do meio ambiente e no combate à poluição, bem como, no registro e acompanhamento da fiscalização, na exploração dos recursos hídricos estaduais. Já nos itens VI e VIII do artigo 74, a competência do Estado é ampliada, ainda concorrentemente com a União, para legislar sobre a conservação da natureza, do solo, dos recursos naturais, proteção ao meio ambiente, controle da poluição e sobre a responsabilidade por dano ao meio ambiente.

Prossegue a Constituição Estadual, em seu artigo 256, a incumbir o Poder Público Estadual na preservação da água, assegurando, inclusive, seu uso múltiplo. Já o artigo 261, em seu *caput*, primeiro parágrafo e itens VII, XVII, XIX, XX, XXI e XXIII, praticamente instituem uma boa parte do que se poderia chamar da Lei de Recursos Hídricos do Estado, tamanho o índice dos detalhes a que chegam esses itens, em relação à gestão dos recursos hídricos estaduais. Esse artigo, resumidamente, trata de aspectos tais como o direito do povo à qualidade de vida; a utilização racional e sustentada dos recursos naturais; a promoção do gerenciamento integrado dos recursos hídricos; a unidade de planejamento que são as bacias e sub-bacias hidrográficas; a unidade na administração da quantidade e da qualidade das águas; a compatibilização entre os usos múltiplos efetivos e potenciais; a participação dos usuários no gerenciamento e obrigatoriedade de contribuição para recuperação e manutenção da qualidade, em função do tipo e da intensidade do uso; a proibição do despejo, nas águas, de resíduos capazes de torná-las impróprias para o consumo, ou para a sobrevivência das espécies; o estabelecimento de uma política tributária, visando à efetivação do princípio poluidor-pagador; a vedação da concessão de financiamentos governamentais e incentivos fiscais às atividades que degradem o meio ambiente; a promoção da conscientização da população e da adequação do ensino, de forma a incorporar os princípios e objetos de proteção ambiental e a imposição de que

captação em cursos de água para fins industriais seja feita a jusante do ponto de lançamento dos efluentes líquidos da própria indústria, na forma da lei.

A Constituição ainda prossegue em seu artigo 262, impondo taxações à utilização, com fins econômicos, dos recursos naturais. O artigo 277 delibera que: o lançamento de esgotos sanitários terá que ser precedido por tratamento primário completo; não é permitida a coleta conjunta de águas pluviais e esgotos; as atividades poluidoras deverão dispor de bacias de contenção.

Finalmente, os artigos 278, 279 e 333 estabelecem, respectivamente, que não podem ser criados aterros sanitários à margem de rios, lagos, lagoas, manguezais e mananciais; que o Estado controlará a utilização de insumos químicos na agricultura e na criação de animais para alimentação humana e que as políticas científica e tecnológica tomarão como princípios, o respeito à vida, à saúde humana, à cultura do povo, além de desenvolver um aproveitamento racional e não predatório dos recursos naturais.

O estado do Rio de Janeiro só promulgou sua lei específica, voltada à política e gerenciamento dos recursos hídricos, em 04 de agosto de 1999. Essa Lei, de número 3.239, de 02 de agosto de 1999, institui a Política Estadual de Recursos Hídricos, cria o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamentando a Constituição Estadual, em seu artigo 261, parágrafo 1º, inciso VII.

Da mesma forma como as legislações de outros estados, a lei fluminense, logo em seu artigo 1º considera a água, em toda a unidade do ciclo hidrológico, ou seja, aérea, superficial e subterrânea, definindo-a como um recurso essencial à vida, de disponibilidade limitada, e dotada de valor econômico, social e ecológico.

A lei fluminense reserva 14% de seus artigos para assuntos exclusivamente ligados ao aproveitamento e proteção da água subterrânea. A referida lei, em seu artigo 3º, item VI, determina que a Política Estadual de Recursos Hídricos promova a despoluição dos corpos hídricos e aquíferos. No artigo 4º, que dispõe sobre as diretrizes da Política Estadual de Recursos Hídricos, são firmadas imposições, tais como a proteção das áreas de recarga dos aquíferos, contra poluição e superexploração; a consideração de toda a extensão do aquífero, no caso de estudos para utilização de águas subterrâneas e a consideração, como continuidade da unidade territorial de gestão, do respectivo sistema estuarino e a zona costeira próxima, bem como, a faixa de areia entre os lagos e o mar.

Na parte em que descreve os Planos de Bacia Hidrográfica, determina como elementos constitutivos desses planos, entre outros, (art. 13) os diagnósticos dos recursos hídricos e dos ecossistemas aquáticos e aquíferos e o cadastro de usuários, inclusive de poços tubulares.

Em relação à autorização para utilização da água a lei dispõe que (art. 18 e 22) as águas de domínio do Estado, superficiais ou subterrâneas, somente poderão ser objeto de uso após outorga pelo poder público e que estão sujeitos à outorga para extração de água de aquífero.

Ressalta-se, mais uma vez, a preocupação da lei com a utilização racional da água subterrânea, quando em seu Capítulo V, a palavra “aquífero” chega a fazer parte do título.

*“Da Proteção dos Corpos de Água e dos Aquíferos”.*

*Art. 35 -*

*§ 2º Os projetos de disposição de resíduos sólidos e efluentes, de qualquer natureza, no solo, deverão conter a descrição detalhada das características hidrogeológicas e da vulnerabilidade do aquífero da área, bem como as medidas de proteção a serem implementadas pelo responsável pelo empreendimento.*

*Art. 36 – A exploração de aquíferos deverá observar o princípio da vazão sustentável, assegurando, sempre, que o total extraído pelos poços e demais captações nunca exceda a recarga, de modo a evitar o deplecionamento.*

*Parágrafo Único – Na extração de água subterrânea, nos aquíferos costeiros, a vazão sustentável deverá ser aquela capaz de evitar a salinização pela intrusão salina.*

*Art. 37 – As águas subterrâneas ou de fontes, em função de suas características físico-químicas, quando se enquadrarem na classificação de mineral, estabelecida pelo Código das Águas Minerais, terão seu aproveitamento econômico regido pela legislação federal pertinente e a relativa à saúde pública, e pelas disposições desta Lei, no que couberem.*

*Art. 38 – Quando, por interesse da conservação, proteção ou manutenção do equilíbrio natural das águas subterrâneas ou dos serviços públicos de abastecimento, ou por motivos ecológicos, for necessário controlar a captação e o uso, em função da quantidade e qualidade, das mesmas, poderão ser delimitadas as respectivas áreas de proteção.*

*Parágrafo Único – As áreas referentes no “caput” deste artigo serão definidas por iniciativa do órgão competente do Poder Executivo, com base em estudos hidrogeológicos e ambientais pertinentes, ouvidas as autoridades municipais e demais organismos interessados e as entidades ambientalistas de notória e relevante atuação.*

*Art. 39 – Para os fins desta Lei, as áreas de proteção dos aquíferos classificam-se em:*

*I – Área de Proteção Máxima (APM), compreendendo, no topo ou em parte, zonas de recarga de aquíferos altamente vulneráveis à poluição e que se constituam em depósitos de águas essenciais para o abastecimento público,*

*II – Área de Restrição e Controle (ARC), caracterizada pela necessidade de disciplina das extrações, controle máximo das fontes poluidoras já implantadas e restrição a novas atividades potencialmente poluidoras e*

*III – Área de Proteção de Poços e Outras Captações (APPOC), incluindo a distância mínima entre poços e outras captações e o respectivo perímetro de proteção.*

Pode-se concluir que a Lei estadual 3.239, de 1999 estabelece, assim como a Lei federal 9.433, de 1997 critérios básicos para o aproveitamento e proteção dos recursos hídricos, determinando que a água (em todo o ciclo hidrológico) é um bem limitado, de valor econômico, deve ter usos múltiplos e prioritariamente, ser utilizada para o abastecimento público; o gerenciamento far-se-á por unidade de bacias hidrográficas (art. 1º).

Como diretrizes principais, a lei em questão estabelece a descentralização da ação do Estado, por regiões e bacias hidrográficas (art. 4º). Para a execução da Política Estadual de Recursos Hídricos cria os seguintes instrumentos (art. 5º): o Plano Estadual de Recursos Hídricos; o Programa Estadual de Conservação e Revitalização de Recursos Hídricos; os Planos de Bacia Hidrográfica, o enquadramento dos corpos d'água em classes; a outorga do direito de uso; a cobrança aos usuários e o Sistema Estadual de Informações sobre os Recursos Hídricos. Cabe ressaltar que, em matéria de política de utilização dos recursos hídricos subterrâneos, a lei fluminense estabelece critérios bem definidos para o seu aproveitamento e proteção.

### **8.3.2. As Instituições e seus Papéis**

A estrutura do Poder Executivo do Governo do Estado do Rio de Janeiro, a partir de janeiro de 2003, quando tomou posse como Governadora do Estado, Rosinha Garotinho, passou a ser constituída por vinte e quatro Secretarias de Estado, 1 Procuradoria Geral do Estado, 1 Defensoria Pública Geral do Estado e 1 Gabinete Civil.(CAETANO 2005)

Em relação ao Governo anterior, houve uma diminuição de três Secretarias, das quais destacamos a extinção da Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Os Recursos Hídricos, dessa forma, nessa nova administração, volta a ficar a cargo da Secretaria de Meio Ambiente, como ocorreu até 1999.

#### **8.3.2.1. Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano (SEMADUR)**

A gestão dos recursos hídricos no Estado do Rio de Janeiro cabe ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERHI) e a Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA), órgão da administração direta do Estado, fundada em 1975 é o órgão técnico executor desta política e a quem compete: a análise e concessão de pedidos de outorga e de cadastro de uso da água de domínio estadual (Portaria nº 307, de 23/12/2002); o estabelecimento de cobrança pelo uso da água; a realização de estudos e projetos de hidrologia, estruturas e geotecnia; a demarcação das faixas marginais de proteção (FMP) de rios e lagoas (Portaria nº 324, de 28/08/2003); a elaboração de planos diretores de recursos hídricos; a análise e aprovação de estudos e projetos, em corpos hídricos elaborados por terceiros; a fiscalização dos corpos d'água e a participação em convênios de cooperação técnica na área de recursos hídricos.

A SERLA possui uma equipe de oito técnicos, para analisar os processos de outorga, sendo que apenas três pertencem ao quadro permanente e somente um geólogo é habilitado para analisar os processos de águas subterrâneas e sondagens geológicas para todo o estado. (SERLA, 2006)

Além da SERLA fazem parte também da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano, o Instituto Estadual de Florestas (IEF), Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA) e a Comissão Estadual de Controle Ambiental (CECA).

Apesar da competência para gestão dos recursos hídricos ser da SERLA, a nova política instituída pela Lei Federal 9.433, de 1997, determina uma gestão integrada com a participação da sociedade. Dessa forma, a SERLA, ao executar a análise dos pedidos de outorga, leva em consideração as legislações específicas dos demais organismos responsáveis pela proteção do meio ambiente e a possibilidade de interferência no entorno do empreendimento. Entre eles, destacam-se:

O Instituto Estadual de Florestas (**IEF**) – Fundado em 1986, é o Órgão responsável pela execução da política florestal e da política de conservação de recursos naturais renováveis do Estado do Rio de Janeiro. A ele compete, dentre outras coisas, fazer cumprir a legislação federal e estadual sobre florestas, fauna e mananciais; orientar as atividades de conservação de solos com fins ecológicos, tendo em vista, principalmente, a preservação dos recursos hídricos; dirigir, orientar e promover a fiscalização das atividades de exploração de florestas, fauna silvestre e aquática, visando a sua conservação, proteção e desenvolvimento e promover e incentivar o reflorestamento ecológico, de proteção e o de interesse econômico, mediante assistência técnica, prestação de serviços, produção de sementes, mudas e utensílios.

A Fundação Estadual de Engenharia e Meio Ambiente (**FEEMA**) – É uma entidade dotada de personalidade jurídica de direito privado. Criada em 1975, com a finalidade de controle ambiental tem como objetivos, dentre outros:

- analisar, fiscalizar e propor o deferimento ou não de pedidos de licenças ambientais (LP, LI e LO);
- medir, conhecer e controlar a poluição, adotando medidas para o seu equacionamento;
- sugerir à CECA, as medidas necessárias ao controle da poluição e à proteção do meio ambiente;
- sistematizar e divulgar conhecimentos técnicos;
- desenvolver programas educativos que concorram para a melhor compreensão social dos problemas ambientais;
- orientar a iniciativa privada no sentido de utilização racional do meio ambiente;

- assessorar o poder público na formulação de uma política ambiental, adequada à melhoria da qualidade de vida da população.

O Conselho Estadual de Controle Ambiental (**CECA**) – É o Órgão responsável pelo julgamento de todos os processos de impacto ambiental e pela outorga de licenças ambientais; fomenta, também, a discussão de estratégias de atuação, em relação a uma utilização racional e sustentável dos recursos naturais.

Apesar de não estar ligada a Ligado a **Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano (SEMADUR)**, o Departamento de Recursos Minerais (**DRM**), criado em 1975, subordinado a **Secretaria de Energia, Indústria Naval e Petróleo (SEINP)**, funciona como uma agência fomentadora do desenvolvimento da atividade mineral ambientalmente sustentável.

Desde 1994, o DRM é responsável pelo Registro Mineral das empresas que exploram ou beneficiam recursos minerais, no Estado do Rio de Janeiro, emitindo o Certificado de Registro Mineral Estadual.

O DRM conta também com a Coordenadoria de Hidrogeologia que tem por competência:

- planejar, organizar, coordenar e disseminar as atividades ligadas às águas subterrâneas e minerais no Estado, visando fornecer elementos para o seu controle, uso racional e desenvolvimento sustentável;
- fornecer as informações para a constituição do banco de dados sobre controle da utilização dos recursos hídricos;
- atuar, em conjunto com outros órgãos públicos, prefeituras e a sociedade para divulgar a importância da preservação dos recursos hídricos subterrâneos, visando à continuidade do seu aproveitamento pelas gerações futuras.

O DRM possui uma equipe de vários geólogos, com diversas especializações, que atuam na área de águas subterrâneas e minerais. Juntamente com a equipe da CPRM, foi responsável pelo levantamento do cadastro de poços tubulares profundos, existentes no Estado do Rio de Janeiro.

