

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE**

Título:

**O PAPEL DOS POÇOS VERTICAIS E HORIZONTAIS
NA CONTENÇÃO HIDRÁULICA DE POLUENTES
NOS AQUÍFEROS LIVRES**

**GILLIANO VIEIRA LIMA BORGES
ORIENTANDO**

**SARMA KAMESWARA VENKATA SEEMANAPALLI
ORIENTADOR**

MARÇO / 1999

GILLIANO VIEIRA LIMA BORGES

**O PAPEL DOS POÇOS VERTICAIS E HORIZONTAIS NA CONTENÇÃO
HIDRÁULICA DE POLUENTES NOS AQUÍFEROS LIVRES**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento as exigências para obtenção do grau de mestre em Ciências.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

DR. SARMA KAMESWARA VENKATA SEEMANAPALLI - Ph.D.

ORIENTADOR

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA

MARÇO DE 1999



B732p Borges, Gilliano Vieira Lima.
O papel dos poços verticais e horizontais na contenção hidráulica de poluentes nos aquíferos livres / Gilliano Vieira Lima Borges. - Campina Grande, 1999.
187 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1999.
"Orientação : Prof. Dr. Seemanapalli Venkata Kameswara Sarma".
Referências.

1. Poços. 2. Poços Verticais e Horizontais. 3. Aquíferos Livres - Poluentes. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Sarma, Seemanapalli Venkata Kameswara. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 628.112(043)

Dissertação de Mestrado aprovada em 12/03/1999

**O Papel dos Poços Verticais e Horizontais na Contenção Hidráulica de Poluentes nos
Aqüíferos Livres**

Gilliano Vieira Lima Borges

AUTOR

COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA:



Professor Dr. Seemanapalli Venkata Kameswara Sarma - Ph.D.

ORIENTADOR



Professor Dr. Hans Dieter Max Schuster – Dr. Ing

EXAMINADOR



Professor Dr. Tunkur Rajarao Gopinath – Ph.D.

EXAMINADOR

Campina Grande, Paraíba

Março de 1999

AGRADECIMENTOS

O homem estar em constante aprendizado, no decorrer de nossas vidas uns tem mais oportunidades do que outros de ampliar os seus conhecimentos. Eu, Gilliano Vieira Lima Borges, em particular, do pouco que sei, muito foi adquirido nestes dois anos últimos anos. Tive a oportunidade de ter como orientador o Dr. Seemanapalli Venkata Kameswara Sarma, Ph.D, Professor da Área de Engenharia de Recursos Hídricos, que como orientador exerceu papel fundamental nesta pesquisa, desenvolvendo e aperfeiçoando programas e exercendo uma ativa participação na interpretação dos resultados obtidos. Ao Dr. Sarma e ao colega Alex Neyves Mariane Alves, pelas idéias e conceitos próprios que deram origem aos programas computacionais desenvolvidos e utilizados nesta pesquisa. Como amigo do Dr. Seemanapalli Venkata Kameswara Sarma, Ph.D, aprendi muito através de seus sábios ensinamentos e a ele enfatizo os meus agradecimentos e o desejo de uma vida ainda mais próspera e feliz.

Ao Departamento de Engenharia Civil da UFPB, Campus II - Campina Grande e, a Coordenação da Área de Engenharia de Recursos Hídricos, representada pela Coordenadora Prof^a Gledsneli Maria de Lima Lins, uma das pessoas mais humanas que conheço, pela paciência, pelo apoio concedido e estímulo dado para o ingresso e conclusão do curso de mestrado.

Aos Professores, Colegas do Curso de Mestrado, e amigos, pela atenção, incentivo, e troca de conhecimentos necessários para a conclusão deste trabalho.

Ao amigo Klebber Teodomiro Martins Formiga pela ajuda e incentivo que foram fundamentais na conclusão deste trabalho.

Ao amigo Marcos Tibério Siqueira pelo apoio e incentivo prestados no termino deste trabalho.

Ao colega Paulo Henrique Braga, pela ajuda prestada e troca de conhecimentos, muitos dos quais de certa forma empregados nesta pesquisa.

A CDRM pelos trabalhos e publicações postos a nossa disposição.

Aos técnicos e funcionários do Laboratório de Hidráulica do C.C.T.- Campus II, pela capacidade demonstrada e o valioso espírito comunitário.

Ao CNPq e ao CAPES , pelo apoio financeiro recebido.

A meu pai, Cláudio Vieira Lima, a quem tenho a agradecer por tudo o que fez pela minha vida, e sem o qual eu nada seria.

A minha amada mãe, Josefa Vieira Lima (Leda) e inesquecível irmã Giuliana Vieira Lima Borges, pelo amor e carinho que sempre mim dedicaram e dedicam.

A minha esposa Juliana Feitoza Vieira Lima Borges, pelo apoio, compreensão e afeto.

E sobretudo, agradeço a DEUS, pela determinação a mim permitida, para a conclusão deste trabalho.

DEDICATÓRIA

A **DEUS** por ter me permitido a **VIDA**;

A minha **MÃE** por tê-la me dado;

A meu **PAI** por ter ensinado-me a vivê-la;

E a minha **ESPOSA** por torná-la feliz.

SUMÁRIO

	Página
AGRADECIMENTOS	II
DEDICATÓRIA	IV
SUMÁRIO	V
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XXIII
LISTA DE SÍBOLOS	XXVII
RESUMO	XXXI
ABSTRACT	XXXIII

CAPÍTULO I – Introdução

1.0.1 - Introdução	1
--------------------	---

CAPÍTULO II – Fundamentos de Água Subterrânea

2.1 - Distribuição da Água no Solo	4
2.2 - Movimento da Água Subterrânea em Escala de Tempo	5
2.3 - Aquíferos	6
2.4 - Definições dos Parâmetros Hidráulicos	7
2.5 - Fundamentos do Fluxo Subterrâneo Horizontal	9

4.3.2 - Perfil da Tecnologia de Poços Horizontais	39
4.3.3 - Cálculo do rebaixamento em um Poço Horizontal	42
4.4 - Uso de Poços Verticais	45
4.4.1 - Perfil da Tecnologia de Poços Verticais	45
4.4.2 - Cálculo do Rebaixamento em um Poço Vertical	47

CAPÍTULO V – Área de Estudo

5.1 - Localização da Bacia do Rio Piranhas	50
5.2 - Formação Geológica da Bacia do Rio Piranhas	51
5.3 - Aspectos Hidrológicos e Climáticos da Bacia do Rio Piranhas	52
5.4 - Potencial Hidrogeológico da Bacia do Rio Piranhas	52
5.5 - Aluvião Estudado	53

CAPÍTULO VI – Dados da Pesquisa

6.1 - Origem dos Dados	54
6.2 - Características dos Poços de Abastecimento Instalados	58
6.3 - Teste de Aquífero e Parâmetros Hidrodinâmicos da Área de Estudo	59
6.4 - Qualidade das Águas	62
6.4.1 - Agressividade e Incrustabilidade	62
6.4.2 - Aeração Diferencial	63
6.4.3 - Conclusões do Relatório Final da CDRM	64

CAPÍTULO VII – Modelo Matemático e Programas Utilizados

7.1	- Introdução	65
7.2	- Programas de Simulação dos Poços Verticais e Horizontais	66
7.2.1	- Representação do Domínio do Fluxo Subterrâneo no Aquífero Retangular Livre Estudado	66
7.2.2	- Discretização do Modelo	68
7.2.3	- Discretização para Um Poço Vertical	69
7.2.4	- Discretização para Dois Poços Verticais	69
7.2.5	- Discretização para Três Poços Verticais	70
7.2.6	- Discretização para Um Poço Horizontal	71
7.2.7	- Discretização para Dois Poços Horizontais	72
7.3	- Dados de Entrada e Calibração	72
7.4	- Programa ISONOVOS	74

CAPÍTULO VIII – Resultados

8.1	- Uso de um Único Poço Vertical como Medida de Contenção Hidráulica dos Contaminantes	75
8.2	- Uso de dois Poços Verticais como Medida de Contenção Hidráulica dos Contaminantes	83
8.3	- Uso de três Poços Verticais como Medida de Contenção Hidráulica dos Contaminantes	92
8.4	- Uso de um Único Poço Horizontal como Medida de Contenção Hidráulica dos Contaminantes	100

8.5	- Uso de dois Poços Horizontais como Medida de Contenção Hidráulica dos Contaminantes	108
-----	---	-----

CAPÍTULO IX – Discussão dos Resultados e Conclusões

-	Discussão dos Resultados e Conclusões	124
---	---------------------------------------	-----

CAPÍTULO X – Recomendações

-	Recomendações	131
---	---------------	-----

CAPÍTULO XI – Bibliografia

-	Bibliografia	133
---	--------------	-----

ANEXOS

-	Anexo I	139
-	Anexo II	147
-	Anexo III	158
-	Anexo IV	177
-	Anexo V	182

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 2.1	- Representação da distribuição da água no solo - (Fonte: Morese, 1998)	5
Figura 2.2	- Representação do movimento da água no solo - (Fonte: Morese, 1998)	5
Figura 2.3	- Tipos de aquíferos produtivos - (Fonte: Morese, 1998)	6
Figura 2.4	- Representação da condutividade hidráulica nos meios homogêneos, heterogêneos, isotropico e anisotropico	8
Figura 2.5	- Representação da definição do coeficiente de armazenamento para um aquífero não-confinado - (Fonte: Bear e Verruijt, 1990)	11
Figura 2.6	- Representação da aproximação de Dupuit - (Fonte: Bear, 1990)	12
Figura 2.7	- Poço captando um aquífero confinado no centro de uma ilha circular. (Fonte: Adaptado de Custodio & Llamas, 1983)	12
Figura 2.8	- Poço no centro de uma ilha circular em um aquífero livre ilustrando as condições para o regime permanente. (Fonte: Adaptado de Custodio & Llamas, 1983)	14
Figura 2.9	- (A) Aquífero limitado com a presença de uma fronteira hidráulica impermeável. (B) Poço imagem simulando o efeito da fronteira impermeável. (Fonte: Filho et al., 1997)	16
Figura 2.10	- Poço bombeando, poço imagem e poço de observação (piezômetro) próximo a uma fronteira hidráulica impermeável - (Fonte: Filho et al., 1997)	17
Figura 3.1	- Distribuição da concentração bidimensional devido à uma injeção momentânea na posição $(x=0$ e $y=0)$ e $t > 0$ (Fonte: Adaptado de Kinzelbach, 1986)	19
Figura 3.2	- Distribuição da concentração bidimensional devido à uma injeção permanente na posição $(x=0$ e $y=0)$, iniciada em $t = 0$ (Fonte: Adaptado de Kinzelbach, 1986)	20
Figura 3.3	- Poluição de origem industrial (Fonte: Silva, 1987)	21
Figura 3.4	- Poluição de origem doméstica (Fonte: Silva, 1987)	21
Figura 3.5	- Poluição de origem agrícola (Fonte: Silva, 1987)	22
Figura 3.6	- Poluição originada na mineração (Fonte: Silva, 1987)	23
Figura 3.7	- Poluição causada pelo efeito da percolação da água da chuva nos aterros sanitários ou lixões . (Fonte: Silva, 1987)	27

Figura 3.8	- Efeito da densidade na migração dos contaminantes em um campo uniforme de fluxo. (a) densidade aproximadamente maior do que a da água; (b) e (c) densidade maior do que a da água. (Fonte: Freeze and Cherry, 1979)	30
Figura 3.9	- Representação do transporte devido a advecção. (Fonte: Adaptado Kinzelbach, 1986)	33
Figura 3.10a	- Representação do transporte devido à advecção e à dispersão. (Fonte: Adaptado Kinzelbach, 1986)	34
Figura 3.10b	- Espalhamento de um traçador a partir de um ponto de injeção. (Fonte: Filho et al, 1997)	34
Figura 4.1	- Representação de um aquífero infinitamente espesso, com fluxo para o ponto (x_p, y_p, z_p) através de uma estrutura esférica de raio r_D e espessura $-dr$	37
Figura 4.2	- Figura 4.2 – Instalação de um poço horizontal (Fonte: www.horizontal.com)	39
Figura 4.3	- Representação da eficácia de um poço horizontal	40
Figura 4.4	- Representativa da independência do poço horizontal (Fonte: www.horizontalwell.com)	40
Figura 4.5	- Poço horizontal funcionando no meio de uma floresta (Fonte: www.horizontal.com)	41
Figura 4.6	- Visão em planta e em seção do poço horizontal	42
Figura 4.7	- Teoria das imagens a ser usada na obtenção de um aquífero infinitamente espesso	44
Figura 4.8	- Representação da eficácia de uma bateria de poços verticais	45
Figura 4.9	- Visão em planta e em seção do poço vertical	48
Figura 5.1	- Mapa das bacias hidrográficas do estado da Paraíba	50
Figura 5.2	- Localização do município de São Bento	53
Figura 6.1	- Localização do aluvial do rio Piranhas no município de São Bento	54
Figura 6.2	- Sondagens complementares e localização dos poços II e III na área 4. (Fonte: CDRM “São Bento, Abastecimento de Água – Captações Concluídas – Relatório Final”, 1986)	56
Figura 7.1	- Conceito de zona de captura	67
Figura 7.2	- Perturbação nas linhas de fluxo decorrente da presença de um poço injetor	68
Figura 7.3	- Refração das linhas de fluxo em uma fronteira geológica	68

Figura 7.4	- Refração das linhas de fluxo em um sistema de camadas com permeabilidades K_1 e K_2	69
Figura 7.5	- Esboço do limites bidimensionais do sistema de fluxo regional subterrâneo	70
Figura 7.6	- Modelo matemático para o sistema de fluxo mostrado na Figura 7.1	71
Figura 7.7	- Grade de diferenças finitas adotada para os programas de poços verticais e horizontais	72
Figura 7.8	- Representação das linhas equipotenciais para um domínio retangular	73
Figura 7.9	- Representação das linhas de fluxo para um domínio retangular	74
Figura 7.10	- Representação da rede de fluxo para um domínio retangular	74
Figura 7.11	- Cenário para o caso de um sistema de remediação composto por único poço vertical parcialmente penetrante sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes	77
Figura 7.12	- Cenário para o caso de um sistema de remediação composto por dois poços verticais parcialmente penetrantes sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes	77
Figura 7.13	- Cenário para o caso de um sistema de remediação composto por três poços verticais parcialmente penetrantes sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes	78
Figura 7.14	- Cenário para o caso de um sistema de remediação composto por único poço horizontal sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes	78
Figura 7.15	- Cenário para o caso de um sistema de remediação composto dois poços horizontais, sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes	79
Figura 7.16	- Validação do modelo tendo como referência o teste de produção da Tabela 6.4	80
Figura 7.17	- Representação esquemática das linhas de fluxo (tubos de fluxo) e identificação das ferramentas conceituais usadas para caracterizar a zona de captura	81
Figura 8.1a	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $25 \text{ m}^3/\text{h}$	84
Figura 8.1b	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $30 \text{ m}^3/\text{h}$	84

Figura 8.1c	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $35 \text{ m}^3/\text{h}$	85
Figura 8.1d	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $40 \text{ m}^3/\text{h}$	85
Figura 8.1e	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $25 \text{ m}^3/\text{h}$	86
Figura 8.1f	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $30 \text{ m}^3/\text{h}$	86
Figura 8.1g	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $35 \text{ m}^3/\text{h}$	86
Figura 8.1h	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $40 \text{ m}^3/\text{h}$	87
Figura 8.1i	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $25 \text{ m}^3/\text{h}$	87
Figura 8.1j	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $30 \text{ m}^3/\text{h}$	88
Figura 8.1L	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $35 \text{ m}^3/\text{h}$	88
Figura 8.1m	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $40 \text{ m}^3/\text{h}$	88
Figura 8.1n	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de 0,2j	89
Figura 8.1o	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de 0,3j	89
Figura 8.1p	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de 0,4j	90

Figura 8.1q	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de 0,5j	90
Figura 8.2a	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de 25 m ³ /h	92
Figura 8.2b	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de 30 m ³ /h	93
Figura 8.2c	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de 35 m ³ /h	93
Figura 8.2d	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de 40 m ³ /h	93
Figura 8.2e	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 25 m ³ /h	94
Figura 8.2f	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 30 m ³ /h	94
Figura 8.2g	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 35 m ³ /h	95
Figura 8.2h	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 40 m ³ /h	95
Figura 8.2i	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 25 m ³ /h	96
Figura 8.2j	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 30 m ³ /h	96
Figura 8.2L	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 35 m ³ /h	96
Figura 8.2m	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 40 m ³ /h	97

Figura 8.2n	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de 0,2j	97
Figura 8.2o	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de 0,3j	98
Figura 8.2p	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de 0,4j	98
Figura 8.2q	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de 0,5j	98
Figura 8.3a	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de 25 m ³ /h	101
Figura 8.3b	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de 30 m ³ /h	101
Figura 8.3c	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de 35 m ³ /h	101
Figura 8.3d	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de 40 m ³ /h	102
Figura 8.3e	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 25 m ³ /h	102
Figura 8.3f	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 30 m ³ /h	103
Figura 8.3g	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 35 m ³ /h	103
Figura 8.3h	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 40 m ³ /h	103
Figura 8.3i	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão 25 m ³ /h	104

Figura 8.3j	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $30 \text{ m}^3/\text{h}$	104
Figura 8.3L	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $35 \text{ m}^3/\text{h}$	105
Figura 8.3m	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $40 \text{ m}^3/\text{h}$	105
Figura 8.3n	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,2j$	106
Figura 8.3o	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,3j$	106
Figura 8.3p	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,4j$	106
Figura 8.3q	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,5j$	107
Figura 8.4a	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $25 \text{ m}^3/\text{h}$	109
Figura 8.4b	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $30 \text{ m}^3/\text{h}$	109
Figura 8.4c	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $35 \text{ m}^3/\text{h}$	110
Figura 8.4d	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $40 \text{ m}^3/\text{h}$	110
Figura 8.4e	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $25 \text{ m}^3/\text{h}$	111
Figura 8.4f	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $30 \text{ m}^3/\text{h}$	111

Figura 8.4g	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $35 \text{ m}^3/\text{h}$	111
Figura 8.4h	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $40 \text{ m}^3/\text{h}$	112
Figura 8.4i	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $25 \text{ m}^3/\text{h}$	112
Figura 8.4j	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $30 \text{ m}^3/\text{h}$	113
Figura 8.4L	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $35 \text{ m}^3/\text{h}$	113
Figura 8.4m	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $40 \text{ m}^3/\text{h}$	113
Figura 8.4n	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,2j$	114
Figura 8.4o	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,3j$	114
Figura 8.4p	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,4j$	115
Figura 8.4q	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,5j$	115
Figura 8.5a	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $25 \text{ m}^3/\text{h}$	117
Figura 8.5b	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $30 \text{ m}^3/\text{h}$	118
Figura 8.5c	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $35 \text{ m}^3/\text{h}$	118

Figura 8.5d	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_c vs. a profundidade, P_p – vazão de $40 \text{ m}^3/\text{h}$	118
Figura 8.5e	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $25 \text{ m}^3/\text{h}$	119
Figura 8.5f	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $30 \text{ m}^3/\text{h}$	119
Figura 8.5g	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $35 \text{ m}^3/\text{h}$	120
Figura 8.5h	- Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $40 \text{ m}^3/\text{h}$	120
Figura 8.5i	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $25 \text{ m}^3/\text{h}$	121
Figura 8.5j	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $30 \text{ m}^3/\text{h}$	121
Figura 8.5L	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $35 \text{ m}^3/\text{h}$	121
Figura 8.5m	- Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p – vazão $40 \text{ m}^3/\text{h}$	122
Figura 8.5n	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,2j$	122
Figura 8.5o	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,3j$	123
Figura 8.5p	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,4j$	123
Figura 8.5q	- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_c vs. a vazão, Q – para a profundidade de $0,5j$	123

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 3.1	- Faixas de variação dos teores de substâncias contaminantes dissolvidas no chorume de aterros sanitários (Conama, 1999)	28
Tabela 3.2	- Solubilidade dos compostos orgânicos comumente encontrados em locais de vazamento de combustíveis (Depois de Verschueren, 1983) ^a	31
Tabela 3.3	- Densidade dos compostos orgânicos encontrados na Tabela 2 (Depois de Verschueren, 1983)	32
Tabela 5.1	- Resultado da pesquisa feita pela IARHA, em São Bento, PB	53
Tabela 6.1	- Sondagens para reconhecimento e detalhamento – Área nº 3	55
Tabela 6.2	- Sondagens para reconhecimento e detalhamento - Área nº 4	57
Tabela 6.3	- Teste de produção/aquífero – poço nº 1, Área 3	59
Tabela 6.4	- Teste de produção – poço nº 3, Área 4	60
Tabela 6.5	- Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero em estudo	61
Tabela 8.1a	- Tabela de eficiência de captura de um único poço vertical em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	82
Tabela 8.1b	- Tabela de eficiência de captura de um único poço vertical em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	83
Tabela 8.1c	- Tabela de eficiência de captura de um único poço vertical em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	83
Tabela 8.1d	- Tabela de eficiência de captura de um único poço vertical em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	83

Tabela 8.1e	- Tabela da eficiência de captura do sistema de remediação com um poço vertical, em função das vazões de extração, para as penetrações de 0,2j, 0,3j 0,4j e 0,5j	89
Tabela 8.2a	- Tabela de eficiência de captura de dois poços verticais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	91
Tabela 8.2b	- Tabela de eficiência de captura de dois poços verticais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	91
Tabela 8.2c	- Tabela de eficiência de captura de dois poços verticais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	91
Tabela 8.2d	- Tabela de eficiência de captura de dois poços verticais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	92
Tabela 8.2e	- Tabela da eficiência de captura do sistema de remediação com dois poços verticais, em função das vazões de extração, para as penetrações de 0,2j, 0,3j 0,4j e 0,5j	97
Tabela 8.3a	- Tabela de eficiência de captura de três poços verticais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	99
Tabela 8.3b	- Tabela de eficiência de captura de três poços verticais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	99
Tabela 8.3c	- Tabela de eficiência de captura de três poços verticais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	100

Tabela 8.3d	- Tabela de eficiência de captura de três poços verticais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	100
Tabela 8.3e	- Tabela da eficiência de captura do sistema de remediação com três poços verticais, em função das vazões de extração, para as penetrações de 0,2j, 0,3j 0,4j e 0,5j	105
Tabela 8.4a	- Tabela de eficiência de captura de um único poço horizontal em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	107
Tabela 8.4b	- Tabela de eficiência de captura de um único poço horizontal em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	108
Tabela 8.4c	Tabela de eficiência de captura de um único poço horizontal em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	108
Tabela 8.4d	Tabela de eficiência de captura de um único poço horizontal em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	108
Tabela 8.4e	Tabela da eficiência de captura do sistema de remediação com um único poço horizontal, em função das vazões de extração, para as penetrações de 0,2j, 0,3j 0,4j e 0,5j	114
Tabela 8.5a	Tabela de eficiência de captura de dois poços horizontais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	116
Tabela 8.5b	Tabela de eficiência de captura de dois poços horizontais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	116

Tabela 8.5c	Tabela de eficiência de captura de dois poços horizontais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	116
Tabela 8.5d	Tabela de eficiência de captura de dois poços horizontais em função do número de tubos de fluxo capturados e das características da zona de captura – vazão constante $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, espessura saturada média $b = j$ (2 m) e permeabilidade Hidráulica do meio $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$.	117
Tabela 8.5e	Tabela da eficiência de captura do sistema de remediação com dois poços horizontais, em função das vazões de extração, para as penetrações de 0,2j, 0,3j 0,4j e 0,5j	122

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Página
K	- Tensor da permeabilidade hidráulica	7
k	- Vetor da permeabilidade intrínseca	7
ρ	- Vetor do peso específico	7
g	- Aceleração da gravidade	7
μ	- Viscosidade dinâmica	7
S	- Coeficiente de armazenamento	8
Δ	- Delta	8
V	- Volume	8
A	- Área	8
H	- Carga hidráulica	8
n_e	- Porosidade efetiva	8
L	- Coeficiente de drenança	9
K	- Permeabilidade	9
K_L	- Permeabilidade da camada confinante	9
b_L	- Espessura da camada confinante	9
q_i	- Vazão específica	9
∂	- Diferencial	9
I	- Direção horizontal	9
J	- Direção vertical	9
V_i	- Velocidade linear	10
∇	- Operador nabla	10
P	- Pressão	10
Z_e	- Carga de elevação	10
T	- Tempo	10
Q_f	- Potencial da fonte	10
S_0	- Rendimento específico para os aquífero não-confinado	10
T	- Transmissividade	11
q_f^*	- Área específica do potencial de fluxo com o tempo	11

θ	- Declividade da superfície freática	11
h_0	- Carga inicial da superfície freática do aquífero	11
H	- Carga da superfície freática do aquífero	
Q	- Vazão de bombeamento	12
S	- Rebaixamento num ponto qualquer a uma distância r do poço de bombeado	12
S_p	- Rebaixamento no poço bombeado	12
R_p	- Raio do poço bombeado	12
R	- Raio de influência	12
B	- Espessura do aquífero	13
B	- Espessura do aquífero	13
I	- Gradiente hidráulico	13
P_B	- Poço bombeado	16
P_i	- Poço imagem	16
s_r	- Rebaixamento do poço real	16
s_i	- Rebaixamento do poço imagem	16
s_w	- Rebaixamento do poço total	16
K	- Potássio	27
Na	- Sódio	27
Ca^{2+}	- Cálcio	27
Mg^{2+}	- Magnésio	27
Cl	- Cloro	27
Fe^{++}	- Ferro	27
Mn	- Manganês	27
Cu	- Cobre	27
Ni	- Níquel	27
Zn	- Zinco	27
Pb	- Chumbo	27
Hg^{2+}	- Mercúrio	27
NO_3^-	- Nitrato	27
SO_4^{2-}	- Sulfato	27
C	- Concentração do soluto	35

M	- Massa do soluto	35
D	- Tensor de dispersão hidrodinâmica	35
D*	- Coeficiente de difusão molecular	35
α_L	- Dispersividade longitudinal	35
α_T	- Dispersividade transversais	35
δ_{ij}	- Símbolo Kronecker	35
q_s	- Potencial do soluto	35
K_x	- Permeabilidade hidráulica horizontal	37
K_z	- Permeabilidade hidráulica vertical	37
K*	- Condutividade hidráulica isotrópica	37
X	- Coordenada horizontal	37
Y	- Coordenada vertical	37
z*	- Coordenada isotrópica no eixo z	37
x_p	- Coordenada horizontal do poço	37
y_p	- Coordenada vertical do poço	37
z*_p	- Coordenada isotrópica do poço no eixo z	37
x_D	- Coordenada horizontal do elemento esférico	37
y_D	- Coordenada vertical do elemento esférico	37
z_D	- Coordenada do eixo z do elemento esférico	37
∞	- Infinito	38
L	- Comprimento	43
I	- Gradiente regional	45
θ	- Direção do gradiente	45
D	- Profundidade do poço abaixo de topo do aquífero	45
ith	- Iésimo termo	47
Z₁	- Coordenada vertical do topo do aquífero	48
Z₂	- Coordenada vertical do fundo do aquífero	48
M	- Número de poços	49
X_i	- Coordenada horizontal do i th poço	49
Y_i	- Coordenada vertical do i th poço	49
D_i	- Distância do topo do aquífero para o topo da entrada do i th poço	49
L_i	- Comprimento de entrada no i th poço	49

n_E	- Nível estático	59
n_D	- Nível dinâmico	59
r_e	- Raio equivalente	61
a_n	- Comprimento médio dos ramais filtrantes	61
V_e	- Velocidade da água no filtro/pré-filtro	61
L	- Total de filtros	61
pH	- Potencial de hidrogênio	61
IER	- Índice de estabilidade de Ryznar	61
$R(x,y)$	- Volume de água adicionado ou retirado do aquífero, por unidade de tempo por unidade de área do aquífero	66
Q_1	- Vazão de entrada	69
Q_2	- Vazão de saída	69
θ_1	- Ângulo de incidência das linhas de fluxo	69
θ_2	- Ângulo de reflexão das linhas de fluxo	69
c	- Declividade do nível d'água	70
$K_{\text{poço}}$	- Permeabilidade do poço	75
m	- Declividade da superfície freática	75
P_p	- Profundidade do sistema de extração	75
C_{zc}	- Comprimento da zona de captura	75
P_{zc}	- Profundidade da zona de captura	75
E_c	- Eficiência de captura do sistema de extração	75
E_{nc}	- Eficiência de não-captura do sistema de extração	75

RESUMO

Foi feita nesta dissertação uma análise das zonas de captura dos poluentes próximos aos poços verticais e horizontais. O poço horizontal é uma renovação recente, feita somente nos últimos 9 ou 10 anos nos países desenvolvidos como EUA e Canadá, a qual agora está sendo usada no mundo inteiro devido a sua simplicidade e eficácia na remoção dos poluentes, sem causar destruição ou perturbação de estruturas como tanques de gasolina, casas etc. Este procedimento provou ser útil na descontaminação da parte rasa do aquífero, com aplicações práticas que poderão ser empregados em campo, caso haja contaminação. A grande vantagem dos poços horizontais é a acessibilidade para qualquer situação, até em abaixo dos containers/tanques vazantes de contaminantes. Sem ameaçar o ambiente natural, dá para se realizar a captura total dos poluentes.

A técnica dos poços verticais, em agrupamento de um ou mais poços foi estudada de acordo com programação explicada no texto da tese. A geometria da pluma de contaminantes, em ambos os casos de poços verticais e horizontais, foi determinada objetivando conter o espalhamento da pluma contaminada. Os critérios para a obtenção da eficiência máxima foram estabelecidos em função da porcentagem dos tubos do fluxo que são capturados (razão dos tubos que chegam ao, e assim capturados, pelo número total de tubos) pelo sistema de remediação. Os programas computacionais usados foram desenvolvidos em Turbo Pascal Versão VI e a resolução das figuras obtidas foi animadora, com clareza e definição suficiente para que um engenheiro possa estudar e interpretar o fenômeno da captura dos tubos de fluxo, usando a teoria de Potenciais. Com o intuito de remover os poluentes nos aquíferos rasos, foi empregada uma bateria de poços verticais, contendo um, dois e até três poços de extração, como medida de contenção hidráulica dos contaminantes. Os parâmetros físicos envolvidos incluíram o tamanho, a profundidade e espaçamento entre os poços, além das permeabilidades do meio e do material do poço. A análise detalhada dos resultados obtidos comprovou a eficiência e a aplicabilidade da metodologia aplicada para região estudada.

O método apresentado para determinar as características das zonas de captura num domínio retangular de fluxo, seja nos poços verticais ou horizontais, foi comprovado como muito útil para a elaboração de projetos, locação e operação de sistemas de extração para as plumas de contaminantes que penetram parcialmente nos aquíferos rasos. Foram obtidas soluções bidimensionais para as zonas de captura. As especificações gerais para os poços verticais e poços horizontais estão presentes no texto, e foram usadas ao longo do estudo. O sistema de contenção hidráulica de contaminantes, composto por um único poço horizontal, mostrou-se mais eficiente do que os compostos pelos poços verticais. Entretanto tal eficiência, é mais evidente, para o caso de aquíferos espessos, pois embora o uso de poço(s) horizontal não tenha como fator limitante a espessura do aquífero, este método é bastante sensível à flutuação do nível freático, que torna-se bem mais preponderante nos aquíferos rasos.

A análise dos resultados para o caso dos poços horizontais deixa claro que na área selecionada, não é recomendado o aumento na profundidade de instalação dos poços a partir de 40% da profundidade total, pois não foi verificado aumento relevante na captura dos tubos de fluxo. O uso de um sistema de contenção hidráulica com dois poços horizontais foi tratado unicamente por interesse acadêmico. As especificações gerais para os poços horizontais foram apresentadas nas respectivas tabelas que mostram as eficiências dos poços horizontais em função do número total dos tubos de fluxo capturados. Foi feita a comparação entre as Zonas de Captura de Poços Verticais e Horizontais e deduzidas conclusões úteis para elaboração de projetos de descontaminação de aquíferos freáticos. As recomendações que foram feitas ajudarão aqueles que desejarem implementar estes conceitos para estruturas e/ou instalações que necessitem do uso de técnica de descontaminação, onde forem necessárias.

As figuras e tabelas que foram confeccionadas são auto-explicativas e foram feitas usando as técnicas computacionais mais recentes.

ABSTRACT

In this dissertation, an analysis was done on the capture zones of pollutants, that pertain to vertical and horizontal wells. The horizontal well is a recent innovation that emerged in the developed countries, such as in the United States of America and Canada, only in the past 9 or 10 years and this technique is being used in the world over due to its simplicity and efficient use in removing the pollutants, without destroying or perturbing beneath such structures as gas tanks, houses etc. This procedure had proved to be useful in the decontamination of the shallow part of the aquifer, with practical applications that could be employed in the field, should such a contamination occur. The advantage of horizontal wells is that they can have exact access to the area that is to be cleaned, however difficult the situation be, even if the lower parts of the leaking containers/tanks are to be reached. Without menace to the natural environment, it is possible to have total capture of the pollutant.

The technique of vertical wells consisting of one or more of these units, as per the program explained in the text of this dissertation, was studied. The plume geometry of the contaminant, in both vertical and horizontal wells, was determined, with the object of limiting the contaminant spread of the plume and criteria were established to obtain the maximum efficiency as a function of percentage of flow tubes which were captured (as a ratio of tubes that are captured by the given well to the total number of tubes) in the remediation system. Turbo-Pascal Version VI computer programs used were and the resolution of the figures so obtained was encouraging, with clarity and definition that is needed for an engineer to study and interpret the phenomenon of capture of flow tubes, using the Potential theory. For the purpose of removing the pollutants in shallow aquifers, a battery of vertical wells was employed, with one, two or up to three extraction wells, with the idea of containing the hydraulic spread of contaminants. The physical parameters involved included the size, depth and spacing in between of the wells, apart from the permeabilities of the media (of the well and that of the formation matrix under question). Detailed

analysis of the results presented confirmed the efficiency and applicability of this method for the region under study.

The method presented here-in for determining the characteristics of capture zones in a rectangular flow domain, be it for the vertical wells or horizontal wells, proved to be very useful for purpose of project design, location and operation of extraction systems for contaminant plumes that penetrate partially into shallow aquifers. The 2-D solutions were obtained for capture zones. The general specifications for vertical and horizontal wells were furnished in the text of this thesis and these were used all along the study. The hydraulic contaminant contention system composed of a single horizontal well showed to be more efficient than that composed of with vertical wells. However, such efficient condition would be more evident for the case of thick aquifers, once that for horizontal well(s), one does not have such factor as the limiting factor, for the aquifer thickness. This method is very sensible to fluctuation of phreatic levels, as for the case of shallow aquifer systems.

A analysis undertaken for horizontal wells resulted in an increase in depth of installation, beginning from 40% of the total depth (which amounts to 0,4j) which is not recommended. Beyond this dimensionless depth, the capture of flow tubes was however not verified, as no measurable increase was observed. In the hydraulic contention system of contaminants, the case of the horizontal two-well system was conducted purely from an academic point of view. The general specifications used for horizontal wells were presented in the respective tables which show that the efficiency of horizontal wells is a function of the number of flow tubes captured. A comparison was made between capture Capture Zones for vertical and horizontal wells and this proved useful in designing field projects to contain the contamination as also to give continuity to such decontamination projects. The recommendations suggested here-in would help one to implement these concepts to structures and installations that need this technique of decontamination of pollutants, wherever they be.

The figures and tables that accompany this dissertation are self-explanatory and were drawn, using the latest computer techniques.

Capítulo I

Introdução

“Como um bem público, a água deve ser protegida pelo Estado, preservada pelo homem e administrada democraticamente pela sociedade com disciplina e garantia necessárias para conservação da própria vida na Terra.”

Revista “USANDO BEM AS ÁGUAS DO
CEARÁ”, Hypérides P. de Macedo, 1997

A importância da água para os seres vivos reside no fato de todas as substâncias por elas absorvidas e todas as reações do seu metabolismo serem feitas por via aquosa. A maior parte do peso de qualquer ser vivo é composta de água. No corpo humano adulto, ela constitui cerca de 70%, em média, do seu peso.