#### **8.4. PROCESSO DE OUTORGA**

De acordo com AZEVEDO et al (2003) há hoje, no Brasil, um certo consenso quanto à importância da outorga de direitos de uso da água como instrumento essencial para a adequada implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. A experiência internacional mostra que a clara definição de direitos de uso da água é, de fato, essencial para o bom funcionamento de qualquer sistema de gerenciamento de recursos hídricos, dos mercados de água aos modelos fundamentados em mecanismos de comando e controle.

A implementação de um sistema de outorga, no entanto, é uma tarefa extremamente complexa, que demanda informação, recursos humanos adequados e instituições sólidas. As decisões tomadas quanto à outorga de direitos de uso da água determinam o seu padrão de uso e sua alocação setorial, tendo, assim, conseqüências ambientais, sociais e econômicas que precisam ser cuidadosamente avaliadas antes que as decisões sejam tomadas. Mas, para que esses aspectos possam ser avaliados, é necessário antes entender o sistema físico de recursos hídricos, levando em consideração as características da bacia hidrográfica, o comportamento hidrológico na área e as diferentes possibilidades de operação das infra-estruturas hídricas.

Essa tarefa, por si só, já envolve elevada complexidade. O número de variáveis a considerar é grande e as incertezas são muitas. Aliando-se aos desafios dos aspectos relativos à disponibilidade da água, considerações sobre sua qualidade tornam o processo ainda mais complexo.

Segundo TUCCI et al (apud RAMOS, 2005), as grandes concentrações urbanas brasileiras apresentam condições críticas de sustentabilidade em função do excesso de cargas poluidoras sejam de origem doméstica, ou industrial, ou devido à ocorrência de enchentes urbanas, que contaminam os mananciais, associada a uma forte demanda de água. Em função desses fatores, a tendência de redução de disponibilidade hídrica dessas áreas é significativa.

A outorga é um instrumento jurídico por meio do qual o Poder Público, através de órgão com a devida competência, confere a um ente público ou privado a possibilidade de uso privativo de um recurso público. Como no Brasil as águas são bens públicos de domínio da União, dos Estados ou do Distrito Federal (Constituição Federal, arts. 20 e 26), todo uso deve ser outorgado. A Lei da Política Nacional de Recursos Hídricos institui a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos como um de seus instrumentos, tendo como objetivos “assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água” (Lei nº. 9.433/97 Art. 11). Note-se que, ao mesmo tempo em que mantém no Poder Público a prerrogativa do controle, a outorga confere ao outorgado a segurança necessária do acesso à água, com a qual pode melhor planejar suas atividades e investimentos.

A outorga de direito de uso de recursos hídricos é o ato administrativo mediante o qual a autoridade outorgante faculta ao outorgado o direito de uso de recurso hídrico, por prazo determinado, nos termos e nas condições expressas no respectivo ato, consideradas as legislações específicas vigentes (CNRH, 2001).

Os usos sujeitos à outorga no Brasil, segundo a Resolução nº 16 do CNRH (CNRH, 2001, artigo 4º) são:

a) a derivação ou captação de parcela de água existente em um corpo de água, para consumo final, inclusive abastecimento público ou insumo de processo produtivo;

b) extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo;

c) lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final;

d) o uso para fins de aproveitamento de potenciais hidrelétricos; e

e) outros usos e/ou interferências que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

Outorga de direito de uso de recursos hídricos é o ato administrativo mediante o qual o Poder Público outorgante (União, Estados ou Distrito Federal) faculta ao outorgado o uso de recurso hídrico, por prazo determinado, nos termos e nas condições expressas no respectivo ato (ANA, 2005).

SILVA (apud RAMOS, 2005) considera que a outorga, de um modo geral, pode ocorrer segundo três distintas doutrinas orientadoras, ripária, controlada e transferível. A outorga ripária está relacionada à propriedade da terra, ou seja, o proprietário de terras ribeirinhas tem direito à água que passa no seu terreno. A possibilidade de ocorrência de conflitos pelo uso da água é grande, pois não existem critérios de usos definidos por organismos administradores. A outorga ripária é a doutrina orientadora do uso da água na porção leste dos Estados Unidos.

Na outorga controlada, o poder público exerce controle sobre as concessões de uso da água; são observados critérios como quantidade de água solicitada e local de captação, objetivo do uso, possíveis impactos para outros usuários decorrentes da emissão ao requerente, e infra-estrutura do usuário requerente. O autor pontua ainda que, na outorga controlada, “os direitos outorgados são tipicamente não-transferíveis, ou seja, são específicos para cada situação de uso e usuário, e qualquer modificação nessas características requer nova solicitação de outorga”. Isso permite a realocação da água para outros usos, o que contribui para uma maior eficiência global na utilização dos recursos hídricos disponíveis.

De acordo com RAMOS (2005), no Brasil, a outorga definida pela Lei 9.433/97, como um dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, pode ser enquadrada como outorga controlada. O poder público pode facultar o direito de uso da água sob o cumprimento pelo usuário de critérios pré-estabelecidos, podendo ainda revogar a emissão caso os critérios estabelecidos não sejam cumpridos pelo outorgado, ou em caso de interesse público, por necessidade de atendimento a situações ocasionadas por condições climáticas adversas, entre outros casos definidos pela própria Lei 9.433/97.

A autoridade outorgante deverá assegurar ao público o acesso aos critérios que orientaram às tomadas de decisão referentes à outorga (CNRH, 2001). A emissão da outorga obedecerá, no mínimo, às seguintes prioridades: o interesse público, a data do protocolo do requerimento, ressal-

vada a complexidade de análise do uso ou a interferência pleiteada, e a necessidade de complementação de informações. Os pedidos de outorga poderão ser indeferidos em função do não cumprimento das exigências técnicas ou legais ou do interesse público, mediante decisão devidamente fundamentada, devendo ser publicada na forma de extrato no Diário Oficial (CNRH, 2001).

Segundo CRUZ (apud RAMOS, 2005), a complexidade da outorga não se resume a critérios técnicos, pois aumenta ainda mais quando são considerados os conflitos de interesses inerentes ao processo de negociação participativa da sociedade, processo esse previsto no sistema de gerenciamento de recursos hídricos adotado no Brasil.

As solicitações de outorga de água de domínio da União, como também os atos administrativos delas resultantes, são publicadas na imprensa oficial e em pelo menos um jornal de grande circulação na região a que se referir. Após a tramitação de rotina, é iniciada a análise do pedido, segundo a tipologia que, em geral, se baseia nos dados fornecidos pelo requerente, os quais devem contemplar: a descrição geral do empreendimento e os estudos para a determinação da disponibilidade hídrica. Em seguida, são conduzidas análises sobre a demanda e disponibilidade de água do corpo hídrico, do qual será feita a captação, tendo em vista as especificidades envolvidas (ANA, 2005). A Agência Nacional de Águas já dispõe de rotinas sistematizadas para análise de pedidos de outorga para irrigação, abastecimento público, lançamento de efluentes de esgotamento sanitário, uso industrial e obras hidráulicas. Um dos desafios ainda a serem enfrentados, é a sistematização de procedimentos do ponto de vista espacial, uma vez que as atribuições da ANA referem-se aos cursos de água de domínio da União, o que pressupõe a adoção de procedimentos análogos e similares para os cursos de água das bacias estaduais (ANA, 2005).

Para RAMOS & LOCH (apud RAMOS, 2005), o instrumento de outorga de uso da água prevê a posterior instituição da cobrança pelo uso, dentro das prioridades e valores a serem sugeridos por cada comitê de bacia hidrográfica. Para realizar a possível cobrança pelo uso, é necessário o conhecimento de quem são os usuários que necessitam ser outorgados, uma vez que a cobrança só é realizada sobre os usos outorgados. Sendo assim, o cadastro dos usuários de água necessita ser bastante abrangente, contemplando informações como: quem são os usuários, quantos são os usuários, quais os tipos de uso de água na bacia, qual o nível ou o percentual de demanda de cada tipo de uso, onde estão localizados os usuários (georeferenciamento), qual a quantidade de água demandada por cada usuário, qual a qualidade de água demandada (classes de uso), entre outras. De acordo com AZEVEDO (2003), a prática da outorga é bastante anterior à Lei 9.433. Alguns Estados, como São Paulo, Paraná e Bahia já se utilizam desse instrumento há mais de dez anos. O Estado de São Paulo é o pioneiro, outorgando o uso de suas águas há cerca de mais de dez anos. BARTH, (apud AZEVEDO, 2003) afirma que dos 27 Estados da Federação, 19 possuem leis estaduais de recursos hídricos, além do Distrito Federal, instituindo formalmente a outorga.

Segundo AZEVEDO (2003), apesar de sua importância e amparo legal, hoje quase que unânimes no Brasil, apenas poucos Estados (ex.: São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Bahia, Ceará e Pernambuco) têm outorgado de modo sistemático suas águas, porém em estágios de implantação bastante distintos. Dentre as várias razões que explicam o fato, destacam-se aquelas de ordem técnica e institucional, além do interesse político e da própria disponibilidade dos recursos hídricos (conflitos crescentes de uso impõem a necessidade da outorga).

Segundo RAMOS (2005), em alguns Estados brasileiros, como São Paulo, Ceará, Bahia Rio Grande do Norte, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Rio Grande do Sul a outorga de direito de uso da água já está sendo concedida de maneira sistemática. Os procedimentos utilizados pelos Estados são bastante semelhantes e baseiam-se principalmente em critérios técnicos e informações hidrológicas. Na bacia do rio Paraíba do Sul, que se estende pelos Estados de São Paulo Rio de Janeiro e Minas Gerais, desde o ano de 2003 já está sendo realizada a cobrança pelo uso da água de domínio da União.

Por outro lado, a busca pela gestão eficiente dos recursos hídricos passa, necessariamente, pela estruturação e consolidação de um sistema eficiente de alocação e registros de direitos de uso da água. No Brasil, o Banco Mundial vem trabalhando com vários Estados na promoção das reformas nas bases legal e institucional para gestão dos recursos hídricos e, mas recentemente, com a ANA dando apoio à sua estruturação. Como parte dessa parceria, torna-se objetivo comum a estruturação e consolidação de um Sistema Nacional de Outorgas, que permita aos Estados e à União decidir, de maneira eficiente e integrada, sobre a alocação de direitos de uso dos seus recursos hídricos.

De acordo com PORTO E AZEVEDO (apud AZEVEDO et al, 2003) a esse quadro, soma-se a falta de informações confiáveis tanto para avaliação e acompanhamento da disponibilidade hídrica, em seus aspectos qualitativo e quantitativo, quanto para conhecimento, controle e gerenciamento da demanda. Existem, ainda, alguns outros elementos que adicionam complexidade à análise dos problemas de recursos hídricos em geral e, em particular, às decisões de outorga: (i) porte elevado dos investimentos; (ii) necessidade de planejamento a longo prazo; (iii) dinamismo ao longo da vida útil dos projetos; (iv) repercussões econômicas, sociais e ambientais significativas; e (v) participação de grupos heterogêneos no processo decisório.

Nesse contexto de elevada complexidade, os sistemas de suporte a decisões podem fornecer uma enorme ajuda para uma melhor compreensão do comportamento dos sistemas de recursos hídricos. Com isso, pode-se analisar um número maior de alternativas, conhecer melhor os problemas e suas possíveis soluções e avaliar de modo mais preciso as consequências de nossas decisões.

#### **8.4.1. Avaliação dos sistemas de outorga em Estados selecionados pela pesquisa do Banco Mundial**

Segundo COSTA (2003), o Banco Mundial, com o apoio do World Bank - Netherlands Water Partnership Program (BNWPP), financiou um estudo para avaliação do suporte à decisão para outorga de direitos de uso da água em utilização no Brasil. Foram pesquisados os seis estados que mais avançaram na aplicação da outorga e no uso de sistemas de suporte à decisão (São Paulo, Bahia, Paraná, Ceará, Minas Gerais e Pernambuco). Com isso, a amostra pôde contemplar diferentes realidades existentes no país no que se refere ao desenvolvimento institucional do setor de recursos hídricos, ao estágio de implantação da outorga e do sistema estadual de gerenciamento e aos problemas predominantes qualitativos no Sul/Sudeste e quantitativos no Nordeste. Foi pesquisada, também, a implantação da outorga no nível federal.

Sistemas de Apoio à Decisão são definidos por VIEGAS FILHO *et al.* (apud RAMOS, 2005), como sendo:

*(...) ferramentas computacionais que permitem aos planejadores e decisores, quando defrontados com problemas de difícil estruturação em face da complexidade envolvida, processarem o seu estudo a partir da construção interativa e adaptativa de soluções através da proposição de diferentes cenários possíveis de ocorrerem e da avaliação da sua evolução face às decisões tomadas.*

A capacidade institucional instalada varia muito de um estado para outro. De um modo geral, os órgãos gestores dos recursos hídricos, responsáveis pela outorga, apresentam limitações de recursos e, sobretudo, de pessoal, exceto São Paulo, que conta com estrutura de maior porte no DAEE. Entre os demais, Paraná e Bahia apresentam equipes de outorga mais bem estruturadas, enquanto que nos restantes existem sérias limitações, tanto no número quanto no perfil dos técnicos envolvidos. Um dos problemas mais sérios que os estados têm enfrentado na implantação de seus sistemas de gerenciamento e, especificamente, da outorga de direitos de uso da água, é a deficiência da base de informações técnicas disponíveis. De um modo geral, o monitoramento de quantidade e qualidade da água é limitado e os dados existentes muitas vezes são sub-aproveitados por falta de uma sistematização adequada. Nos estados do Nordeste, há um número insuficiente de estações fluviométricas e pouca informação sobre a capacidade dos aquíferos existentes, limitando bastante o conhecimento das disponibilidades hídricas e, em conseqüência, reduzindo a credibilidade do instrumento de outorga. No Sul/Sudeste, as disponibilidades hídricas são mais bem conhecidas e monitoradas, mas persiste a limitação quanto ao monitoramento da qualidade da água.