O potencial hídrico do planeta Terra é da ordem de 1,4 bilhões de km^3 , porém, a parte da água doce de mais fácil aproveitamento para satisfazer às necessidades da humanidade através das diversas utilizações é de aproximadamente 14 mil km^3/ano . Desta total estima-se que atualmente a demanda mundial é da ordem 41%.

Pelo fato das águas superficiais serem visíveis, muitas pessoas imaginam que os rios, barragens e lagos devem ser a maior fonte de atendimento das necessidades do homem. Na verdade, um pouco mais de 97% da água doce disponível na Terra encontra-se no subsolo e portanto menos de 3% da água potável disponível no planeta provém das águas de superfície. Os processos de filtração e as reações bio-geoquímicas

que tem lugar no subsolo, fazem com que as águas subterrâneas apresentem, geralmente, boa potabilidade e achem-se melhor protegidas dos agentes de poluição que atingem os rios e lagos (Filho *et al.* 1997).

Em termos de abastecimento público, em muitos países, tais como Arábia Saudita, Dinamarca e Malta, as águas subterrâneas são o único recurso disponível. Em muitos outros, tais como Áustria, Alemanha, Bélgica, França, Hungria, Itália, Holanda, Marrocos, Rússia e Suíça, mais de 70% da demanda é atendida pelos mananciais subterrâneos. As obras de captação são variadas: nascentes, cacimbões simples, cacimbões com drenos radiais, poços tubulares rasos e profundos (Filho *et al.* 1997).

O Brasil é um país privilegiado em recursos hídricos, com um volume armazenado de água subterrânea da ordem de 58.000 km³. No Brasil, a falta de controle na utilização da água subterrânea provavelmente não permite fazer estimativas sem erros significativos. Mesmo assim, os dados disponíveis (IBGE - 1991) revelam que 61% da população é abastecido com água subterrânea, sendo 43% através de poços tubulares, 12% por fontes ou nascentes e 6% por poços escavados (tipo amazonas). Nas regiões Sul e Sudeste, 90% das cidades do Paraná e Rio Grande do Sul e 76% das cidades do estado de São Paulo são abastecidos por poços (Rebouças, 1996).

No Nordeste, a água subterrânea surge como uma fonte vital para o abastecimento d'água, principalmente por ser uma região susceptível à verões áridos e onde a maioria dos rios não são perenes, onde tal recurso vem a surgir como uma medida barata e eficaz de combate à escassez hídrica nos períodos de seca. Segundo o CREA-RJ, a Paraíba apresenta um indicador de renovação hídrica da ordem 1.348 m³/hab/ano, e sendo assim, é um dos estados nordestinos onde o potencial hídrico renovável per capita já se aproxima do sinal de alerta de escassez hídrica (1.700 m³/hab/ano). Existem parcelas significativas do abastecimento público de várias cidades importantes (por exemplo, Maceió em Alagoas; Recife e Olinda, em Pernambuco; Natal e Mossoró, no Rio Grande do Norte) que são oriundas das reservas subterrâneas (Filho *et al.* 1997). Deve-se salientar que, face as potencialidades hidrogeológicas do território brasileiro, para 80% das nossas cidades as águas subterrâneas constituem uma

alternativa economicamente viável, sobretudo por dispensarem as onerosas obras de engenharia para captação, adução e, pelos crescentes custos de tratamento.

A poluição e a contaminação da água subterrânea é um problema ambiental que têm despertando a atenção e a preocupação de diversas entidades municipais, estaduais e governamentais, em todo o mundo, nas últimas décadas. Em alguns estados do Nordeste, a inexistência de uma política de gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, voltada para a proteção dos aquíferos, torna a água subterrânea susceptível à diversas formas de contaminação, expondo a população favorecida à inúmeros problemas de saúde decorrentes do seu consumo. Atentando para tal problema, procuramos elaborar um trabalho que apontasse na direção de uma possível técnica de proteção para poços de produção. Foi selecionada uma área aluvial no município de São Bento, no estado da Paraíba. Analisamos as zonas de captura de poços de extração verticais e horizontais, usados comumente, em muitos países, como medidas de contenção hidráulica de contaminantes.

No Capítulo II são tratados os principais fundamentos da água subterrânea que serão foram usados nesta pesquisa. O Capítulo III enfoca a contaminação das água subterrâneas, apresentando os principais conceitos e fundamentos que envolve este assunto. A teoria que envolve o uso de poços verticais e horizontais como medidas de contenção hidráulica dos contaminates é discutida no Capítulo IV. Os Capítulos V e VI referem-se à área estudada e aos dados usados na pesquisa, respectivamente. O Capítulo VII trata do modelo matemático e dos programas adotados. Os resultados obtidos na simulação são abordados no Capítulo VIII. O Capítulo IX traz os resultados e as conclusões obtidas com a pesquisa. O capítulo X traz as recomendações para as pesquisas futuras que venham a abordar este tema. O Capítulo XI apresenta a bibliografia utilizada na pesquisa. E no final, nos anexos, são apresentadas as figuras da simulação dos poços verticais e horizontais (Anexo I), os gráficos da eficiência de não captura dos poços verticais e horizontais (Anexo II), os programas utilizados na pesquisa (Anexo 3), o método das diferenças finitas (Anexo 4) e as sondagens da CDRM na região usada para simulação (Anexo 5).

Capítulo II

Fundamentos de Água Subterrânea

2.1 - Distribuição da Água no Solo

A água abaixo da superfície pode ser encontrada em duas regiões distintas (Figura 2.1):

- Na zona não-saturada, na mistura sólida que contém ar e filetes de água entre os espaços das partículas sólidas. Esta é a água usada pelas plantas.
- Na zona saturada, onde a água subterrânea preenche totalmente todos os espaços dos poros das formações sólidas abaixo do nível freático, que é o limite superior da zona saturada.

A zona saturada pode ser constituída por diferentes camadas de solo ou formações rochosas. A água presente na zona saturada, estar em constante movimento. Como a água superficial, a água subterrânea move-se por gravidade e também na direção do menor gradiente de pressão, com a taxa de fluxo variando de acordo com o tipo de material sólido do meio.

Desta forma a água subterrânea move-se de forma mais rápida nos solos arenosos, enquanto que nos meios argilosos (devido a sua maior porosidade e inexistência de interconexão entre seus vazios provocar retenção e dificultar a transmissão da água - “efeito esponja”) de forma mais lenta.

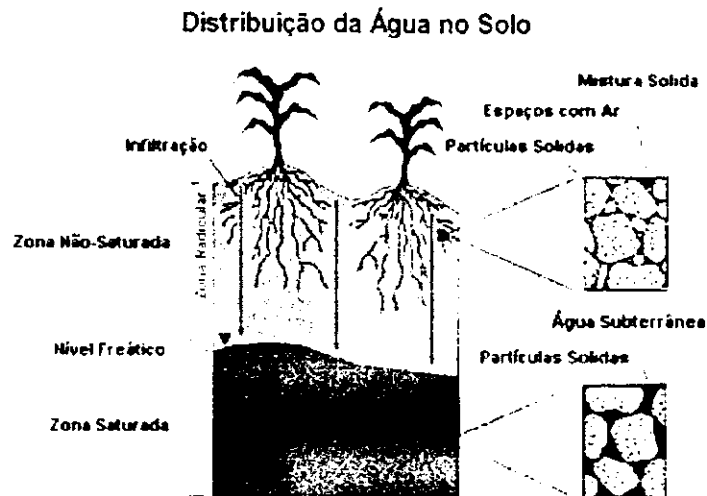


Figura 2.1 - Representação da distribuição da água no solo (Fonte: Adaptado de Morese, 1998)

2.2 - Movimento da Água Subterrânea em Escala de Tempo

A taxa de fluxo e a quantidade de tempo gasto na várias partes do ciclo hidrológico são influenciadas por inúmeros fatores: cobertura do solo, elevação, topografia, temperatura, tipo de solo e geologia. Geralmente a água subterrânea move-se muito lentamente através da subsuperfície. Sendo assim pode vim a levar anos, décadas ou séculos até que a água subterrânea flua através da subsuperfície para a superfície de áreas de descargas como um rio (Figura 2.2).

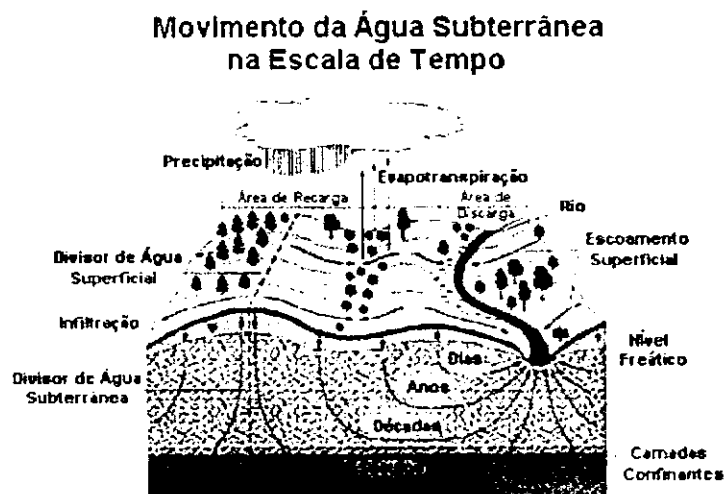


Figura 2.2 - Representação do movimento da água no solo (Fonte: Adaptado de Morese, 1998)

2.3 - Aquíferos

O aquífero é uma formação porosa (camada ou estrato) de rocha permeável, areia ou cascalho, capaz de armazenar e fornecer quantidades significativas de água (aquíferos produtivos). Na zona saturada podem existir três tipos de aquíferos produtivos (Figura 2.3):

- Aquífero confinado - é uma formação geológica permeável confinada entre duas camadas impermeáveis. No seu interior a pressão em qualquer ponto é maior que a pressão atmosférica. São geralmente aquíferos de grandes extensão e produção;
- Aquífero freático (livre) ou não-confinado - no aquífero livre a superfície freática serve como fronteira superior e estar sujeito à pressão atmosférica. Tais aquíferos são geralmente de pequena extensão e mais explorados devido ao fácil acesso;
- Aquífero semi-confinado - o aquífero semiconfinado está situado entre duas camadas semipermeáveis e relativamente delgadas, através das quais pode se processar o esgotamento da água para o aquífero ou a partir dele, devido a diferença de potencial hidráulico nas respectivas camadas.

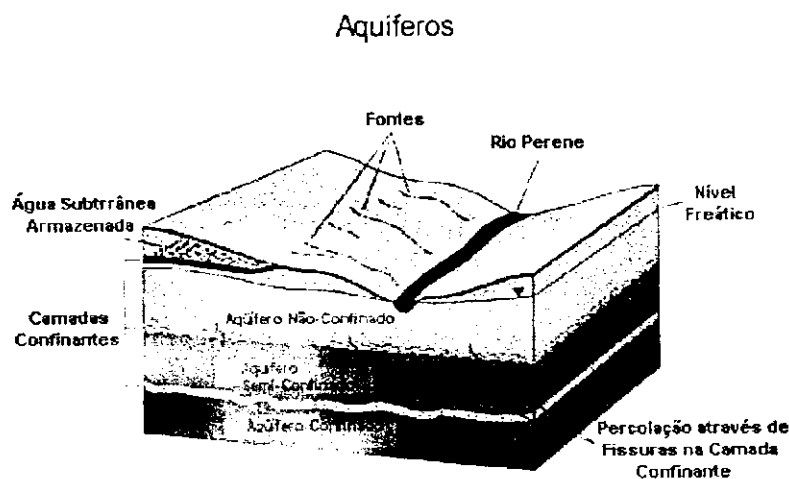


Figura 2.3 - Tipos de aquíferos produtivos (Fonte: Adaptado de Morese, 1998)

A literatura também cita outras formas de armazenamento de água subterrânea denominadas por aquítarde, aquíclude e aquífugo.

- O aquítarde é uma formação geológica de natureza relativamente impermeável e semiconfinante que transmite água com velocidade muito reduzida, em comparação a um aquífero produtivo;
- O aquíclude é uma formação que embora seja capaz de absorver água, não transmite em velocidades suficientes para proporcionar um abastecimento a um poço ou a uma fonte;
- O aquífugo é uma formação sem interstícios interconectados, incapaz, portanto de absorver ou transmitir água.

2.4 - Definições dos Parâmetros Hidráulicos

A permeabilidade hidráulica é a medida da capacidade de um meio poroso de transmitir o fluxo de um determinado fluido. Estudos experimentais mostraram que o tensor da permeabilidade hidráulica \mathbf{K} é função do vetor de permeabilidade intrínseca \mathbf{k} [L^2] do meio poroso, do peso específico ρg [$ML^{-2}T^{-2}$] e da viscosidade do fluido (μ) [$ML^{-1}T^{-1}$]. K é dado por:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}, [LT^{-1}] \quad (2.1)$$

Se os valores de K puderem ser considerados constantes em um domínio do aquífero, tal domínio é dito homogêneo. Caso contrário este domínio será heterogêneo (Figura 2.4a e c).

Se os valores de K são constantes em todas as direções em relação a um dado ponto, o aquífero é considerado isotrópico. Se K variar com a direção, o aquífero é anisotrópico (Figura 2.4a e b).

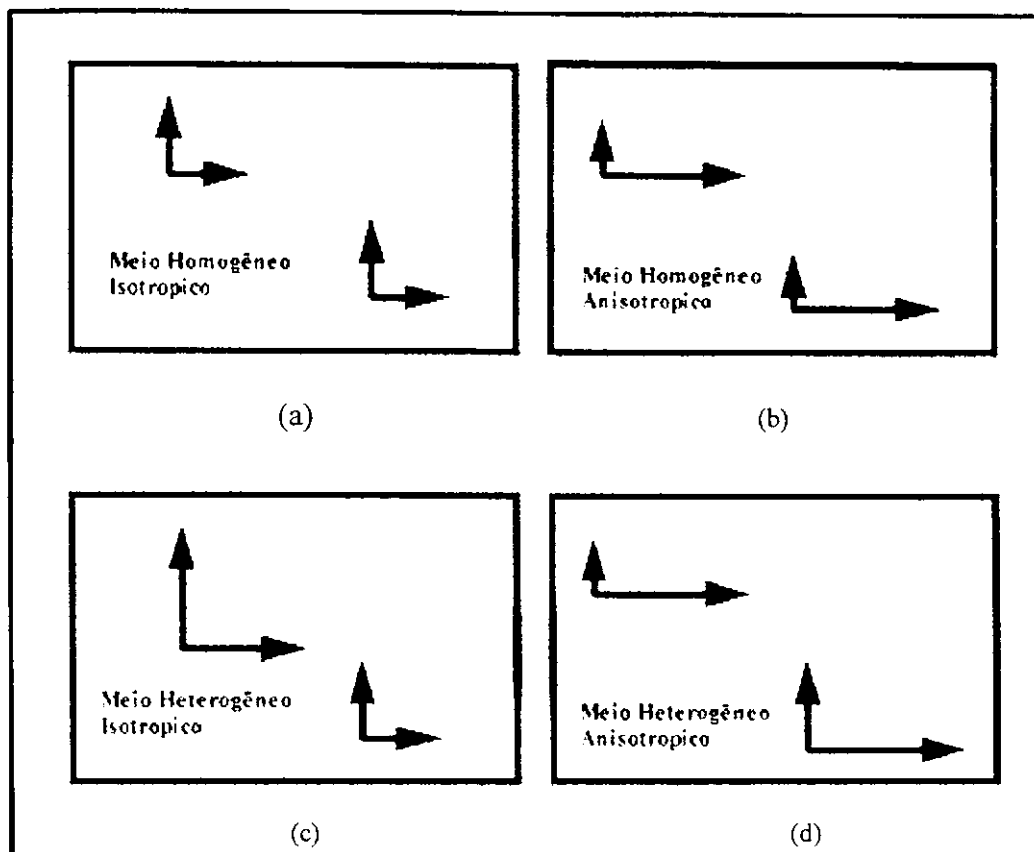


Figura 2.4 - Representação da permeabilidade hidráulica nos meios homogêneos, heterogêneos, isotrópico e anisotrópico (Fonte: Adaptado de Morese, 1998)

O coeficiente de armazenamento (S), é definido como sendo o volume de água liberado ou armazenado por um aquífero (ΔV)[L³], por unidade de área superficial do aquífero (A)[L²], por unidade de variação na carga hidráulica (Δh)[L].

$$S = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta h} \quad (2.2)$$

O coeficiente de armazenamento descreve a capacidade do sistema aquífero de armazenar água (Figura 2.5). Para os aquíferos livres, o coeficiente S não depende da compressibilidade da água e nem da do próprio aquífero, como é verificado nos aquíferos confinados, mas sim da capacidade de drenança da água nos poros - o chamado rendimento específico ou porosidade efetiva n_e .

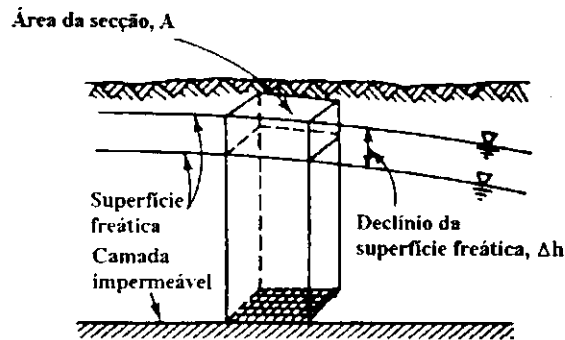


Figura 2.5 - Representação da definição do coeficiente de armazenamento para um aquífero não-confinado (Fonte: Adaptado de Bear e Verruijt, 1990)

O coeficiente de drenança, (L), que representa o fluxo vertical através de uma camada semiconfinante, é dado por:

$$L = \frac{K_L}{b_L}, \quad [T^{-1}] \quad (2.3)$$

onde: K_L é permeabilidade da camada confinante e $b_L[L]$ é espessura da camada confinante.

2.5 - Fundamentos do Fluxo Subterrâneo Horizontal

O movimento da água subterrânea pode ocorrer tanto na zona saturada quanto na zona não saturada de fluxo. Bear (1972, 1979) e Freeze e Cherry (1979) trataram as características do fluxo na zona não saturada detalhadamente.

O fluxo no meio poroso é proporcional ao gradiente do potencial hidráulico, seguindo a lei de Darcy, que é dada pela equação geral abaixo:

$$q_i = -K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}, \quad [LT^{-1}] \quad (2.4)$$

onde q_i é a vazão específica, K_{ij} é a permeabilidade hidráulica, $\partial h / \partial x_j$ é o gradiente hidráulico e i e j são as direções de fluxo.

A velocidade linear média do fluxo no meio poroso é dada por:

$$V_i = \frac{q_i}{n_e}, \quad [LT^{-1}] \quad (2.5)$$

onde n_e é a porosidade efetiva do meio.

O fluxo em um aquífero confinado ou não-confinado é governado pela equação geral do fluxo subterrâneo, mostrada abaixo:

$$S_0 \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\vec{K} \nabla h \right) + q_f \quad (2.6)$$

(Bear, 1979). As notificações na equação 2.6 são: ∇ , operador; $h = p/\rho g_z + z_c$, [L], carga piezométrica; p [MT^2L^{-1}], pressão; g_z [LT^{-2}], aceleração da gravidade; z_c , [L] carga de elevação; ρ [ML^{-3}], massa específica; t [T], tempo; K [LT^{-1}], tensor da permeabilidade hidráulica; q_f [T^{-1}], potencial da fonte; S_0 [L^{-1}], armazenamento específico (rendimento específico para os aquífero não-confinado).

Para um aquífero confinado horizontalmente isotropico com $K = K_{xx} = K_{yy}$ e com espessura $B(x,y)$, a integração na vertical da equação 2.6. dará:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q_f \quad (2.7)$$

onde $T(xy) = KB$ [L^2T^{-1}], é a transmissividade; $q_f^* = q_f B$ [LT^{-1}], área específica do potencial de fluxo com o tempo; $S = S_0 \cdot B$, coeficiente de armazenamento específico do aquífero.

Para um aquífero não-confinado, Dupuit observou que na maioria dos fluxos de água subterrânea, a declividade da superfície freática, θ (Figura 2.6), é muito pequena. Diante disto, Dupuit sugeriu que o valor do $\sin \theta$ substituísse o valor da declividade, $\tan \theta = dh/dx$. Sendo assim, assumir o valor de θ pequeno é equivalente a assumir que as linhas equipotenciais são verticais e, conseqüentemente, o fluxo subterrâneo horizontal.

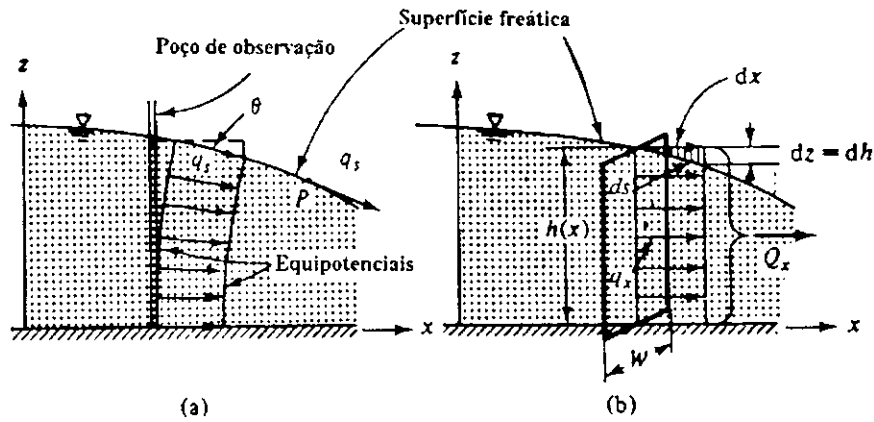


Figura 2.6 - Representação da aproximação de Dupuit (Fonte: Adaptado de Bear, 1990).

A equação 2.7 é reescrita na forma da equação de Dupuit-Forchheimer, como a seguir:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q_{Df}^* \quad (2.8)$$

com $q_{Df}^* = q_f \cdot h$ [LT^{-1}]. Devido a equação 2.8 não ser linear, são comumente usadas duas técnicas de linearização (Bear, 1979):

1. Substituindo a variável $T=Kh$, pela transmissividade efetiva local da camada não-confinada $T_0=Kh_0$, onde h_0 é a altura média da superfície freática do aquífero, resulta em uma equação similar a equação 2.7, com $T=T_0=const.$;
2. Reescrevendo o termo derivativo do tempo na equação 2.8 como $(S/h_0) \partial(h^2/2)/\partial t$, obtemos uma equação linear em h^2 :

$$\frac{S}{h_0} \frac{\partial h^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) + 2q_{Df}^* \quad (2.9)$$

Sendo o fluxo em um aquífero não-confinado considerado como permanente, como será tratado nesta pesquisa, a equação 2.9 é reduzida para:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2q_{Df}^* \quad (2.10)$$

Para um poço sendo bombeado num aquífero confinado, no centro de uma ilha circular, com o raio de influência igual ao limite da própria ilha e coincidente com o

nível da água superficial, conforme mostrado na Figura 2.8. Pelo princípio da continuidade a vazão extraída do poço é igual à vazão que passa pela superfície lateral do cilindro indicado na Figura 2.8.

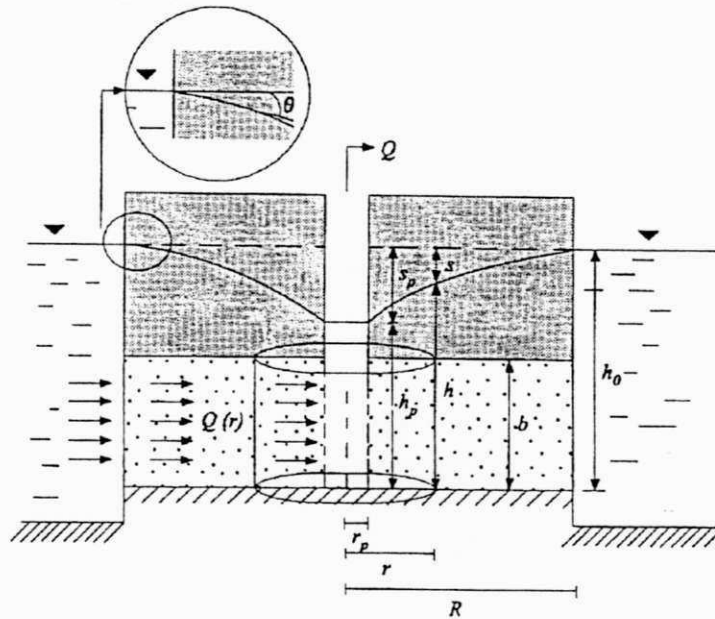


Figura 2.7 - Poço captando um aquífero confinado no centro de uma ilha circular. (Fonte: Adaptado de Custodio & Llamas, 1983)

Onde na Figura 2.7:

Q é a vazão de bombeamento [L^3/T];

h_0 é o nível potenciométrico inicial [L];

h é o nível potenciométrico a uma distância r do poço de bombeamento [L];

h_p é o nível da água no poço [L];

s é o rebaixamento num ponto qualquer a uma distância r do poço de bombeado [L];

s_p é o rebaixamento no poço bombeado [L];

r_p é o raio do poço [L];

R é o raio de influência; limite do cone de rebaixamento [L];

B é a espessura do aquífero [L].

Segundo a lei de Darcy esta vazão é dada pela expressão:

$$Q = KAi \quad (2.11)$$

onde:

Q é a vazão que passa pela área lateral do cilindro [L^3T^{-1}];

K é a permeabilidade hidráulica [LT^{-1}];

$2\pi rH$ é a área da superfície lateral do cilindro [L^2];

i (dh/dr) é o gradiente hidráulico a uma distância r.

Logo:

$$Q = 2\pi r b K \cdot \frac{dh}{dr} = 2\pi r T \cdot \frac{dh}{dr} \therefore dh = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \frac{1}{r} dr$$

Integrando para os limites extremos, teremos:

No poço: $h = h_p$ e $r = r_p$

No extremo da ilha $h = h_0$ e $r = R$

$$h_0 - h_p = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \ln \frac{R}{r_p} \quad (2.12)$$

Para um caso mais geral onde o aquífero tenha uma extensão muito grande, as condições de contorno passam a ser:

No poço: h_p e r_p

Num ponto qualquer do aquífero: h e r

Desta forma, a equação 2.12 torna-se:

$$h - h_p = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \ln \frac{R}{r_p} \quad (2.13)$$

A equação para fluxo radial sob condições permanentes num poço colocado num aquífero não-confinado pode ser desenvolvida com as suposições de Dupuit. Como é mostrado na Figura 2.7, o poço penetra completamente no aquífero e na margem do raio de influência a carga hidráulica permanece constante.

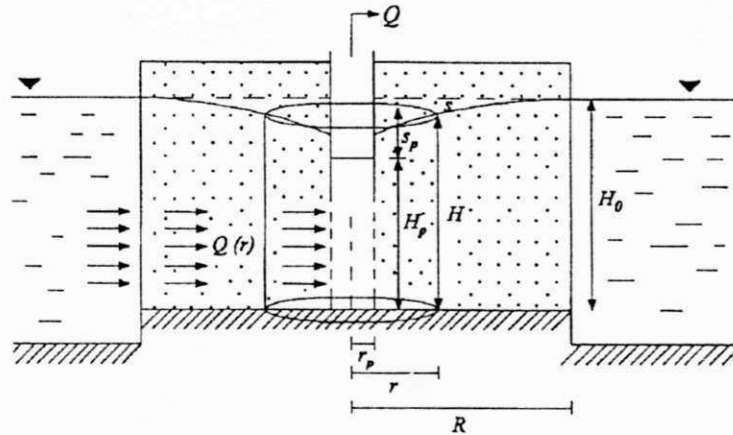


Figura 2.8 - Poço no centro de uma ilha circular em um aquífero livre ilustrando as condições para o regime permanente. (Fonte: Adaptado de Custodio & Llamas, 1983)

Nestas condições a vazão do poço é dada por:

$$Q = 2\pi KH \cdot \frac{dH}{dr} \quad (2.14)$$

onde :

Q é a vazão que passa pela área lateral do cilindro [L^3T^{-1}];

K é a permeabilidade hidráulica [LT^{-1}];

$2\pi rH$ é a área da superfície lateral do cilindro [L^2];

dh/dr é o gradiente hidráulico a uma distância r .

Isolando os termos em H , vem:

$$HdH = \frac{Q}{2\pi K r} \cdot \frac{1}{r} dr \quad (2.15)$$

Integrando para as condições de contorno:

No poço: $r = r_p$ e $H = H_p$

No extremo da ilha: $r = R$ e $H = H_0$

Chegamos à:

$$H_0^2 - H_p^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r}{r_p} \quad (2.16)$$

Generalizando para um ponto qualquer vem:

$$H^2 - H_p^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r}{r_p} \quad (2.17)$$

Essa equação porém, não é suficientemente precisa para descrever a curva de rebaixamento próximo ao poço uma vez que os componentes do fluxo contradizem as suposições de Dupuit. Porém, as estimativas de permeabilidade hidráulica para determinadas cargas são razoavelmente aceitáveis. Na prática, os rebaixamentos devem ser pequenos em relação a espessura saturada do aquífero não-confinado.

Quando um poço é bombeado próximo a um limite hidráulico, permeável ou impermeável e seu cone de rebaixamento atinge este limite, o fluxo da água subterrânea é afetado. Se este limite é brusco e retilíneo, pode-se substituí-lo, nos cálculos, por um poço fictício (poço imagem) que simula o efeito da descontinuidade, reduzindo o problema ao estudo da superposição de efeitos. Esta metodologia é conhecida como Teoria das Imagens. Aqui, será abordado apenas o caso das fronteiras impermeáveis, que causam acréscimos de rebaixamento (perdas) nos poços situados próximos a elas.

A Figura 2.7 mostra um poço sendo bombeado próximo a um limite impermeável. O efeito deste limite faz com que, em qualquer ponto, o rebaixamento seja maior do que no caso de aquíferos de grande extensão. Usando a Teoria das Imagens, o limite impermeável pode ser substituído por um poço imagem fictício, simétrico e com a mesma vazão do poço real bombeado.

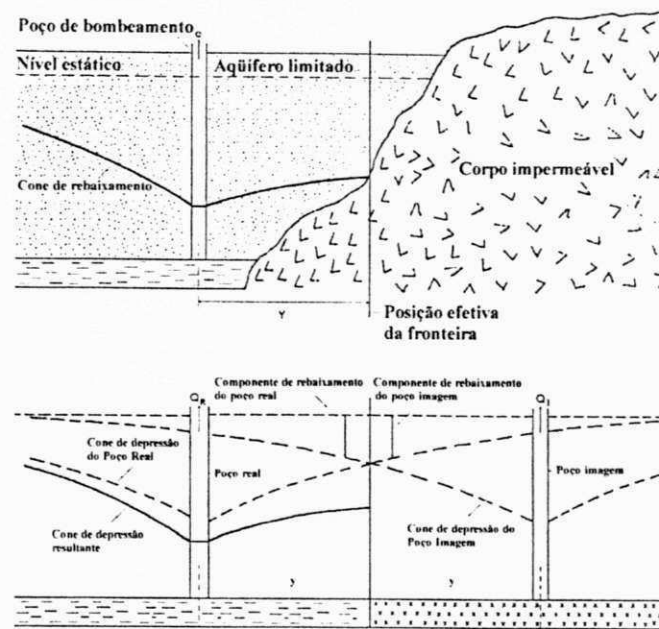


Figura 2.9 - (A) Aquífero limitado com a presença de uma fronteira hidráulica impermeável. (B) Poço fictício simulando o efeito da fronteira impermeável. (Fonte: Filho et al., 1997)

Supondo um poço sendo bombeado com uma vazão Q , num aquífero confinado não drenante próximo a um limite permeável e um poço de observação (P_z) situado a uma distância r do poço bombeado (P_B) e r_i do poço imagem (P_i), como ilustrado na Figura 2.10.

Aplicando a Teoria das Imagens, o rebaixamento no poço de observação (P_z) será a soma dos rebaixamentos provocados pelos bombeamentos do poço real (s_r) e do poço imagem (s_i). Aplicando a formula de Theis, teremos:

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u), \quad \text{sendo } u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$s_i = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u_i), \quad \text{sendo } u_i = \frac{r_i^2 S}{4Tt}$$

Generalizando para um ponto qualquer no aquífero e chamando o rebaixamento total de s_w , teremos:

$$s_w = \frac{Q}{4\pi T} \cdot [W(u) + W(u_i)] \tag{2.18}$$

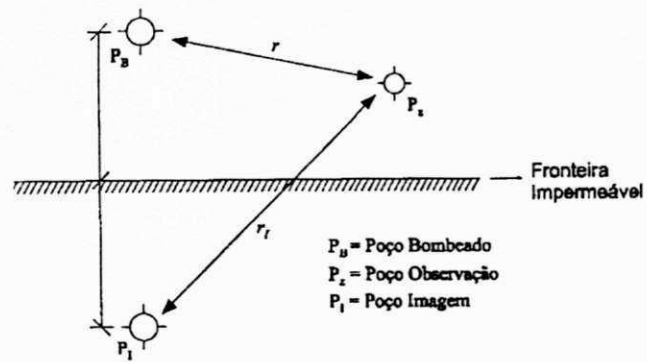


Figura 2.10 - Poço bombeando, poço imagem e poço de observação (piezômetro) próximo a uma fronteira hidráulica impermeável. (Fonte: Filho et al., 1997)

A Teoria das Imagens é tratada com maior detalhamento no Capítulo IV, onde é usada na determinação dos rebaixamentos tanto dos poços horizontais quanto dos verticais.

Capítulo III

Contaminação das Águas Subterrâneas

3.1 - Conceito de Contaminação e Poluição

A água subterrânea é uma solução diluída de inúmeros elementos e compostos sólidos, líquidos ou gasosos em proporções diversas, provenientes do ar (durante o processo de condensação e precipitação), dos solos e das rochas (nas quais circula ou é armazenada) e do contato com as atividades humanas.

A poluição da água pode ser definida como uma alteração artificial da qualidade físico-química da água, suficiente para superar os limites ou padrões pré-estabelecidos para determinado fim. Por exemplo, o aumento da temperatura de uma água, além dos limites tolerados por uma determinada espécie de peixes, representa uma poluição da água para a finalidade a que se destina.

A água contaminada é uma água que possui organismos patogênicos, substâncias tóxicas e/ou radioativas, em teores prejudiciais à saúde do homem. Por exemplo, a presença de coliformes fecais, além dos limites tolerados para o consumo humano, representa uma contaminação da água para o propósito de abastecimento público.

Um contaminante é toda e qualquer substância que ameaça a saúde, altera as características de águas receptadas para determinados fins ou modifica normas de qualidade pré-estabelecidas (Conama, 1999).

Quanto à distribuição espacial e temporal, a poluição (e a contaminação que pode originar) pode ser:

- Pontual, quando a fonte está concentrada numa pequena superfície, como por exemplo um poço tubular, ou escavado;
- Difusa quando a fonte de contaminação se estende, mesmo com baixa concentração, sobre uma grande superfície, como é o caso de áreas de irrigação ou áreas urbanas, ou do transporte por via atmosférica;
- Linear, quando a fonte de contaminação é um rio ou canal;
- Injeção Momentânea (Figura 3.1);

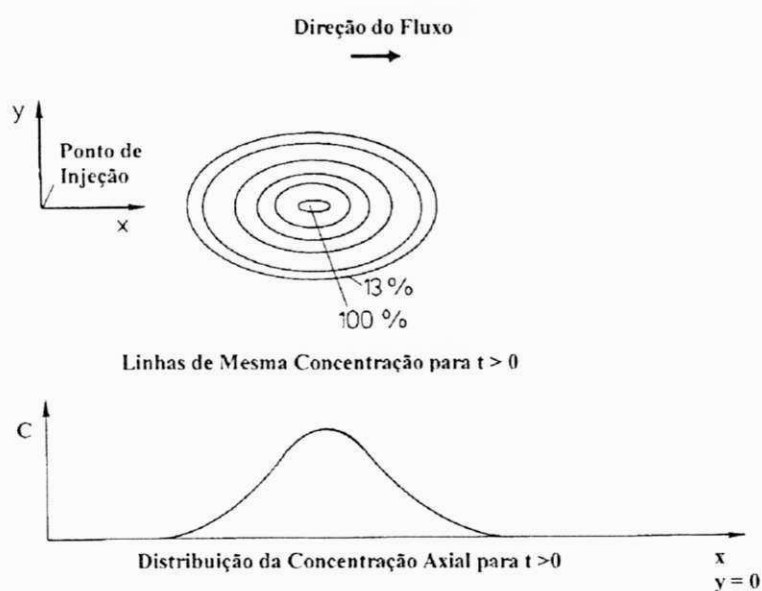


Figura 3.1 - Distribuição da concentração bidimensional devido à uma injeção momentânea na posição ($x=0$ e $y=0$) e $t > 0$ (Fonte: Adaptado de Kinzelbach, 1986)

- Injeção Permanente (Figura 3.2).

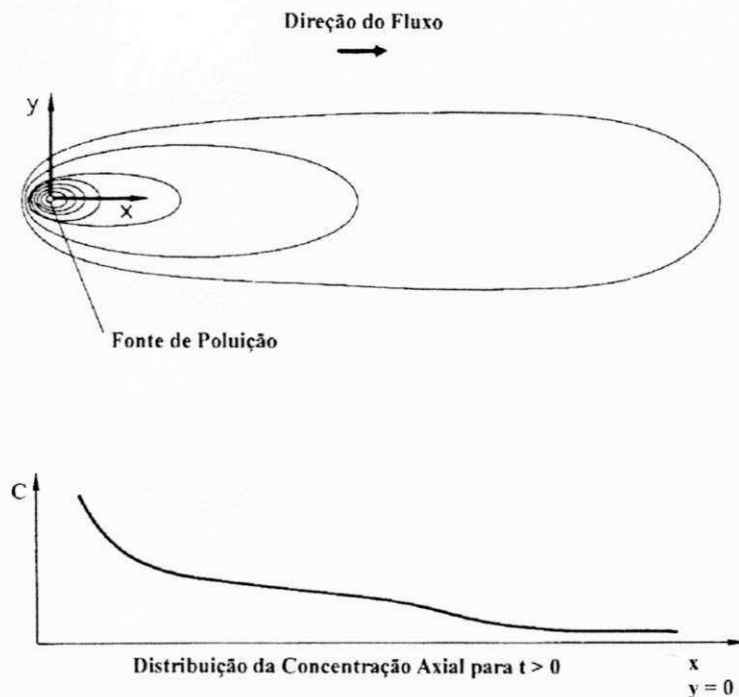


Figura 3.2 - Distribuição da concentração bidimensional devido à uma injeção permanente na posição ($x=0$ e $y=0$), iniciada em $t = 0$ (Fonte: Adaptado de Kinzelbach, 1986)

3.2 - Origens da Contaminação da Água Subterrânea

As contaminações das águas subterrâneas podem ter origem diversas, sendo atualmente mais comuns aquelas relacionadas diretamente com atividades industriais, domésticas e agrícolas.

Atividades Industriais (Figura 3.3) - as indústrias podem produzir contaminação subterrânea através de:

- Águas usadas, contendo compostos químicos, metais e/ou com alta temperatura;
- Elementos radioativos
- Acidentes com produtos químicos.

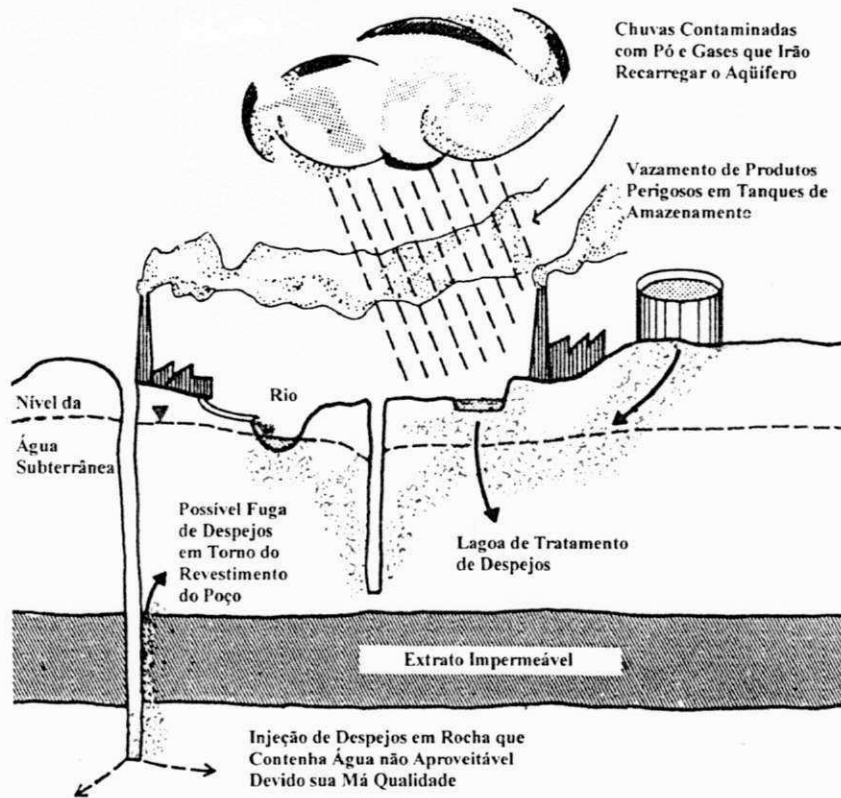


Figura 3.3 - Poluição de origem industrial (Fonte: Silva, 1987)

Atividades Domésticas - a atividade doméstica pode contaminar a água subterrânea das seguintes maneiras (Figura 3.4):

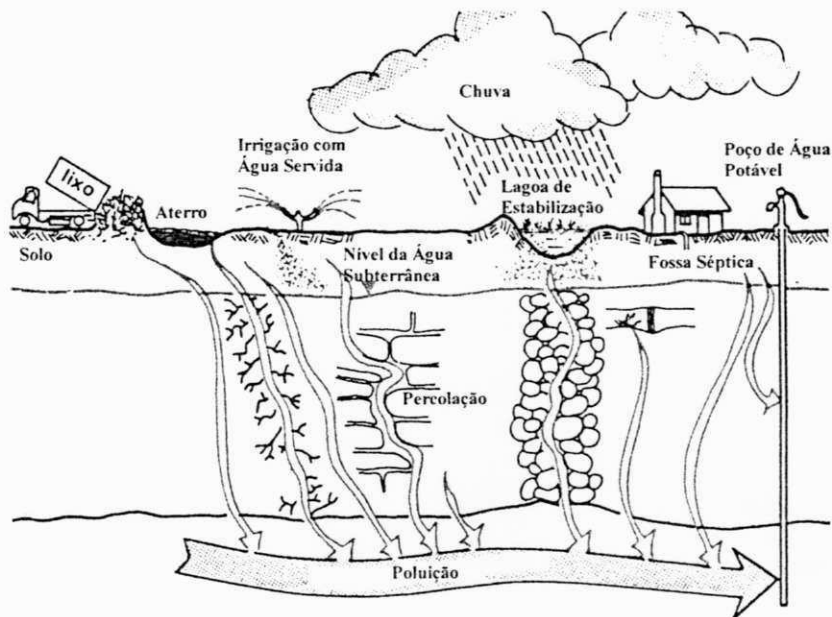


Figura 3.4 - Poluição de origem doméstica (Fonte: Silva, 1987)

- Chorumes de aterros sanitários;
- Acidentes com rompimentos de fossas sépticas ou de redes de esgotos.

Atividades Agrícolas (Figura 3.5) - a agricultura pode contaminar a água subterrânea através de:

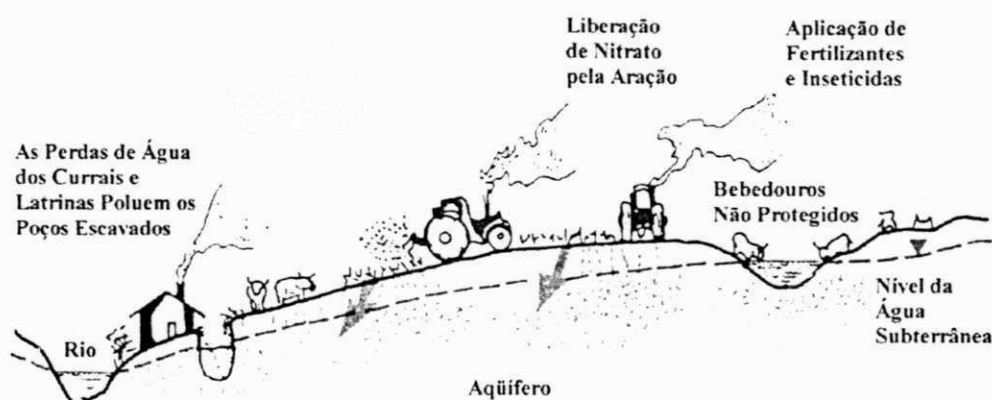


Figura 3.5 - Poluição de origem agrícola (Fonte: Silva, 1987)

- Solutos dissolvidos por chuva ou irrigação;
- Fertilizantes minerais, naturais etc.;
- Sais, herbicidas, pesticidas etc.

3.3 - Fontes de Contaminação da Água Subterrânea

De acordo com a classificação estabelecida pelo *Office of Technology Assessment* (OTA) do Congresso dos Estados Unidos, modificada por Fetter (1993), é possível distinguir as seguintes fontes de contaminação:

Fontes projetadas para recepção de substâncias:

- Fossas sépticas (águas residuais e esgotos domésticos);
- Poços de injeção (resíduos perigosos, escoamento superficial urbano, esgotos municipais);

- Aplicações no solo como fertilizantes [lodos de estações de tratamento, esterco de animais (currais, aviários etc.)];
- Nitrogênio, fósforo e metais pesados podem originar-se dessas fontes e contaminar as águas subterrâneas.

Fontes projetadas para armazenar, tratar ou receber substâncias:

- Aterros sanitários (lixões urbanos, restos de demolições, lodos de estações de tratamento, materiais tóxicos e resíduos perigosos de fundições ou indústrias);
- Valas clandestinas abertas (lixo doméstico queimado, cujas cinzas diluídas pelas chuvas, podem produzir contaminações da água subterrânea);
- Resíduos de mineração (Figura 3.6);

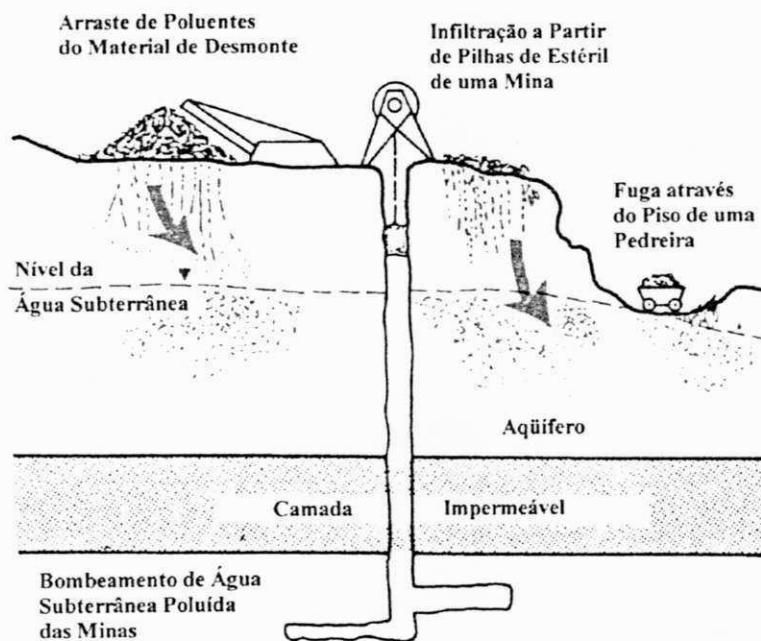


Figura 3.6 - Poluição originada na mineração (Fonte: Silva, 1987)

- Vazamentos de tanques de armazenamento (produtos de petróleo, químicos agrícolas e outros químicos).

Fontes projetadas para reter substâncias durante transporte:

- Vazamentos de oleodutos, gasodutos, coletores de esgotos;
- Acidentes com caminhões e trens condutores de produtos químicos.

Fontes produtoras de substâncias em virtude de outras atividades:

- Irrigação (percolação do excesso de água de irrigação até o nível freático, levando pesticidas e fertilizantes dissolvidos);
- Aplicações de pesticidas para controle de pragas (ervas daninhas, insetos, fungos etc.);
- Aplicações de fertilizantes (nitrogênio, fósforo, potássio) dos quais apenas o nitrogênio pode se constituir em contaminante;
- Escoamento superficial urbano (sólidos dissolvidos e em suspensão, oriundos das emissões dos veículos automotores, resíduos de óleos e graxas, fezes humanas e de animais);
- Percolação de poluentes atmosféricos (emissões de automóveis, fumaças de indústrias, incinerações etc.). Os poluentes incluem hidrocarbonetos, químicos orgânicos sintéticos, químicos orgânicos naturais, metais pesados, compostos de enxofre e de nitrogênio;
- Cemitérios (percolação da água até o nível freático, levando compostos orgânicos dissolvidos).

Fontes que podem atuar como condutores da água contaminada:

- Poços produtores (óleo, gás, energia geotérmica e água), nos quais os contaminantes podem ser introduzidos durante a perfuração;

- Poços mal construídos, com cimentações deficientes, e/ou com revestimentos corroídos, podem constituir-se em vias de contaminação de um aquífero por outro;
- Poços escavados (tipo amazonas), abandonados, podem ser usados como receptores de lixo.

Fontes naturais cuja descarga é criada pela atividade humana:

- Interações entre água superficial e subterrânea (indução da água de um rio contaminado em um aquífero);
- Lixiviação natural (minerais dissolvidos de rochas e solos em níveis que podem atingir de 10 a 100 g/L de sólidos totais dissolvidos);
- Intrusão de água do mar em aquíferos costeiros (avanço regional e ascensão do cone de água salgada pela base das estruturas de captação).

3.4 - Modos de Contaminação da Água Subterrânea

Nos aquíferos, devido à lenta circulação das águas subterrâneas, capacidade de absorção dos terrenos e pequeno tamanho dos espaços intra-granulares, uma contaminação pode levar muito tempo até manifestar-se claramente. O notável poder de depuração dos aquíferos, em relação a muitos contaminantes, e o grande volume de água que armazenam, fazem com que as contaminações extensas se manifestem muito lentamente e as contaminações localizadas somente apareçam depois de algum tempo e mesmo assim quando deslocadas para captações em exploração. Em outras palavras, os aquíferos são muito menos vulneráveis à poluição do que as águas superficiais. Mas, uma vez produzida a contaminação, a recuperação, dependendo do tipo de contaminante, pode levar muitos anos e até mesmo tornar-se economicamente inviável.

De um modo geral pode-se dizer que as águas subterrâneas podem sofrer contaminação direta, sem diluição, quando o poluente atinge diretamente o aquífero através de poços negros ou poços abandonados e/ou com deficiências construtivas e contaminação indireta, com diluição, quando o poluente atinge o aquífero depois de passar por alterações a partir do ponto de origem (Filho *at al.*, 1997). A seguir serão discutidas as formas mais usuais de contaminação da água subterrânea.

3.4.1 - Deposição de Resíduos Sólidos na Superfície do Solo

Principalmente nas regiões úmidas, o lixo enterrado em aterros sanitários está sujeito a produzir, sob o efeito das percolações dos excessos da água de chuva, um líquido contaminante que se denomina chorume. O TDS (Total de Sólidos Dissolvidos) do chorume além de ser bastante alto, pode ainda conter muitos contaminantes inorgânicos e orgânicos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Faixas de variação dos teores de substâncias contaminantes dissolvidas no chorume de aterros sanitários (Conama, 1999)

K ⁺	200-1000
Na ⁺	200-1200
Ca ²⁺	100-3000
Mg ²⁺	100-1500
Cl ⁻	300-3000
SO ₄ ²⁻	10-1000
Alcalinidade	500-10000
Fe (total)	1-1000
Mn	0,01-10
Cu	<10
Ni	0,01-1
Zn	0,1-100
Pb	<5
Hg	<0,2
NO ₃ ⁻	0,1-10
NH ₄ ⁻	10-1000
Carbono orgânico total dissolvido (COTD)	200-30000
Demanda química de oxigênio (DQO)	1000-90000
Sólidos totais dissolvidos (STD)	5000-40000
pH	4-8

Robertson et al. (1974) identificaram mais de 40 compostos orgânicos em águas subterrâneas contaminadas por chorumes oriundos de plásticos e outros materiais sólidos industriais, em um aquífero arenoso nos Estados Unidos. Muitos chorumes contêm substâncias tóxicas provenientes de resíduos industriais líquidos jogados em aterros sanitários. São muitos os exemplos de contaminações de aquíferos por aterros sanitários. Entre eles pode-se destacar os trabalhos de Gariand & Mosher (1975), Apgar & Satherthwaite (1975), Mackay *et al.* (1986), Freyberg (1986) e Roberts *et al.* (1986).

Em aterros sanitários ou em lixões situados sobre materiais permeáveis, como por exemplo, areias, cascalhos ou rochas fissuradas, a migração do chorume pode produzir, após algumas décadas, contaminação das águas subterrâneas ao longo de áreas muito maiores do que a ocupada pelos resíduos (Figura 3.7).

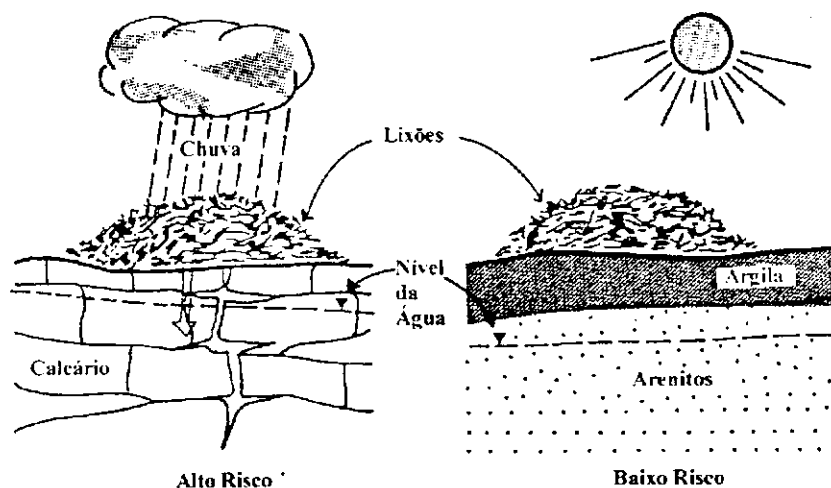


Figura 3.7 - Poluição causada pelo efeito da percolação da água da chuva nos aterros sanitários ou lixões. (Fonte: Silva, 1987)

3.4.2 - Lançamentos de Esgotos

Os esgotos são lançados sobre ou abaixo da superfície do solo de várias maneiras. O uso generalizado de fossas sépticas e drenos, não somente

contribui para que o esgoto filtrado alcance a superfície do terreno, como se constitui provavelmente numa das principais causas de contaminação da água subterrânea no mundo (Filho *et al.*, 1997).

Um contaminante oriundo de sistemas sépticos e presente na água subterrânea é o nitrato, considerado como um dos mais freqüentes. Geralmente é transportado com a água subterrânea e não sofre completa redução bioquímica para nitrogênio gasoso (N_2).

Outro problema associado com o lançamento de esgotos, tratados ou não, na superfície do terreno ou a pequena profundidade, é o de saber a que distância e a que velocidade bactérias patogênicas e vírus podem se mover em sistemas de fluxo subterrâneo. Esse problema é também crucial na delimitação de áreas de proteção de poços que exploram água subterrânea para abastecimento humano nas proximidades de rios contaminados. Quando as bactérias são transportadas com a água subterrânea no meio poroso, elas são removidas por filtração e absorção, de maneira que o seu avanço é muito retardado em relação à velocidade do fluxo advectivo. Em areias médias ou em materiais mais finos, organismos patogênicos e conformes somente conseguem penetrar alguns metros (Krone *et al.*, 1958). Estudos de campo todavia, mostraram que em aquíferos heterogêneos de areia ou cascalho, bactérias oriundas de esgotos podem ser transportadas por dezenas ou centenas de metros na água subterrânea (Krone *et al.*, 1957; Wesner & Baier, 1970).

Segundo Freeze & Cherry (1979) uma das mais sérias conseqüências do lançamento de esgotos no solo, através de fossas sépticas, foi a contaminação da água subterrânea por alkyl benzeno sulfonatos (ABS), que são substâncias não-biodegradáveis e que até meados dos anos 1960 eram os principais componentes dos detergentes de uso doméstico. Vários casos de contaminação de aquíferos freáticos pouco profundos nos Estados Unidos foram descritos por Perimutter *et al.* (1964).

3.4.3 - Atividades Agrícolas

O uso de fertilizantes e pesticidas nas atividades agrícolas é responsável pela degradação da qualidade da água subterrânea em muitas áreas de cultivo intenso. Nos países industrializados é mais freqüente o uso de fertilizantes inorgânicos, quimicamente manufaturados, enquanto que nos países em desenvolvimento geralmente empregam-se dejetos humanos ou de animais como fertilizantes orgânicos (Filho *et al.*, 1997).

Os três principais nutrientes exigidos pelas culturas são: nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P). As quantidades anuais aplicadas desses elementos variam muito de um lugar para outro, de acordo com as colheitas. Para o nitrogênio as aplicações variam na faixa de 100 a 500 kg/ha.ano (Freeze & Cherry, 1979). Como os fertilizantes são usados todos os anos, é de se esperar que em muitas áreas os excessos se infiltrem e alcancem o nível freático contaminando os aquíferos.

Dentre os fertilizantes o principal contaminante é o nitrogênio (N) na forma de nitrato (NO_3). O nitrato move-se com a água subterrânea e pode atingir extensas áreas. Concentrações superiores aos limites permissíveis para água potável são encontradas em muitas regiões agrícolas do mundo, como por exemplo na Inglaterra (Foster & Crease, 1972), Alemanha (Groba & Hahn, 1972) e Estados Unidos (Ayers & Branson, 1973; Spalding *et al.*, 1978; Hill, 1982; Flipse *et al.* 1984). Em áreas onde existem componentes verticais de fluxo a contaminação por nitrato pode atingir grandes profundidades. Por exemplo, a presença de nitrato em poços profundos (240 a 400 m) na Califórnia, aumentou aproximadamente de 1 mg/l em 1950, para uma faixa de 10-17 mg/l em 1962 (Broadbent, 1971).

3.5 - Características Hidráulicas das Fontes de Contaminação

A maioria das fontes de contaminação listadas no item 3.2 podem criar ou exibir um comportamento único na zona saturada. Este comportamento freqüentemente influencia a maneira na qual os contaminantes entram no aquífero e subseqüentemente são transportados pelo fluxo subterrâneo. De acordo com Freeze *et al.* (1993), tais comportamentos são descritos como:

A - Plumais imiscíveis flutuantes LNAPLs (substâncias menos densas que a água e não aquosas na fase líquida) (Figura 3.8a). Exemplo: derivados do petróleo.

- A pluma tende a forma-se na superfície do aquífero;
- A pluma é capaz de migrar na direção do gradiente de rebaixamento da superfície freática.

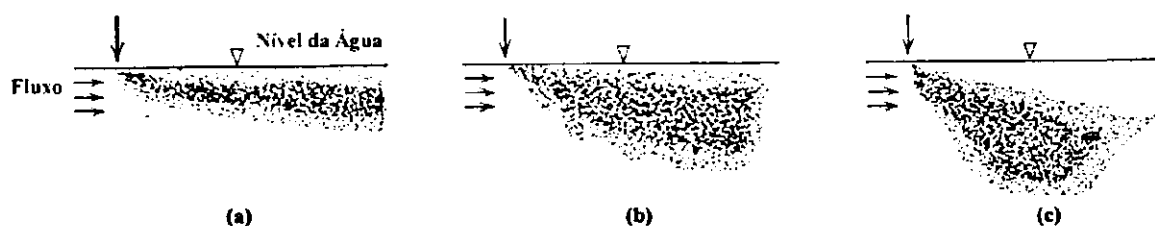


Figura 3.8 - Efeito da densidade na migração dos contaminantes em um campo uniforme de fluxo. (a) densidade aproximadamente maior do que a da água; (b) e (c) densidade maior do que a da água. (Fonte: Freeze and Cherry, 1979)

B - Plumais imiscíveis penetrantes DNAPLs (substâncias mais densas que a água e não aquosas na fase líquida) (Figura 3.8b e c). Exemplo: solventes.

- A pluma tende a direcionar-se para baixo no sentido da unidade impermeável, que poderá não coincidir com a direção do fluxo subterrâneo local ou regional;
- A captura da pluma é difícil, se não impossível.

Devido o efeito e o comportamento hidráulico das fontes do tipo A e B acima, serem problemas de fluxos multifásicos complicados, as análises matemáticas rigorosas não são comumente aplicadas a esses tipos de problemas. Assim sendo, os projetos de remediação são freqüentemente baseados na experiência e num julgamento hidráulico apoiado em modelos matemáticos simples de sistemas de fluxo.

3.6 - Propriedades dos Contaminantes

Uma vez que um contaminante entra em contato com a água subterrânea, diversas características específicas deste contaminante influenciam na sua capacidade de ser transportado pelo fluxo subterrâneo.

3.6.1 - Propriedades Químicas dos Contaminantes

Com relação a poluição da água subterrânea, a característica mais significativa do contaminante é a solubilidade. A solubilidade de um soluto é definida como a massa de soluto que se dissolverá em uma unidade de volume de solução sob condições específicas. A solubilidade define a máxima concentração possível que comumente ocorre na água subterrânea para um dado contaminante qualquer. É tipicamente expressa em unidades de $[M/L^3]$, onde M é a massa do soluto e L^3 é o volume da solução. A Tabela 2 lista a solubilidade dos contaminantes orgânicos mais comuns.

Tabela 3.2 - Solubilidade dos Compostos Orgânicos Comumente Encontrados em Locais de Vazamento de Combustíveis (Depois de Verschueren, 1983)^a

Componente	Solubilidade em Miligramas por litro, mg/l
Benzeno	1.780
Etil Benzeno	152
Cloridrato de Metileno	20.000
M-Xileno	NA ^b
O-Xileno	175
P-Xileno	198
Tolueno	515
Tricloroetileno	1.100
Cloridrato de Vinil	1.100

^a Solubilidade em função da temperatura. Para compostos na fase gasosa como o cloridrato de vinil, a solubilidade também é função da pressão parcial e total.

^b NA = Não avaliado.

Fonte - Corana, (1999)

3.6.2 - Propriedades Físicas dos Contaminantes

A densidade de um contaminante líquido imiscíveis determinará o seu comportamento ao alcançar o nível d'água. Os LNAPLs, líquidos imiscíveis com densidade menor do que a da água ($\rho_{\text{água}} = 1,0 \text{ g/cm}^3$), flutuarão. Os Hidrocarbonos são os LNAPLs mais comuns.

Os DNAPLs, líquidos imiscíveis com densidade maior do que a da água, irão posicionar-se no fundo do aquífero. Os solventes são os DNAPLs mais comuns.

A Tabela 3.3 lista a densidade do conjunto de compostos orgânicos listados na Tabela 3.2.

Tabela 3.3 – Densidade dos Compostos Orgânicos Encontrados na Tabela 2 (Depois de Verschueren, 1983).

Componente	Solubilidade em Miligramas por litro, mg/l
Benzeno	0,88
Etil Benzeno	0,87
Cloridrato de Metileno	1,33
M-Xileno	0,86
O-Xileno	0,88
P-Xileno	0,86
Tolueno	0,87
Tricloroetileno	1,46
Cloridrato de Vinil	0,91

Fonte – Conama, (1999).

3.7 - Princípio do Transporte de Contaminantes

Os contaminantes dissolvidos na água subterrânea são transportados por três processos: advecção, dispersão mecânica e difusão molecular. A dispersão mecânica e a difusão molecular são referidas coletivamente como dispersão hidrodinâmica. Todos os três processos ocorrem simultaneamente no fluxo subterrâneo (Freeze *et al.* 1993).

3.7.1 - Advecção dos Solutos Dissolvidos

A advecção é o movimento dos solutos dissolvidos no sentido do fluxo subterrâneo. Este tipo de movimento é um componente do processo de transporte total, que pode ser matematicamente explicado pelo fluxo paralelo ao da água subterrânea na direção do menor gradiente hidráulico, em um meio isotropico com uma velocidade igual a velocidade linear média do meio saturado (v)(Figura 3.9).

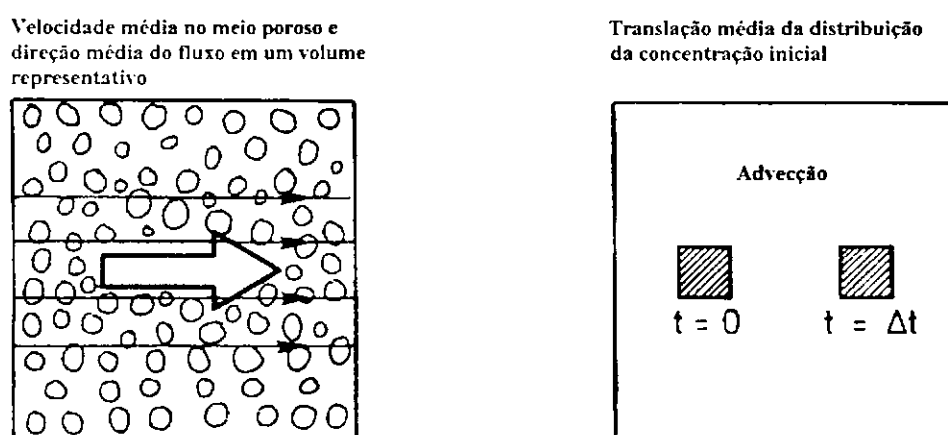


Figura 3.9 - Representação do transporte devido a advecção. (Fonte: Adaptado Kinzelbach, 1986)

3.7.2 - Dispersão e Difusão dos Solutos Dissolvidos

Os dois processos que constituem a dispersão hidrodinâmica são difusão e dispersão mecânica. Tais processos são geralmente secundários em importância, em relação ao processo advectivo, no contexto dos sistemas de captura e contenção dos contaminantes. A difusão molecular é o processo no qual os contaminantes dissolvidos movem-se das áreas de maior concentração para as de menor concentração em resposta a presença de um gradiente de concentração. A difusão pode ocorrer na presença ou na ausência do movimento da água subterrânea, por conseguinte, tal processo torna-se mais significativo em ambientes hidrogeológicos de baixa velocidade.

A dispersão mecânica é uma componente do transporte total resultante da trajetória que as partículas da água e do contaminante seguem ao fluírem através dos meios porosos e fraturados. A dispersão mecânica tende à espalhar a pluma de contaminante sobre uma área maior (tanto na direção paralela quanto na direção ortogonal ao gradiente hidráulico) do que a que seria ocupada se somente a advecção estivesse ocorrendo. Este espalhamento dilui as concentrações dos contaminantes, à medida que a pluma se move através do aquífero (Figura 3.10a e b).

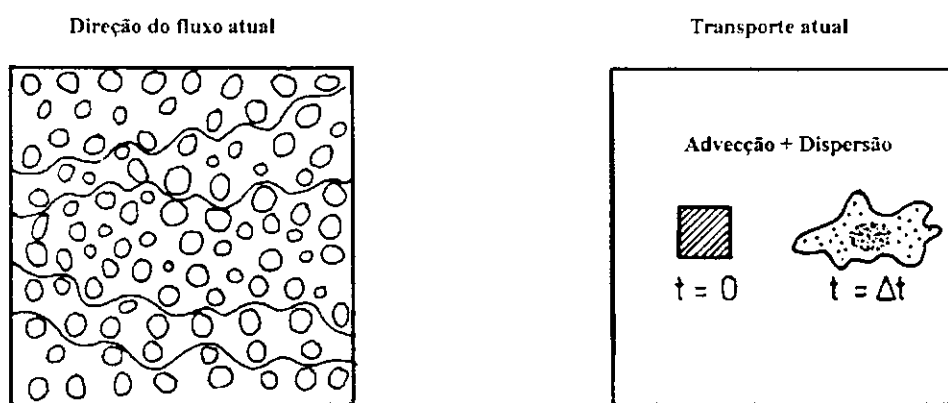


Figura 3.10a - Representação do transporte devido à advecção e à dispersão. (Fonte: Adaptado Kinzelbach, 1986)

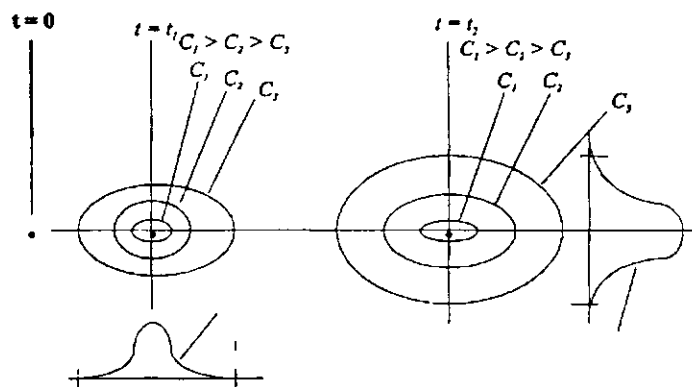


Figura 3.10b – Espalhamento de um traçador a partir de um ponto de injeção. (Fonte: Filho et al, 1997)

3.7.3 - Retardamento

Os solutos dissolvidos na água subterrânea estão sujeitos a vários processos naturais, através dos quais eles podem ser removidos. Podem, por exemplo, sofrer sorção para as superfícies dos grãos sólidos do aquífero, sorção para o carbono orgânico eventualmente presente no aquífero, sofrer biodegradação e participar de reações de oxidação e redução. Nos processos de sorção alguns solutos movem-se mais lentamente do que a própria água subterrânea que os transporta. Esse efeito é conhecido como retardamento (Filho *et al.*, 1997). Os outros processos, embora reduzam a concentração do soluto na pluma, não reduzem o seu movimento.

3.7.4 - Equação Geral do Transporte de Contaminantes

A difusão total da concentração de um contaminante como função $C(x_i, t)$ é dada do ponto de vista de Euler como:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla c = \nabla \cdot (D \nabla c) + q_s \quad (3.11)$$

onde o primeiro termo refere-se a taxa de mudança na concentração da partícula com o tempo e é chamado de taxa local de mudança. O segundo é chamado taxa convectiva de mudança na concentração, uma vez que expressa a contribuição do movimento da partícula, como variável do campo de concentração. Segundo Bear (1979), os termos na equação 2.10 são: t [T], tempo; c [$M_{\text{solute}}/M_{\text{fluido}}$], concentração do soluto, e M , massa; v [L/T], velocidade média do fluido no meio poroso; q_s [T^{-1}], termo que define o potencial do soluto; D [L^2/T], tensor de dispersão hidrodinâmica definido como $D_{ij} = D_{ij}^* + \alpha_T |v| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) v_i v_j / |v|$, δ_{ij} , símbolo Kronecker; D^* [L^2/T], coeficiente de difusão molecular; e α_L, α_T são respectivamente as dispersividades longitudinal e transversais (Koch, 1998).

Capítulo IV

Contenção Hidráulica dos Contaminantes

4.1 - Introdução

Ao se projetar sistemas de remediação para as plumas de contaminantes, uma abordagem hidráulica se faz necessária para determinar as taxas de fluxo e localização apropriada dos poços de extração que irão realizar a contenção hidráulica dos contaminantes. Quando um aquífero fica contaminado os poluentes, nele dissolvidos, posicionam-se geralmente apenas na sua parte superior. Sob tais circunstâncias, o sistema hidráulico mais econômico de contenção é aquele que captura somente a água subterrânea rasa do sistema, permitindo, assim, que a água limpa passe por baixo do sistema de extração nas profundidades maiores. Para tal fim, é comum o emprego de poços verticais e horizontais.

4.2 - Cálculo do Rebaixamento em Torno de um Sumidouro

O rebaixamento em torno de um sumidouro, como um poço horizontal ou um poço vertical, pode ser determinado representado o rebaixamento por um número infinito de pontos de sumidouros, cada um com uma vazão infinitesimal, que somadas resultarão na vazão total do poço. O rebaixamento para cada sumidouro é determinado e o rebaixamento total é obtido pela

integração ao longo do comprimento do sumidouro. O primeiro passo é determinar o rebaixamento do sumidouro sob estado permanente no aquífero homogêneo, anisotrópico e infinitamente espesso.