Algumas das deficiências encontradas, no que diz respeito à base de informações, à manutenção de uma equipe adequada, à ausência de fiscalização sistemática, ou ao tratamento dos aspectos de qualidade da água e da outorga de águas subterrâneas, estão intimamente relacionadas à falta

de autonomia financeira das instituições. Esta limitação está associada não só ao montante total de recursos alocados, como também, à irregularidade desses recursos, que muitas vezes chegam em espasmos. O processo de outorga é um processo contínuo que está sempre em evolução. Nesse caso, o fluxo regular de recursos é fundamental para que se possa planejar o que fazer e como fazer, inclusive sobre o desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão (SSD). A solução para esse problema passa, necessariamente, pelo aspecto financeiro e, sobre isto, a política nacional prega e as experiências internacionais bem sucedidas mostram, que a cobrança pelo uso dos recursos hídricos é uma das principais alavancas para a consolidação dos sistemas de gestão.

A avaliação realizada permitiu a indicação de algumas recomendações para projeto, concepção e implementação de novos sistemas de suporte à decisão para outorga: (i) clareza na definição dos objetivos e das funções do SSD; (ii) discussão ampla e sintonia entre tomadores de decisão e técnicos; (iii) capacitação e dimensionamento adequado das equipes; (iv) flexibilidade do suporte à decisão; (v) organização, tratamento e atualização das informações disponíveis; (vi) tratamento adequado das questões de qualidade da água; (vii) ampliação e melhoria da base de informações para outorga de águas subterrâneas; (viii) modelagem adequada dos sistemas de reservatórios; (ix) eficiência e facilidade de uso dos recursos de análise; e, (x) adequação na comunicação dos resultados.

Além disso, foram enumerados requisitos mínimos que devem ser verificados antes de se desenvolver e implantar um SSD específico para outorga. Esses requisitos foram agrupados em três dimensões: do problema a analisar (conhecimento e caracterização das decisões), da informação (conhecimento e organização da base de dados e informações) e do usuário (existência de equipe com potencial para assimilar a tecnologia).

No caso de outorgas de águas subterrâneas é necessária, segundo o resultado da pesquisa (AZEVEDO 2003), a ampliação e melhoria da base de informações. Em vários Estados, o maior número de outorgas emitidas é exatamente para exploração de águas subterrâneas. Apesar disso, os procedimentos de análise da outorga e as informações técnicas que a subsidiam são muito limitados. As águas subterrâneas constituem um recurso estratégico que precisa ser melhor gerenciado. Para isso, precisam ser estudadas e avaliadas as capacidades dos aquíferos e os níveis atuais de exploração. Deve-se melhorar o monitoramento dos aquíferos e desenvolver instrumentos de análise adequados para avaliar os pedidos de outorga, de forma a garantir uma exploração sustentável desses mananciais.

O SSD existe para aprimorar o julgamento humano. Portanto, é fundamental a capacitação e dimensionamento adequado das equipes responsáveis pela análise da outorga não só para uso do sistema de suporte à decisão mas, principalmente, no que se refere ao conhecimento técnico necessário para a adequada compreensão dos fenômenos envolvidos, das técnicas de modelagem utilizadas (suas aplicações e restrições), dos usos da água e das características locais. Para isso, é necessá-

rio que equipe de outorga conte com profissionais de diferentes perfis, com conhecimentos em áreas como hidrologia, hidrogeologia, agronomia, hidráulica, saneamento e qualidade da água.

Por fim, além do aspecto da regularidade dos recursos, foi destacada a necessidade de garantir a sustentabilidade das estruturas de gestão dos recursos hídricos e, especificamente, dos sistemas de outorga. Para isso, é fundamental o fortalecimento e a autonomia das instituições gestoras e o início efetivo da cobrança pelo uso dos recursos hídricos (AZEVEDO 2003 E RAMOS 2005). Na **Tabela 8.4** é apresentada uma síntese sobre os sistemas de outorga utilizados por 6 estados brasileiros pesquisados, inclusive para a água subterrânea.

Tabela 8.4 – Síntese sobre os sistemas de outorga utilizados entre os estados brasileiros pesquisados

Estado	Legislação referente à outorga	Vazão de referência para a outorga	Consumo insignificante, dispensado da outorga	Participação dos comitês em relação à outorga	Critérios de outorga	Águas subterrâneas
Minas Gerais	<p>Lei 3.199/1999; Lei 13.771/2000; Decreto 43.371 /2003; Deliberação Normativa do CERHMG nº 9/2004; Portaria Administr. nº 10/1998; Portaria IGAM nº 007/1999; Portaria IGAM nº 001/2000</p>	<p>30% da Q 7,10 como limite máximo de derivações consuntivas</p>	<p>1 litro/segundo ou 0,5 litros/segundo para captações ou derivações de águas superficiais (*). 10 m<sup>3</sup>/dia para águas subterrâneas (exceção para poços tubulares). 5.000 m<sup>3</sup> ou 3.000 m<sup>3</sup> para acumulações superficiais (*)</p>	<p>Aprovar a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos para empreendimentos de grande porte e com potencial poluidor</p>	<p>Prioridades de uso estabelecidas nos Planos Diretores de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas; classe em que o corpo de água estiver enquadrado; manutenção de condições adequadas ao transporte hidroviário, necessidade de se preservar o uso múltiplo e racional das águas.</p>	<p>A Análise da outorga é realizada com base no teste de bombeamento e outras informações fornecidas pelo requerente. Em alguns casos faz-se uma consulta quanto aos poços já existentes na área. Há informação sobre a capacidade dos aquíferos, mas não está sistematizada, de forma que esta informação não é utilizada na análise da outorga.</p>
São Paulo	<p>Lei nº 7.663/991; Lei nº 9034/1994; Decreto nº 36.787/1993; Decreto nº 41.258/1996; Portaria DAEE nº 717/1996</p>	<p>Q 7,10 para as vazões em geral. Para as vazões regularizadas por reservatórios a Q7,10 descontadas perdas por infiltração, evaporação ou por outros processos físicos, da utilização das águas e as reversões de bacias hidrográficas</p>	<p>1 litro/segundo (bacia do rio Paraíba do Sul)</p>	<p>Aprovar a proposta da bacia hidrográfica, para integrar o Plano Estadual de Recursos Hídricos e suas atualizações.</p>	<p>Eficiência e economia na utilização da água, mediante tecnologias apropriadas, eliminação de perda e desperdícios e outras condições, a serem fixadas em regulamento. Consonância com a legislação ambiental</p>	<p>A outorga para águas subterrâneas é concedida em função do tipo de capacidade do aquífero, da interferência com outros poços e das áreas de proteção. As fontes de informação são os estudos regionais do DAEE, o banco de dados de águas subterrâneas e observações de campo. A outorga só é concedida após comprovação da possibilidade da água</p>

Tabela 8.4 – Síntese sobre os sistemas de outorga utilizados entre os estados brasileiros pesquisados ( continuação)

Estado	Legislação referente à outorga	Vazão de referência para a outorga	Consumo insignificante, dispensado da outorga	Participação dos comitês em relação à outorga	Critérios de outorga	Águas subterrâneas
Ceará	Lei 11.996/1992 Decreto nº 23.067/1994 Decreto nº 26.462/2001 Decreto nº 25.443/1999	Não poderá exceder 9/10 (nove décimos) da vazão regularizada anual com 90% (noventa por cento) de garantia. Para lagos territoriais ou lagoas, este limite é reduzido a 1/3 (um terço)	Consumo até 2.000 litros / hora	Propor ao CONERH critérios e normas gerais para a outorga de uso dos recursos hídricos e de execução de obras ou serviços de oferta hídrica	Não havendo disponibilidade hídrica para atender vários pedidos de outorga de água de um mesmo corpo d'água, a Secret.de Recursos Hídricos procederá ao rateio, segundo seu critério, respeitada a ordem de prioridades para os usos na bacia. Em igualdade de ordem, a decisão favorecerá quem detenha a licença prévia. Na ausência desta ou persistindo o empate, terá preferência o que melhor atender aos interesses sociais.	Dificuldade em quantificar as reservas exploráveis e em conhecer o nível de exploração atual dos aquíferos, devido a desatualização do cadastro de poços. A análise é realizada essencialmente com base na vazão do teste de poços
Bahia	Lei nº 8.194/2002 Lei nº 8.194/2002 Decreto nº 6.296/1997 Lei nº 6.855/1995	80% da vazão de referência (VR) com base na vazão de até 90% de perman. (sem barramento, lagos naturais ou barram. Em mananciais perenes). 95% da VR: mananc. Intermit. Abastecim. humano: até 95% da VR	Vazões máximas de 0,5 litros/segundo Volumes máximos acumulados em reservatórios de 200.000 m3	-----	As vazões superficiais ou os volumes deriváveis dos lagos ou reservatórios para outorga sob condições especiais; As limitações dos níveis dinâmicos e as vazões máximas a serem extraídas de poços tubulares profundos; Maior racionalidade na utilização do recurso hídrico.	Há pouca informação sobre os aquíferos do estado. A análise é realizada com base no teste de bombeamento e demais informações fornecidas sobre o poço (local, profundidade, etc...). O volume outorgado é definido em função da verificação da demanda.

Tabela 8.4 – Síntese sobre os sistemas de outorga utilizados entre os estados brasileiros pesquisados (continuação)

<b>Estado</b>	<b>Legislação referente à outorga</b>	<b>Vazão de referência para a outorga</b>	<b>Consumo insignificante, dispensado da outorga</b>	<b>Participação dos comitês em relação à outorga</b>	<b>Critérios de outorga</b>	<b>Águas subterrâneas</b>
Paraná	Lei n° 12.726/1999 Decreto n° 4.646/2001 Decreto n° 2.315/2000 Decreto n° 2.317/2000 Decreto n° 2.314/2000	Vazões de referência: vazões naturais, determinadas com base em estudos hidrológicos, para diferentes períodos de retorno e duração ou frequência de curvas de permanência.	Serão estabelecidos pelo Poder Público Outorgante, com base em proposições dos Comitês de Bacia Hidrográfica.	Propor ao poder público outorgante ( SUDERHSA) os valores de uso considerados insignificantes. Propor ao CERH/PR a probabilidade associada à vazão outorgável. estabelecer as prioridades de uso dos recursos hídricos da bacia. Estabelecer as prioridades para outorga no plano da bacia e propor critérios e normas gerais para a outorga	As prioridades de uso estabelecidas nos Planos de Bacia Hidrográfica; o enquadramento dos corpos de água em classes de uso; a preservação dos usos; a manutenção, quando for o caso, das condições adequadas ao transporte aquaviário; ordem de protocolo da solicitação da outorga.	Há pouca informação sobre a capacidade dos aquíferos. Existe um setor de águas subterrâneas na SUDERHSA que analisa os pedidos de outorga. Em geral, não há informação sobre o aquífero e a análise é realizada com base no teste de bombeamento. A vazão outorgada é definida em função da verificação da demanda, devendo ser inferior a vazão do teste.
Rio de Janeiro	Lei n° 3.239/1999 Portaria SERLA n° 307/2002	No máximo 50% da Q7,10 , inclusive para abastecimento humano	Definição pelos comitês (Planos de Bacia). Não havendo comitê, definição pela SERLA e aprovação pelo CERH. Critérios gerais: até 0,5% da vazão para curso d'água com Q7,10 até 200 l/s. Até 1 l/s para trechos onde a Q7,10 for maior do que 200l/s. Captação subterrânea menor que 5 m3/dia	Encaminhar ao CERH as propostas de acumulações, derivações, captações e lançamentos considerados insignificantes para isenção de outorga	Águas superficiais: aspectos quantitativos no ponto de captação; vazão mínima para o curso d'água; vazão máxima utilizável (50% da Q7,10). Águas subterrâneas: aspectos quantitativo da vazão de extração; possibilidade de interferência em poços vizinhos. Lançamento de efluentes: aspectos quantitativos da vazão de efluentes; localização geográfica do lançamento; proteção das áreas de recarga de água subterrânea e das nascentes.	A Análise da outorga é realizada com base no teste de vazão e outras informações fornecidas pelo requerente. Dificuldade em quantificar as reservas exploráveis e em conhecer o nível de exploração atual dos aquíferos, devido a não existir informações sistematizadas sobre os aquíferos. Em 2005 teve início o cadastro dos usuários de águas superficiais(captação) e subterrânea(extração) .

Fonte: Adaptado pelo autor de AZEVEDO, L.G.T.; BALTAR, A.M.; RÉGO, M.; PORTO, R. Banco Mundial, 2003 e RAMOS, 2005

## 8.5. PROCESSO DE OUTORGA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

No Estado do Rio de Janeiro, a legislação mais específica sobre a outorga de direito de uso da água são a Lei nº 3.239, de 1999, e a portaria da SERLA nº 307 de 2002.

O órgão responsável pela emissão das outorgas de uso da água no Estado do Rio de Janeiro é a Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas – SERLA.

De acordo com CAETANO (2005), a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, embora venha sendo concedida desde 1988, no Estado do Rio de Janeiro, somente após a promulgação da Lei Estadual, nº 3.239/99, que trata da Política Estadual de Recursos Hídricos, teve seu processo impulsionado, através de um número maior de solicitações de outorga; este fato acarreta uma mudança de metodologia no órgão gestor, para atendimento aos usuários, bem como obriga às empresas de saneamento básico, prefeituras, indústrias e usuários a se adequarem às novas exigências.

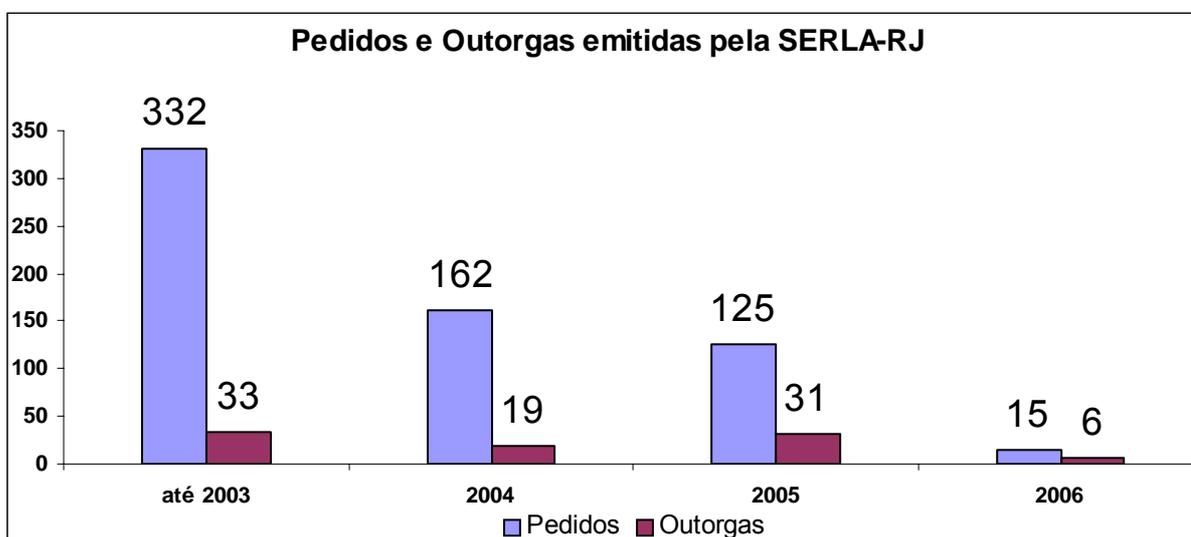
Segundo o artigo 22, da Lei nº 3.239, somente se concederá outorga para fins industriais se a captação solicitada pelo usuário estiver situada à jusante do ponto de lançamento dos efluentes líquidos da atividade do próprio usuário.

A portaria da SERLA nº 307 de 2002 estabelece que a vazão de referência a ser usada para a outorga de uso da água no Rio de Janeiro é a Q 7,10, sendo que o volume máximo a ser outorgado é de 50% da Q 7,10, inclusive para abastecimento humano. De acordo com o artigo 13 do Conama 20 de 18 de agosto de 1986, Q 7,10 é a média das mínimas de 7 (sete) dias consecutivos em 10 (dez) anos de recorrência de cada seção do corpo receptor.

A portaria citada estabelece que as vazões a serem consideradas como insignificantes deverão ser propostas pelos comitês em seus respectivos Planos de Bacia Hidrográfica. Na inexistência de comitê, essa definição será realizada pela SERLA e aprovada pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Como critério geral, a portaria estabelece que para os cursos de água com Q 7,10 até 200 l/s (duzentos litros por segundo), serão insignificantes as captações de valor até 0,5% (meio por cento) da vazão de referência na seção específica. Para os trechos dos cursos de água onde a Q 7,10 for superior a 200 l/s (duzentos litros por segundo), serão consideradas insignificantes as captações de valor até 1 l/s (um litro por segundo). Os poços tubulares ou quaisquer outras captações subterrâneas com vazão menor ou igual a 5 m<sup>3</sup>./dia (cinco metros cúbicos por dia) ou 0,06 l/s (litros por segundo) serão considerados insignificantes. Para bacias (ou sub bacias) hidrográficas, nas quais a somatória de captações (menos os lançamentos dos usos considerados, a princípio, insignificantes) atingir um valor superior a 10% (dez por cento) da vazão mínima de referência, não mais será aplicado o con-

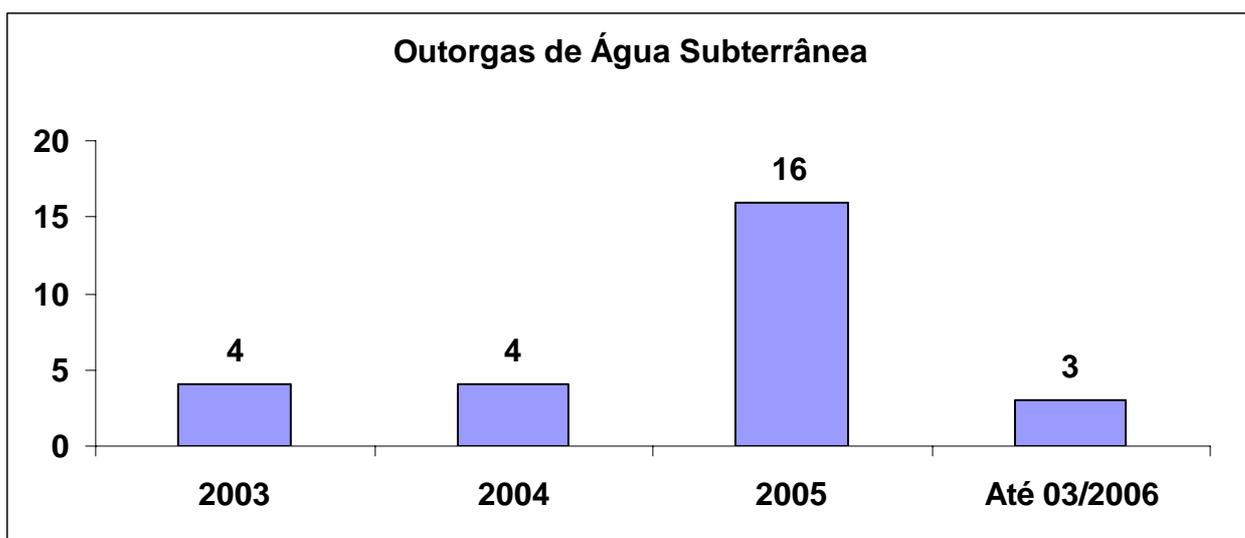
ceito de insignificante para os novos usos a serem cadastrados, implicando em necessidade de outorga para qualquer nova instalação na bacia.

Podemos observar na **Figura 8.1** a evolução dos pedidos e das outorga expedidas após a publicação da Portaria da SERLA nº 307 de 2002, até março 2006. Até esta data foram protocolados 634 pedidos e emitidas 89 outorgas incluindo águas superficiais e subterrâneas.



**Figura 8.1 – Pedidos de outorga e outorgas emitidas pela SERLA de 2003 a março 2006 (Serla, 2006), disponível junto a Diretoria de Gestão de Recursos Hídricos**

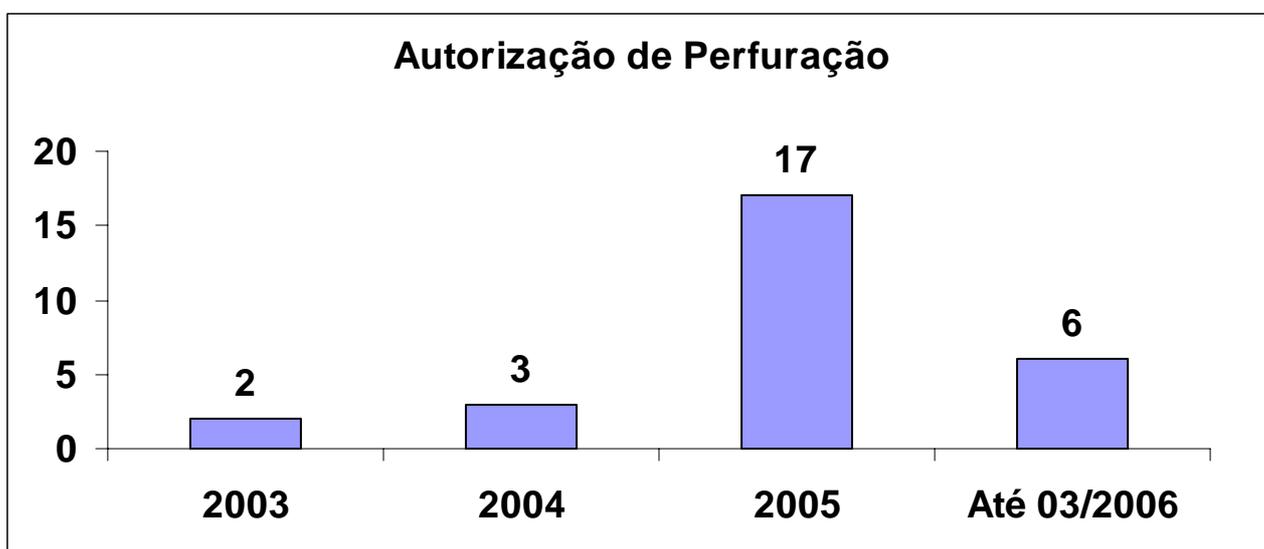
Na **Figura 8.2** observamos a evolução das concessões de outorga para águas subterrâneas expedidas após a publicação da Portaria da SERLA nº 307 de 2002, até março 2006. Até esta data foram emitidas 27 outorgas.



**Figura 8.2 – Outorgas de água subterrânea emitidas pela SERLA de 2003 a março de 2006 (Serla, 2006), disponível junto a Diretoria de Gestão de Recursos Hídricos**

A necessidade de se solicitar previamente a autorização de perfuração ao Órgão responsável pela emissão das outorgas tem como objetivo a verificação prévia de que não haverá interferência com os poços já cadastrados na região em questão.

Apesar de a lei nº 3.239/99, no artigo 64 inciso V considerar infração, sujeita a penalidade, perfurar poços para a extração de água subterrânea ou operá-los sem a devida autorização, a ser concedida pelo poder outorgante, este instrumento não vinha sendo muito exigido. Esta autorização de perfuração foi regulamentada inicialmente pela portaria SERLA nº 308 de 16 de janeiro de 2003 e posteriormente pela portaria SERLA nº 385 de 12 de abril de 2005 que revogou a portaria anterior, em função do descumprimento da lei e da portaria nº 308. Assim sendo podemos observar uma fraca solicitação de autorizações de perfuração ao longo dos anos, ocorrendo uma mudança desta tendência em 2005, conforme podemos observar na **Figura 8.3.**



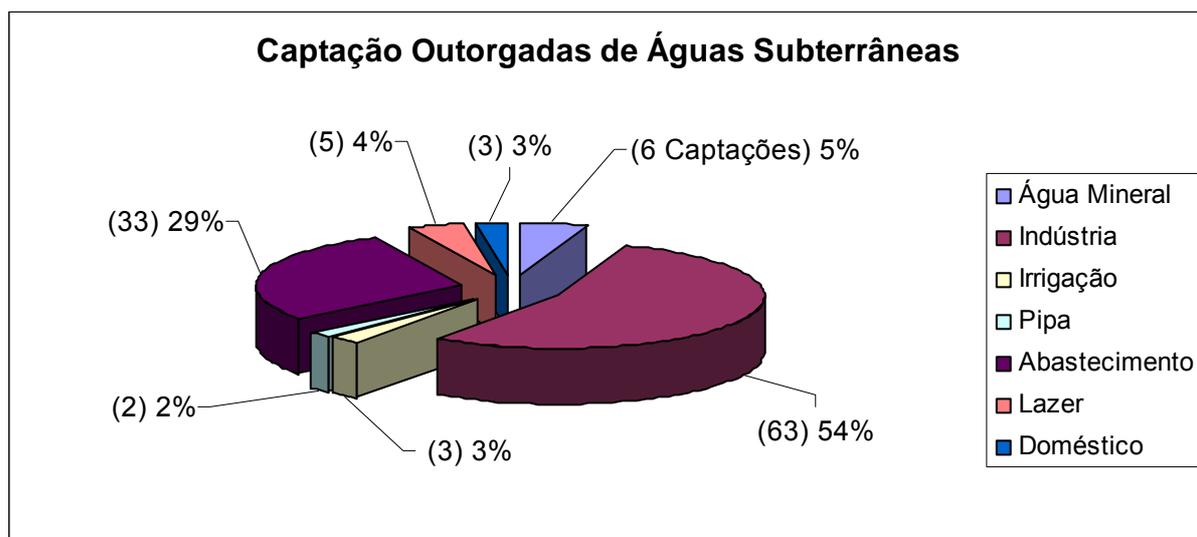
**Figura 8.3 – Autorizações de Perfuração expedidas de 2003 a março 2006, (Serla, 2006), disponível junto a Diretoria de Gestão de Recursos Hídricos**

É importante salientar que podem existir pedidos de outorga que não tenham gerado inicialmente pedidos de autorização de perfuração.

O cadastro da SERLA-RJ (2003) apud Caetano 2005 informa um volume de água solicitado e/ou outorgado de 1.272.292,84 m<sup>3</sup>/dia (superficiais e subterrâneas), dos quais 9.739,41 m<sup>3</sup>/dia (0,77%) referem-se aos sistemas de abastecimento público, considerado na Lei Estadual nº 3.239/99, como uso prioritário. Ainda segundo este cadastro, as explorações cadastradas pela SERLA-RJ (2003) são em número de 274 poços e 8 nascentes, captando um volume de 28.654,21 m<sup>3</sup>/dia (ou 0,33 m<sup>3</sup>/s).

Os usuários da água estão divididos em diversos grupos, dos quais destacam-se: indústria, água mineral, irrigação, “pipa” (os chamados “pipeiros ou aguadeiros”), abastecimento público, lazer e uso doméstico. Estes grupos foram baseados na própria classificação existente no cadastro da SERLA-RJ, 2003 (apud CAETANO, 2005).

Na **Figura 8.4** são mostradas as distribuições de água subterrânea outorgada e em situação de outorga no Estado até 2003.



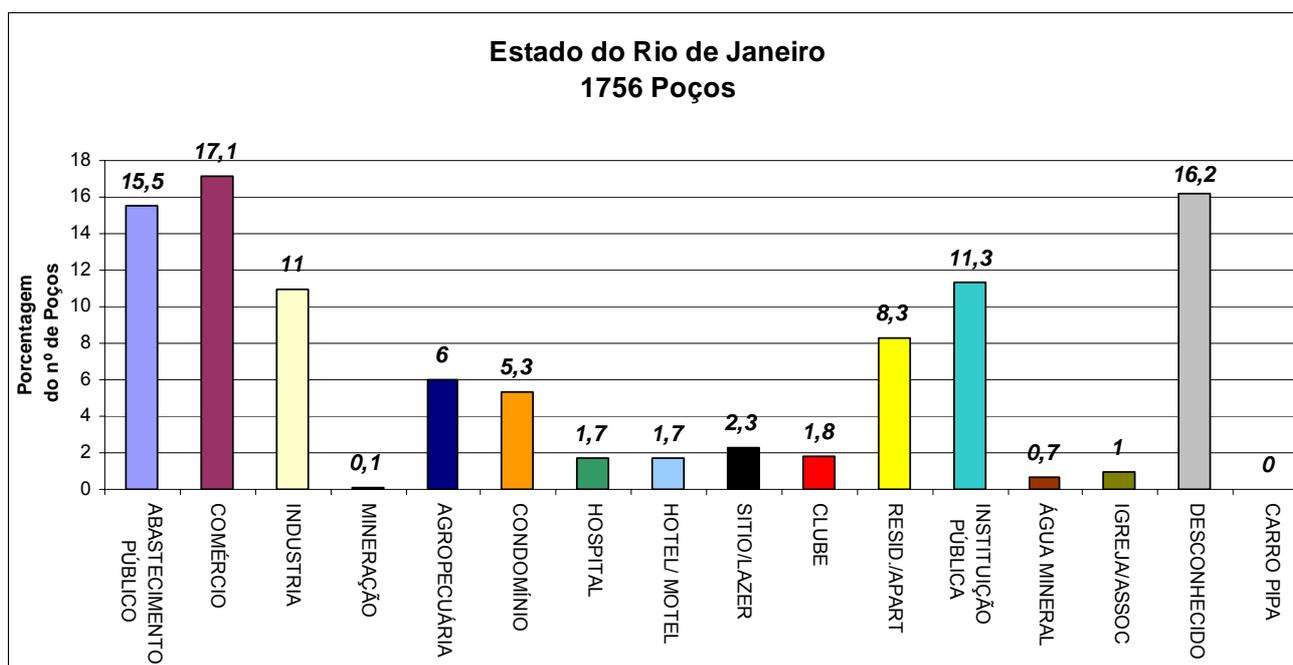
**Figura 8.4** – Gráfico sobre a estimativa de distribuição de captções de água subterrânea outorgadas ou em processo de outorga em função de seu uso. Fonte: SERLA-RJ (2003), (apud Caetano 2005)

O gráfico indica uma maior participação das indústrias (63%) no processo de outorga, seguida das empresas de saneamento básico (29%), lazer (4%) e, por fim, água mineral e irrigação (3% cada uma).