Considerando o aquífero anisotrópico com permeabilidade hidráulica horizontal, $K = K_x = K_y$, e uma permeabilidade hidráulica vertical, K_z , com uma taxa de anisotropia, $A = K_z/K$ [Harr (1962) e Strack (1989)] o sistema anisotrópico pode ser transformado em um sistema isotrópico equivalente, alongando o eixo vertical z pelo inverso da raiz quadrada da taxa de anisotropia e atribuindo uma permeabilidade hidráulica isotrópica igual a $K(A)^{1/2}$. Estando, o sistema transformado, indicado pelo asterisco,

$$z^* = \frac{z}{(A)^{1/2}} \quad (4.1a)$$

$$K^* = K(A)^{1/2} \quad (4.1b)$$

Em um aquífero isotrópico, a equação de rebaixamento do ponto de sumidouro em condições permanentes pode ser obtida da lei de Darcy. Assumindo um aquífero infinitamente espesso (Figura 4.1), o fluxo para o ponto (x_p, y_p, z_p^*) através de uma estrutura esférica de raio r_D e espessura $-dr$ (com dr tido como negativo, r_D decresce de infinito a zero):

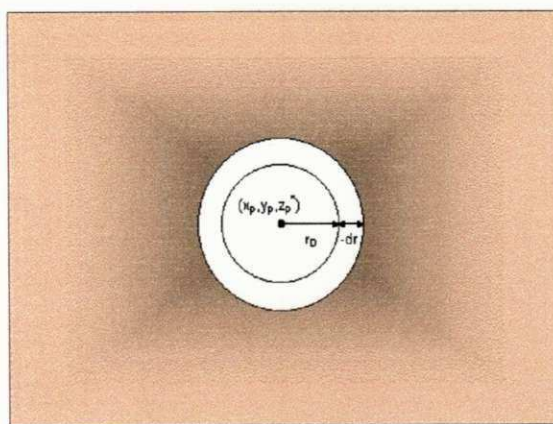


Figura 4.1 – Representação de um aquífero infinitamente espesso, com fluxo para o ponto (x_p, y_p, z_p^*) através de uma estrutura esférica de raio r_D e espessura $-dr$, de acordo com a lei de Darcy.

$$Q = 4\pi r_D^2 \cdot K^* \cdot \left(\frac{-ds}{dr_D} \right) \quad (4.2)$$

Nesta equação, Q é a taxa de fluxo, e s representa o rebaixamento. Rearranjando os termos dados, tem-se:

$$-ds = \frac{Q}{4\pi K^*} \cdot \frac{dr_D}{r_D^2} \quad (4.3)$$

Integrando de infinito até r :

$$-[s(r) - s(\infty)] = \frac{Q}{4\pi K^*} \left[-\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\infty}\right) \right] \quad (4.4)$$

e, como o rebaixamento em infinito é nulo, chega-se à:

$$s = \frac{Q}{4\pi K^* r} \quad (4.5)$$

Para um ponto (x, y, z^*) localizado a uma distância r de (x_p, y_p, z_p^*) , obtém-se:

$$s = \frac{Q}{4\pi K^*} \cdot \frac{1}{[(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2 + (z^*-z_p^*)^2]^{1/2}} \quad (4.6)$$

Em termos de um aquífero anisotrópico:

$$s = \frac{Q}{4\pi K(A)^{1/2}} \cdot \frac{1}{[(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2 + (z-z_p)^2/A]^{1/2}} \quad (4.7)$$

4.3 - Uso de Poços Horizontais

A tecnologia dos poços horizontais foi originalmente desenvolvida para o uso na produção de petróleo, entretanto recentemente (no final da década de 80) foi adaptada para as aplicações no campo da remediação ambiental. Na indústria da remediação ambiental, os poços horizontais apresentam características e vantagens únicas que proporcionam o aumento da eficácia das tecnologias usadas na limpeza da água subterrânea, se compararmos com as técnicas tradicionais desenvolvidas usando poços verticais. Até o momento, é estimado que mais de 300 poços horizontais foram instalados com o propósito de remediação ambiental, com o número de instalações duplicando a cada ano desde 1994 (Wilson, 1996).

4.3.1 - Instalação de Poços Horizontais

A instalação de um poço horizontal é feita inicialmente através de uma perfuração na direção vertical até que se atinja a profundidade desejada para o poço (Figura 4.2).

- Como exemplos de materiais usados no na construção do poço temos:

- Fibras de plástico reforçadas;
- PVC;
- Polietileno de Alta Densidade.

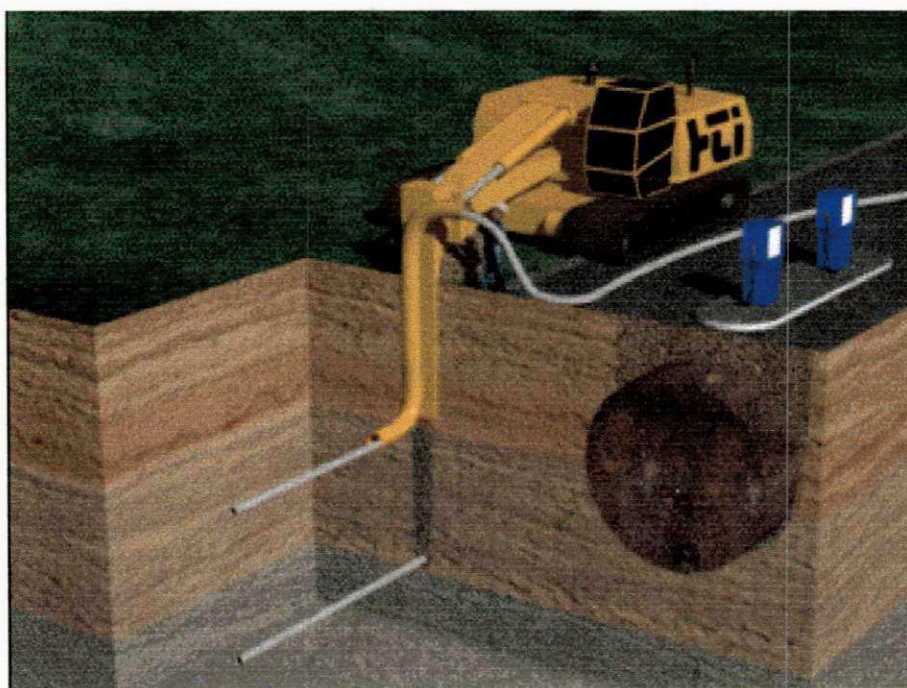


Figura 4.2 – Instalação de um Poço Horizontal (Fonte: www.horizontal.com)

4.3.2 - Perfil da Tecnologia de Poços Horizontais

Até o momento são poucas as informações que tratam de resultados específicos do uso de poços horizontais, direcionado para a remediação da contaminação água subterrânea. O HAZWRAP – Hazardous Waste Remedial Actions Program – em 1995, apresentou um resumo de alguns resultados da

aplicação da tecnologia dos poços horizontais em área próximas ao Rio Savannah, na Carolina do Sul, EUA.

- Um aumento de 5 vezes na taxa de remoção dos contaminantes foi constatado, se comparado com o uso de poços verticais.
- Seria necessário o uso de uma bateria de 11 poços verticais, com uma vazão individual de aproximadamente $108 \text{ m}^3/\text{h}$, para que se obtivesse o mesmo resultado.

De acordo com Miller (1996), as vantagens do uso da tecnologia de poços horizontais são:

- Eficácia – permite um melhor acesso ou contato com uma pluma linear (lateralmente extensa e verticalmente restrita) (Figura 4.3);

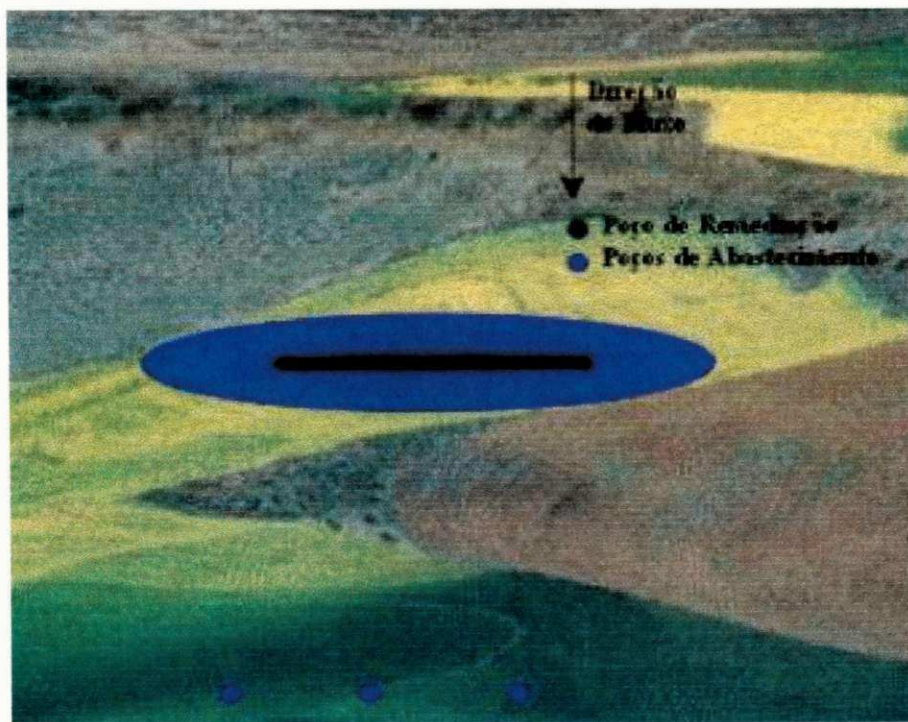


Figura 4.3 – Representação da Eficácia de um Poço Horizontal

- Independência – não são limitados por obstáculos na superfície do solo, nem pela espessura do aquífero (Figura 4.4);

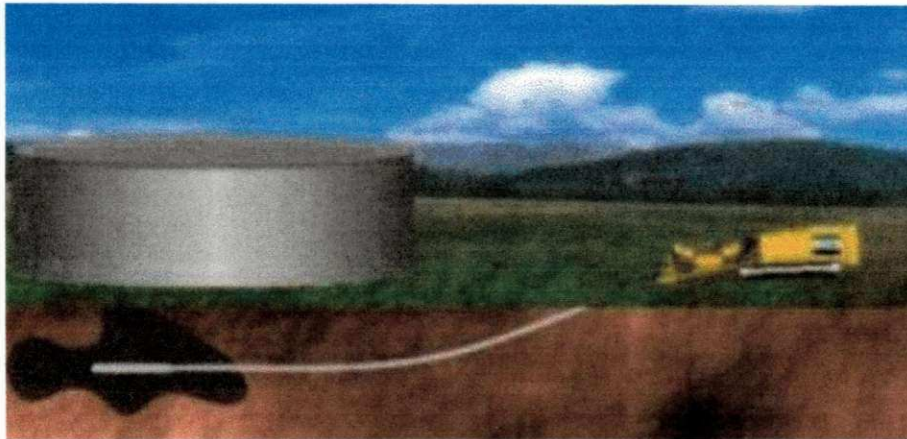


Figura 4.4 - Representativa da Independência do Poço Horizontal (Fonte: www.horizontalwell.com)

- Confiança – minimiza as “zonas mortas” que comumente ocorrem entre poços verticais;
- Integração – sua instalação traz o mínimo de distúrbio para a região receptora, e sua operação requer um número mínimo de pessoas (Figura 4.5);



Figura 4.5 - Poço horizontal funcionando no meio de uma floresta (Fonte: www.horizontal.com)

- Eficiência – desde que a transmissividade horizontal geralmente excede a transmissividade vertical em um aquífero, os poços horizontais extraem a água subterrânea mais eficientemente que os poços verticais.

- Limitações da tecnologia de poços horizontais:

- Profundidade da Instalação – o limite da profundidade das instalações dos poços horizontais varia de aproximadamente 12 a 15 m [Miller, (1996) and Cade, (1997)].
- Tecnologia – apesar de já bastante difundida nos países desenvolvidos, a técnica de implantação e manutenção dos poços horizontais é uma tecnologia nova que ainda precisa ser difundida e estudada em nosso país.
- Profundidade da Zona de Captura – a profundidade da zona de captura é limitada pela permeabilidade vertical, a qual é geralmente significativamente menor do que permeabilidade horizontal (Miller, 1996).
- Custo – geralmente o custo de implantação de um poço horizontal é cerca de 2 a 3 vezes mais que o de um poço vertical (Cade, 1997).

4.3.3 - Cálculo do Rebaixamento em um Poço Horizontal

A Figura 4.6 mostra um poço horizontal de largura, L , localizado a uma profundidade, d , abaixo do topo de um aquífero de espessura b , posicionado em $x = y = 0$ e paralelo ao eixo de y . A medida que o aquífero livre tem seus limites na parte superior e inferior, a teoria das imagens é usada para transforma-lo em um aquífero infinitamente espesso. A Figura 4.6 mostra as imagens obtidas pela reflexão sucessiva do poço atual e imagem subsequente dos poços entre os dois limites citados acima. A geometria resultante das

imagens dos poços é simétrica para ambos os limites, assim assegurando a condição de sem-fluxo em cada margem.

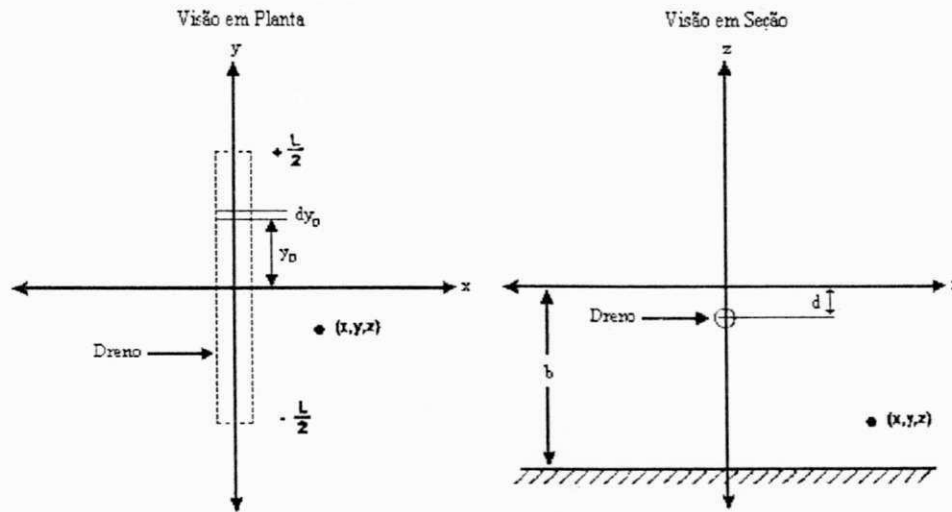


Figura 4.6 - Visão em planta e em seção do poço horizontal

O rebaixamento próximo ao poço é calculado pela integração da equação do ponto de sumidouro. Para um poço como o mostrado na Figura 4.6, com uma elevação arbitrária, Z , o fluxo infinitesimal para o segmento de largura dy_D e de posição y_D é:

$$dq = (Q/L) \cdot dy_D \quad (4.8)$$

Onde Q é o fluxo total alcançando o dreno. Aplicando a equação (4.7), a equação resultante do rebaixamento infinitesimal para o ponto (x, y, z) é:

$$s = \frac{(Q/L)dy_D}{4\pi K(A)^{1/2}} \cdot \frac{1}{[x^2 + (y - y_D)^2 + \frac{(z - Z)^2}{A}]^{1/2}} \quad (4.9)$$

Integrando em relação à y_D ao longo do comprimento do poço de $-L/2$ a $L/2$ produz:

$$s = \frac{Q}{4\pi KL(A)^{1/2}} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{dy_D}{[x^2 + (y - y_D)^2 + \frac{(z - Z)^2}{A}]^{1/2}}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi KL(A)^{1/2}} \ln \frac{[x^2 + (y + \frac{L}{2})^2 + \frac{(z-Z)^2}{A}]^{1/2} + y + \frac{L}{2}}{[x^2 + (y - \frac{L}{2})^2 + \frac{(z-Z)^2}{A}]^{1/2} + y - \frac{L}{2}} \quad (4.10)$$

O princípio da superposição é usado para determinar o rebaixamento total causado pelo poço atual e todos os poços imagens. O posicionamento da coordenada z do poço atual, e dos poços imagens na Figura 4.7 são -d, d, -2b + d, -2b-d, 2b-d, 2b+d, etc. Estes valores são substituídos na equação (4.10). Além disso, um termo de gradiente é adicionado ao já existente para um gradiente prévio de magnitude I na direção θ em relação ao eixo x. O termo assim se torna como uma medida da distância do nível d'água, abaixo do nível não bombeado na origem do sistema de coordenadas e é expresso por:

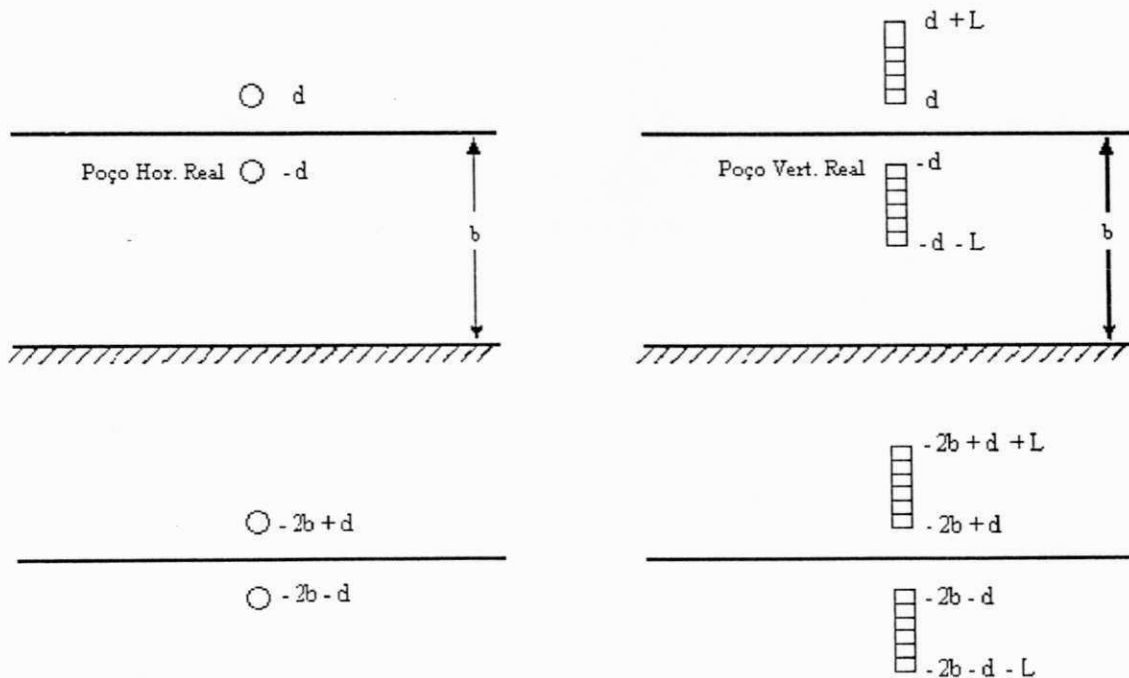


Figura 4.7 - Teoria das imagens a ser usada na obtenção de um aquífero infinitamente espesso

A carga e o rebaixamento devem ter o mesmo nível de referência. A escolha da carga estática na origem do sistema de coordenadas é arbitrária, e feita exclusivamente de acordo com a conveniência do pesquisador.

$$s = Ix \cos \theta + Iy \sin \theta + \frac{Q}{4\pi KL(A)^{1/2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\ln \frac{[x^2 + (y + \frac{L}{2})^2 + \frac{(z - 2nb - d)^2}{A}]^{1/2} + y + \frac{L}{2}}{[x^2 + (y - \frac{L}{2})^2 + \frac{(z - 2nb - d)^2}{A}]^{1/2} + y - \frac{L}{2}} \right. \\ \left. + \ln \frac{[x^2 + (y + \frac{L}{2})^2 + \frac{(z - 2nb + d)^2}{A}]^{1/2} + y + \frac{L}{2}}{[x^2 + (y - \frac{L}{2})^2 + \frac{(z - 2nb + d)^2}{A}]^{1/2} + y - \frac{L}{2}} \right] \quad (4.11)$$

Resumindo os termos na equação (4.11), s = distância do nível d'água para (x, y, z) abaixo do nível estático d'água medido na origem do sistema de coordenadas; I = gradiente regional; θ = direção do gradiente, medida do eixo x positivo; Q = taxa de fluxo; K = permeabilidade hidráulica horizontal; A = taxa de anisotropia = K_z/K (K_z = permeabilidade hidráulica vertical), L = comprimento do dreno; x, y, z = coordenadas dos pontos onde s é calculado; b = espessura do aquífero; e d = profundidade do poço abaixo de topo do aquífero.

As suposições principais feitas no desenvolvendo desta equação são as seguintes: (1) o aquífero é homogêneo e anisotrópico ou isotrópico. (2) O aquífero é confinado ou livre e s é pequeno em relação a espessura do aquífero ($s \ll b$). (3) o fluxo é constante por unidade de comprimento do poço.

Na equação (4.11), os termos que correspondem a $n = 0$ representam o poço e sua imagem refletida através do topo do aquífero. Os termos correspondentes aos valores negativos de n representam os pares das imagens abaixo do aquífero, considerando que os termos correspondentes aos valores positivos de n representam os pares de imagem acima do aquífero, como mostrado na figura 4.7.

4.4 - Uso de Poços Verticais

Bastante difundida em todo o mundo para o abastecimento público, a tecnologia para extração de água subterrânea, com o emprego de poços verticais, é bastante conhecida e comumente usada na descontaminação de aquíferos.

4.4.1 - Perfil da Tecnologia de Poços Verticais

A análise do fluxo vertical, nos poços parcialmente penetrantes foi tratada anteriormente tanto para fluxo de água (Philip e Molha, 1992) quanto para o fluxo de ar na zona Vadosa, zona parcialmente saturada, (Shan, Falta, e Javandel, 1992). Nos parágrafos abaixo são apresentadas algumas vantagens e desvantagens do uso de poços verticais na descontaminação de aquíferos.

- Vantagens da tecnologia de poços verticais:

- Tecnologia – técnica de extração bastante difundida e estudada;
- Custo – o custo de implantação de um poço vertical é de duas a três vezes menor do que o de um poço horizontal;
- Profundidade da zona de captura – a profundidade da zona de captura sofre uma maior influência da componente vertical do fluxo subterrânea, cuja intensidade é dependente da profundidade do poço parcialmente penetrante.

- Limitações da tecnologia de poços verticais:

- Eficácia – como geralmente as plumas de contaminantes tendem a se espalhar na direção horizontal, na maioria das vezes os sistemas de remediação são constituídos por uma bateria de poços verticais (Figura 4.8).

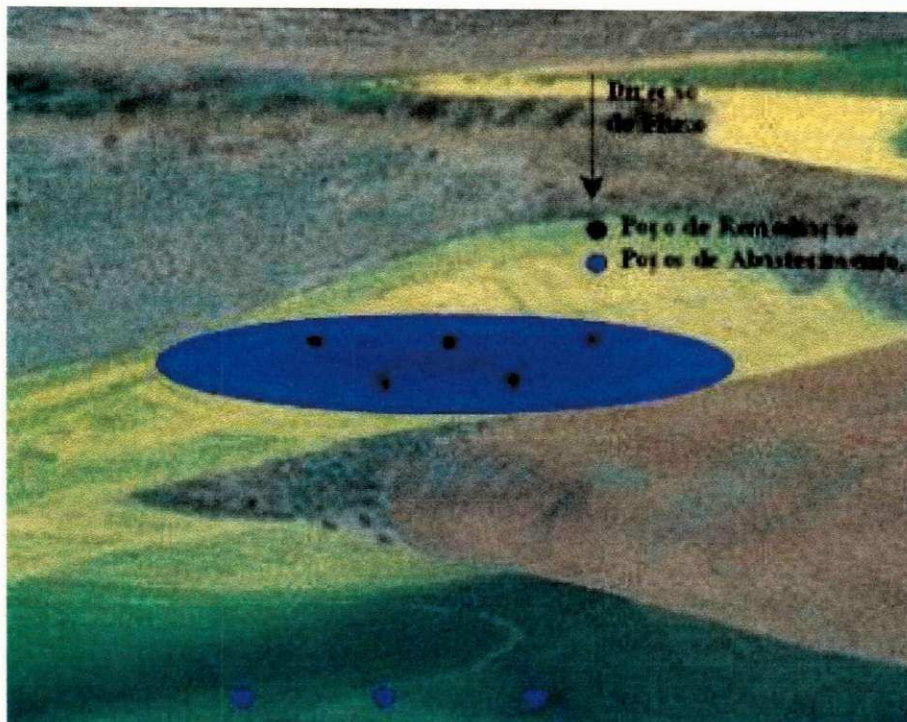


Figura 4.8 - Representação da eficácia de uma bateria de poços verticais

- Implantação – a profundidade dos poços verticais é limitada pela espessura do aquífero;
- Interferência entre poços – é comum ocorrerem as chamadas “zonas mortas” entre poços verticais.

4.4.2 - Cálculo do Rebaixamento em um Poço Vertical

A equação para o rebaixamento em torno de um sistema de poços de extração parcialmente penetrantes pode ser derivada de maneira similar a de um poço horizontal (item 4.3.3).

A figura 4.9 mostra a entrada para o poço de extração i^{th} (i^{esimo} , de um sistema múltiplo de poços), localizados em (x_i, y_i) , bombeando a uma taxa Q_i , e aberto no aquífero entre d_i e $d_i + L_i$ abaixo do topo do aquífero.

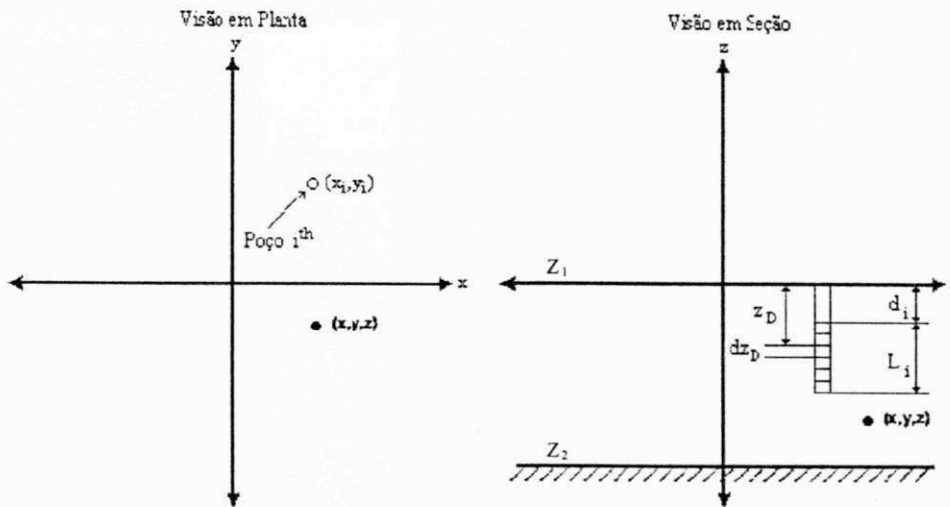


Figura 4.9 - Visão em Planta e em Seção do Poço Vertical.

Usando a equação do ponto de sumidouro, o rebaixamento infinitesimal, no ponto (x, y, z), causado pelo fluxo em uma área infinitesimal do poço de largura dz_D no ponto z_D é:

$$s = \frac{(Q_i/L_i)}{4\pi K(A)^{1/2}} \cdot \frac{dz_D}{[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_D)^2/A]^{1/2}} \tag{4.12}$$

Para o poço aberto no aquífero entre a profundidade arbitrária de Z₁ (fundo) e Z₂ (topo), o rebaixamento total é obtido pela integração da equação (3.12) de Z₁ a Z₂ como a seguir:

$$s = \frac{Q_i}{4\pi KL_i(A)^{1/2}} \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{dz}{z_1 [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + \frac{(z-Z)^2}{A}]^{1/2}}$$

$$s = \frac{Q_i}{4\pi KL_i} \ln \frac{[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + \frac{(z-Z_1)^2}{A}]^{1/2} + \frac{z-Z_1}{(A)^{1/2}}}{[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + \frac{(z-Z_2)^2}{A}]^{1/2} + \frac{z-Z_2}{(A)^{1/2}}} \tag{4.13}$$

A figura 4.7 mostra os poços imagens estabelecidos simulando o limite superior e inferior do aquífero, junto com as coordenadas z dos topos e dos fundos das seções de entrada para cada poço. Estas coordenadas são substituídas na equação (4.13) para cada imagem. Para um sistema de M poços

de extração, o princípio da superposição é aplicado para somar as componentes dos rebaixamentos para todo sistema de poços de extração e todas as suas respectivas imagens. Finalmente, os termos do gradiente hidráulico podem ser incorporados, como pode ser visto a seguir,

$$s = Ix \cos \theta + Iy \sin \theta + \sum_{i=1}^M \frac{Q_i}{4\pi K L_i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\ln \frac{[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + \frac{(z-2nb-d_i+L_i)^2}{A}]^{1/2} + \frac{z-2nb-d_i+L_i}{(A)^{1/2}}}{[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + \frac{(z-2nb-d_i)^2}{A}]^{1/2} + \frac{z-2nb-d_i}{(A)^{1/2}}} + \ln \frac{[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + \frac{(z-2nb-d_i)^2}{A}]^{1/2} + \frac{z-2nb-d_i}{(A)^{1/2}}}{[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + \frac{(z-2nb-d_i-L_i)^2}{A}]^{1/2} + \frac{z-2nb-d_i-L_i}{(A)^{1/2}}} \right] \quad (4.14)$$

Resumindo os termos desta equação, s = distância do nível d'água para (x, y, z) abaixo do nível estático d'água medido na origem do sistema de coordenada; I = magnitude do gradiente regional; θ = direção do gradiente, medida do eixo x positivo; Q_i = taxa de fluxo do i^{th} poço; K = permeabilidade hidráulica horizontal; A = taxa de anisotropia = K_z/K (K_z = permeabilidade hidráulica vertical); x, y, z = coordenada dos pontos onde s é calculado; b = espessura do aquífero; M = número de poços; x_i, y_i = coordenadas do i^{th} poço; d_i = distância do topo do aquífero para o topo da entrada do i^{th} poço; e L_i = comprimento de entrada no i^{th} poço.

Os termos que correspondem a $n = 0$ representam o poço de extração real e uma imagem refletida através do topo do aquífero. Os termos correspondentes aos valores negativos de n representam os pares das imagens abaixo do aquífero, considerando que os termos correspondentes aos valores positivos de n representam os pares de imagem acima do aquífero.

Capítulo V

Área de Estudo

5.1 – Localização da Bacia do Rio Piranhas

O aquífero estudado é um aquífero livre pertence à bacia do rio piranhas. A bacia hidrográfica do rio Piranhas ocupa uma posição centro-oriental, nos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte (Figura 5.1). O seu alto e médio cursos formam uma figura aproximadamente retangular, com lados que medem 810 x 120 Km (RADAMBRASIL, 1981) o lado maior na direção Nordeste, enquanto que o baixo curso se assemelha a um triângulo.



Figura 5.1 – Mapa das bacias hidrográficas do estado da Paraíba

A bacia do rio Piranhas abrange uma área de 38.400 Km², apresentando vários tipos de configuração e drenagem, destacando-se entre elas a dentrítica, a mais comum; a paralela, principalmente no baixo curso; a angulada, no alto curso; além de outras como a colinear. O rio Piranhas está posicionado de forma simétrica na sua bacia, sendo a Área de sua margem direita até o limite com o divisor de água bem maior que a Área de sua margem esquerda. Como seus tributários principais destacam-se os rios Pindoba, Garganta, Seriado, Sabugo, Espinharas, e Painço como os maiores afluentes da margem direita, enquanto que o rio do Peixe, Riacho dos Cavalos, rio Pariu e o riacho Umbuzeiro contituem-se em alguns dos afluentes principais da margem esquerda. São rios de caráter transitório, que ocorrem unicamente na época de chuvas, enquanto que o próprio Rio Piranhas torna-se perene próximo ao litoral sofrendo inclusive influência das marés (RADAMBRASIL, 1981).

5.2 – Formação Geológica da Bacia do Rio Piranhas

A vertente do Alto Piranhas se compõe principalmente de granito gnaisse e xisto micáceo Pré-crambrianos. Graças às falhas, erosão e aluviação, formaram-se durante o período Cretáceo grandes áreas de depósito aluvial ao longo dos rios Piranhas e Peixe. Estes formam as atuais camadas de argila sobre terraços de arenito e folhelhos que se estendem de áreas próximas a Antenor Navarro e Souza até Acauá, onde o rio volta a penetrar num vale profundo ou “canyon” cortando a rocha mais dura.

As formações de terras podem ser agrupadas em três divisões gerais: (1) velhos solos de terraço formados durante o Cretáceo; (2) formações de rochas cristalinas mais antigas de granito e gnaisse; (3) aluviões jovens ou recentes depositados em virtude de recente sintrusões (post-crestáceas) e formação de terra (RADAMBRASIL, 1981).

5.3 – Aspectos Hidrológicos e Climáticos da Bacia do Rio Piranhas

Originalmente o curso do Piranhas para o Atlântico era intermitente e extremamente irregular, em virtude das grandes variações de chuvas, que constituem a única fonte de suas águas. Com o propósito de combater as secas que ocorriam com períodos de retorno variando entre 3 a 5 anos, foram construídos numerosos açudes e barragens em toda a bacia de drenagem do rio.

O clima só pode ser classificado de tropical no que diz respeito à adaptabilidade e crescimento estacionário das plantas. A influência desértica de seca e as brisas criam uma umidade relativa entre 53 e 72%, com uma média de temperatura que varia de 18° à 35°C (70° a 90° F); a temperatura máxima é inferior a 38°, e a mínima chega à 13°C. As variações mensais não vão além de 5°. Isto permite uma estação contínua de plantio e a prática do cultivo mais de uma cultura, nos locais onde existe irrigação. A precipitação na Bacia do Piranhas é inteiramente devida às chuvas que costumam ocorrer no período de 3 meses, de fevereiro a abril. A bacia hidrográfica do Rio Piranhas contribui com um volume médio de 66.452 m³ /Km²/ano, totalizando 2.551.275.000 m³/ano (RADAMBRASIL, 1981).

5.4 – Potencial Hidrogeológico da Bacia do Rio Piranhas

Os depósitos aluvionares na bacia do Rio Piranhas ocupam uma área de 1.100 km², distribuídos com maior extensão de área no baixo curso, sendo que a área menor está localizada no alto curso e pequena faixa no médio curso. Litologicamente, as aluviões se constituem de areia fina à grossas, ocasionalmente conglomeráticas, argilas, siltes e matéria orgânica. A análise matricial de determinação numérica avaliou como médio potencial hidrogeológico para esta formação (RADAMBRASIL, 1981).

5.5 – Aluvião Estudado

Para o propósito deste estudo, foi selecionado um aquífero adjacente ao rio Piranhas, no município de São Bento, PB. O município de São Bento está localizado na Micro Região Homogênea 89 de Catolé do Rocha, (Figura 5.2).

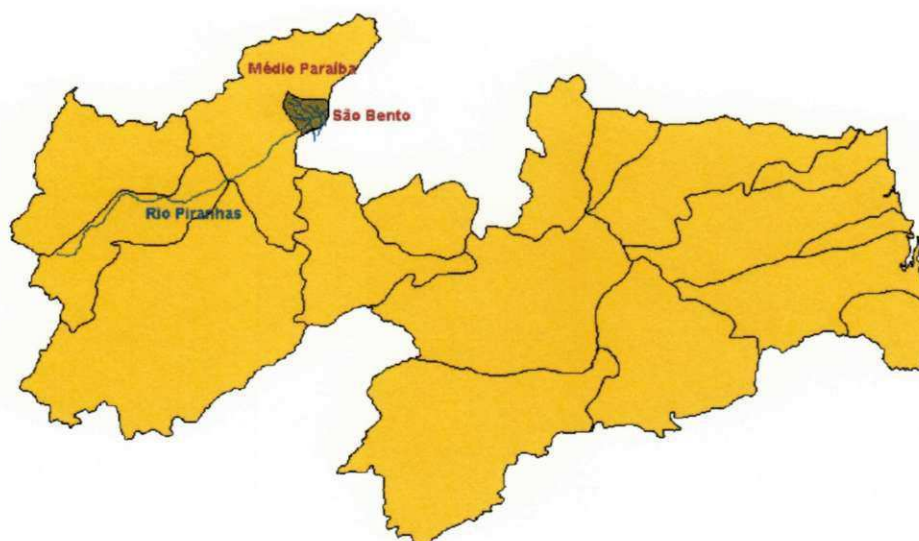


Figura 5.2 – Localização do Município de São Bento

O Resultado das pesquisas feitas pela IARHA – Informação para Análise dos Recursos Hídricos e do Meio Ambiente – em 1991, no município de São Bento é apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultado da Pesquisa Feita pela IARHA, em São Bento, PB

São Bento				
UF	Paraíba			
Latitude	06°29'10" S			
Longitude	37°27'57" W			
Ano de Averiguação	1991			
Área (km ²)	256,70			
População	Homem	Mulher	Total	
	Urbana	8.149	8.686	16.835
	Rural	3.983	3.776	7.759
	Total	12.132	12.462	24.594

Fonte: IARHA, 1998

Capítulo VI

Dados da Pesquisa

6.1 – Origem dos Dados

A CDRM – Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba, através da divisão de hidrogeologia e Sondagens, foi o órgão responsável pelas sondagens, projeto e construção do sistema de extração da água subterrânea existente no município de São Bento.

As pesquisas preliminares, com base nas quais foram projetados e construídos os poços, foram desenvolvidas através de sondagens em 2”, executadas nos depósitos aluvionares existentes nas margens do Rio Piranhas, próximo a cidade (Figura 6.1).

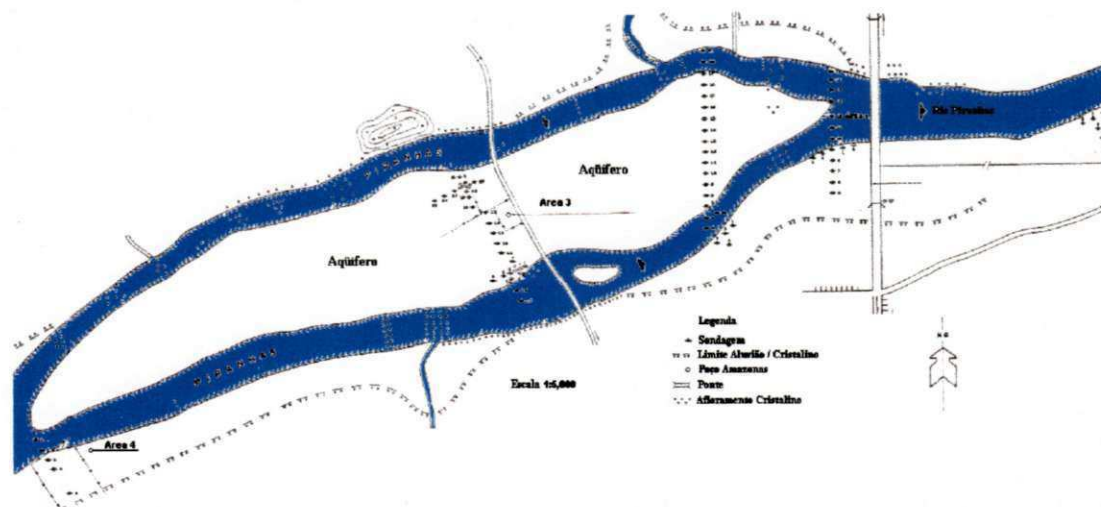


Figura 6.1 - Localização do aluvial do rio Piranhas no município de São Bento

No início da construção dos poços, outubro de 1985, a demanda de água de projeto, calculada pela CAGEPA, Companhia de Água e Esgoto da Paraíba, foi de 70 m³/h, 16 horas por dia. Ficou definido que apenas três ou quatro poços eram suficientes para atender a tal demanda. O primeiro poço foi construído na área 1. Após a sua implantação, a vazão de demanda foi redefinida para 150 m³/h e sendo assim a locação das outras captações teve que ser redefinida, implicando em novas pesquisas através de sondagens em 2", em áreas aluvionares com espessura saturada superior a 2,0 m e próximas as fontes de recarga do Rio Piranhas, visto que para o atendimento da nova demanda os poços foram projetados para vazões de exploração da ordem de 40 m³/h.

Com o aumento da demanda, a locação dos dois poços subsequentes teve que ser refeita, razão pela qual foram executadas mais 14 sondagens na área nº 3, próximo a fonte de recarga, sendo 6 de reconhecimento e 8 de detalhamento (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 – Sondagens para Reconhecimento e Detalhamento - Área nº 3

Área	Sondagens		Metros de Perfuração	Espessura do Aquífero
	Reconhecimento	Detalhamento		
III	31	-	5,65	2,35
	32	-	5,26	1,35
	33	-	5,20	1,90
	34	-	4,90	1,90
	35	-	5,20	1,30
	36	-	5,90	1,35
	-	31 - A	6,00	1,65
	-	32 - B	6,30	1,95
	-	33 - C	6,80	2,50
	-	34 - D	2,00	1,90
	-	35 - E	5,60	1,65
	-	36 - F	5,67	1,55
	-	37 - G	6,70	2,50
	-	38 - H	6,00	1,70
Total	6	8	77,18	-

Fonte: CDRM (São Bento, Abastecimento de Água – Captações Concluídas – Relatório Final, 1986).

Analisando a Tabela 6.1 e as descrições e perfis litológicos em anexo (Anexo 5), constata-se que somente na sondagem de reconhecimento nº. 31, encontrou-se uma espessura saturada superior a 2,0 metros. Feito o

detalhamento, ficou provado que o substrato impermeável local é irregular, inviabilizando a locação dos poços restantes naquela área.

Reestudados os elementos preliminares da área IV (Figura 6.2), que fica a 1,4 Km, a montante do primeiro poço, na margem direita do Rio Piranhas, constatou-se que a sondagem nº 3 possui 2,50 m de espessura saturada. Assim sendo, o primeiro poço foi definido na ilha, na área de captação da CAGEPA, e os outros dois ficaram localizados a 1,4 Km a montante do primeiro, na margem direita do rio (Figura 6.1).

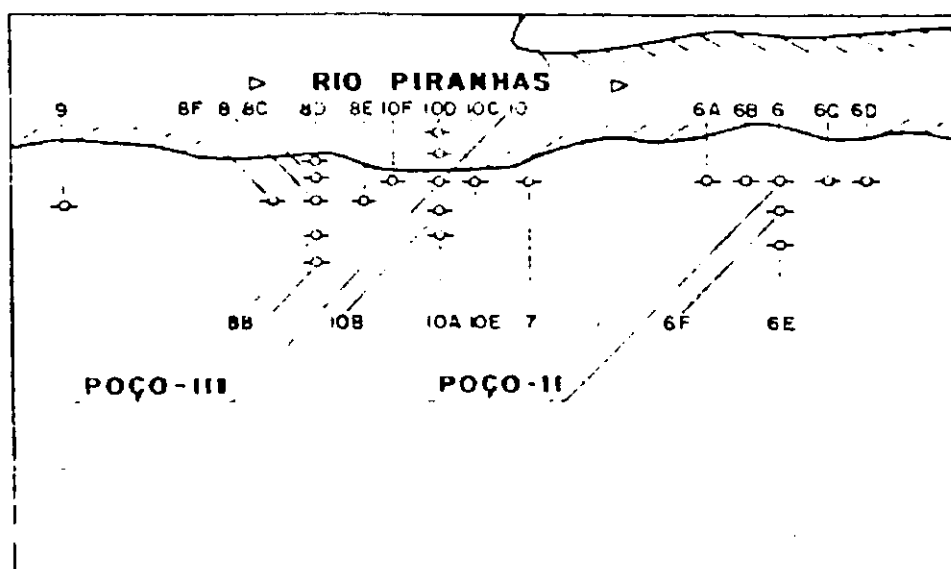


Figura 6.2 – Sondagens Complementares e Localização dos Poços II e III na Área 4. (Fonte: CDRM "São Bento, Abastecimento de Água – Captações Concluídas – Relatório Final", 1986).

Paralelamente a margem do rio e nas imediações desta, foram executadas 6 sondagens de reconhecimento e 26 de detalhamento, obtendo-se os seguintes resultados (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 – Sondagens para Reconhecimento e Detalhamento - Área nº 4

Área	Sondagens		Metros de Perfuração	Espessura do Aquífero	Poço
	Reconhecimento	Detalhamento			
IV	6	-	6,10	3,00	I
	7	-	5,85	2,95	
	8	-	6,40	2,75	
	9	-	4,95	1,25	
	10	-	6,00	2,55	
	11	-	5,22	2,00	
	-	6 - A	5,05	2,90	II
	-	6 - B	5,30	3,03	
	-	6 - C	5,65	2,98	
	-	6 - D	5,20	3,00	
	-	6 - E	5,60	2,90	
	-	6 - F	5,60	3,00	
	-	8 - A	6,30	2,00	III
	-	8 - B	6,13	2,35	
	-	8 - C	6,65	2,00	
	-	8 - D	5,70	1,60	
	-	8 - E	5,90	1,35	
	-	8 - F	6,00	2,10	
	-	10 - A	5,80	2,57	
	-	10 - B	6,10	2,70	
	-	10 - C	3,60	2,55	
	-	10 - D	3,40	2,45	
	-	10 - E	6,30	2,00	IV
	-	10 - F	5,30	1,40	
	-	11 - A	6,25	2,20	
	-	11 - B	5,50	2,30	
	-	11 - C	5,55	2,00	
	-	11 - D	5,35	2,55	
-	11 - E	5,70	2,60		
-	11 - F	5,45	2,50		
-	11 - G	4,35	1,60		
-	11 - H	3,40	1,70		
Total	6	11	175,65	-	-

Fonte: CDRM (São Bento, Abastecimento de Água – Captações Concluídas – Relatório Final, 1986)

Analisando a Tabela 6.2, bem como as descrições e perfis litológicos, (Anexo 5), constata-se que os resultados obtidos nas sondagens de reconhecimento nº, 6, 7, 8, 10 e 11 são satisfatórios para localização das captações previstas. No entanto, pelas características dos poços a serem construídos, foram executadas sondagens de detalhamento, obtendo-se resultados finais positivos nos pontos 6, 10 e 11.

6.2 – Características dos Poços de Abastecimento Instalados

De acordo com o estabelecido nas pesquisas da CDRM, foram construídos 3 poços do tipo “Amazonas”, apresentando as seguintes características:

Poço n° 1

Ficou localizado na ilha, no setor da captação da CAGEPA, coincidindo com a sondagem n° 20 da área n° 3, As características finais são:

-Profundidade	10,50 m (da laje coberta)
-Vazão	16,00 m ³ /h
- Espessura do Aquífero	2,00 m

Poço n° 2

Ficou localizado na área n° 4, sondagem n° 6, margem direita do rio Piranhas e no mesmo lado da cidade, Possui as seguintes características construtivas:

-Profundidade	9,50 m (da laje coberta)
-Vazão	40,00 m ³ /h
- Espessura do Aquífero	2,20 m

Poço n° 3

Construído no local da sondagem n° 10, área n° 4, 40,0 m a montante do poço n° 2, Ficou com as seguintes características básicas:

-Profundidade	9,55 m (da laje coberta)
---------------	--------------------------

-Vazão	36,00 m ³ /h
- Espessura do Aquífero	2,30 m

6.3 – Teste de Aquífero e Parâmetros Hidrodinâmicos da Área de Estudo

Para avaliação da capacidade de produção dos poços e dos aquíferos foram realizados bombeamentos retirando-se vazões diferentes em etapas distintas. Observaram-se os rebaixamentos do lençol freático nos piezômetros previamente construídos nas proximidades dos poços definidos, em ambas as áreas. As vazões foram extraídas e os volumes foram em recipientes de 220 litros, e os rebaixamentos identificados com medidores elétricos (Tabela 6,3).

Tabela 6.3 – Teste de Produção/Aquífero – Poço nº 1, Área 3

Etapas	Poço Bombeando						Poço de Observação					
	n _E (m)	n _D (m)	Q (m ³ /h)	S _w (m)	Q/S _w (m ³ /hm)	t (h)	Piez. (m)	Dist. (m)	n _E (m)	n _D (m)	S _w (m)	B (m)
1°	5,04	6,39	33,00	1,35	24,40	24	1	3	4,125	5,200	1,169	2,90
							2	6	4,075	5,250	1,165	2,85
							3	24	4,510	4,560	0,050	2,36
2°	5,07	5,29	8,79	0,22	39,00	8	1	3	4,035	4,255	0,220	1,90
							2	6	4,095	4,275	0,180	2,63
							3	24	4,520	4,520	0,000	2,36
3°	5,08	5,44	14,40	0,30	40,00	8	1	3	4,055	4,385	0,330	2,90
							2	6	4,100	3,395	0,200	2,85
							3	24	-	-	-	-

Fonte: CDRM (São Bento, Abastecimento de Água – Captações Concluídas – Relatório Final, 1986)

Sendo n_E = nível estático, n_D = nível dinâmico, Q = vazão, s_w = rebaixamento do poço, t = tempo, Piez. = piezômetro, Dist. = distância e B = espessura saturada.

Conforme mostra a Tabela 6.3, foram realizados apenas três etapas de testes. Somente estes elementos são satisfatórios para avaliação da capacidade de produção dos poços. Os rebaixamentos registrados nos piezômetros mais próximos estão em consonância com os valores obtidos no próprio poço

bombeado, com pequenas diferenças, muito embora estes resultados estejam influenciados pela pequena distância destes para a unidade bombeada. Estes valores refletem a eficiência hidráulica do sistema, com perda de carga reduzida.

A medida do nível d'água em cada etapa de teste é relativa à boca do poço, nas respectivas fases de realização (Tabela 6.4).

Tabela 6.4 – Teste de Produção – Poço nº 3, Área 4

Etapas	n_E (m)	n_D (m)	Q (m ³ /h)	S_w (m)	Q/ S_w (m ³ /hm)	t (h)	Rebaixamento Poço 2 - 40 m
1º	3,00	3,410	80,8	0,410	197,70	4	0,1200
2º	3,02	3,239	40,0	0,234	178,50	22	0,0800
3º	2,88	3,016	20,9	0,139	153,67	4	0,0450

Fonte: CDRM (São Bento, Abastecimento de Água – Captações Concluídas – Relatório Final, 1986).

No projeto inicial, para o dimensionamento hidráulico dos poços foram utilizados valores estimados de; $T=0,003 \text{ m}^2/\text{s}$ e $K=0,0015 \text{ m/s}$, para um aquífero com espessura saturada média de 2,0 metros, fornecidos pelas pesquisas com sondagens em 2". Na obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos definitivos dos aquíferos livres a serem captados, foi levado em conta os efeitos provocados pela drenagem gravitacional, onde segundo PRICKETT e outros, a transmissividade varia com a redução da espessura do aquífero.

O resultado médio da transmissividade encontrada para a área 4, está elevado pela duplicação da espessura do aquífero em função da elevação do nível do rio. Os valores reais certamente se reduzirão na mesma proporção com a redução da espessura saturada do aquífero, nos períodos de estiagens, permanecendo entretanto imutável os valores da permeabilidade (K) que não dependem da espessura do aquífero como mostra a Tabela 6.5. Os valores dos parâmetros hidrodinâmicos foram calculados para os poços nº 3 e nº 4, usando os valores mostrados na as Tabelas 6.3 e 6.4.

Em se tratando de um aquífero livre com recarga (rio Piranhas), as condições de exploração dos poços, para todas as situações, foram calculadas

segundo, a Teoria das Imagens, auxiliada pela equação de DUPUIT. Como a espessura saturada é pequena, de apenas 2 metros, nos períodos de escassez pluviométrica, foi estabelecido o rebaixamento máximo de exploração em 1,0 m, que corresponde a 50 % da espessura saturada nas condições mais pessimista.

Tabela 6.5 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero em Estudo

Poço	Elementos Definidos												Vazões (m ³ /hm)	
	K m/s.10 ⁻³	h ₀ M	h _w m	r _i m	r _e m	a _n m	n n ^o	ln -	pd m	a m ²	l m	V _e M/s.10 ⁻³	Pos.	Perm.
1	2,0	2,0	1,0	114	1,60	4,00	4,26	0,31	0,31	53	16	1,6	15,92	15,11
2	2,7	2,0	1,0	17	2,60	4,29	1,88	0,31	0,31	53	42,8	1,6	48,70	40,59
3	2,7	2,0	1,0	12	2,71	4,80	1,48	0,31	0,31	53	38,4	1,6	61,86	36,34

Fonte: CDRM (São Bento, Abastecimento de Água – Captações Concluídas – Relatório Final, 1986)

Sendo K = permeabilidade hidráulica, h₀ = espessura do aquífero, h_w = carga sobre o coletor, r_i = raio de influência, r_e = raio equivalente = $0,8a_n \cdot n^2 / 4$, a_n = comprimento médio dos ramais filtrantes, n = número de ramais, ln = logaritmo, πd = π·diâmetro dos filtros, V_e = velocidade da água no filtro/pré-filtro, l = total de filtros, a área aberta, vazão de produção possível = $Q = \pi K \cdot (h_0^2 - h_w^2) / \ln \frac{r_i}{r_e}$ e vazão de produção permissível = $Q = \pi d \cdot a \cdot V_e \cdot l$.

O Parecer Técnico Final dos parâmetros hidrodinâmicos da área n^o 4, mostraram que o valor da permeabilidade hidráulica (K) é de $2,7 \times 10^{-3}$, e o da espessura saturada média, da ordem de 2,0 m.

6.4 - Qualidade das Águas

Durante os ensaios de bombeamento, em cada unidade construída, foram coletadas amostras d'água para ser feita a análise físico-química. As determinações foram realizadas pelo laboratório do DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas), regional de Campina Grande, segundo os valores definidos pela ABNT, as águas analisadas se enquadram nos padrões de potabilidade admitidos para o consumo humano.

6.4.1 - Agressividade e Incrustabilidade

A determinação da agressividade da incrustabilidade (Anexo 5), segundo Hoover-Langelier, permitem identificar o pH de equilíbrio da água em função da temperatura, resíduo seco, concentração de cálcio e alcalinidade de bicarbonatos.

O cálculo do índice de estabilidade de Ryznar, foi feito usando a equação abaixo:

$$\text{IER} = 2 \text{pH}_e - \text{pH} \quad (6.1)$$

sendo, IER = índice de estabilidade de Ryznar, pH_e = pH de equilíbrio pH = pH da água analisada, Para os três poços foram obtidos os seguintes resultados abaixo:

Poço n° 1

$$\text{IER} = 7,85$$

Poço n° 2

$$\text{IER} = 8,9$$

Poço n° 3

$$\text{IER} = 8,4$$

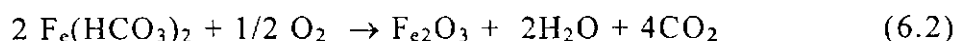
Os valores acima definidos enquadram as águas do município de São Bento quase no final da faixa de fracamente corrosiva, passando para muito corrosiva (CDRM - São Bento, Abastecimento de Água - Captações Concluídas - Relatório Final, 1986).

6.4.2 - Aeração Diferencial

A água subterrânea ao sair da formação aquífera e entrar em contato com o ar, por dissolução simples, se reestabelece um novo equilíbrio químico entre os minerais dissolvidos. Existindo bicarbonato de ferro na fase original da água, $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$, imediatamente se forma o ambiente propício para o surgimento das chamadas Bactérias de Ferro, aeróbicas, como por exemplo as do gênero *Gallionella Ferrugínea*. Essas se desenvolvem nas seguintes condições:

- Temperatura: $0^\circ - 40^\circ$, sendo a faixa ótima $6^\circ - 25^\circ\text{C}$;
- pH: 5,5 - 8,2, sendo o melhor 6,5 (CDRM - São Bento, Abastecimento de Água - Captações Concluídas - Relatório Final, 1986).

Exemplificando com uma água contendo bicarbonato de sódio de ferro, solúvel, tem-se a reação acelerada pelas bactérias de ferro:



Desta forma, as bactérias, por oxidação transformam o Fe^{++} , dissolvido na água, em $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$, insolúvel e inaceitável para o consumo humano quando a concentração assume valor superior a 0,30 ppm. Essa situação existindo, a tendência é se observar o aumento da concentração do Fe_2O_3 , que a olho nu, deixa a água com coloração avermelhada, onde os primeiros sinais serão vistos na ponta dos tubos drenos que sobressai ao interior do poço, sob a forma de uma massa amorfa.

6.5 - Conclusões do Relatório Final da CDRM

O relatório Final da CDRM (São Bento, Abastecimento de Água - Captações Concluídas - Relatório Final, 1986) me sua conclusão, descreve que os resultados obtidos com a definição de três poços coletores do tipo

"Amazônas" com ponteiros radiais, construídos pela CDRM nos aquíferos aluviais do rio Piranhas, próximo à cidade de São Bento, permitem com segurança afirmar as seguintes informações:

- A demanda por água requerida pela cidade, da ordem de 150 m³/h, 16 horas por dia, será parcialmente atendida com aproximadamente 92 m³/h, usando-se as unidades até então construídas;
- Não há restrições de qualidade físico-química da água para o consumo humano;
- Na área 4, onde foram instalados os poços n^o 2 e n^o 3, poderão ser construídos mais dois ou três poços, cujas viabilidades dependerão de novos levantamentos com sondagens em 2".

Capítulo VII

Modelo Matemático e Programas Utilizados

7.1 - Introdução

Este capítulo descreve o modelo matemático usado por Wang e Anderson (1982) para solucionar a equação de Poisson em um domínio de fluxo bidimensional vertical. Foram atribuídos valores distintos de permeabilidade para o meio e para o(s) poço(s), e, portanto o sistema foi tratado como sendo heterogêneo. Os programas usados foram codificados na linguagem Pascal e foi usado o Método Interativo de Gauss-Seidel como critério de convergência para as iterações. Empregou-se basicamente dois tipos de programas. O primeiro tipo foi usado para representar o domínio da área selecionada com as condições impostas de Dirichlet e Neumann, e solucionar as equações lineares parciais de segunda ordem utilizando o Método das Diferenças Finitas. Usou-se como dados de entrada as características hidráulicas do aquífero aluvial de São Bento (citadas no capítulo VI) e como medidas de contenção hidráulica as mencionadas no capítulo IV, resultado como saída, arquivos do tipo Phi.dat e Psi.dat. Após então, tais arquivos foram usados como arquivos de entrada para o programa ISONOVO5, empregado para a obtenção da representação gráfica das linhas de fluxo.

7.2 - Equação de Fluxo dos Poços em (x,y)

A recarga oriunda das precipitações e a descarga dos poços são exemplos de fontes distribuídas e pontos de sumidouros de água subterrânea, respectivamente. A adição ou o rebaixamento da água subterrânea, em um dado sistema, indica que a taxa do volume de saída de fluxo por unidade de volume do aquífero, não é nula, e portanto, a equação de Poisson é a equação governante, expressa de forma analítica como:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = -\frac{R(x,y)}{T} \quad (7.1)$$

ou, em termos de diferenças finitas, como:

$$H(I,J) = [H(I-1,J)+H(I+1,J)+H(I,J-1)+H(I,J+1)+DX \cdot DY \cdot R/T]/4 \quad (7.2)$$

onde Dx é o espaço entre os nós $\Delta x = \Delta y$, $R(x,y)$ = volume de água adicionado ou retirado do aquífero, por unidade de tempo por unidade de área do aquífero para um volume infinitesimal em torno do ponto (x,y) e T = transmissividade do aquífero.

7.2.1 - Conceito de Zonas de Captura

O projeto de sistemas destinados ao controle de migração de uma pluma de contaminantes é baseado no conceito das zonas de captura.

O conceito de zona de captura é melhor explicado para condições de fluxo permanente, em um aquífero confinado horizontal. Considerando uma pequena porção do aquífero, com um gradiente regional como o mostrado na Figura 7.1.1, e a direção ortogonal do fluxo regional como a mostrado na Figura 7.1.2. E assumindo que haja um bombeamento durante um tempo suficiente para que se atinja as condições de fluxo permanente. O rebaixamento do cone será desenvolvido em um campo de cargas hidráulicas como o mostrado na Figura 7.1.3 e as linhas de fluxo associadas serão de

acordo com o esquema mostrado na Figura 7.1.4. A água contida dentro da área delimitada pela zona de captura irá entrar dentro do poço.

A zona de captura associada com um poço de extração é definida como a porção do aquífero que contém água subterrânea que eventualmente será capturada ou descarregada pelo poço. Isto não inclui a área inteira das cargas perturbadas, a menos que a velocidade do sistema de fluxo natural seja zero.

O uso do conceito de zona de captura no projeto de remediação fica claro a partir da Figura 7.1.4. A Figura 7.2 mostra a perturbação das linhas de fluxo devido à existência de um poço injetor. Dada a geometria da pluma de contaminantes, o objetivo no projeto de um sistema de controle para a migração da pluma é estabelecido para um conjunto de poços que criem uma zona de captura que englobe a pluma inteiramente. É importante enfatizar que o conceito de zona de captura é um conceito puramente hidráulico.

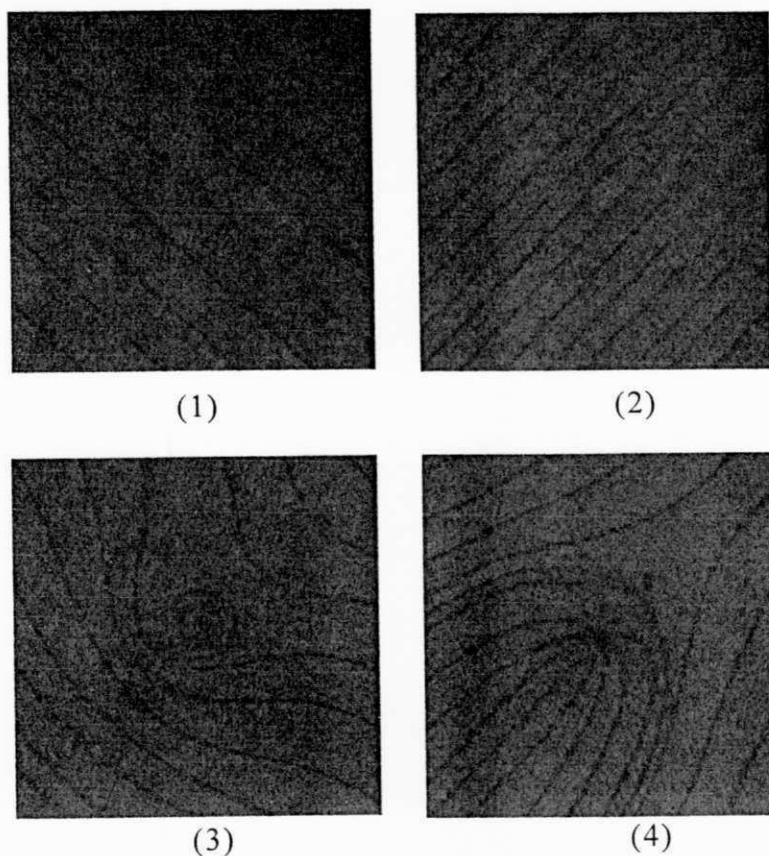


Figura 7.1 – Conceito de zona de captura

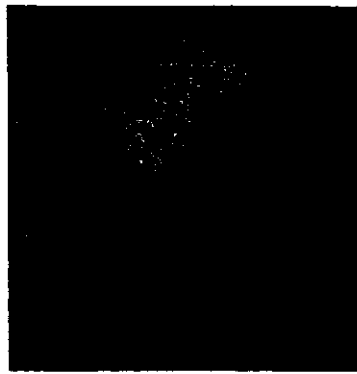


Figura 7.2 - Perturbação nas linhas de fluxo decorrente da presença de um poço injetor

7.3 - Princípio da Refração Aplicado para os Poços Verticais e Horizontais

Quando em um aquífero as linhas de fluxo atravessam uma fronteira geológica, entre duas formações com valores diferentes de permeabilidade hidráulica, ocorre a refração destas linhas. Considerando o tubo de fluxo mostrado na Figura 7.3, onde o fluxo ocorre de um meio com permeabilidade K_1 para um meio com permeabilidade K_2 , sendo $K_1 > K_2$.

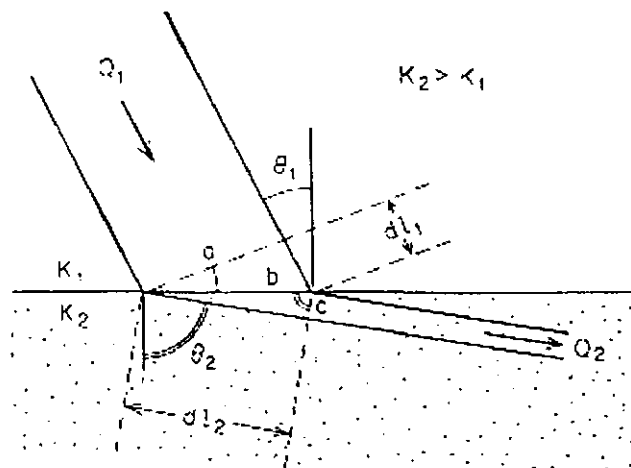


Figura 7.3 - Refração das linhas de fluxo em uma fronteira geológica

O tubo de fluxo tem unidade de profundidade perpendicular com a página, e os ângulos e distâncias conforme indicado na Figura 7.3. Para o fluxo permanente, a vazão de entrada Q_1 deve ser igual à vazão de saída Q_2 ; ou pela Lei de Darcy:

$$K_1 a \frac{dh_1}{dl_1} = K_2 c \frac{dh_2}{dl_2} \quad (7.3)$$

onde dh_1 é a carga infinitesimal através da distância dl_1 e dh_2 é a carga infinitesimal através da distância dl_2 . De fato dl_1 e dl_2 representam uma aproximação para duas linhas equipotenciais iguais, com $dh_1 = dh_2$; e tendo $a = b \cdot \cos \theta_1$ e $c = b \cdot \cos \theta_2$. Notando que $b/dl_1 = 1/\sin \theta_1$ e $b/dl_2 = 1/\sin \theta_2$, a equação 7.3 pode ser escrita como abaixo:

$$K_1 \frac{\cos \theta_1}{\sin \theta_1} = K_2 \frac{\cos \theta_2}{\sin \theta_2} \quad (7.4)$$

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} \quad (7.5)$$

A equação 7.5 constitui a Lei da Tangente para a refração das linhas de fluxo da água subterrânea na fronteira geológica de um meio heterogêneo.

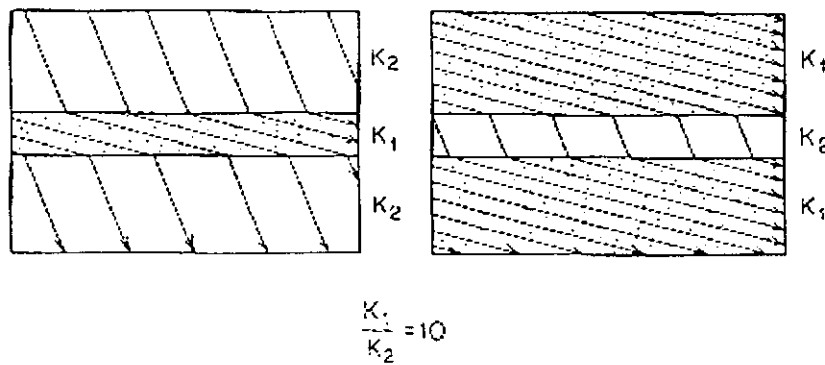


Figura 7.4 - Refração das linhas de fluxo em um sistema de camadas com permeabilidades K_1 e K_2

7.4 - Representação do Domínio de Fluxo Subterrâneo em um Aquífero Retangular Livre

A Figura 7.5 representa a seção transversal de um domínio de fluxo adimensional limitado de um lado por um divisor topográfico e de outro por um grande rio, o qual é uma área de descarga subterrânea e com isso torna-se

uma outra divisa do fluxo subterrâneo regional. O aquífero é suposto ser homogêneo, isotrópico e repousa sob uma rocha impermeável.

Considerando-se, primeiramente as condições de contorno, temos dos lados esquerdo e direito as divisas de água subterrânea que foram representadas matematicamente como impermeáveis, com o fluxo nas suas proximidades sendo paralelo. Embora não haja uma barreira física, uma divisa de água subterrânea tem o mesmo efeito de uma barreira, pois a água subterrânea não passa através dela. A água subterrânea a direita do fundo do vale descarrega no ponto A, e a água subterrânea em qualquer lado do divisor topográfico escoa para longe do ponto B. Nas proximidades do limite inferior do aquífero as linhas equipotenciais são perpendiculares, pois o embasamento impermeável rochoso forma uma barreira física para o fluxo. O limite superior do modelo matemático é uma linha horizontal AB' mesmo para o nível d'água do sistema físico fictício acima de AB'. Na verdade o domínio do problema matemático é uma aproximação para a forma da região saturada de fluxo. Ao longo do limite AB', a carga é tida como sendo igual a altura do nível d'água, e a configuração do nível d'água é considerada como sendo uma linha reta.

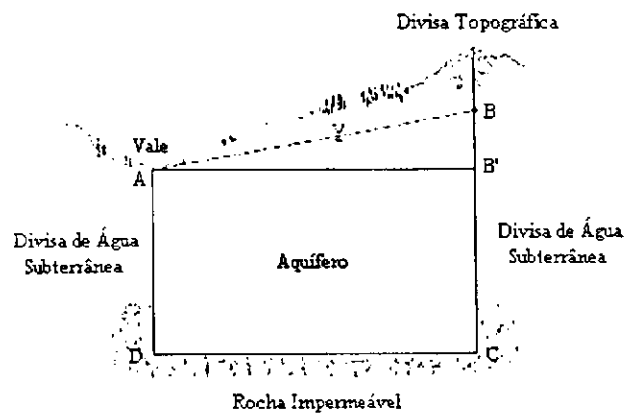


Figura 7.5 - Esboço do limites bidimensionais do sistema de fluxo regional subterrâneo

As condições de contorno para o domínio representado na Figura 7.5 são mostradas na Figura 7.6. O limite posicionado em $y = y_0$ para x variando de 0 à s . A distribuição das cargas ao longo deste limite foi assumida linear. A equação para uma variação linear cada $h(0, y_0) = y_0$ foi dada na forma $h(x, y_0)$

$= cx + y_0$ para $0 \leq x \leq s$, onde c é a declividade do nível d'água. As especificações, acima citadas, de carga hidráulica ao longo do limite superior do aquífero são chamadas de condições de contorno de Dirichlet.

Nas outras condições de contorno onde existem limites com ausência de fluxo, a Lei de Darcy relaciona o fluxo com o gradiente de carga hidráulica. Com a condição de não haver fluxo na vertical, $q_x = 0$, implica $\partial h / \partial x = 0$, e para a mesma condição na horizontal, $q_y = 0$, implica em $\partial h / \partial y = 0$.

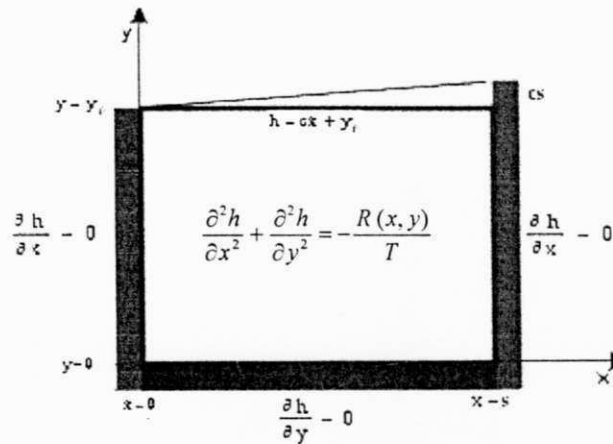


Figura 7.6 – Modelo matemático para o sistema de fluxo mostrado na Figura 7.5

As especificações do fluxo através dos três limites são chamadas de condições de contorno de Neumann. Neste caso, nós temos ambas as cargas específicas e as condições de fluxo, e, assim, temos um problema misto, onde:

No topo - $h(x, y_0) = cx + y_0$ para $0 \leq x \leq s$.