De acordo com o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS (CPRM 2001) (apud CAETANO, 2005), **Figura 8.5**, podemos observar a distribuição dos poços do Estado do Rio de Janeiro por usuários de águas subterrâneas agrupados por atividades existentes neste cadastro. Algumas cidades não possuem poços cadastrados, porém se prevê a existências destes, o que modificaria assim as percentagens e sua distribuição, à medida que se inserirem mais informações neste cadastro. As informações contidas no cadastro de poços tubulares, do SIAGAS, são provenientes das principais empresas de perfuração existentes no Estado do Rio de Janeiro.

Há uma grande quantidade de poços (16,1% ou 283 poços), sem qualquer tipo de informação. Os maiores usuários de água subterrânea são as atividades de comércio (17,1% ou 300 poços) seguido do abastecimento público (15,5% ou 272 poços). As instituições públicas (escolas, institutos e órgãos municipais, estaduais e federais) correspondem a 11,3% (198 po-

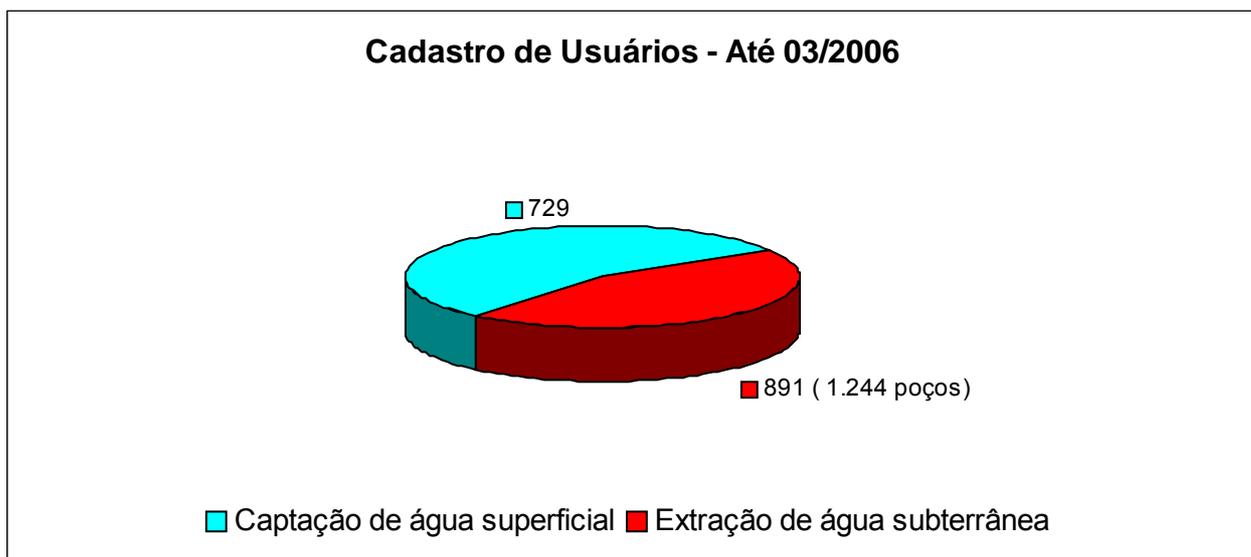
ços), seguidas das indústrias, com 11% (193 poços). As empresas de engarrafamento de água mineral correspondem a 0,7% do total de usuários.



**Figura 8.5 – Distribuição dos poços no Estado do Rio de Janeiro por atividade. Fonte: CPRM, 2001 (apud Caetano, 2005)**

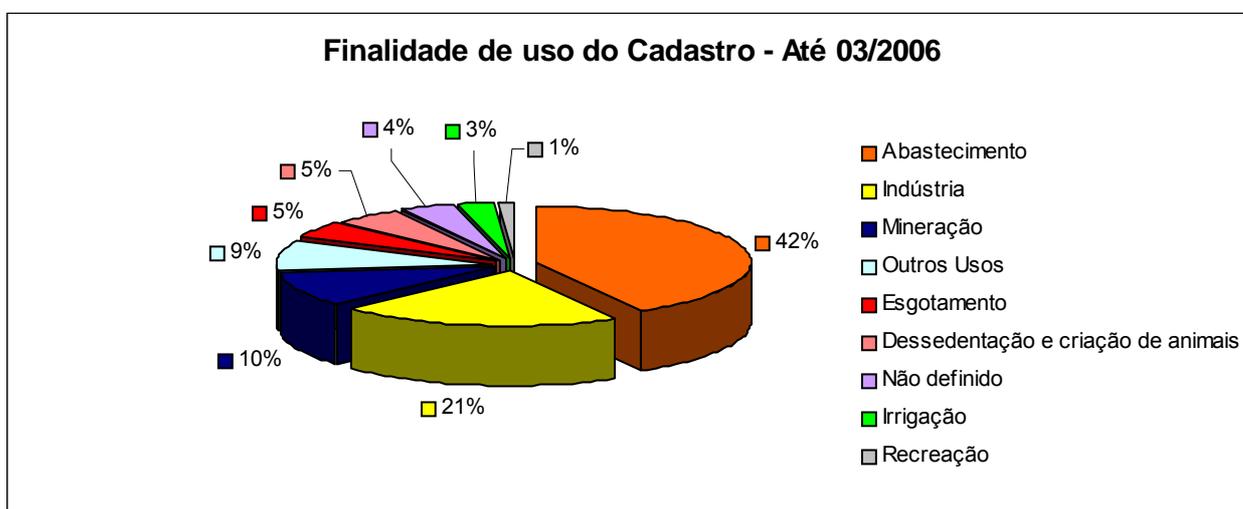
Estas informações demonstravam uma grande inconsistência entre o número de poços cadastrados pela SERLA (274) até 2003 e o número de poços cadastrados pelo SIAGAS – CPRM (1.756 poços) até 2001.

A lei nº 4247 de no art. 6º prevê a organização de um cadastro específico de usuários de recursos hídricos. A portaria SERLA nº 339 de 06 de abril de 2004, estabeleceu os procedimentos técnicos e administrativos para o cadastro dos usuários de recursos hídricos e subterrâneos no âmbito do Estado do Rio de Janeiro. O artigo 4º desta portaria estabelece a convocação dos usuários para a constituição do Cadastro Estadual de Usuários de Água do Estado do Rio de Janeiro – CEUA/SERLA. A partir da publicação desta portaria podemos observar um incremento dos cadastros dos usuários. Pela Figura 8.6, existem até março de 2006, 1620 usuários de água superficial e subterrânea cadastrados. É importante salientar que neste cadastro estão incluídos os usuários em processo de outorga e outros que ainda não formalizaram este processo.



**Figura 8.6 – Gráfico sobre distribuição dos usuários de água superficial e subterrânea cadastrados. Fonte: SERLA-RJ (2006), disponível junto ao Setor de Cadastro**

Destes 1620 usuários cadastrados os 891 relativos a extração subterrânea correspondem a 1.244 poços. Os usuários da água estão divididos em diversos grupos, Na **Figura 8.7** temos a distribuição destes usuários baseados na classificação existente no cadastro da SERLA-RJ, até março de 2006 em função da sua finalidade de uso.



**Figura 8.7 – Distribuição dos usuários cadastrados em função da finalidade de seu uso. Fonte: SERLA-RJ (2006), disponível junto ao Setor de Cadastro**

O gráfico indica uma maior participação da área de abastecimento (42%), seguida das indústrias (21%), seguida das empresas de mineração (9%) e outros usos. Analisando as informações do cadastro em 2003 e 2006, podemos observar uma mudança dos principais usuá-

rios. Em 2003 a indústria representava 63 % dos usuários cadastrados e atualmente representa 21%, sendo ultrapassada pelos usuários com o objetivo de abastecimento. O aumento do número de usuários cadastrados se deve a contribuição das empresas de abastecimento público principalmente a CEDAE, que tem atuado na fiscalização com o objetivo de cadastrar usuários de água, principalmente subterrâneos. A atuação da Cedae nesta fiscalização tem gerado muitas controvérsias, uma vez que este não é o seu papel.

## **8.6. UTILIZAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO RIO GRANDE DO NORTE, SÃO PAULO E CENTRO-OESTE.**

Com o intuito de estabelecer uma base comparativa entre os números de outorgas concedidas no Estado do Rio de Janeiro, conforma descrito no item anterior e outros estados da unidade federativa, foi realizada um levantamento da situação.

Segundo CASTRO et al (2001), as ações que envolvem o licenciamento de obras hidráulicas e a outorga do direito de uso de água, no Estado do Rio Grande do Norte, teve início com o Decreto no 13.283, de 22 de março de 1997, que regulamenta o inciso III do art. 4º da lei no 6.908, de 1º de julho de 1996, que dispõe sobre a Política Estadual dos Recursos Hídricos, e dá outras providências.

A condução do processo de concessão de licenças de obras hidráulicas e outorgas do direito de uso da água iniciado em agosto/1996 tem fornecido resultados que ao serem analisados, indicam as diretrizes para um futuro planejamento da estruturação do setor responsável por estas atividades e estratégias para o aprimoramento dos procedimentos metodológicos.

No período de agosto/1996 a junho/2001, foram concedidas um total de 387 licenças sendo que 86% (332 licenças) foram emitidas para a perfuração de poços tubulares. O número de concessões de outorgas, neste mesmo período, compreendeu um total de 471, sendo que 66%, (312 outorgas), contemplam as concessões relacionadas ao direito de uso das águas subterrâneas.

A implementação destes instrumentos de gestão tem possibilitado, ao órgão gestor possuir as informações sobre os poços tubulares que estão sendo executados, como também o acesso aos estudos hidrogeológicos locais realizados especificamente, quando necessários, para compor os processos de requerimento de licenças e outorgas. Junto a estes fatores existe o desafio deste programa, que é utilizar estes instrumentos de gestão com o intuito de favorecer um trabalho em parceria com os usuários das águas subterrâneas, viabilizando a relação custo/benefício na gestão destes recursos e conseqüentemente minimizar os possíveis impactos ambientais nestes mananciais.

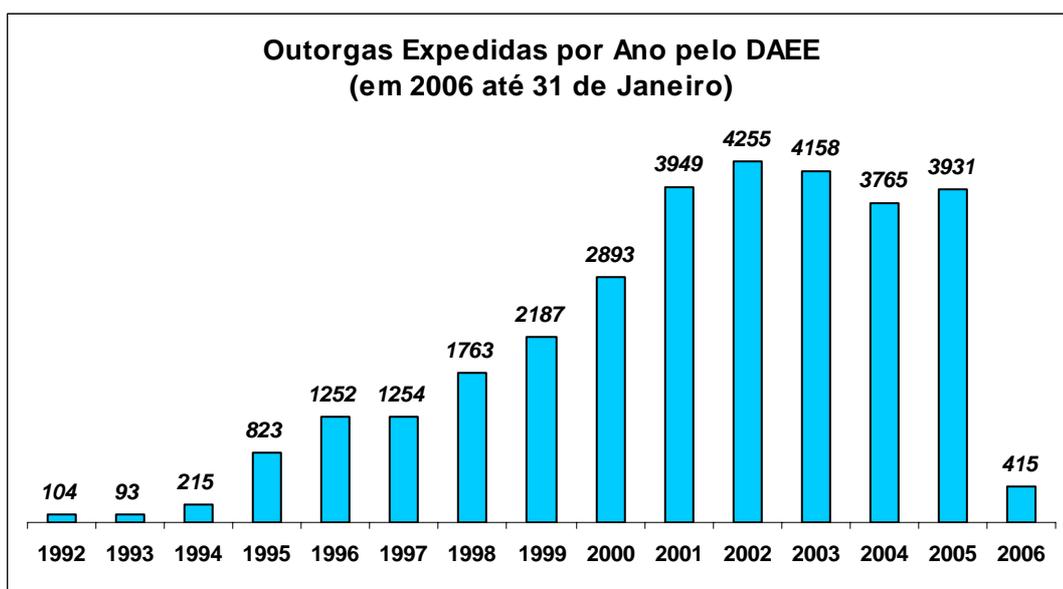
Segundo GAMA (2006) na região Centro-Oeste tem ocorrido uma grande utilização desse recurso principalmente nas áreas de influência dos principais centros urbanos como Brasília, Campo Grande e Dourados. Nessas duas últimas cidades, 60% da água abastecida pelas populações provém de recursos hídricos subterrâneos. De um modo geral o Estado do Mato Grosso do Sul é o estado da região em que são encontradas as melhores condições hidrogeológicas em função de extensas ocorrências dos aquíferos da província hidrogeológica do Paraná, principalmente pelos aquíferos Serra Geral e Bauru. Quanto às demais Unidades Federativas da região Centro-Oeste, embora apresentando sistemas aquíferos de baixo potencial hidrogeológico, em geral os mesmos constituem certa importância no abastecimento de pequenas comunidades. No Mato Grosso, 60% das localidades com sistema de abastecimento são atendidas por água subterrânea enquanto que, em Goiás, este índice alcança 30%. No Distrito Federal, que ocorre uma densidade relativamente grande de poços tubulares, a água subterrânea também é utilizada no abastecimento de pequenas comunidades, assim como no abastecimento suplementar de algumas cidades-satélites.