No fundo - $\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{y=0} = 0$ para $0 \leq x \leq s$.

No lado esquerdo - $\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$ para $0 \leq y \leq y_0$.

No lado direito - $\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=s} = 0$ para $0 \leq y \leq y_0$.

A equação de Laplace ($\partial^2 h/\partial x^2 + \partial^2 h/\partial y^2 = 0$), simula o fluxo subterrâneo em um aquífero homogêneo e isotropico se não houver acumulação ou perda de água dentro do sistema. Caso haja recarga ou extração de água dentro do sistema, a equação usada para simular o fluxo subterrâneo será a de Poisson $\partial^2 h/\partial x^2 + \partial^2 h/\partial y^2 = -R(x,y)/T$. Toth assumiu que, em uma bacia não urbanizada, as flutuações do lençol freático a nível anual são pequenas. Com isso, ele usou o nível médio do lençol freático e assumiu que o sistema se comportou como um sistema permanente em termos anuais. A posição do lençol freático no início do ano foi igual a do final do ano; não houve acumulação ou perda de água no sistema. Portanto, a partir deste princípio, a equação bidimensional de Poisson, é tida como a equação governante. E o modelo matemático foi constituído da equação governante juntamente com as quatro condições de contorno, mostradas na Figura 7.6.

7.4.1 - Discretização do Modelo

Com o emprego das condições de contorno citadas no item anterior, e com o auxílio de métodos numéricos (Anexo 4), foi usada uma grade de diferenças finitas 22 x 51, com matriz real 21 x 49, sendo o eixo horizontal representado por i e o eixo vertical por j, para simular os valores das cargas hidráulica nos diversos pontos do aquífero em questão (Figura 7.7).

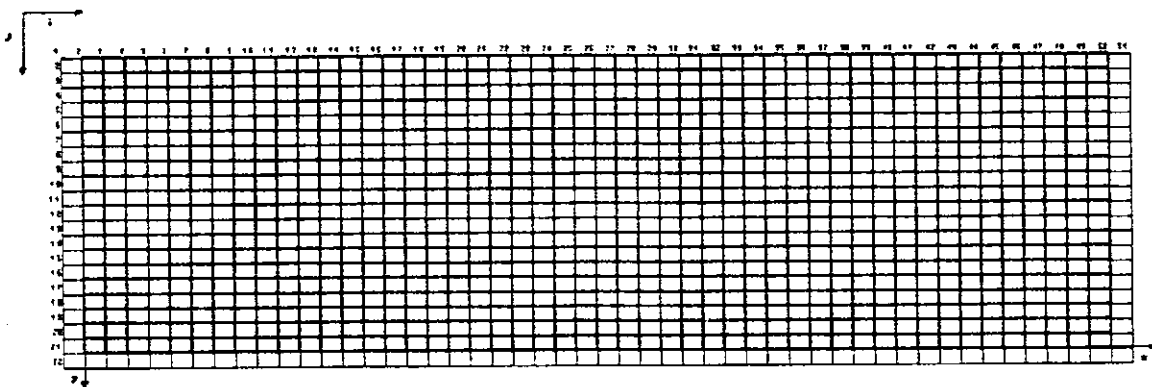


Figura 7.7 – Grade de diferenças finitas adotada para os programas de poços verticais e horizontais

7.4.2 - Obtenção das Linhas Equipotenciais e Linhas de Fluxo

O Sample Program 5, desenvolvido originalmente por Woffang Kinzelbach (1986), e usado para representar as isolinhas ou as linhas equipotenciais ou ainda as linhas de fluxo, foi primeiramente melhorado pelo Dr. Sarma e pelo Prof. Carlos Galvão, na linguagem BASIC. Posteriormente foi novamente melhorado e codificado na linguagem PASCAL pelo Dr. Seemanapalli V. K. Sarma Ph.D., João Ailton e Alex Neyves Mariane Alves, e renomeado para ISONOVO5. Na versão atual o ISONOVO5 é capaz de traçar simultaneamente as linhas equipotenciais e de fluxo, usando como dados de entrada os arquivos do tipo x.dat.

O programa ISONOVO5 foi usado para traçar a linhas equipotenciais e de fluxo. A partir dos dados obtidos do arquivo Psi.dat, que nesta pesquisa foram gerados pelos programas de poços verticais e horizontais, as linhas equipotências são traçadas ligando os pontos de mesma carga hidráulica como mostrado na Figura 7.8:

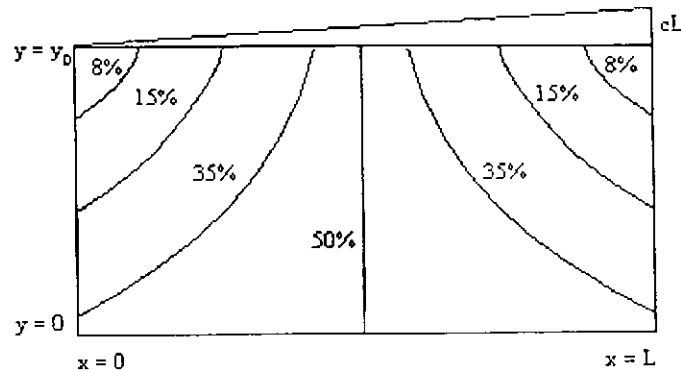


Figura 7.8 – Representação das linhas equipotenciais para um domínio retangular

As linhas de fluxo resultantes das linhas equipotenciais, mostradas na Figura 7.8, são obtidas invertendo-se as condições de contorno de Dirichlet e Neumann e obedecendo a Lei de Forchheimer.

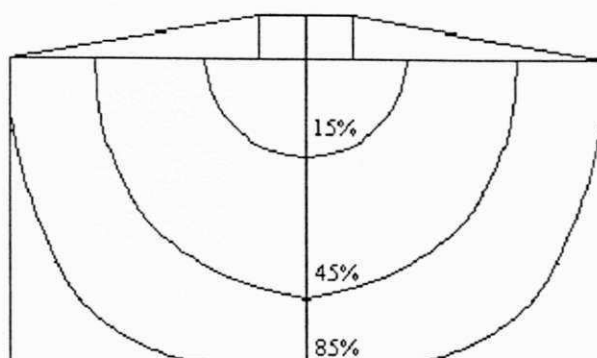


Figura 7.9 – Representação das linhas de fluxo para um domínio retangular

A lei de Forchheimer determina que em uma rede de fluxo as linhas de fluxo devem interceptar as linhas equipotenciais perpendicularmente, formando uma figura com 4 interseções ortogonais e medidas centrais iguais “quadrado”.

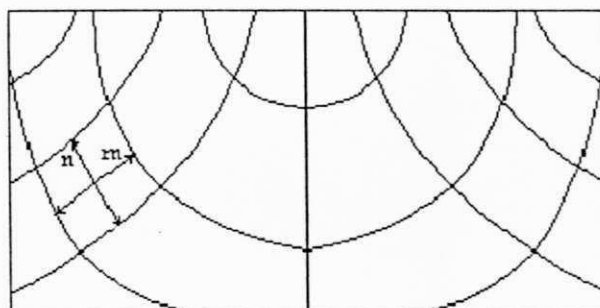


Figura 7.10 – Representação da rede de fluxo para um domínio retangular

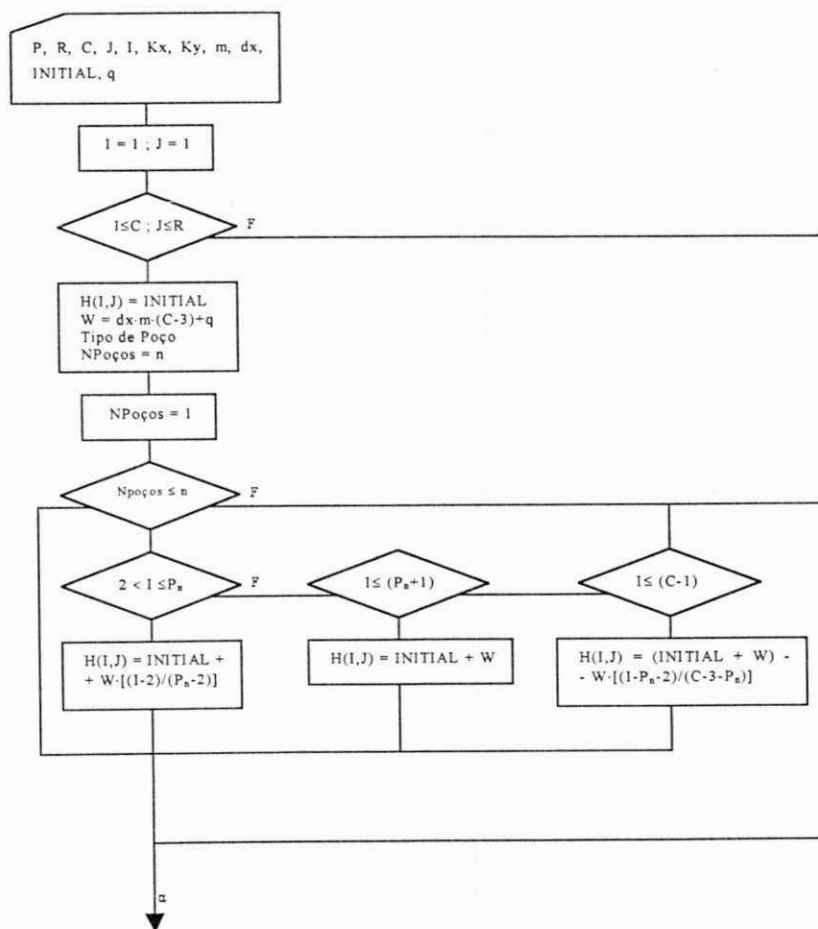
Apesar da rede de fluxo ser constituída por linhas equipotenciais e de fluxo, nesta pesquisa foram apresentadas apenas às linhas de fluxo, por considerar-se que tais linhas isoladas são representativas e perfeitamente capazes de descrever o fluxo subterrâneo.

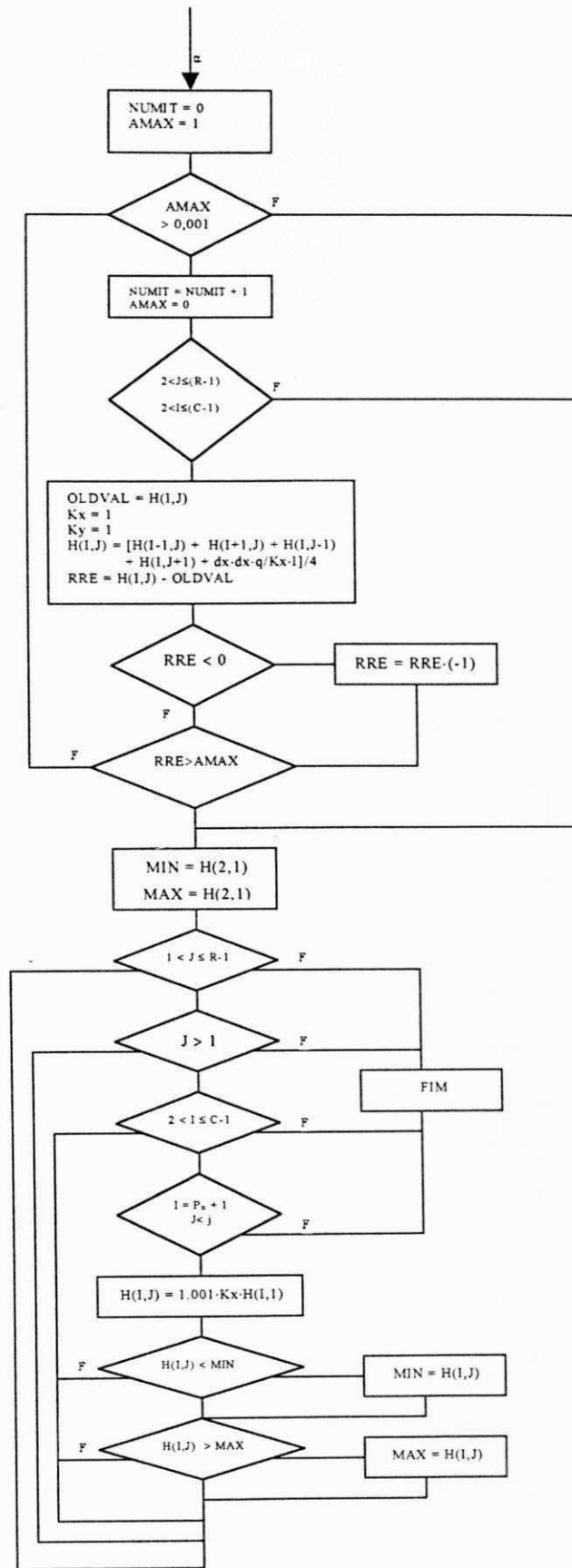
Ao ser simulada a retirada da água subterrânea através de poços de extração com uma permeabilidade $K_{\text{poço}}$ maior do que a permeabilidade K_{meio} , as linhas de fluxo que chegam no sistema com ângulo θ_1 , sofrem refração e percorrem o material do poço com ângulo θ_2 , maior que θ_1 , obedecendo a Lei da Tangente para a refração das linhas de fluxo.

7.5 - Programas de simulação dos Poços Verticais e Horizontais

Os programas usados para discretizar e representar o domínio de fluxo estudado foram condicionados na linguagem pascal, a partir dos exemplos dados por Toth (1939) e Wang e Anderson, (1982). Inicialmente o programa desenvolvido pelo Dr. Seemanapalli V. K. Sarma Ph.D. e por Alex Neyves Mariane Alves, foi adaptado e mudado pelo Dr. Seemanapalli V. K. Sarma Ph.D. e por Gilliano Vieira Lima Borges, para a obtenção dos programas de simulação dos poços verticais e horizontais.

7.5.1- Fluxograma da Programação





7.5.2 - Dcretização para Um Único Poço Vertical

Para o caso de um sistema de remediação constituído por um único poço vertical parcialmente penetrante sendo usado como medida de contenção hidráulica de contaminantes (Figura 7.11), com posicionamento $i = 25$, foram simuladas para quatro profundidades diferentes ($j = 4 = 0,2j$, $j = 6 = 0,3j$, $j = 8 = 0,4j$ e $j = 10 = 0,5j$), quatro valores de vazões distintas (25, 30, 35 e 40 m^3/s).

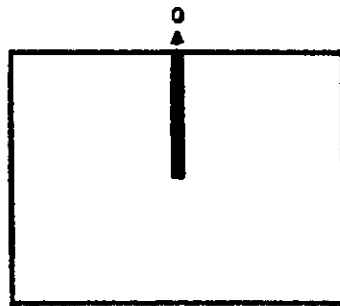


Figura 7.11 – Cenário para o caso de um sistema de remediação composto por um único poço vertical parcialmente penetrante sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes

7.5.3- Dcretização para Dois Poços Verticais

Para o caso de um sistema de remediação constituído por dois poços verticais parcialmente penetrantes sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes (Figura 7.12), com posicionamento $i_1 = 12$ e $i_2 = 38$, foram simuladas para quatro profundidades diferentes ($j = 4 = 0,2j$, $j = 6 = 0,3j$, $j = 8 = 0,4j$ e $j = 10 = 0,5j$), quatro valores de vazões distintas (25, 30, 35 e 40 m^3/s).

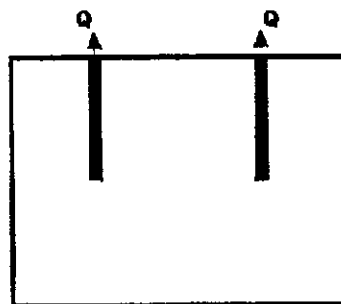


Figura 7.12 – Cenário para o caso de um sistema de remediação composto por dois poços verticais parcialmente penetrantes sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes

7.5.4 - Dcretização para Três Poços Verticais

Para o caso de um sistema de remediação constituído por três poços verticais parcialmente penetrantes sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes (Figura 7.13), com posicionamento $i_1 = 12$, $i_2 = 25$ e $i_3 = 38$, foram simuladas para quatro profundidades diferentes ($j = 4 = 0,2j$, $j = 6 = 0,3j$, $j = 8 = 0,4j$ e $j = 10 = 0,5j$), quatro valores de vazões distintas (25, 30, 35 e 40 m^3/s).

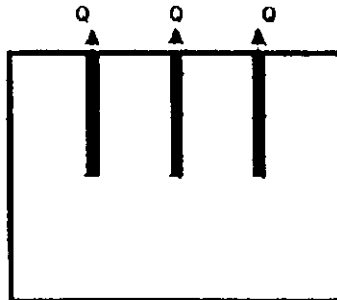


Figura 7.13 – Cenário para o caso de um sistema de remediação composto por três poços verticais parcialmente penetrantes sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes

7.5.5 - Dcretização para Um Único Poço Horizontal

Para o caso de um sistema de remediação constituído por um único poço horizontal sendo usado como medida de contenção hidráulica de contaminantes (Figura 7.14), com posicionamento $i = 25$, foram simuladas para quatro profundidades diferentes ($j = 4 = 0,2j$, $j = 6 = 0,3j$, $j = 8 = 0,4j$ e $j = 10 = 0,5j$), quatro valores de vazões distintas (25, 30, 35 e 40 m^3/s).

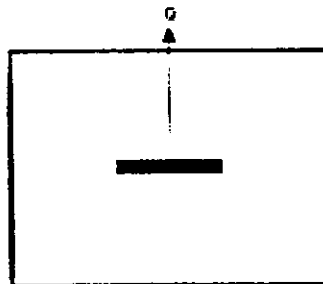


Figura 7.14 – Cenário para o caso de um sistema de remediação composto por um único poço horizontal sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes

7.5.6 - Dcretização para Dois Poços Horizontais

Para o caso de um sistema de remediação constituído por dois poços horizontais sendo usado como medida de contenção hidráulica de contaminantes (Figura 7.15), com posicionamento $i_1 = 12$ e $i_2 = 38$, foram simuladas para quatro profundidades diferentes ($j = 4 = 0,2j$, $j = 6 = 0,3j$, $j = 8 = 0,4j$ e $j = 10 = 0,5j$), quatro valores de vazões distintas (25, 30, 35 e 40 m^3/s).

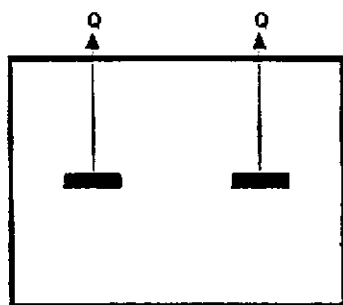


Figura 7.15 – Cenário para o caso de um sistema de remediação composto por dois poços horizontais, sendo usado como medida de contenção hidráulica dos contaminantes

7.6 - Dados de Entrada e Calibração

Para calibração, validação e simulação do modelo foram usados dados provenientes da área aluvial localizada no município de São Bento (Capítulo VI). Na Figura 7.16 é possível observar que a espessura saturada do aquífero (2 metros), com a malha adotada ficou dividida em 20 partes iguais, ou seja, a profundidade j poderia variar no intervalo de 0 a 20 do domínio selecionado. Nesta pesquisa, foram simuladas as condições de fluxo para as profundidades adimensionais $0,4j$, $0,6j$, $0,8j$ e $1,0j$.

Tanto nos programas de poços verticais quanto nos programas de poços horizontais, o número de células da grade de Diferenças Finitas adotada foi o mesmo. As áreas simuladas para o caso de um, dois e três poços de extração verticais foram $48 \times 48m$, $72 \times 72m$ e $96 \times 96m$, respectivamente. Para caso dos poços horizontais a área simulada foi de $144 \times 144m$.

A calibração do modelo foi feita utilizando como referência os dados do teste de produção do poço n^o 3 (Tabela 6.4 do Capítulo VI), que foi feito usando como poço de observação o poço n^o 2. Os rebaixamentos obtidos com o modelo e com o teste de produção são mostrados Figura 7.9. A permeabilidade hidráulica do meio na direção horizontal, (K_x), foi tratada como tendo valor unitário, onde este valor equivale em valor real ao valor de $K_x = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$. No programa, na região destinada à localização do(s) poço(s), foi atribuída uma permeabilidade, $K_{\text{poço}}$ igual a $1,001 \cdot K_x$, para simular a existência de um sistema de extração constituído por um ou mais poços verticais ou horizontais. Foi estabelecida uma declividade da superfície freática $m = 0,011 \text{ m}$.

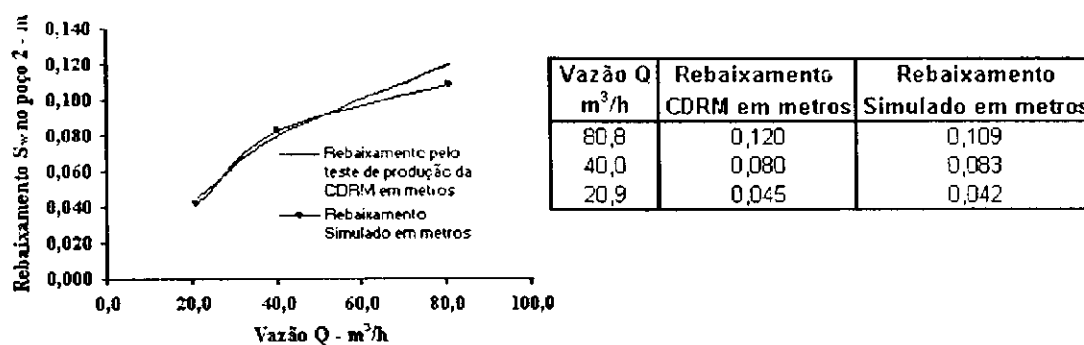


Figura 7.16 – Validação do modelo tendo como referência o teste de produção da Tabela 6.4

Na figura 7.16 constata-se que o modelo apresenta uma melhor representatividade para o intervalo de vazões de 20 a 60 m³/h. Por isso foram tratadas vazões de simulação da ordem de 25, 30, 35 e 40m³/h.

Usando os dados citados acima e nos itens 7.3.1 a 7.3.7, os programas geraram como saída, arquivos do tipo Phi.dat e Psi.dat, que representaram as cargas hidráulicas resultantes da simulação nas áreas selecionadas. Tais arquivos posteriormente foram usados como dados de entrada para o programa ISONOVOS, o qual como já mencionado foi empregado para a representação gráfica das linhas de fluxo ou tubos de fluxo do domínio estudado para cada tipo de sistema de remediação.

7.7 - Descrição Esquemática dos Parâmetros Usados

A análise das linhas de fluxo ou de tubos de fluxo obtidos no domínio estudado, para cada tipo de sistema de remediação, foi feita usando ferramentas conceituais, conforme definidas na Figura 7.17.

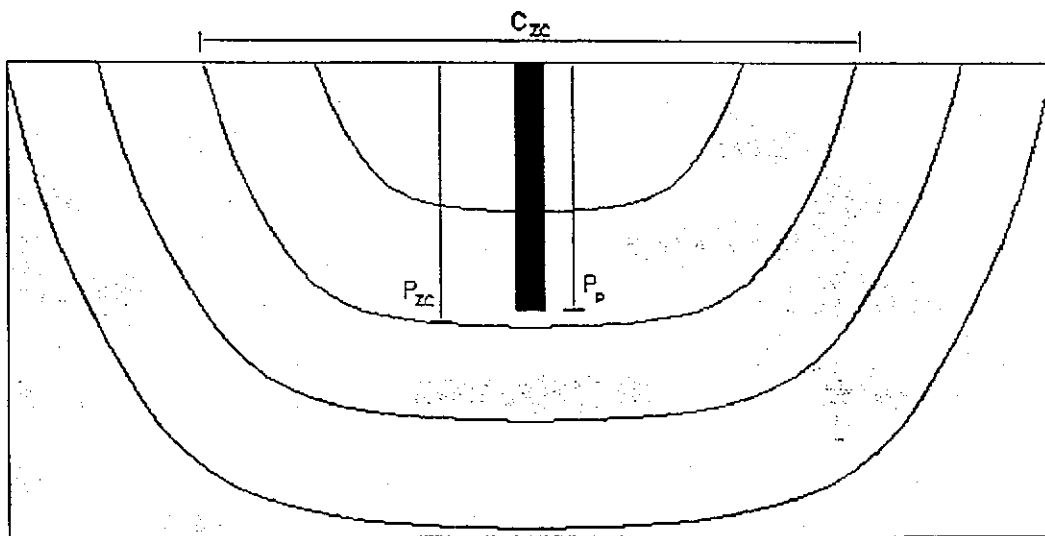


Figura 7.17 – Representação esquemática das linhas de fluxo (tubos de fluxo) e identificação das ferramentas conceituais usadas para caracterizar a zona de captura

A Figura 7.17 é uma representação gráfica das linhas de fluxo (tubos de fluxo) desenvolvidas mediante a presença de poço vertical de extração em um aquífero livre. O termo C_{zc} representa o comprimento da zona de captura do poço, P_{zc} a profundidade da zona de captura e P_p a profundidade do poço.

Ainda na Figura 7.17 é possível identificar a existência 4 (quatro) tubos de fluxo contidos totalmente no domínio de fluxo do sistema representado. Foi usado o termo *eficiência de captura* (E_c) para a razão entre o número de tubos capturados pelo sistema de extração e números total de tubos existentes no domínio do aquífero. O termo *eficiência de não-captura* (E_{nc}) foi atribuído a razão entre o número de tubos não capturados e números total de tubos.

Capítulo VIII

Resultados Obtidos

8.1 – Uso de um Único Poço vertical como Medida de Contenção Hidráulica dos Contaminantes

O resultado obtidos referente ao uso de um sistema de remediação composto por apenas um poço vertical central parcialmente penetrante, como medida de contenção hidráulica dos contaminantes, é apresentado nas Tabelas 8.1a, 8.1b, 8.1c e 8.1d e nas figuras do item 1 do anexo 1.

Tabela 8.1a - Tabela da Eficiência de Captura de Um Único Poço Vertical em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
1 Poço Vertical		25		0,50		62,5			
Profundidade - Pp		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - CzC		Profundidade - PzC				Ec	Esc
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	Tc	Tsc	100 Tc/T (%)	100 - Ec (%)
4	0,2	24,0	0,500	4,0	0,2	15,5	47,0	24,8	75,2
6	0,3	22,0	0,458	5,3	0,3	31,5	31,0	50,4	49,6
8	0,4	20,0	0,417	7,8	0,4	38,5	24,0	61,6	38,4
10	0,5	18,0	0,375	9,8	0,5	40,0	22,5	64,0	36,0

Tabela 8.1b - Tabela da Eficiência de Captura de Um Único Poço Vertical em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1.001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
1 Poço Vertical		30		0.50		75.0			
Profundidade - Pp		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - CzC		Profundidade - PzC				Ec	Enc
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	Tc	Tnc	100Tc/T (%)	100 - Ec (%)
4	0.2	42.0	0.875	4.0	0.2	20.0	55.0	26.7	73.3
6	0.3	40.0	0.833	5.5	0.3	38.5	36.5	51.3	48.7
8	0.4	38.0	0.792	7.9	0.4	46.5	28.5	62.0	38.0
10	0.5	36.0	0.750	9.9	0.5	48.0	27.0	64.0	36.0

Tabela 8.1c - Tabela da Eficiência de Captura de Um Único Poço Vertical em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1.001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
1 Poço Vertical		35		0.50		87.5			
Profundidade - Pp		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - CzC		Profundidade - PzC				Ec	Enc
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	Tc	Tnc	100Tc/T (%)	100 - Ec (%)
4	0.2	44.0	0.917	4.0	0.2	23.5	64.0	26.9	73.1
6	0.3	42.0	0.875	5.6	0.3	45.5	42.0	52.0	48.0
8	0.4	40.0	0.833	8.0	0.4	54.5	33.0	62.3	37.7
10	0.5	38.0	0.792	10.1	0.5	56.5	31.0	64.6	35.4

Tabela 8.1d - Tabela da Eficiência de Captura de Um Único Poço Vertical em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1.001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
1 Poço Vertical		40		0.50		100.0			
Profundidade - Pp		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - CzC		Profundidade - PzC				Ec	Enc
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	Tc	Tnc	100Tc/T (%)	100 - Ec (%)
4	0.2	30.0	0.625	4.1	0.2	28.0	72.0	28.0	72.0
6	0.3	28.0	0.583	5.8	0.3	52.5	47.5	52.5	47.5
8	0.4	26.0	0.542	8.1	0.4	62.5	37.5	62.5	37.5
10	0.5	24.0	0.500	11.7	0.6	65.0	35.0	65.0	35.0

A partir das Tabelas 8.1a, 8.1b, 8.1c e 8.1d foram construídos os gráficos, objetivando possibilitar uma melhor representação e entendimento dos resultados. Tais gráficos descrevem a capacidade do sistema de

remediação composto por um único poço vertical de extração, em capturar os tubos de fluxo gerados pelo gradiente hidráulico regional e pelo próprio bombeamento no poço, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j), para as vazões estudadas (25, 30, 35 e 40 m³/h).

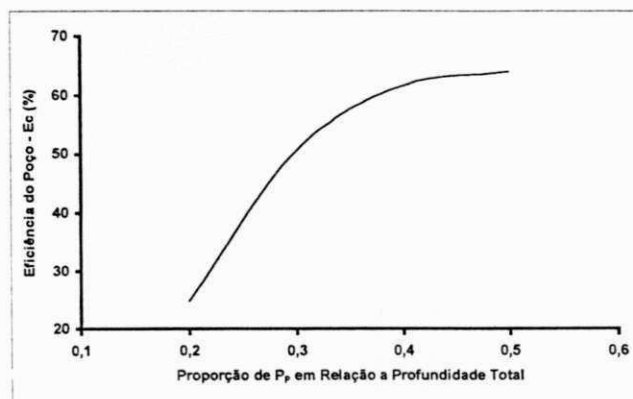


Figura 8.1a - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_C vs. a profundidade do poço, P_P - vazão de 25m³/h

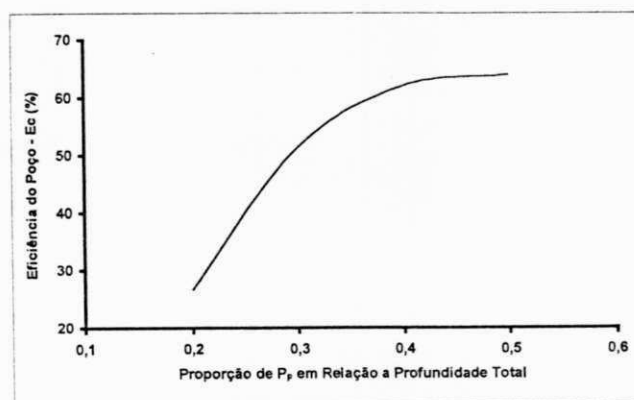


Figura 8.1b - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_C vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 30m³/h

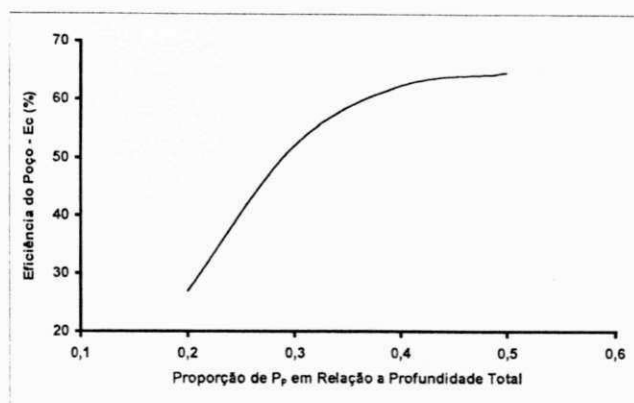


Figura 8.1c - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_C vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 35m³/h

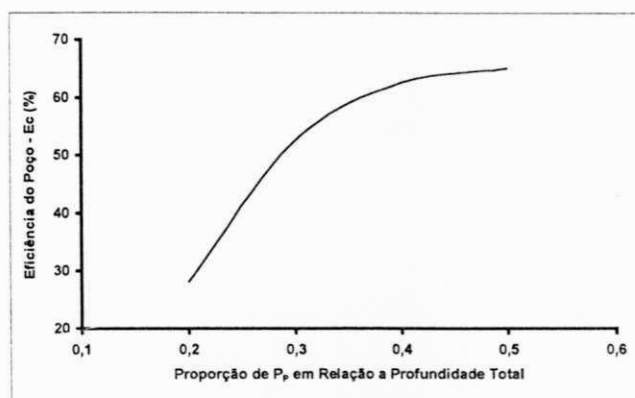


Figura 8.1d - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_C vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 40m³/h

A capacidade do sistema de remediação composto por um poço vertical, sob as mesmas variações impostas de vazão e profundidade, de permitir a passagem do fluxo subterrâneo é apresentada no item 1 do anexo 2.

Os gráficos 8.1e, 8.1f, 8.1g e 8.1h, descrevem a variação do comprimento da zona de captura do sistema de remediação adotado, em função do bombeamento (25, 30, 35 e 40 m³/h), e da variação na profundidade do poço (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j). A análise de tais gráficos é necessária, pois a zona de captura do sistema de remediação delimita a área de contribuição do fluxo subterrâneo do aquífero para o sistema, e como a pluma de contaminantes geralmente tende a espalhar-se horizontalmente no aquífero, este tipo de análise se justifica.

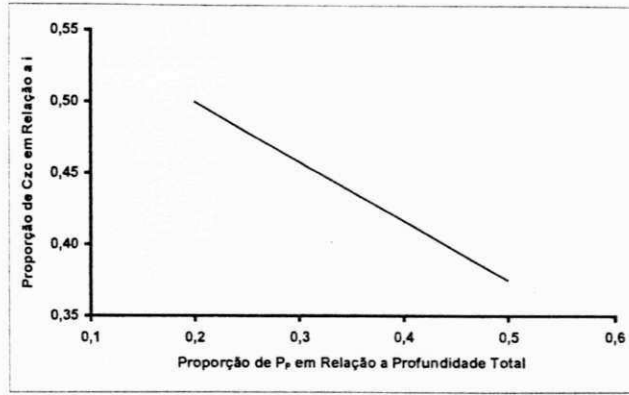


Figura 8.1e - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $25\text{m}^3/\text{h}$

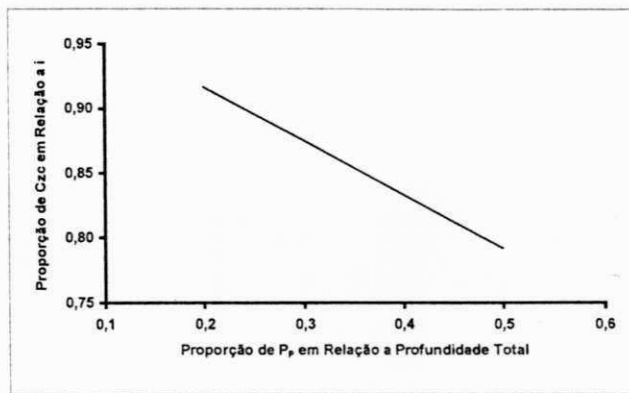


Figura 8.1f - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $30\text{m}^3/\text{h}$

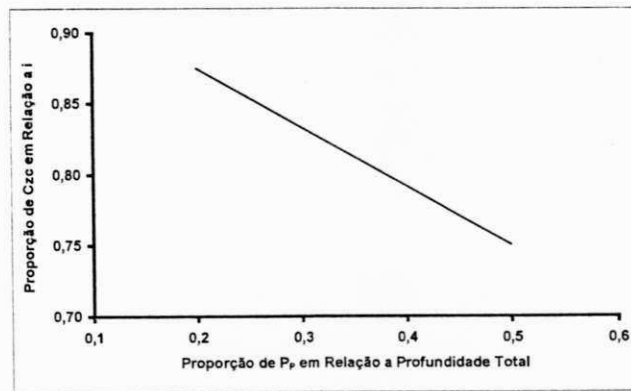


Figura 8.1g - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $35\text{m}^3/\text{h}$

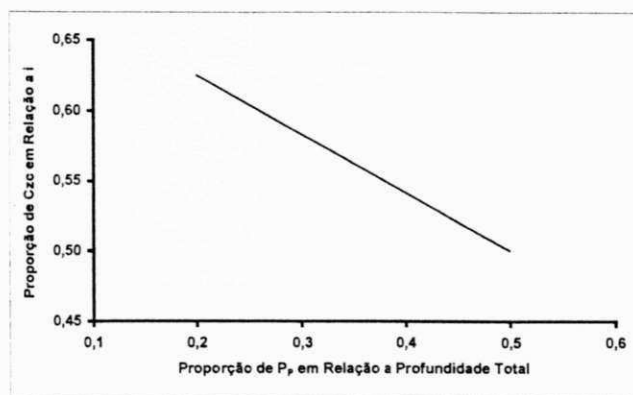


Figura 8.1h - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$

Os gráficos 8.1i, 8.1j, 8.1L e 8.1m, descrevem a variação da profundidade da zona de captura resultante do bombeamento (25, 30, 35 e $40\text{m}^3/\text{h}$) em um único poço de extração, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j). Embora a maioria dos contaminantes tenda a se espalhar mais na direção horizontal, também é importante a análise da profundidade da zona de captura do poço, para escolha da penetração ideal que possa proporcionar a contenção hidráulica total dos contaminantes.