O Estado de São Paulo é o maior usuário de águas subterrâneas do Brasil, tendo cerca de 65% de seus núcleos urbanos e, aproximadamente, 90% das indústrias abastecidas parcialmente ou totalmente por poços. Não por acaso é o Estado que concentra as maiores preocupações quanto à poluição e à contaminação de aquíferos.

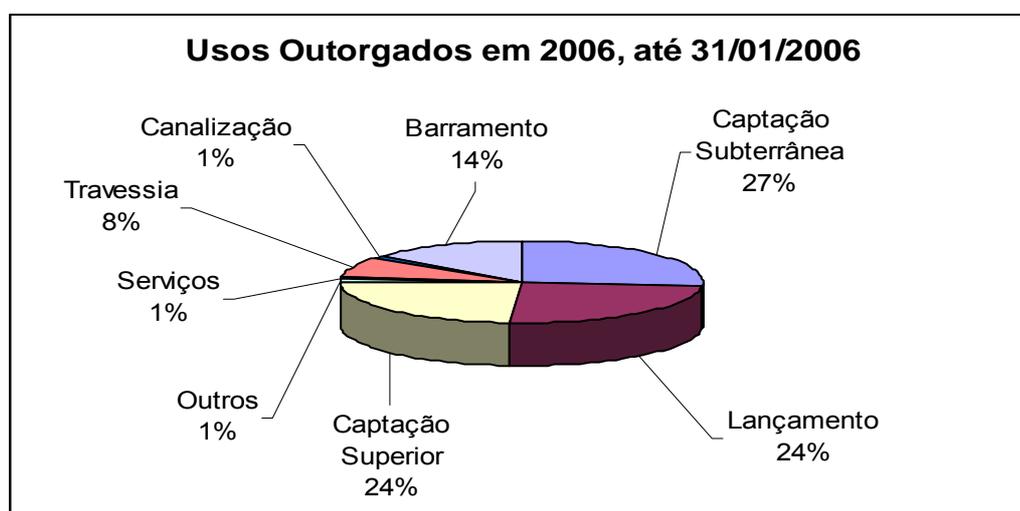
Em São Paulo com o advento da Lei nº 7.663/91, que instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos, coube ao DAEE cadastrar e outorgar o direito de uso dos recursos hídricos, quanto aos aspectos quantitativos, e aplicar as sanções previstas em lei.

A partir da publicação do Decreto Estadual nº 41.258/96, que regulamenta a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, e da Portaria DAEE nº 717/96, o DAEE passou a desempenhar mais decididamente seu papel de agente fiscalizador.

Atualmente mais de 35.400 pontos de uso estão cadastrados no DAEE, correspondentes a captações, lançamentos, obras hidráulicas, serviços, extração de minério e outros usos. A evolução das outorgas expedidas pode ser vista na **Figura 8.8**. Podemos observar na **Figura 8.9**, que em janeiro de 2006 o maior número de outorgas concedidas foi para a captação subterrânea.



**Figura 8.8 – Outorgas Expedidas por ano pelo DAEE** Fonte Disponível em <http://www.dae.sp.gov.br/outorgaefiscalizacao/outorga06.htm> acesso em 01/03/2006



**Figura 8.9 – Usos outorgados pelo DAEE em 2006 até 31/01/2006.** Fonte Disponível em <http://www.dae.sp.gov.br/outorgaefiscalizacao/outorga06.htm> acesso em 01/03/2006

Ao apreciar as informações contidas neste item e no item 8.5, observa-se que o Estado do Rio de Janeiro concede suas outorgas de uso de água em um ritmo muito inferior ao demais estados estudados. Após a publicação da Portaria da SERLA nº 307 de 2002, só foram concedidas 89 outorgas de uso, incluindo água superficial e subterrânea, sendo que destas 27, são para usuários de poços tubulares, (SERLA 2006).

A diferença numérica entre poços outorgados no Estado do Rio de Janeiro e nos demais estados estudados, como São Paulo e Rio Grande do Norte é muito discrepante. No Rio Grande do Norte, no período de agosto/1996 a junho/2001, foram concedidas 312 outorgas relacionadas ao direito de uso das águas subterrâneas. Em São Paulo, local onde existem as

informações mais completas, somente em janeiro foram concedidas 112 outorgas para a utilização deste mesmo tipo de manancial.

O atual cenário do Rio de Janeiro tem motivado usuários de água subterrânea, entidades de classe e demais interessados, a pressionar o órgão competente - a SERLA - a acelerar os trâmites para julgamento dos processos para concessão de outorgas. Além disso, os usuários questionam restrições impostas pelo estado ao uso das águas subterrâneas para consumo e higiene humana, em localidades atendidas pelas concessionárias de saneamento, o que vem inibindo a solicitação legal de autorizações de perfuração e pedidos de outorga.

## **8.7. GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO ÂMBITO INTERNACIONAL**

A preocupação com a gestão dos recursos hídricos sucedeu a difusão da onda ambiental deflagrada após a Conferência Mundial sobre Meio Ambiente de Estocolmo, em 1972. Na época, já se fixava o princípio de que “deve-se confiar a instituições nacionais apropriadas a tarefa de planejar, administrar e controlar a utilização dos recursos ambientais, com vistas a melhorar a qualidade do meio ambiente”.

A Conferência Internacional sobre a Água e o Meio Ambiente de janeiro de 1992, realizada em Dublin, responsável pela formulação das estratégias e programas de ação que seriam apresentados na Rio 92, estabeleceu os seguintes pontos principais:

- a água doce é um recurso finito e vulnerável, essencial para a conservação da vida, a manutenção do desenvolvimento e do meio ambiente;
- o desenvolvimento e a gestão da água devem ser baseados na participação dos usuários, dos planejadores e dos responsáveis políticos em todos os níveis;
- a água tem valor econômico em todos os seus usos competitivos e deve ser reconhecida como um bem econômico.

Na Conferência Mundial sobre Meio Ambiente do Rio de Janeiro, em 1992, foram consolidados os compromissos sobre recursos hídricos que seriam assumidos pelos países participantes. Considerando que a água é necessária em todos os aspectos da vida, a conferência fixou, como objetivo geral, a garantia do suprimento adequado de água de boa qualidade para toda a população do planeta e, ao mesmo tempo, a preservação das funções biológicas, hidrológicas e químicas dos ecossistemas, adaptando as atividades humanas aos limites da capacidade da natureza e combatendo os vetores das doenças transmissíveis pela água.

Neste item é apresentado de uma forma sucinta o funcionamento da gestão de recursos hídricos na Europa, Estados Unidos e América Latina. O objetivo é evidenciar a evolução e os

diferentes estágios atuais de implantação dos sistemas de gestão da água nos vários países, possibilitando uma visão sobre as semelhanças e diferenças entre eles e em relação ao Brasil.

**França:** O modelo brasileiro de gestão de recursos hídricos teve como base o sistema francês. Segundo CAVINI (apud RAMOS, 2005), a experiência francesa na gestão de recursos hídricos data de 1898, sendo aperfeiçoada a partir de então. A França tem como diretriz a ampla participação dos usuários de água e, como um dos instrumentos, a cobrança pelo seu uso, destinando a seus comitês a responsabilidade, tanto pela arrecadação quanto pela destinação dos recursos. A cobrança, implementada através do princípio poluidor-pagador, é utilizada como instrumento de planejamento, pois o valor estipulado para a cobrança é revisto a cada plano quinquenal em função do orçamento para cada bacia hidrográfica. O valor arrecadado com a cobrança pelo uso custeará as obras definidas pelo comitê.

A lei francesa de recursos hídricos atualmente em vigor é a Lei 92-3/1992, que é um aperfeiçoamento da lei de 1964, a qual revolucionou o sistema de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos daquele país CARRERA-FERNANDEZ, 2002 (apud RAMOS, 2005).

Segundo esse autor, na lei de 1992, alguns pontos merecem destaque especial, como: reforço do poder de polícia, até então limitado, adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão com a criação de seis regiões hidrográficas, criação de um fundo de investimento, advindo da contribuição dos usuários, no qual se baseia o atual sistema de cobrança pelo uso da água. Como no Brasil, os comitês de bacia na França são o fórum de debate, devendo refletir a vontade de todos os setores envolvidos no processo de gestão do uso das águas da bacia, incluindo a administração pública e a sociedade civil organizada. A água potável consumida na França provém principalmente de mananciais subterrâneos (60%), ao passo que somente 40% são de águas de superfície. Cada uma das seis 69 grandes bacias hidrográficas francesas possui um comitê de bacia e uma agência de água.

Essas últimas têm a função de motivação dos serviços públicos da bacia para a utilização racional dos recursos hídricos, apoiadas em ajudas financeiras oriundas das taxas de cobrança pagas pelos usuários, principalmente taxas de poluição e de captação de água MACHADO, 2001 (apud RAMOS, 2005)

Segundo BORSOI e TORRES (2006), a coordenação dos diversos serviços afins com os problemas hídricos deu-se com a atribuição de competência aos ministérios, conforme o seguinte esquema: o Ministério da Saúde é responsável por todos os problemas da água relacionados com a saúde pública, especialmente o controle da potabilidade das águas e do funcionamento das instalações de tratamento de efluentes urbanos; o Ministério da Indústria con-

trola a exploração das águas subterrâneas e a utilização de água para geração de energia; o Ministério da Agricultura cuida de irrigação e drenagem e de abastecimento de água e saneamento rural; o Ministério do Equipamento tem a gestão de vias navegáveis e o controle das inundações; o Ministério do Interior co-participa em obras de infra-estrutura de abastecimento de água para cidades; e o Ministério do Meio Ambiente tem poder de polícia sobre as águas superficiais e subterrâneas e a competência para a coordenação interministerial.

Ainda segundo as autoras na estrutura francesa, o Comitê de Bacia é composto por representantes dos usuários (industriais, agricultores, distribuidores de água, associações de pescadores e de turismo etc.), das coletividades locais (eleitos indiretamente) e do Estado (nomeados pelo governo). O Comitê de Bacia elege metade dos membros do conselho de administração da Agência de Bacia. A Agência de Bacia é um órgão público com autonomia financeira que atende a uma ou mais bacias. Suas atividades centram-se na atribuição de empréstimos e subsídios para a realização de obras de interesse comum e na contribuição para a execução de estudos e pesquisas. A agência tem competência para cobrar tarifas dos usuários de água, seja pela quantidade consumida, seja pela poluição provocada.

**Alemanha:** Não existe um modelo nacional de gestão de recursos hídricos na Alemanha. Existem vários órgãos regionais e consórcios municipais também responsáveis pela gestão. Como no Brasil, os Estados na Alemanha são executores das leis federais, podendo ampliá-las para atender a objetivos mais locais. Os municípios alemães são muito fortes e autônomos em relação aos investimentos em obras de saneamento e de proteção da qualidade e quantidade da água.

Historicamente, a Alemanha é considerada o berço da gestão territorial de recursos hídricos por bacias hidrográficas no mundo ocidental, e o principal instrumento político administrativo do sistema de gerenciamento de recursos hídricos são as “associações regionais”, que existem aos milhares MACHADO, 2001 (apud RAMOS, 2005).

Desde o início do século XX, foram criadas várias organizações, denominadas associações regionais, as quais se ocupam da gestão territorial e das águas. Essas organizações surgiram da necessidade da contenção do avanço da poluição dos recursos hídricos do Vale do Ruhr. Na bacia do Ruhr foi criada a primeira associação de águas de que se tem notícia (Associação de Águas da Bacia do Ruhr) CARRERA-FERNANDEZ, 2002 (apud RAMOS 2005).

Essa associação adotava o princípio de que a água é um recurso econômico escasso, devendo seu uso ser racional, e estabelecia que seus associados (indústria, comércio, municipalidades, comunidades) deveriam seguir a política decidida por todos em assembléia. A co-

brança pelo uso de recursos hídricos já era instituída. Os recursos oriundos da cobrança eram utilizados para realizar investimentos para a expansão da oferta de água e melhoria da sua qualidade, como também custear o gerenciamento da bacia hidrográfica. O referido autor cita que foram criadas 12 associações de bacia baseadas na associação original, as quais funcionam como sindicatos cooperativos em que os membros exercem seu direito de voto proporcionalmente às suas contribuições.

**Espanha:** A primeira lei de águas da Espanha data de 1879, MARTÍNRETORTILLO, 1997 (apud RAMOS, 2005); porém a lei espanhola de recursos hídricos, atualmente em vigor, é de 1985, e se ocupa de definir o domínio público hidráulico, sua utilização e proteção. Essa lei ainda estabelece as bases para o planejamento hidrológico, para a administração do uso da água, seu regime financeiro e determina sanções e penalidades para os infratores das normas do setor. A referida lei contempla também a necessidade da compatibilização da gestão pública da água com o ordenamento territorial, com a conservação e proteção do meio ambiente e com a restauração da natureza CARRERA-FERNANDEZ, 2002 (apud RAMOS, 2005). Em relação à organização administrativa, a estrutura do sistema espanhol se baseia no Conselho Nacional da Água, que funciona como um organismo consultor superior, na matéria, bem como nos Organismos de Bacia, previstos para bacias que se estendam por mais de uma Comunidade Autônoma, base da divisão política da Espanha.

A lei de 1985 instituiu o princípio poluidor-pagador e reforçou o papel das entidades gestoras de bacias de atuação no âmbito das Comunidades.

**Estados Unidos:** Em função da divisão desse país, através do rio Mississipi, em uma porção úmida a leste e outra seca a oeste, as características do direito de uso da água são diferenciados. Na porção leste do país a doutrina orientadora foi o direito ribeirinho ou ripário, que privilegia o proprietário de terras ribeirinhas a quem cabe o direito de propriedade (usufruto) sobre os recursos hídricos que passam por seus terrenos. Os tribunais esperam que o usuário não pratique desperdício de água, mas não é exigido que o seu uso seja eficiente.

Na porção oeste, prevalece o direito de apropriação, ou seja, a regra reconhecida pelos tribunais norte americanos e que se tornou lema do direito ao uso dos recursos hídricos da região é “o primeiro a usar é o primeiro a ter direito”. Nessa região, encontram-se também as aplicações práticas da cobrança pelo uso da água CARRERA-FERNANDEZ, 2002 (apud RAMOS, 2005).

De acordo com BORSOI e TORRES (2006), em 1965 foi criado, por força de Lei Federal relativa à gestão do uso da água, o Conselho de Recursos Hídricos, com atuação em escala nacional.

O Conselho de Recursos Hídricos é o órgão federal com a atribuição de preparar balanços periódicos de recursos e necessidades de cada unidade de gestão de recursos hídricos; estudar permanentemente as relações entre os planos e programas regionais ou de bacias e as necessidades das maiores regiões do país; manter estudo sobre a adequação dos meios administrativos e institucionais à coordenação das políticas e programas de água; avaliar a adequação e recomendar políticas e programas; estabelecer, consultando as entidades interessadas, os princípios, normas e processos a serem usados pelas agências federais na preparação de planos globais, regionais ou de bacias e para a avaliação de projetos relativos a recursos hídricos federais; e rever planos apresentados pelas comissões de bacia, a serem instituídos por lei.

As comissões de bacia têm como atribuições coordenar planos federais, interestaduais, estaduais e locais relativos a recursos hídricos; preparar e manter atualizado plano global de desenvolvimento dos recursos hídricos; recomendar prioridades, a longo prazo, para coleta e análise de dados e para projetos de investigação, planejamento e construção; e fazer recomendações às entidades responsáveis pelo planejamento dos recursos hídricos sobre sua prática e manutenção. Para reforçar as medidas antipoluidoras, foi aprovada, em 1972, lei federal relativa ao controle de poluição das águas com novos parâmetros para a recuperação da qualidade das águas e com controles mais rígidos das fontes poluidoras.

Em relação aos países da Europa, no que se refere à participação dos usuários na gestão dos recursos hídricos, nos países que não possuem comitês com papel consultivo ou deliberativo, existem associações setoriais de usuários. A cobrança pelo uso da água na Alemanha, Dinamarca e Inglaterra é feita através de organismos governamentais, enquanto que na França, nos Países-Baixos e na Espanha é implementada por organismos de bacia. Nesses países, o sistema possui um enfoque de gerenciamento fortemente negociado “de baixo para cima”, ou seja, baseado na definição das regras pelo estado, na participação dos usuários, na existência de financiamentos específicos, e de organismos de bacia autônomos. Somente a França e a Espanha possuem agências “financeiras”, BOURLON & BERTHON, 1998 (apud RAMOS, 2005).

No **Quadro 5** é apresentada uma síntese sobre os sistemas de gestão da água na Europa e Estados Unidos da América.

Quadro 5 – Síntese dos Sistemas de Gestão da Água na Europa e Estados Unidos

País	Coordenação Administrativa	Planejamento por Bacias (inclui usos do solo)	Participação dos Usuários (Comitês)	Contribuições (cobrança) por Uso da Água	Agências de Bacia
Alemanha*	Sim	Não	Consultivos (2)	Estado	Não
Áustria*	Sim	Não	Não	Não	Não
Bélgica*	Não	Não	Não	Não	Não
Dinamarca	Sim	Não	Não	Estado (3)	Não
Holanda	Sim	-	Sim	Sim	Não
Espanha	Sim (1)	Sim	Consultivos	Sim	Sim (4)
EUA	Sim (1)	Sim (6)	Sim	Sim	Sim (7)
Finlândia	Sim	Não	Não	Projeto	Não
França	Sim (1)	Sim	Deliberativos	Sim	Sim
Grécia	Sim (1)	Sim	Projeto	Não	Não
Irlanda	Sim (1)	Não	Não	Projeto	Não
Itália	Não	Sim	Não	Projeto	Projeto
Luxemburgo	Sim (1)	Sim	Não	Não	Não
Países-Baixos	Sim	Sim	Deliberativos	Sim	Sim (5)
Portugal	Sim (1)	Sim	Projeto	Projeto	Projeto
Reino Unido	Sim	Sim	Consultivos	Não	Técnicas
Suécia	Sim (1)	Não	Não	Não	Não

Fonte: Bourlon & Berthon, 1998, modificado por Ramos (2005)

(1) Comitês ou Conselhos Nacionais, Conselhos Interministeriais da Água; (2) Sindicatos cooperativos do Vale do Rio Rhur; (3) Limitadas; (4) Confederações Hidrográficas; (5) *Wateringues*; (6) Também pode ser por região; (7) Estaduais; \*Estrutura Federativa.

As cinco últimas colunas do **Quadro 5** correspondem a cinco critérios indicadores do enfoque adotado por cada país com relação às políticas de água. Assim, a coluna 2 (coordenação administrativa) contempla o tipo de coordenação do sistema de recursos hídricos adotado pelo país (interministerial e nacional/regional), e a separação das funções "promoção dos usos" e "regulamentação e controle". A coluna 3 (planejamento por bacias) identifica se o país adota planejamento por bacias hidrográficas, podendo ser em todo o país ou em bacias pilotos, integrando o manejo dos solos. Na coluna 4 (participação dos usuários) é apresentado o tipo de participação dos usuários no âmbito de Comitês de bacias deliberativos (votando orçamentos), ou consultivos (dando um parecer). A coluna 5 (contribuições por uso da água) apresenta a existência de contribuições por usos da água, caracterizadas como contribuições para uso de um bem natural comum em quantidade limitada, arrecadadas por um organismo de bacia ou por um organismo governamental. A coluna 6 (agências de bacia) indica a exis-

tência de Agências de bacia, técnicas e/ou financeiras BOURLON & BERTHON, 1998 (apud RAMOS, 2005).

Segundo o autor, na Bélgica e na Itália, as divisões administrativas e institucionais não facilitam uma gestão integrada dos recursos hídricos. Para estes autores, os países latinos adotaram estruturas de coordenação interministerial ao passo que os países do norte da Europa utilizam-se de administrações centrais e locais para gerenciar os recursos hídricos.

França, Espanha, Países-Baixos e Reino Unido já utilizam as bacias hidrográficas como unidades de planejamento, enquanto que Portugal, Itália e Grécia seguem a mesma tendência

No **Quadro 6**, é possível visualizar uma síntese sobre os sistemas de gestão de recursos hídricos na América Latina. Observa-se que em alguns países, como o México, por exemplo, a bacia hidrográfica é considerada como unidade de planejamento em âmbito nacional. No Chile, Venezuela e Costa Rica, esse princípio aplica-se a bacias pilotos. A integração da gestão dos recursos hídricos com a gestão dos solos nos planos de bacias é ainda muito limitada, o que é alarmante, levando-se em conta a importância dos impactos da erosão sobre os rios BOURLON & BERTHON, 1998 (apud RAMOS, 2005). Tais autores destacam ainda que a cobrança pelo uso quantitativo da água foi implantada em países como Equador e Peru, mas não são bem arrecadados e os seus valores são muito baixos. Somente México e Argentina realizam cobrança, através do governo, pela degradação da qualidade da água, sendo que o México prevê a redistribuição dos valores arrecadados através dos comitês de bacia. A França está preparando cobrança, nos seus departamentos de ultra mar (D.O.M.), e a Venezuela poderá seguir o mesmo caminho após revisão dos textos legais existentes.

**Quadro 6 - Síntese sobre os Sistemas de Gestão da Água na América Latina**

<b>País *estrutura federativa</b>	<b>Coordenação Administrativa</b>	<b>Planificação por Bacias (inclui usos do solo)</b>	<b>Participação dos Usuários (Comitês)</b>	<b>Contribuições (cobrança) por Uso da Água</b>	<b>Agências de Bacia</b>
Argentina *	Não	Projeto	Consultivos	Estado (3)	Não
América Central	Não	Não	Não	Não	Não
Bolívia	Projeto	Pilotos	Não	Projeto	Técnicas
Brasil * (1)	Sim (2)	Sim	Sim	Sim	Sim
Caribe (outros)	Não	Não	Não	Não	Não
Chile	Não	Pilotos	Projeto	Projeto	Técnicas
Colômbia	Não	Sim	Não	Projeto	Não
Costa Rica	Não	Projeto	Consultivos	Projeto	Projeto
D.O.M. (França)	Sim	Sim	Deliberativos	Projeto	Não
El Salvador	Não	Não	Não	Não	Não
Equador	Sim (2)	Pilotos	Consultivos	Projeto	Projeto
Guiana	Não	Não	Não	Não	Não
México	Não	Sim	Consultivos	Estado (4)	Técnicas
Paraguai	Não	Pilotos	Não	Não	Não
Peru	Não	Sim	Não	Não	Técnicas
Uruguai	Não	Não	Não	Não	Não
Suriname	Não	Não	Não	Não	Não
Venezuela	Não	Pilotos	Projeto	Projeto	Técnicas

**Fonte: Bourlon & Berthon (1998), modificado por Ramos (2005)**

(1) Após decretos de aplicação da lei sobre águas nº 8.433, de 08/01/97; (2) Comitês nacionais ou conselhos interministeriais da água; (3) Qualidade em algumas províncias; (4) Qualidade e quantidade em todo o país.

## CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES GERAIS

Este trabalho abordou os recursos hídricos de uma forma abrangente e a água subterrânea de uma forma mais específica. A água subterrânea, como parte integrante dos recursos hídricos disponíveis, é um recurso que deve ser considerado pelos órgãos responsáveis pela Política Nacional de Recursos Hídricos na formulação de suas regras e pelos órgãos gestores na aplicação desta conduta, uma vez que é impossível a individualização da água.

A água, essencial à vida no planeta, é componente cada vez mais freqüente nas agendas de discussão de governos, políticos, pesquisadores, técnicos e sociedade em geral em nível mundial e também no Brasil. O nosso modelo de gestão de recursos hídricos que está em implantação, tem caráter participativo e ainda está sendo reformulado e adaptado em função principalmente das diferenças regionais e das necessidades de cada estado da federação.

A água subterrânea é um recurso disponível para utilização para consumo humano, industrial e agrícola, desde que respeitadas todas as etapas pertinentes a sua exploração desde os estudos preliminares até a obtenção do direito de uso (outorga).

O foco do trabalho foi apresentar uma metodologia que permita o estudo de viabilidade para a implantação de soluções alternativas de abastecimento de água baseadas em mananciais subterrâneos, através da perfuração e construção de poços tubulares profundos e realizar uma análise da base legal existente.

Esta implantação é fundamental em muitos casos para uma diminuição dos custos de uma indústria ou empreendimento e em outros casos é a única fonte ou o complemento das necessidades de abastecimento de água potável para a população em pequenas e médias cidades, ou mesmo para indústrias localizadas fora do alcance das concessionárias.

O presente trabalho pode ser dividido em três grandes grupos:

- Gerenciamento do Projeto
- Operação e Manutenção dos Sistemas Alternativos baseados em Água Subterrânea
- Obtenção do direito de uso para a sua exploração – Outorga

A metodologia se baseia em um Gerenciamento de Projeto, passando por todas as fases desde a idéia inicial ou a motivação principal, estudos de rentabilidade, onde a viabilidade econômica é avaliada. Deve-se observar também os riscos do projeto em relação à segurança e alternativas de abastecimento.

Nesta fase todas as variáveis econômicas e riscos envolvidos do projeto são estudadas e, se aprovadas, as demais etapas de estudos hidrogeológicos e de engenharia serão executadas. Estas etapas possuem uma interface muito grande com as exigências legais, uma vez que para se iniciar qualquer obra de engenharia relacionada com a exploração de recursos hídricos

e ou atividade potencialmente poluidora é necessário à autorização dos órgãos gestores destes recursos e atividades. Os estudos hidrogeológicos e o respeito às normas técnicas para a perfuração e construção dos poços tubulares profundos é fundamental para garantir a performance necessária para o fornecimento de água bem como evitar contaminação dos aquíferos.

Os testes de bombeamento são imprescindíveis e a execução dos testes de aquífero deve ser avaliada em função do conhecimento hidrogeológico da localidade, da possível interferência entre os poços, quando o sistema alternativo de abastecimento baseado em água subterrânea for composto de vários poços ou quando a vazão total mensal for significativa.

A etapa de operação e manutenção dos poços é um dos fatores mais importantes para a sustentabilidade do fornecimento de água, porém, de uma maneira geral, considerado de menor importância pelos utilizadores dos sistemas alternativos e menos fiscalizados mesmo pelos estados que possuem a melhor estrutura de Gerenciamento dos Recursos Hídricos. Nesta etapa foram apresentadas metodologias de controles operacionais e de manutenção, bem como formulários e rotinas de trabalho que tem por objetivo garantir aos utilizadores de águas subterrâneas a adequada operação do sistema de uma forma economicamente viável e sustentável, evitando-se a exaustão dos aquíferos e possibilidades de contaminação.

A motivação da redução de custos, aliada à operação adequada do sistema, baseada em condições técnicas para a exploração sustentável dos aquíferos, transformam e tornam indissolúveis as motivações ambientais e econômicas, uma vez que elas se baseiam nos princípios da eco-eficiência.

Em relação à base legal, houve um avanço significativo nos estados onde as legislações pertinentes foram elaboradas, mas ainda há problemas associados às regulamentações. Persistem os problemas de ausência de efetiva autonomia administrativa e financeira, bem como a pouca consolidação das instituições gestoras dos recursos hídricos. As equipes técnicas ainda são inadequadas para responder às atribuições e responsabilidades dos órgãos gestores, na maioria dos órgãos. Os estados ainda dependem fortemente de recursos financeiros federais e como a segurança e regularidade do aporte de recursos são, em geral, de médias a baixas, temos como consequência prejuízo das atividades de monitoramento e fiscalização, assim como das manutenções de infra-estrutura existentes. A fiscalização dos usos da água não é sistemática, dificultando a atualização e verificação dos cadastros de usuários e o fortalecimento da outorga. A maioria dos estados ainda não dispõe de sistemas de informação implantados.