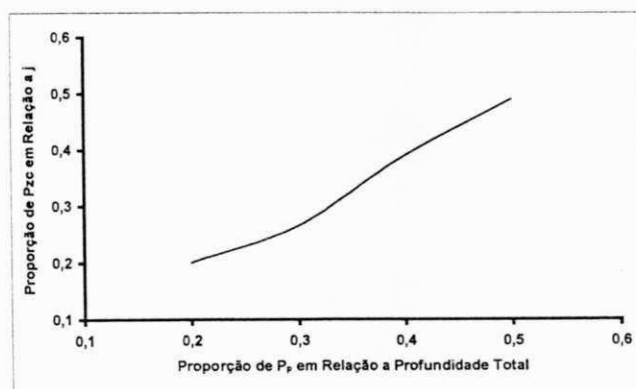


Figura 8.1i - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $25\text{m}^3/\text{h}$

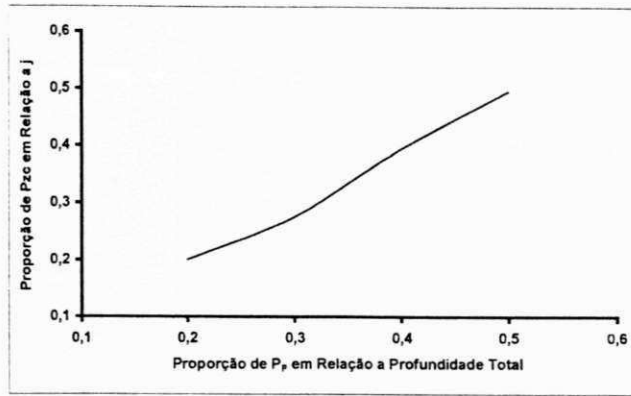


Figura 8.1j - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $30 \text{ m}^3/\text{h}$

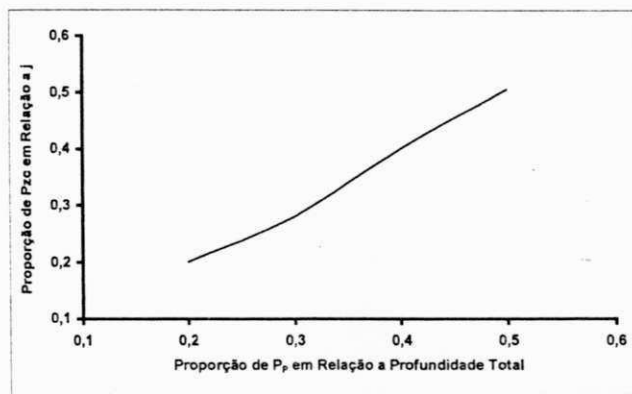


Figura 8.1L - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $35 \text{ m}^3/\text{h}$.

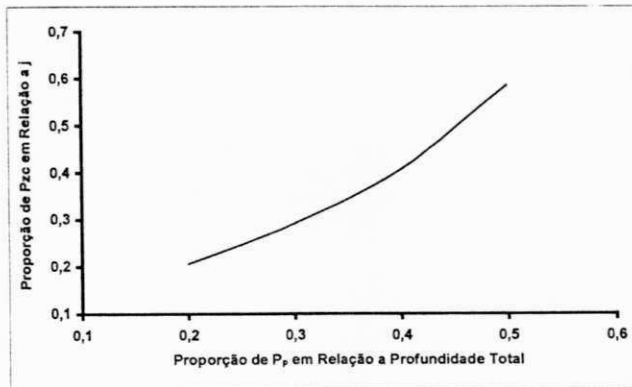


Figura 8.1m - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40 \text{ m}^3/\text{h}$

Na Tabela 8.1e são apresentados os resultados da variação da eficiência de captura do sistema de remediação, com um único poço de extração, em função do aumento na vazão, para as penetrações de 0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j.

Tabela 8.1e - Tabela da eficiência de captura do sistema de remediação, com um poço vertical, em função das vazões de extração, para as penetrações de 0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j

Vazão - Q (m ³ /s)	E _{C-0,2} %	E _{C-0,3} %	E _{C-0,4} %	E _{C-0,5} %
25	24,8	50,4	61,6	64,0
30	26,7	51,3	62,0	64,0
35	26,9	52,0	62,3	64,6
40	28,0	52,5	62,5	65,0

A partir da Tabela 8.1e foram obtidos os gráficos 8.1n, 8.1o, 8.1p e 8.1q.

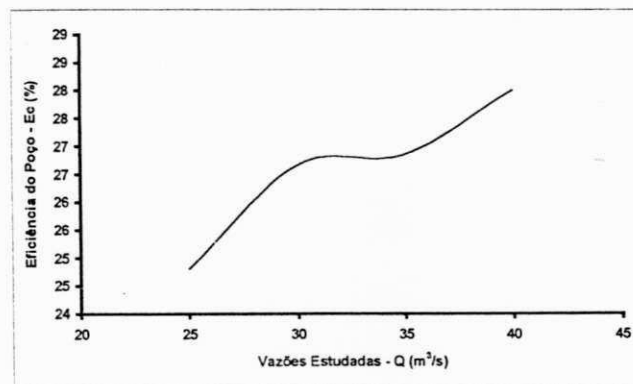


Figura 8.1n - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com um poço vertical, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,2j

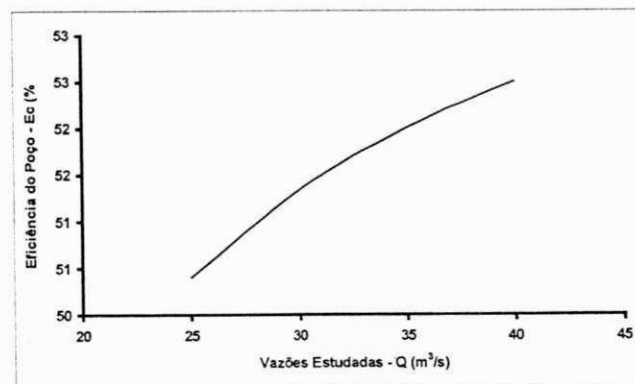


Figura 8.1o - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com um poço vertical, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,3j

Tabela 8.2a - Tabela da Eficiência de Captura de Dois Poços Verticais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
2 Poços Verticais		25		0,50		62,5			
Profundidade - P _p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C _{zc}		Profundidade - P _{zc}				Ec	Enc
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	Tc	Tnc	100Tc/T (%)	100 - Ec (%)
4	0,2	42,0	0,875	6,2	0,3	14,5	48,0	23,2	76,8
6	0,3	40,0	0,833	8,2	0,4	41,5	21,0	66,4	33,6
8	0,4	38,0	0,792	10,1	0,5	52,4	10,1	83,8	16,2
10	0,5	36,0	0,750	12,2	0,6	57,0	5,5	91,2	8,8

Tabela 8.2b - Tabela da Eficiência de Captura de Dois Poços Verticais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
2 Poços Verticais		30		0,50		75,0			
Profundidade - P _p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C _{zc}		Profundidade - P _{zc}				Ec	Enc
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	Tc	Tnc	100Tc/T (%)	100 - Ec (%)
4	0,2	44,0	0,917	6,7	0,3	19,0	56,0	25,3	74,7
6	0,3	42,0	0,875	8,3	0,4	50,0	25,0	66,7	33,3
8	0,4	40,0	0,833	10,3	0,5	63,1	11,9	84,1	15,9
10	0,5	38,0	0,792	12,5	0,6	68,5	6,5	91,3	8,7

Tabela 8.2c - Tabela da Eficiência de Captura de Dois Poços Verticais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
2 Poços Verticais		35		0,50		87,5			
Profundidade - P _p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C _{zc}		Profundidade - P _{zc}				Ec	Enc
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	Tc	Tnc	100Tc/T (%)	100 - Ec (%)
4	0,2	46,0	0,958	7,0	0,4	26,5	61,0	30,3	69,7
6	0,3	44,0	0,917	8,8	0,4	58,5	29,0	66,9	33,1
8	0,4	42,0	0,875	10,8	0,5	73,9	13,6	84,5	15,5
10	0,5	40,0	0,833	12,6	0,6	80,0	7,5	91,4	8,6

Tabela 8.2d - Tabela da Eficiência de Captura de Dois Poços Verticais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
2 Poços Verticais		40		0,50		100,0			
Profundidade - P_p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C_{zc}		Profundidade - P_{zc}				E_c	E_{nc}
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	T_c	T_{nc}	$100 T_c/T (\%)$	$100 - E_c (\%)$
4	0,2	48,0	1,000	7,1	0,4	36,0	64,0	36,0	64,0
6	0,3	46,0	0,958	9,2	0,5	68,0	32,0	68,0	32,0
8	0,4	44,0	0,917	11,2	0,6	84,9	15,1	84,9	15,1
10	0,5	42,0	0,875	12,8	0,6	91,5	8,5	91,5	8,5

A partir das Tabelas 8.2a, 8.2b, 8.2c e 8.2d foram construídos os gráficos, objetivando possibilitar uma melhor representação e entendimento dos resultados. Tais gráficos descrevem a capacidade do sistema de remediação composto por dois poços verticais de extração, em capturar os tubos de fluxo gerados pelo gradiente hidráulico regional e pelo próprio bombeamento no poço, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j), para as vazões estudadas (25, 30, 35 e $40 \text{ m}^3/\text{h}$).

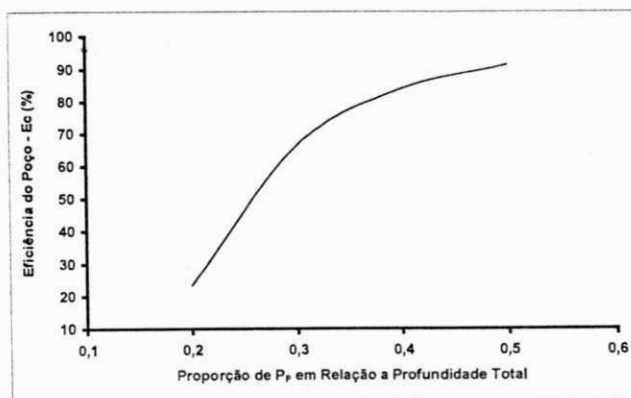


Figura 8.2a - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_c vs. a profundidade do poço, P_p - vazão de $25\text{m}^3/\text{h}$

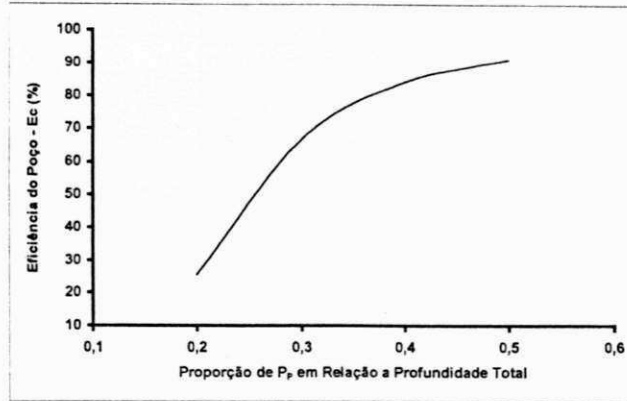


Figura 8.2b - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_C vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 30m³/h

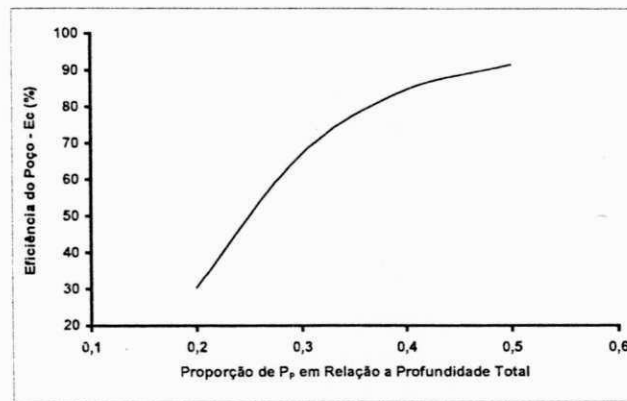


Figura 8.2c - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_C vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 35m³/h.

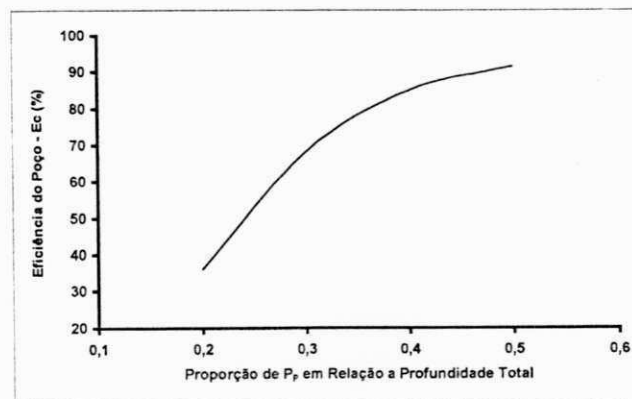


Figura 8.1d - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_C vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 40m³/h.

A capacidade do sistema de remediação composto por dois poços verticais, sob as mesmas variações impostas de vazão e profundidade, de permitir a passagem do fluxo subterrâneo é apresentada no item 2 do anexo 2.

Os gráficos 8.2e, 8.2f, 8.2g e 8.2h, descrevem a variação do comprimento da zona de captura do sistema de remediação adotado, em função do bombeamento (25, 30, 35 e 40 m³/h), e da variação na profundidade do poço (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j). A análise de tais gráficos é necessária, pois a zona de captura do sistema de remediação delimita a área de contribuição do fluxo subterrâneo do aquífero para o sistema, e como a pluma de contaminantes geralmente tende a espalha-se horizontalmente no aquífero, este tipo de análise se justifica.

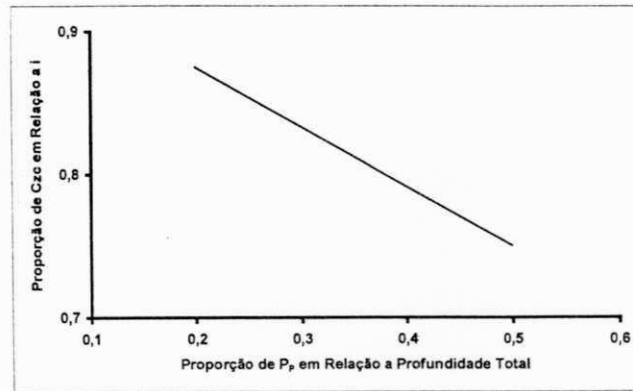


Figura 8.2e - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 25m³/h

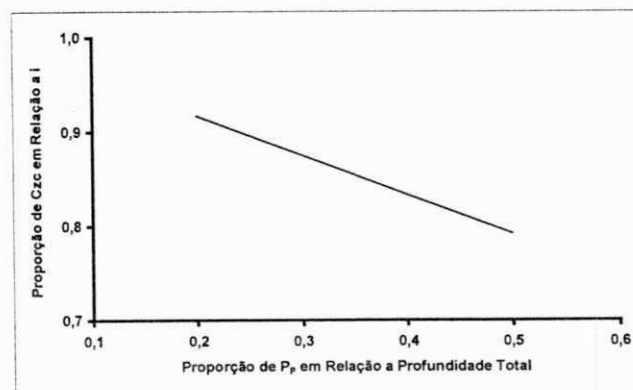


Figura 8.2f - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 30m³/h

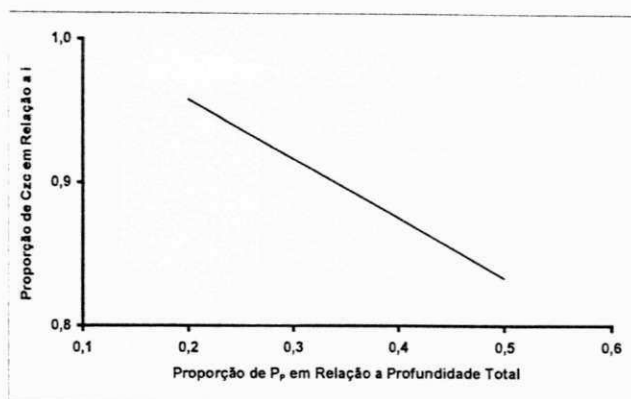


Figura 8.2g - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $35\text{m}^3/\text{h}$

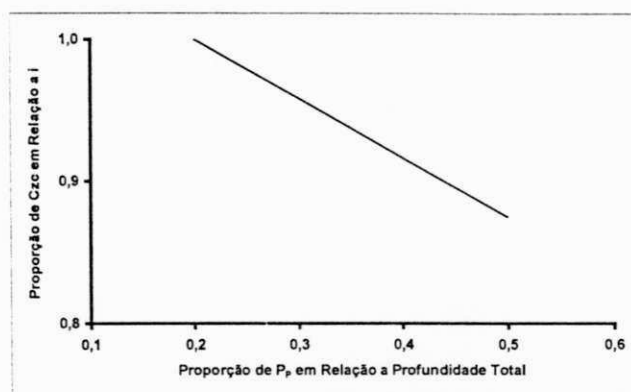


Figura 8.2h - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$

Os gráficos 8.2i, 8.2j, 8.2L e 8.2m, descrevem a variação da profundidade da zona de captura resultante do bombeamento ($25, 30, 35$ e $40\text{m}^3/\text{h}$) em um único poço de extração, devido à variação na sua profundidade ($0,2j, 0,3j, 0,4j$ e $0,5j$). Embora a maioria dos contaminantes tenda a se espalhar mais na direção horizontal, também é importante a análise da profundidade da zona de captura do poço, para escolha da penetração ideal que possa proporcionar a contenção hidráulica total dos contaminantes.

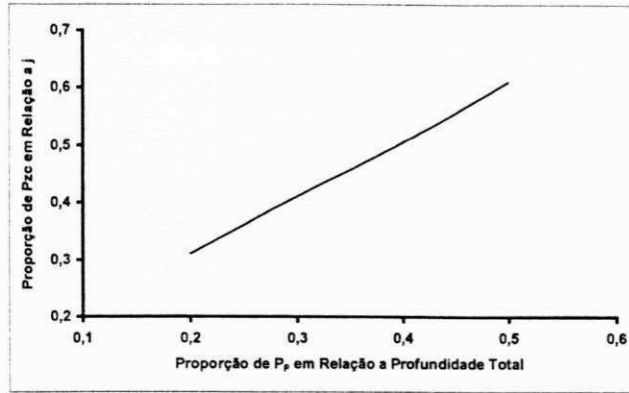


Figura 8.2i - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, P_{zc} vs. a Profundidade do Poço, P_p - Vazão $25\text{m}^3/\text{h}$

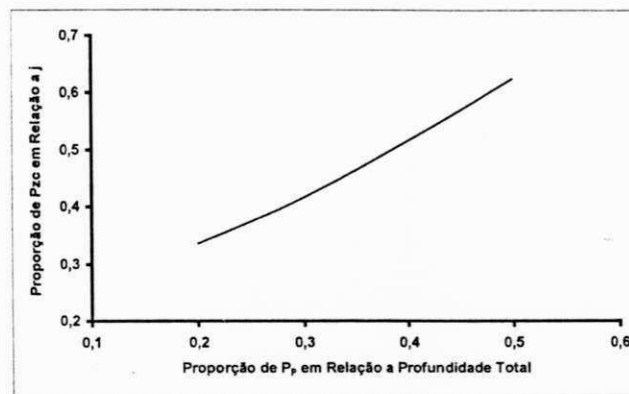


Figura 8.2j - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - Vazão $30\text{m}^3/\text{h}$.

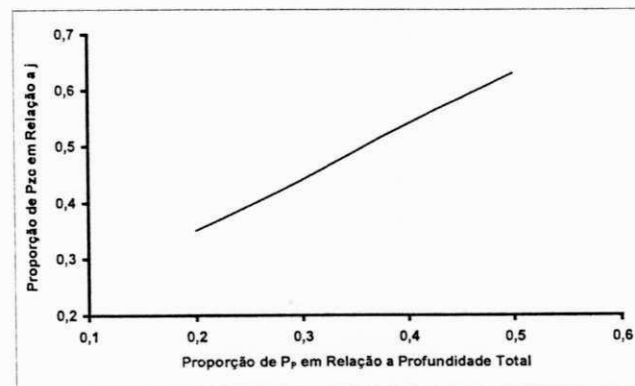


Figura 8.2L - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $35\text{m}^3/\text{h}$.

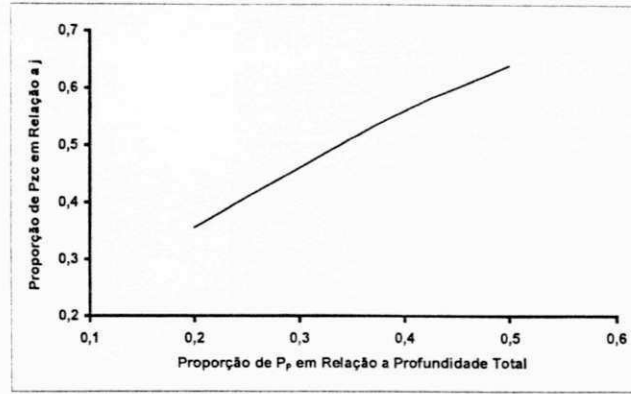


Figura 8.2m - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$.

Na Tabela 8.2e são apresentados os resultados da variação da eficiência de captura do sistema de remediação, com dois poços verticais de extração, em função do aumento na vazão, para as penetrações de 0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j.

Tabela 8.2e - Tabela da eficiência de captura do sistema de remediação, com dois poços verticais, em função das vazões de extração, para as penetrações de 0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j

Vazão - Q (m^3/s)	$E_{C-0,2} \%$	$E_{C-0,3} \%$	$E_{C-0,4} \%$	$E_{C-0,5} \%$
25	23,2	66,4	83,8	91,2
30	25,3	66,7	84,1	91,3
35	30,3	66,9	84,5	91,4
40	36,0	68,0	84,9	91,5

A partir da Tabela 8.2e foram obtidos os gráficos 8.2n, 8.2o, 8.2p e 8.2q.

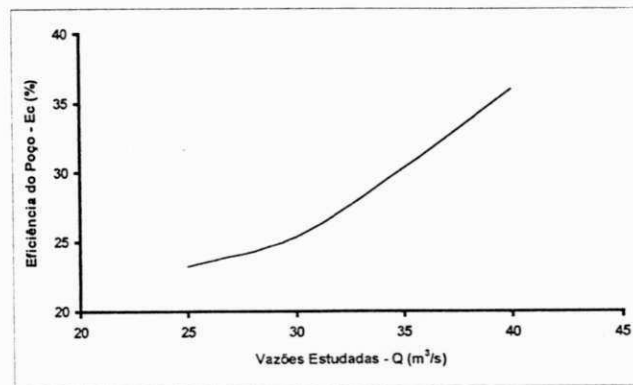


Figura 8.2n - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com dois Poços verticais, E_c vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,2j

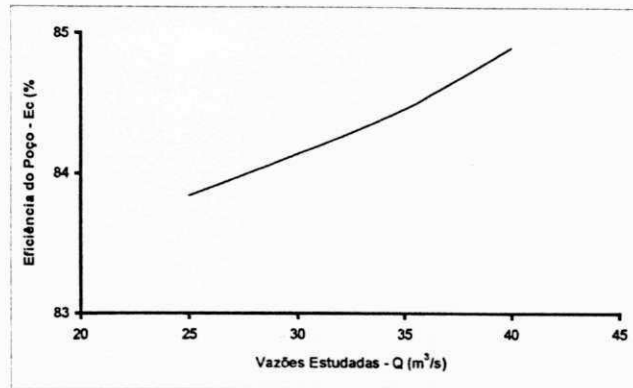


Figura 8.2o - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com dois Poços verticais, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,3j

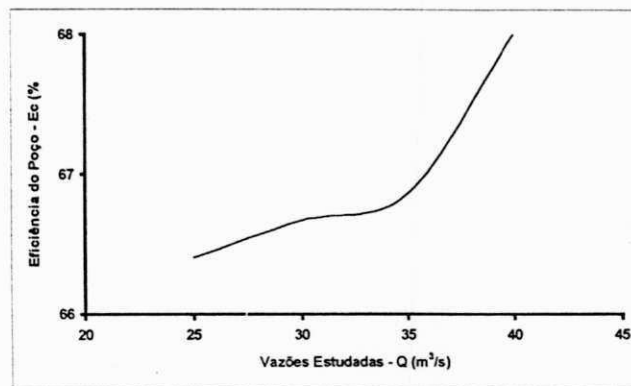


Figura 8.2p - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com dois Poços verticais, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,4j.

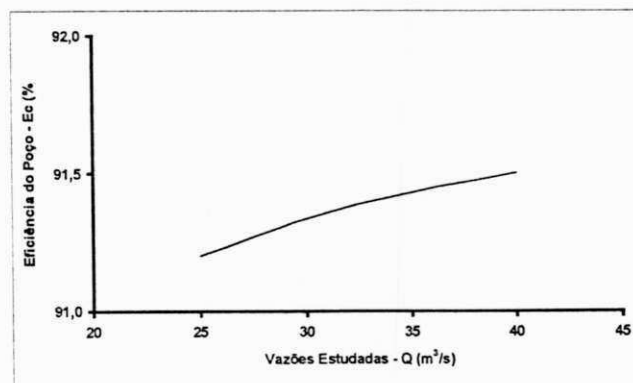


Figura 8.2q - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com dois Poços verticais, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,5j

8.3 – Uso de Três Poços vertical como Medida de Contenção Hidráulica dos Contaminantes

O resultado referente ao emprego de um sistema de remediação composto por três poços verticais parcialmente penetrantes, separados por uma distância de 28m, como medida de contenção hidráulica de contaminantes, é apresentado nas Tabelas 8.3a, 8.3b, 8.3c e 8.3d, e nas figuras do item 3 do anexo 1.

Tabela 8.3a - Tabela da Eficiência de Captura de Três Poços Verticais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
3 Poços Verticais		25		0.50		62.5			
Profundidade - Pp		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - Cz		Profundidade - Pz				Ec	Enc
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	Tc	Tsc	100Tc/T (%)	100 - Ec (%)
4	0.2	43.5	0.906	6.4	0.3	24.5	38.0	39.2	60.8
6	0.3	41.5	0.865	7.2	0.4	43.5	19.0	69.6	30.4
8	0.4	39.5	0.823	10.1	0.5	52.6	9.9	84.2	15.8
10	0.5	37.5	0.781	12.2	0.6	57.9	4.6	92.6	7.4

Tabela 8.3b - Tabela da Eficiência de Captura de Três Poços Verticais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
3 Poços Verticais		30		0.50		75.0			
Profundidade - Pp		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - Cz		Profundidade - Pz				Ec	Enc
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	Tc	Tsc	100Tc/T (%)	100 - Ec (%)
4	0.2	45.5	0.948	6.9	0.3	30.0	45.0	40.0	60.0
6	0.3	43.5	0.906	7.4	0.4	53.0	22.0	70.7	29.3
8	0.4	41.5	0.865	10.3	0.5	63.5	11.5	84.7	15.3
10	0.5	39.5	0.823	12.5	0.6	69.5	5.5	92.7	7.3

Tabela 8.3c - Tabela da Eficiência de Captura de Três Poços Verticais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
3 Poços Verticais		35		0,50		87,5			
Profundidade - Pp		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - CzC		Profundidade - PzC				Ec	Enc
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	Tc	Tnc	100Tc/T (%)	100 - Ec (%)
4	0,2	47,5	0,990	7,0	0,4	37,5	50,0	42,9	57,1
6	0,3	45,5	0,948	7,5	0,4	62,5	25,0	71,4	28,6
8	0,4	43,5	0,906	10,8	0,5	74,3	13,2	84,9	15,1
10	0,5	41,5	0,865	12,6	0,6	81,3	6,2	92,9	7,1

Tabela 8.3d - Tabela da Eficiência de Captura de Três Poços Verticais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
3 Poços Verticais		40		0,50		100,0			
Profundidade - Pp		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - CzC		Profundidade - PzC				Ec	Enc
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	Tc	Tnc	100Tc/T (%)	100 - Ec (%)
4	0,2	48,0	1,000	7,1	0,4	44,0	56,0	44,0	56,0
6	0,3	46,0	0,958	9,2	0,5	72,0	28,0	72,0	28,0
8	0,4	44,0	0,917	11,2	0,6	85,1	14,9	85,1	14,9
10	0,5	42,0	0,875	12,8	0,6	93,2	6,8	93,2	6,8

A partir das Tabelas 8.3a, 8.3b, 8.3c e 8.3d foram construídos os gráficos, objetivando possibilitar uma melhor representação e entendimento dos resultados. Tais gráficos descrevem a capacidade do sistema de remediação composto por três poços verticais de extração, em capturar os tubos de fluxo gerados pelo gradiente hidráulico regional e pelo próprio bombeamento no poço, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j), para as vazões estudadas (25, 30, 35 e $40 \text{ m}^3/\text{h}$).

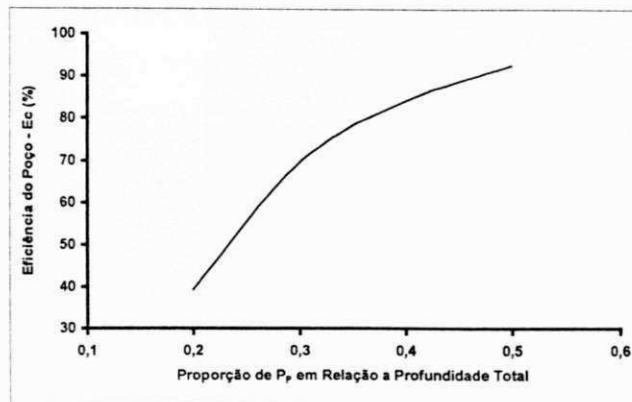


Figura 8.3a - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_C vs. a profundidade do poço, P_p - vazão de 25m³/h

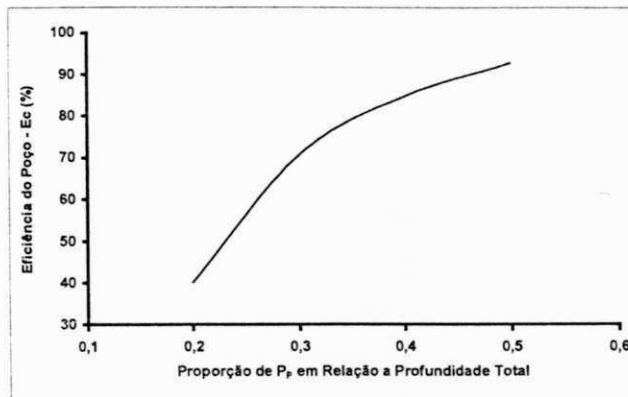


Figura 8.3b - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_C vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 30m³/h

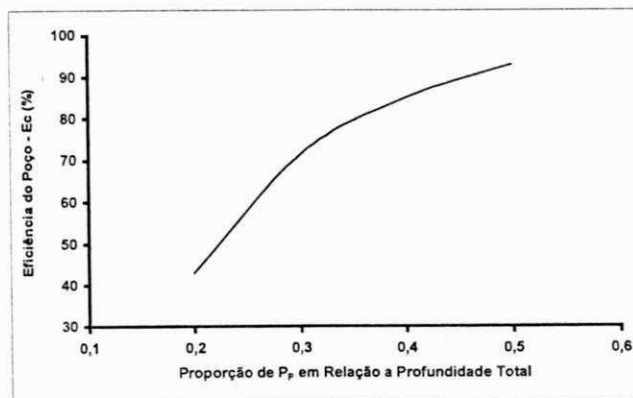


Figura 8.3c - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_C vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 35m³/h.

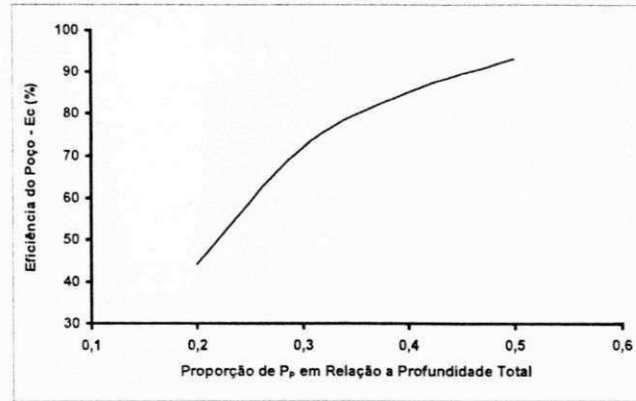


Figura 8.3d - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_C vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 40m³/h.

A capacidade do sistema de remediação composto por três poços verticais, sob as mesmas variações impostas de vazão e profundidade, de permitir a passagem do fluxo subterrâneo é apresentada no item 3 do anexo 2.

Os gráficos 8.3e, 8.3f, 8.3g e 8.3h, descrevem a variação do comprimento da zona de captura do sistema de remediação adotado, em função do bombeamento (25, 30, 35 e 40 m³/h), e da variação na profundidade do poço (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j). A análise de tais gráficos é necessária, pois a zona de captura do sistema de remediação delimita a área de contribuição do fluxo subterrâneo do aquífero para o sistema, e como a pluma de contaminantes geralmente tende a espalhar-se horizontalmente no aquífero, este tipo de análise se justifica.