A implantação de modelos matemáticos é fundamental como ferramentas de apoio a usuários e órgãos gestores. Os simuladores constituem importantes ferramentas de apoio, uma vez que podem prognosticar situações de testes de interferência, e esgotamento dos aquíferos

e situações atuais e futuras das demandas de recursos hídricos subterrâneos. Esta ferramenta pode ser ainda empregada para avaliar contaminações do aquífero e procedimentos para contenção da pluma de contaminantes e realizar previsões de qualidade de água.

No caso de outorgas de águas subterrâneas é necessária a ampliação e melhoria da base de informações. Em vários estados, o maior número de outorgas emitidas é exatamente para exploração de águas subterrâneas. Apesar disso, os procedimentos de análise da outorga e as informações técnicas que a subsidiam são muito limitados. As águas subterrâneas constituem um recurso estratégico que precisa ser melhor gerenciado. Para isso, precisam ser estudadas e avaliadas as capacidades dos aquíferos e os níveis atuais de exploração. Deve-se melhorar o monitoramento dos aquíferos e desenvolver instrumentos de análise adequados para avaliar os pedidos de outorga, de forma a garantir uma exploração sustentável desses mananciais.

O processo de outorga é um processo contínuo que está sempre em evolução. Neste caso, o fluxo regular de recursos é fundamental para que se possa planejar o que fazer e como fazer, inclusive sobre o desenvolvimento de ferramentas de suporte a decisões. A solução para esse problema passa, necessariamente, pelo aspecto financeiro e, sobre isto, a política nacional prega e as experiências internacionais bem sucedidas demonstram que a cobrança pelo uso dos recursos hídricos é uma das principais alavancas para consolidação dos sistemas de gestão. Considerando-se a gestão participativa como um dos fundamentos do sistema nacional de recursos hídricos, mas com dificuldades de ser atingida na prática, somente a melhor capacitação dos órgãos gestores e a participação dos membros dos comitês poderão acelerar este processo.

O órgão estadual do Rio de Janeiro, para recursos hídricos é a SERLA. Atualmente a SERLA possui um corpo técnico mais voltado para águas superficiais e está procurando preparar um corpo técnico mais especializado para atuar na área de águas subterrâneas, enquanto que o DRM já possui um corpo técnico especializado em águas subterrâneas. Estes órgãos poderiam juntos estabelecer a disponibilidade hídrica do estado. No Rio de Janeiro, a análise da outorga é realizada com base no teste de vazão e outras informações fornecidas pelo requerente. Ainda existem dificuldades em quantificar as reservas exploráveis e em conhecer o nível de exploração atual dos aquíferos, devido a não existência de informações sistematizadas sobre os aquíferos.

Observa-se que o estado do Rio de Janeiro concede suas outorgas de uso de água em um ritmo muito inferior ao demais estados estudados.

No atual cenário do Rio de Janeiro tem sido observado conflito entre os usuários de água subterrânea, entidades de classe e demais interessados e a SERLA, sobre as restrições impostas pelo estado ao uso das águas subterrâneas para consumo e higiene humana, em localidades atendidas pelas concessionárias de saneamento. Restrições estas únicas, em todo o Brasil.

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a possibilidade de o órgão responsável pela concessão de outorgas no estado do Rio de Janeiro, preparasse relatórios padronizados para o cadastro dos dados construtivos dos poços, testes de vazão, parâmetros de qualidade de água dos poços, bem como dados básicos de monitoramento do volume extraído, horas de funcionamento, qualidade da água, entre outras informações. Cartilhas educativas com modelos de formulários úteis aos usuários poderiam ser desenvolvidas pela SERLA, para facilitar os seus cadastros.

Outra recomendação é a averiguação da base legal que está motivando o Estado do Rio de Janeiro a impor estas restrições ao uso de água subterrânea, fato incomum em relação aos demais estados da federação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. Agência Nacional de Águas. Outorga de direito de uso. Disponível em:

<<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 18 dez. 2005.

AZEVEDO, L.G.; BALTAR, A.M.; REGO, M.; LA LAINA, R. Sistemas de Suporte à Decisão para a Outorga de Direitos de Uso da Água no Brasil, 1ª edição, Brasília, 2003

BARTH, F.T. “Quadro Sinótico das Leis Estaduais de Gerenciamento de Recursos Hídricos”, Comissão Eletrônica de Gestão/ABRH. Livro 2 do banco Mundial página 3

BORGES, A.F., BARRETO, A.B. Notas de aula de Hidrogeologia, 2001.

BORGHETTI, N.B., BORGHETTI, J. R., ROSA FILHO, E. O Aquífero Guarani. Disponível em: [http://www.abas.org.br/index.php?PG=aguas\\_subterraneas&SPG=aguas\\_subterraneas\\_as](http://www.abas.org.br/index.php?PG=aguas_subterraneas&SPG=aguas_subterraneas_as). Acesso em: 20/09/2005.

BORSOI, ZMF e TORRES, SDA, A Política de Recursos Hídricos no Brasil, disponível em <http://www.bndes.gov.br/conhecimento/revista/rev806.pdf>. Acesso em 06/03/2006

CABRAL, J. Movimento das Águas Subterrâneas. In: FEITOSA, FERNANDO A. CARNEIRO, MANOEL FILHO, JOÃO, Coordenadores, Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, Labhid-UFPE, Fortaleza, 1997.

CARTILHA DA FIESP. Orientações para a utilização de Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo, 2005.

CASTRO, V.L.L.; LIZÁRRAGA, G., CASTRO, M.F.C. Licenciamento de Obras Hidráulicas e Outorgas de Direito de Uso da Água como instrumentos de Gestão dos Mananciais Subterrâneos do Estado do Rio Grande do Norte. Disponível em: [http://www.serhid.rn.gov.br/ftp/2001-10-14\\_GerenciamentoAquiferos.pdf](http://www.serhid.rn.gov.br/ftp/2001-10-14_GerenciamentoAquiferos.pdf). Acesso em: 26/12/2005

CAETANO, L.C. A política da água mineral: uma proposta de integração para o Estado do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. Campinas, SP : [s.n.], 2005.

CAPUCCI, EGMONT et al Poços Tubulares e outras Captações de Águas Subterrâneas: Orientação aos Usuários, Serla, Rio de Janeiro, 2001.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Resolução nº 16 – Diretrizes Gerais para a Outorga. Brasília. 2001.

- COSTA, W.D. & COSTA, W.D. Disponibilidades hídricas subterrâneas na região Nordeste do Brasil. In: CPRM, ano V, no 9. Belo Horizonte, 1997.
- COSTA, F.J.L.da. Estratégias do Gerenciamento de Recursos Hídricos no Brasil: Áreas de Cooperação com o Banco Mundial, 1ª Edição, Brasília, 2003.
- CRUZ, W.B. da. et al. Disponibilidades hídricas subterrâneas no estado de Minas Gerais. In: VII CONGR. BRAS. DE GUAS SUBTERRÂNEAS. Belo Horizonte, 1992.
- ENCICLOPÉDIA BRITÂNICA, Groundwater, disponível em /www.britannica.com/, acesso em 14 de agosto de 2005.
- FEITOSA, E.C. Pesquisa de Água Subterrânea. In: FEITOSA, FERNANDO A.CARNEIRO, MANOEL FILHO, JOÃO, Coordenadores, Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, Labhid-UFPE, Fortaleza, 1997.
- FEITOSA, FERNANDO A.CARNEIRO, MANOEL FILHO, JOÃO, Coordenadores, Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, Labhid-UFPE, Fortaleza, 1997.
- FETTER, C.W. Applied Hydrogeology, Prentice-Hall, New Jersey 1994.
- FOSTER, S. & HIRATA, R. C. A. Determinação de riscos de contaminação das águas subterrâneas, São Paulo. Bol. Inst. Geológico, São Paulo, n. 10, 1993.
- FOSTER, S. & HIRATA, R. C. A. Poluição das águas subterrâneas- um documento executivo da situação da América Latina e Caribe com relação ao abastecimento de água potável. Stephen Foster, Miguel Ventura, Ricardo Hirata. Manual. 1993.
- GAMA, Iza. Perfil Ambiental dos Recursos Hídricos no Centro-Oeste Expandido (2002). Disponível em: [http://www.abep.nepo.unicamp.br/docs/anais/pdf/2002/GT\\_MA\\_PO37\\_Gama\\_texto.pdf](http://www.abep.nepo.unicamp.br/docs/anais/pdf/2002/GT_MA_PO37_Gama_texto.pdf), acesso em 04/01/2006
- GIAMPÁ, C.E. Q. & SOUZA, J.C. de. Potencial aquífero do cristalino no estado de São Paulo. In: IV CONGR. BRAS. DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Brasília, 1986.
- HASSUDA, S. et. al. Influência dos vários tipos de disposição de vizinhança na qualidade da água subterrânea. In: Encontro Nacional de Estudos sobre o Meio Ambiente, 3, Londrina, 1991.
- HASSUDA, S.; REBOUÇAS, A. C.; CUNHA, R. C. A. Aspectos qualitativos da infiltração da vizinhança de cano no aquífero Bauru, Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 11, 1991.

HEATH, R.C. Water Supply paper. Disponível em <http://pubs.er.usgs.gov/pubs/wsp/wsp2220>. Acesso em: 04/02/06

HIRATA, R. C. A. Águas Subterrâneas: uma introdução à gestão de qualidade e quantidade. Apostila de curso. São Paulo: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. 1991.

HIRATA, R. C. A. Os recursos hídricos subterrâneos e as novas exigências ambientais. Apostila de Curso pré-Congresso. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo: SBG. 1992.

HOPE, R. C. , The Legendary Lore of the Holy Wells of England, Elliot Stock, Londres, 1893.

JOHNSON DIVISION. Água Subterrânea e Poços Tubulares. Cetesb, São Paulo, 1972.

JORBA, A.F., ROCHA, G.A. Manual de operação e manutenção de poços. Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2ª edição, 1982.

LEAL, A.S. Perspectivas de exploração das bacias subterrâneas do Nordeste. II Semana de Energia Nuclear, UFPE. Recife, 1974.

LEAL, A.S.; AÇHÃO, S.M.; LIMA, J.E.S. Mapa Hidrogeológico do Estado de Minas Gerais, Escala 1:1.000.000. 1º ENCONTRO DE PERFURADORES DE POÇOS. ABAS. Belo Horizonte, 1980.

LEAL, A.S. Água subterrânea nos terrenos cristalinos do Nordeste. CPRM/DEPEM. Inédito, 1983.

LEAL, A. S. et al. Projeto Mapas Hidrogeológicos – Folha Rio Pardo de Minas, MG. CPRM. Brasília, 1992.

LEAL, A.S. & LIMA, J.E.S. Mapa Hidrogeológico da Folha Janaúba, MG. Brasília, 1992.

LIMA, J.E.S. Projeto Mapas Hidrogeológicos. Folha Monte Azul, MG.CPRM. Brasília, 1992.

LOPES, M.F.C. Água subterrânea no estado de São Paulo – Síntese das condições de In: IV CONGR. BRAS. DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Brasília, 1986.

MANOEL FILHO, J. Água Subterrânea Histórico e Importância. In: FEITOSA, FERNANDO A.CARNEIRO, MANOEL FILHO, JOÃO, Coordenadores, Hidrogeologia: Conceitos e Apli-

cações, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, Labhid-UFPE, Fortaleza, 1997.

MARIANO, I.B., SILVEIRA, E.L. Projeto, perfuração e operação de poços profundos., Novo Horizonte, SP, 1994.

MENTE, A. et al. A solução do problema da seca do Nordeste – Subsídios e proposta para um programa racional de perfuração de poços tubulares para o abastecimento de cidades de pequeno, médio e grande porte na região Nordeste. Corner. Recife, 1994.

MENTE, A. Avaliação de disponibilidades hidrogeológicas do Brasil. Relatório final de consultoria. SRH/IICA – Fortalecimento Institucional. Brasília, 1996.

MOURÃO, BENEDICTUS MÁRIO, A Água Mineral e as Termas, Abinam Editora, São Paulo, 1997.

PORTO, R.L.L. e AZEVEDO, L.G.T. “Sistemas de Suporte a Decisões Aplicados a Problemas de Recursos Hídricos”. In: Porto, R.L.L. (Ed.). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 43-95, 1997.

RAMOS, P.R. Modelo para outorga de uso da água utilizando a metodologia multicritério de apoio à decisão: estudo de caso da Bacia Hidrográfica do rio Cubatão do Sul / Paulo Roberto Ramos; orientador: Carlos Loch. Florianópolis, 2005.

REBOUÇAS, A. C., Águas Subterrâneas, Escrituras Editora, São Paulo, 1999.

REBOUÇAS, A.C. & GASPARY, J. As águas subterrâneas do Nordeste: estimativas preliminares. 2a. ed., SUDENE. Série Hidrogeologia, no 6. Recife, 1971.

REBOUÇAS, A.R. Recursos hídricos subterrâneos da bacia do Paraná. Análise de pré- viabilidade. Tese de livre docência. Inst. Geol. USP, 1976.

REBOUÇAS, A.C. Sistema aquífero Botucatu no Brasil. In: VIII CONGR. BRAS. DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Recife, 1994.

REBOUÇAS, A.C. et al. Diagnóstico do setor hidrogeológico. ABAS/PADCT, 1996.

RIBEIRO, F.L.B. Introdução ao Método dos Elementos Finitos. COPPE/UFRJ, 2004.

SERLA - FUNDAÇÃO SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DE RIOS E LAGOAS.

Entrevistas e acesso a diversos documentos, 2006. Disponível em: < <http://www.serla.rj.gov.br> >.

SILVA, SOLANGE TELES, Aspectos Jurídicos das Águas Subterrâneas, Revista de Direitos Difusos, Rio de Janeiro, nov - dez 2002

SILVA, A.B. da et al. Estudo hidrogeológico do carste da Jaíba, norte de Minas Gerais. In: II CONGR. BRAS. DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Salvador, 1982.

SOLLEY, W. B., PIERCE, R.R. PERLMAN, H.A., Estimated Use of Water in the United State in 1990, U.S., Geologic Survey, circular 1081, 1993

TOLMAN, C.F., Ground Water, McGraw Hill, New York, 1937.

VILLELA, S.M., MATTOS, A., Hidrologia Aplicada, McGraw Hill do Brasil, São Paulo, 1975.

VILLIERS, MARQ, Água, Ediouro, Rio de Janeiro, 2002.

WALTON, W., Groundwater Resource Evaluation, McGraw Hill, New York, 1970.