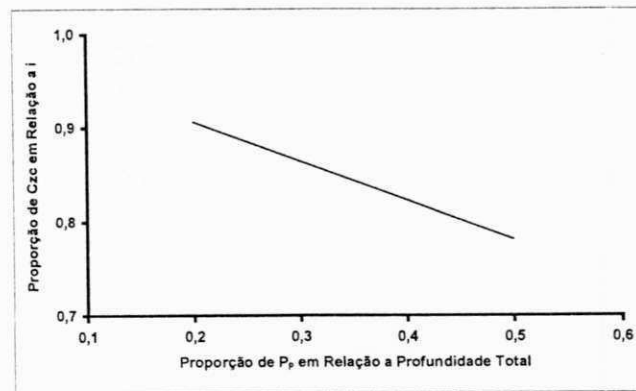


Figura 8.3e - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 25m³/h

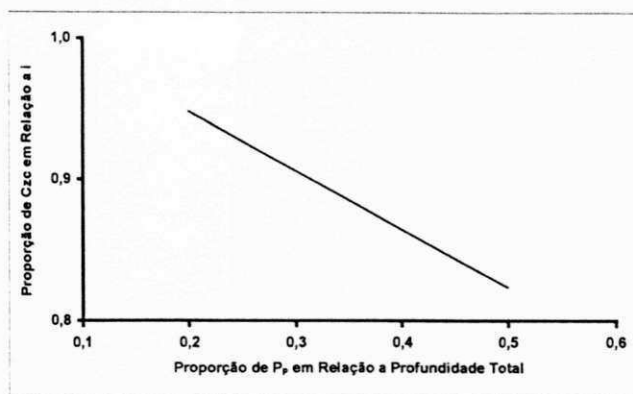


Figura 8.3f - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $30\text{m}^3/\text{h}$

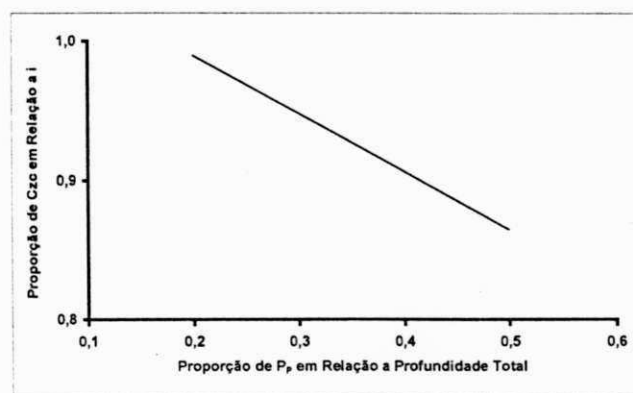


Figura 8.3g - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $35\text{m}^3/\text{h}$

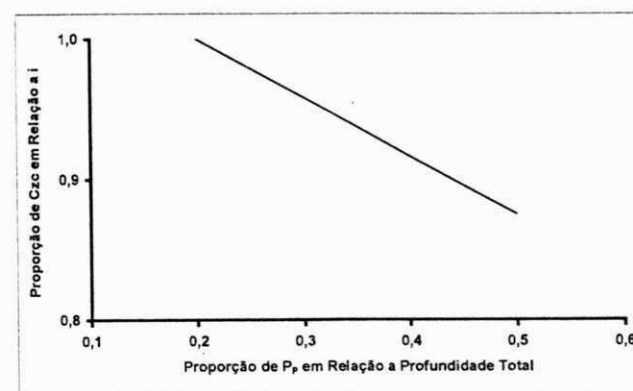


Figura 8.3h - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$

Os gráficos 8.3i, 8.3j, 8.3L e 8.3m, descrevem a variação da profundidade da zona de captura resultante do bombeamento (25, 30, 35 e 40 m^3/h) em um único poço de extração, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j). Embora a maioria dos contaminantes tenda a se espalhar mais na direção horizontal, também é importante a análise da profundidade da zona de captura do poço, para escolha da penetração ideal que possa proporcionar a contenção hidráulica total dos contaminantes.

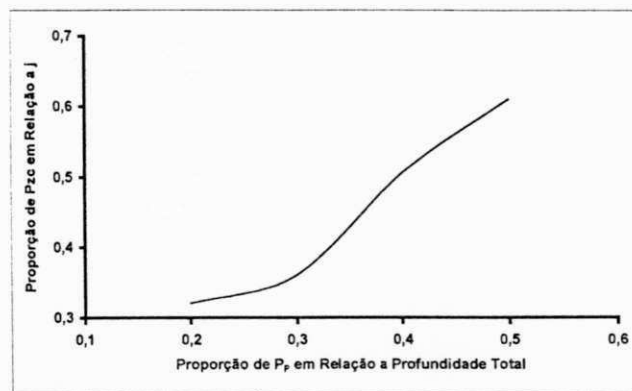


Figura 8.3i - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, P_{zc} vs. a Profundidade do Poço, P_p - Vazão $25m^3/h$

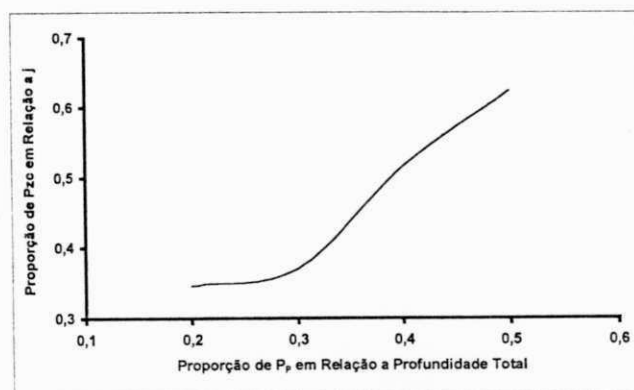


Figura 8.3j - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - Vazão $30m^3/h$.

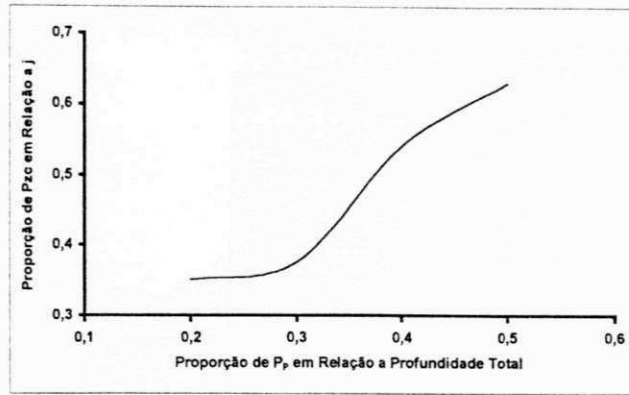


Figura 8.3L - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $35\text{m}^3/\text{h}$.

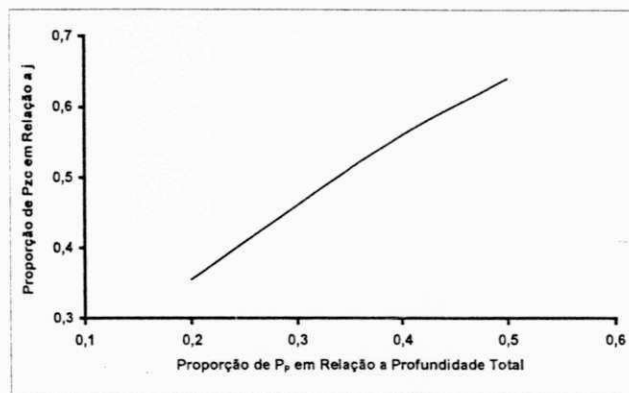


Figura 8.3m - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$.

Na Tabela 8.3e são apresentados os resultados da variação da eficiência de captura do sistema de remediação, com três poços verticais de extração, em função do aumento na vazão, para as penetrações de 0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j.

Tabela 8.3e - Tabela da eficiência de captura do sistema de remediação, com três poços verticais, em função das vazões de extração, para as penetrações de 0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j

Vazão - Q (m^3/s)	$E_{C-0,2} \%$	$E_{C-0,3} \%$	$E_{C-0,4} \%$	$E_{C-0,5} \%$
25	39,2	69,6	84,2	92,6
30	40,0	70,7	84,7	92,7
35	42,9	71,4	84,9	92,9
40	44,0	72,0	85,1	93,2

A partir da Tabela 8.3e foram obtidos os gráficos 8.3n, 8.3o, 8.3p e 8.3q.

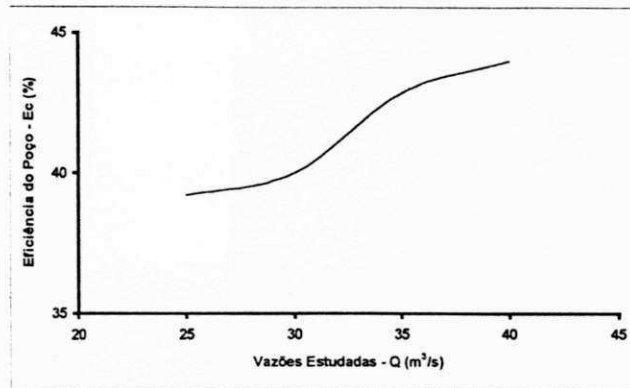


Figura 8.3n - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com três Poços verticais, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,2j

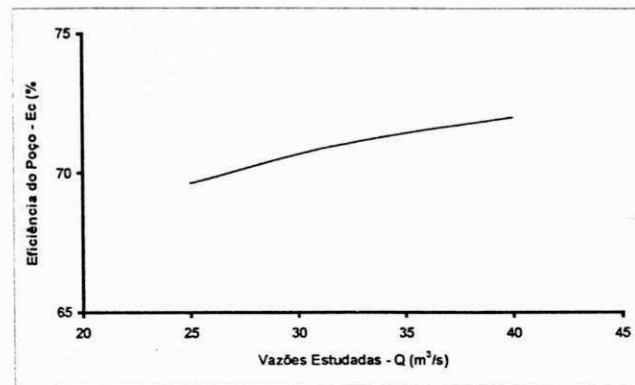


Figura 8.3o - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com três Poços verticais, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,3j

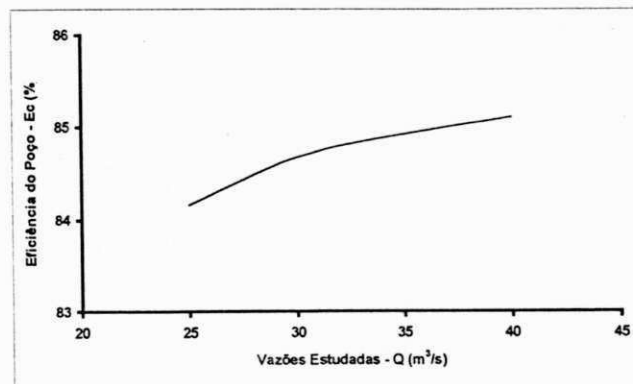


Figura 8.3p - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com três Poços verticais, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,4j.

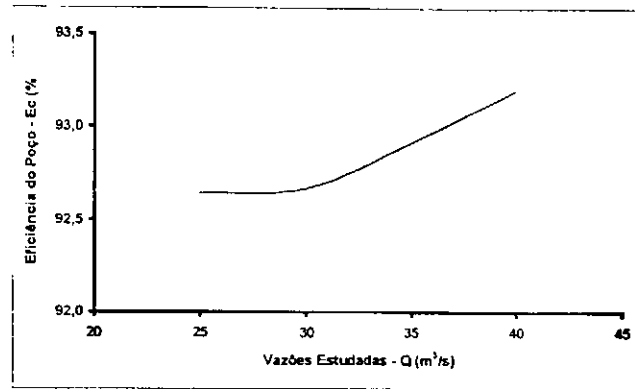


Figura 8.3q - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com três Poços verticais, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,5j

8.4 – Uso de Um Único Poço Horizontal como Medida de Contenção Hidráulica dos Contaminantes

O resultado referente ao emprego de um sistema de remediação composto por um único poço horizontal, como medida de contenção hidráulica de contaminantes, é apresentado nas Tabelas 8.4a, 8.4b, 8.4c e 8.4d, e nas figuras do item 4 do anexo I.

Tabela 8.4a - Tabela da Eficiência de Captura de Um Único Poço Horizontal em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante Q = 25 m³/s, Espessura Saturada Média b=2m e Permeabilidade Hidráulica do Meio K_x = 2,7x10⁻³ m/s e K_{poço} = 1,001·K_x

Tipo de Poço		Vazão - Q em m³/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
1 Poço Horizontal		25		0,50		62,5			
Profundidade - P _p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C _{zc}		Profundidade - P _{zc}				E _C	E _{NC}
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	T _c	T _{nc}	100T _c /T (%)	100 - E _C (%)
4	0,2	40,0	0,833	4,6	0,2	15,5	47,0	24,8	75,2
6	0,3	38,0	0,792	7,0	0,4	35,5	27,0	56,8	43,2
8	0,4	36,0	0,750	9,5	0,5	42,5	20,0	68,0	32,0
10	0,5	34,0	0,708	11,1	0,6	44,5	18,0	71,2	28,8

Tabela 8.4b - Tabela da Eficiência de Captura de Um Único Poço Horizontal em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
1 Poço Horizontal		30		0,50		75,0			
Profundidade - P _p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C _{zc}		Profundidade - P _{zc}				E _c	E _{nc}
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	T _c	T _{nc}	100 T _c /T (%)	100 - E _c (%)
4	0,2	42,0	0,875	4,7	0,2	20,0	55,0	26,7	73,3
6	0,3	40,0	0,833	7,1	0,4	49,0	26,0	65,3	34,7
8	0,4	38,0	0,792	9,6	0,5	57,0	18,0	76,0	24,0
10	0,5	36,0	0,750	11,3	0,6	58,0	17,0	77,3	22,7

Tabela 8.4c - Tabela da Eficiência de Captura de Um Único Poço Horizontal em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
1 Poço Horizontal		35		0,50		87,5			
Profundidade - P _p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C _{zc}		Profundidade - P _{zc}				E _c	E _{nc}
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	T _c	T _{nc}	100 T _c /T (%)	100 - E _c (%)
4	0,2	44,0	0,917	4,8	0,2	24,5	63,0	28,0	72,0
6	0,3	42,0	0,875	7,2	0,4	61,5	26,0	70,3	29,7
8	0,4	40,0	0,833	9,7	0,5	69,5	18,0	79,4	20,6
10	0,5	38,0	0,792	11,5	0,6	71,5	16,0	81,7	18,3

Tabela 8.4d - Tabela da Eficiência de Captura de Um Único Poço Horizontal em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
1 Poço Horizontal		40		0,50		100,0			
Profundidade - P _p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C _{zc}		Profundidade - P _{zc}				E _c	E _{nc}
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	T _c	T _{nc}	100 T _c /T (%)	100 - E _c (%)
4	0,2	46,0	0,958	4,9	0,2	29,0	71,0	29,0	71,0
6	0,3	44,0	0,917	7,3	0,4	72,0	28,0	72,0	28,0
8	0,4	42,0	0,875	9,8	0,5	80,0	20,0	80,0	20,0
10	0,5	40,0	0,833	11,7	0,6	82,0	18,0	82,0	18,0

A partir das Tabelas 8.4a, 8.4b, 8.4c e 8.4d foram construídos os gráficos, objetivando possibilitar uma melhor representação e entendimento dos resultados. Tais gráficos descrevem a capacidade do sistema de remediação composto por um único poço horizontal de extração, em capturar os tubos de fluxo gerados pelo gradiente hidráulico regional e pelo próprio bombeamento no poço, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j), para as vazões estudadas (25, 30, 35 e 40 m³/h).

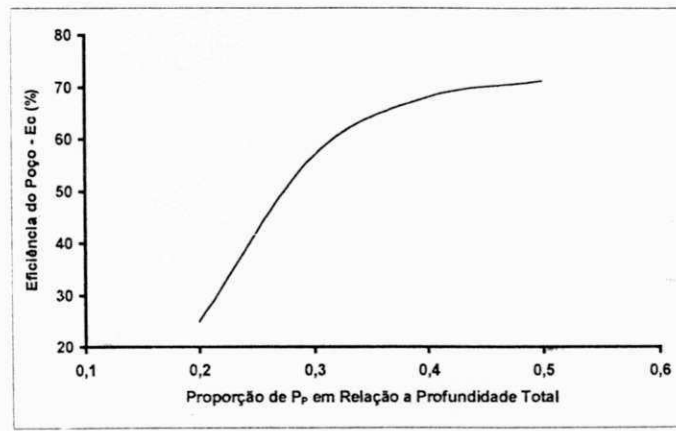


Figura 8.4a - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_C vs. a profundidade do poço, P_P - vazão de 25m³/h

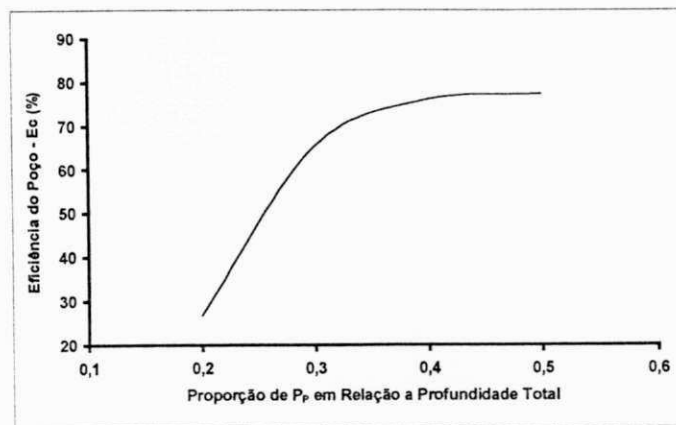


Figura 8.4b - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_C vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 30m³/h

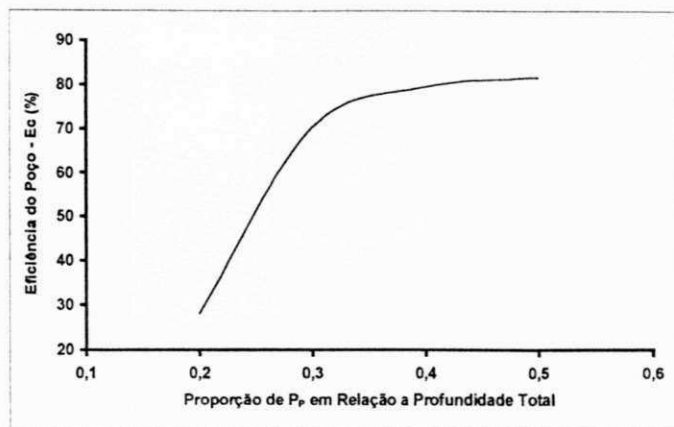


Figura 8.4c - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_C vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $35 \text{ m}^3/\text{h}$.

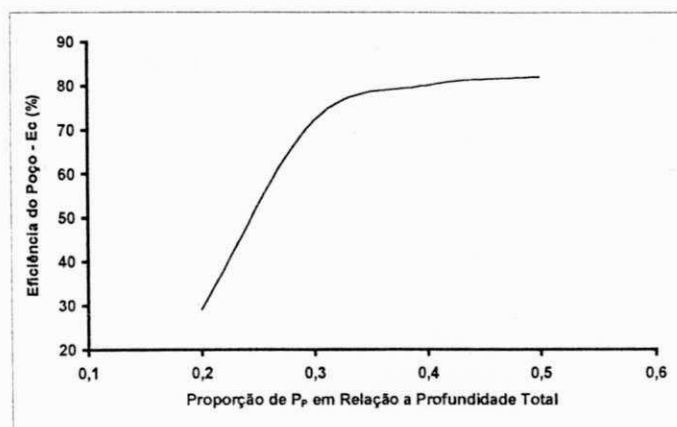


Figura 8.4d - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_C vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40 \text{ m}^3/\text{h}$.

A capacidade do sistema de remediação composto por um poço horizontal, sob as mesmas variações impostas de vazão e profundidade, de permitir a passagem do fluxo subterrâneo é apresentada no item 4 do anexo 2.

Os gráficos 8.4e, 8.4f, 8.4g e 8.4h, descrevem a variação do comprimento da zona de captura do sistema de remediação adotado, em função do bombeamento (25 , 30 , 35 e $40 \text{ m}^3/\text{h}$), e da variação na profundidade do poço ($0,2j$, $0,3j$, $0,4j$ e $0,5j$).

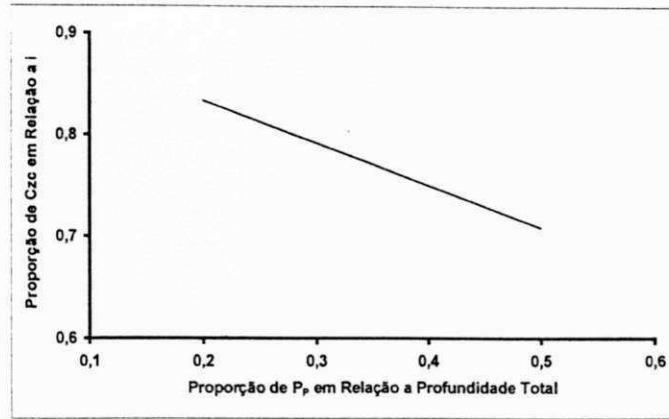


Figura 8.4e - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $25\text{m}^3/\text{h}$

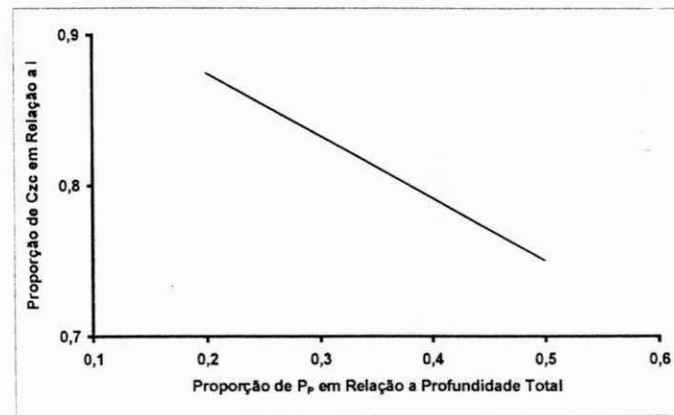


Figura 8.4f - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $30\text{m}^3/\text{h}$

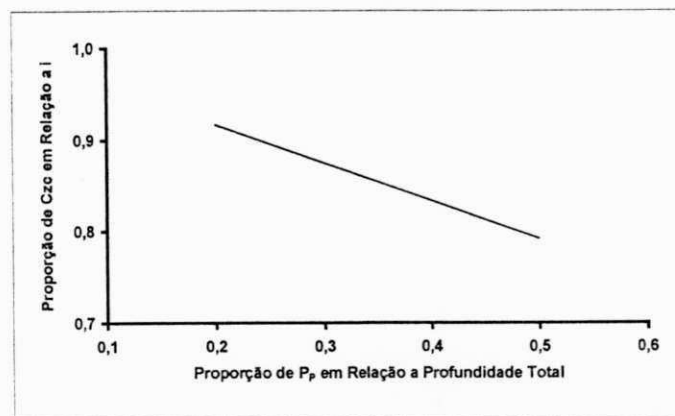


Figura 8.4g - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $35\text{m}^3/\text{h}$

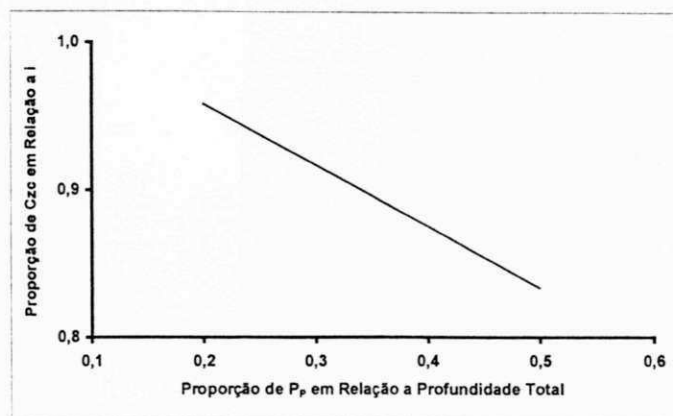


Figura 8.4h - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$

Os gráficos 8.4i, 8.4j, 8.4L e 8.4m, descrevem a variação da profundidade da zona de captura resultante do bombeamento (25, 30, 35 e $40\text{m}^3/\text{h}$) em um único poço de extração, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j).

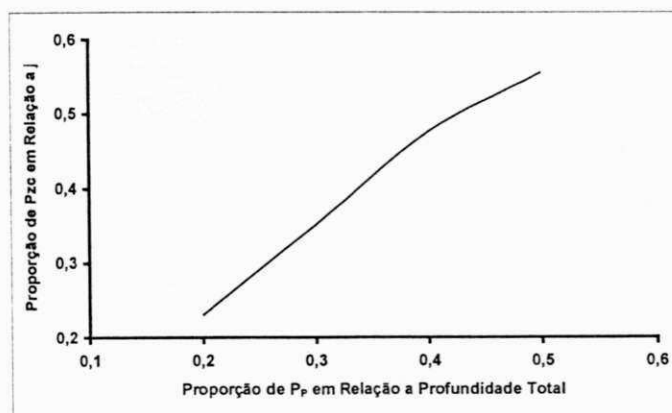


Figura 8.4i - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, P_{zc} vs. a Profundidade do Poço, P_p - Vazão $25\text{m}^3/\text{h}$

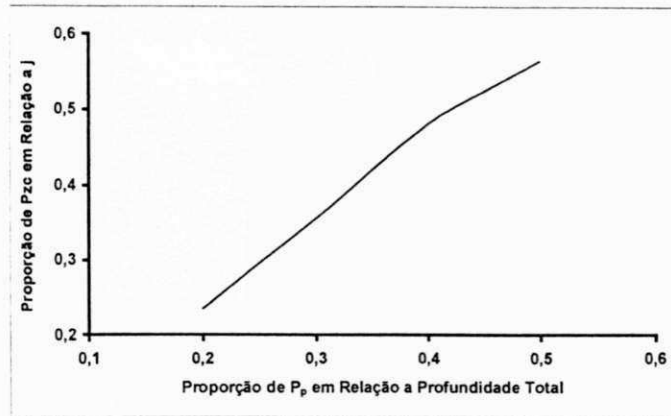


Figura 8.4j - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - Vazão $30\text{m}^3/\text{h}$.

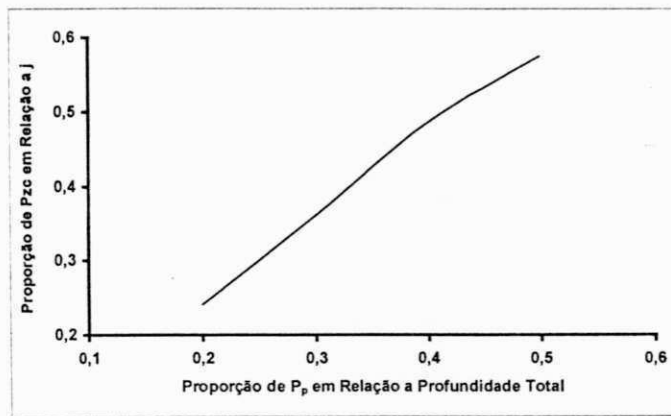


Figura 8.4L - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $35\text{m}^3/\text{h}$.

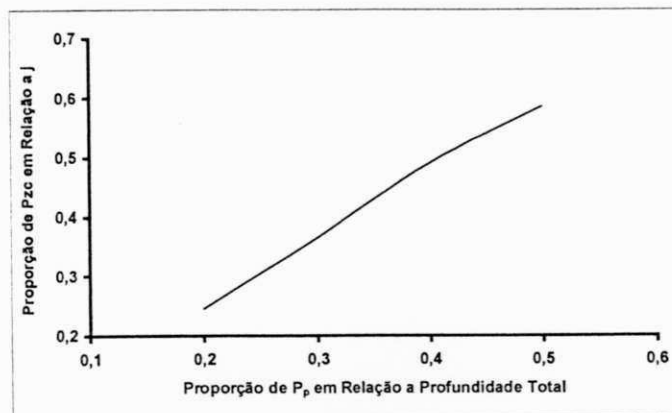


Figura 8.4m - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$.

Na Tabela 8.4e são apresentados os resultados da variação da eficiência de captura do sistema de remediação, com um único poço de extração, em função do aumento na vazão, para as penetrações de 0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j.

Tabela 8.4e - Tabela da eficiência de captura do sistema de remediação, com um poço horizontal, em função das vazões de extração, para as penetrações de 0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j

Vazão - Q (m ³ /s)	E _{C-0,2} %	E _{C-0,3} %	E _{C-0,4} %	E _{C-0,5} %
25	24,8	56,8	68,0	71,2
30	26,7	65,3	76,0	77,3
35	28,0	70,3	79,4	81,7
40	29,0	72,0	80,0	82,0

A partir da Tabela 8.4e foram obtidos os gráficos 8.4n, 8.4o, 8.4p e 8.4q.

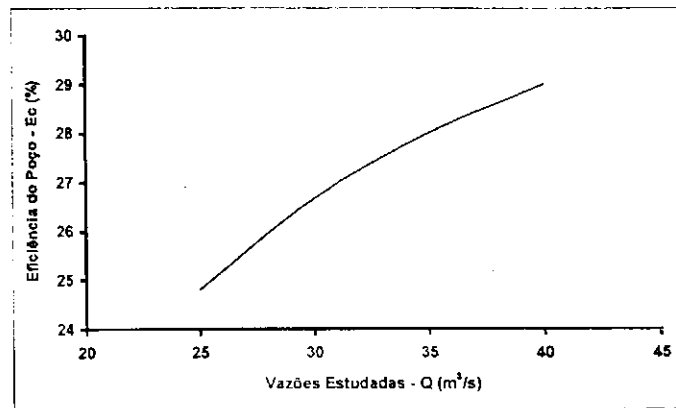


Figura 8.4n - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com um poço horizontal, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,2j

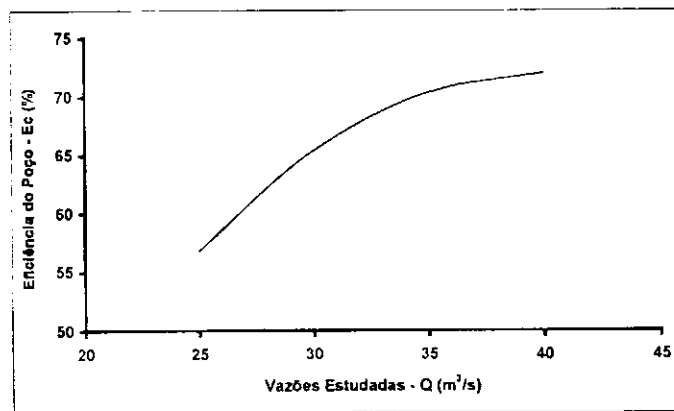


Figura 8.4o - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com um poço horizontal, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,3j

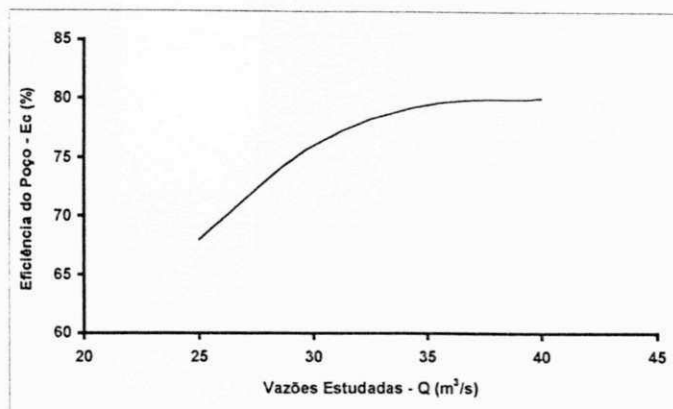


Figura 8.4p - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com um poço horizontal, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de $0,4j$.

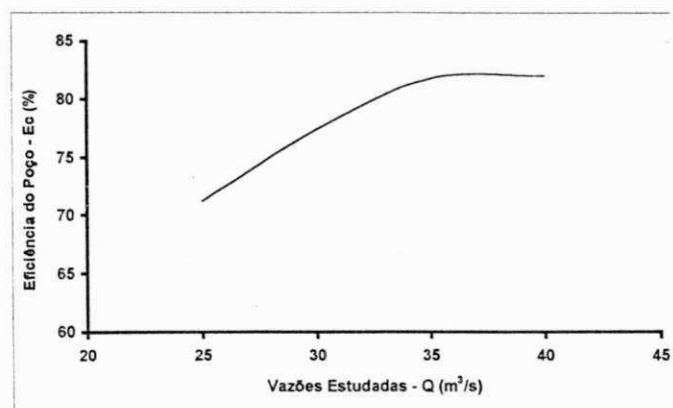


Figura 8.4q- Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com um poço horizontal, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de $0,5j$

8.5 – Uso de Dois Poços Horizontais como Medida de Contenção Hidráulica dos Contaminantes

O resultado referente ao emprego de um sistema de remediação composto por dois poços horizontais, como medida de contenção hidráulica de contaminantes, é apresentado nas Tabelas 8.5a, 8.5b, 8.5c e 8.5d, e nas figuras do item 5 do anexo 1.

Tabela 8.5a - Tabela da Eficiência de Captura de Dois Poços Horizontais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
2 Poços Horizontais		25		0,50		62,5			
Profundidade - P_p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C_{zc}		Profundidade - P_{zc}				E_c	E_{nc}
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	T_c	T_{nc}	$100T_c/T (\%)$	$100 - E_c (\%)$
4	0,2	42,0	0,875	6,2	0,3	14,5	48,0	23,2	76,8
6	0,3	40,0	0,833	8,2	0,4	41,5	21,0	66,4	33,6
8	0,4	38,0	0,792	10,1	0,5	52,4	10,1	83,8	16,2
10	0,5	36,0	0,750	12,2	0,6	57,0	5,5	91,2	8,8

Tabela 8.5b - Tabela da Eficiência de Captura de Dois Poços Horizontais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
2 Poços Horizontais		30		0,50		75,0			
Profundidade - P_p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C_{zc}		Profundidade - P_{zc}				E_c	E_{nc}
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	T_c	T_{nc}	$100T_c/T (\%)$	$100 - E_c (\%)$
4	0,2	44,0	0,917	6,7	0,3	19,0	56,0	25,3	74,7
6	0,3	42,0	0,875	8,3	0,4	50,0	25,0	66,7	33,3
8	0,4	40,0	0,833	10,3	0,5	63,1	11,9	84,1	15,9
10	0,5	38,0	0,792	12,5	0,6	68,5	6,5	91,3	8,7

Tabela 8.5c - Tabela da Eficiência de Captura de Dois Poços Horizontais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
2 Poços Horizontais		35		0,50		87,5			
Profundidade - P_p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C_{zc}		Profundidade - P_{zc}				E_c	E_{nc}
J	Proporção	I	Proporção	J	Proporção	T_c	T_{nc}	$100T_c/T (\%)$	$100 - E_c (\%)$
4	0,2	46,0	0,958	7,0	0,4	26,5	61,0	30,3	69,7
6	0,3	44,0	0,917	8,8	0,4	58,5	29,0	66,9	33,1
8	0,4	42,0	0,875	10,8	0,5	73,9	13,6	84,5	15,5
10	0,5	40,0	0,833	12,6	0,6	80,0	7,5	91,4	8,6

Tabela 8.5d - Tabela da Eficiência de Captura de Dois Poços Horizontais em Função do Número de Tubos de Fluxo Capturados e das Características da Zona de Captura - Vazão Constante $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, Espessura Saturada Média $b=2\text{m}$ e Permeabilidade Hidráulica do Meio $K_x = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e $K_{\text{poço}} = 1,001 \cdot K_x$

Tipo de Poço		Vazão - Q em m^3/h		Incremento		Número Total de Tubos de Fluxo - T			
2 Poços Horizontais		40		0.50		100,0			
Profundidade - P_p		Características da Zona de Captura				Tubos de Fluxo		Eficiência do Poço	
		Comprimento - C_{zc}		Profundidade - P_{zc}				E_c	E_{nc}
J	Proporção	l	Proporção	J	Proporção	T_c	T_{nc}	$100T_c/T (\%)$	$100 - E_c (\%)$
4	0.2	48.0	1.000	7.1	0.4	36.0	64.0	36.0	64.0
6	0.3	46.0	0.958	9.2	0.5	68.0	32.0	68.0	32.0
8	0.4	44.0	0.917	11.2	0.6	84.9	15.1	84.9	15.1
10	0.5	42.0	0.875	12.8	0.6	91.5	8.5	91.5	8.5

A partir das Tabelas 8.5a, 8.5b, 8.5c e 8.5d foram construídos os gráficos, objetivando possibilitar uma melhor representação e entendimento dos resultados. Tais gráficos descrevem a capacidade do sistema de remediação composto por dois poços horizontais de extração, em capturar os tubos de fluxo gerados pelo gradiente hidráulico regional e pelo próprio bombeamento no poço, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j) para as vazões estudadas (25, 30, 35 e $40 \text{ m}^3/\text{h}$).

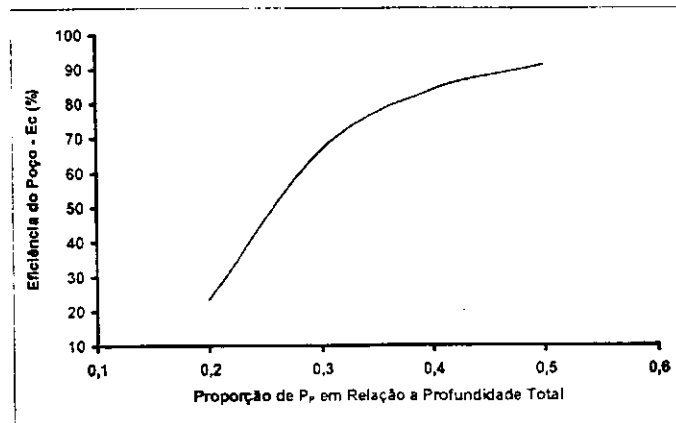


Figura 8.5a - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_c vs. a profundidade do poço, P_p - vazão de $25\text{m}^3/\text{h}$

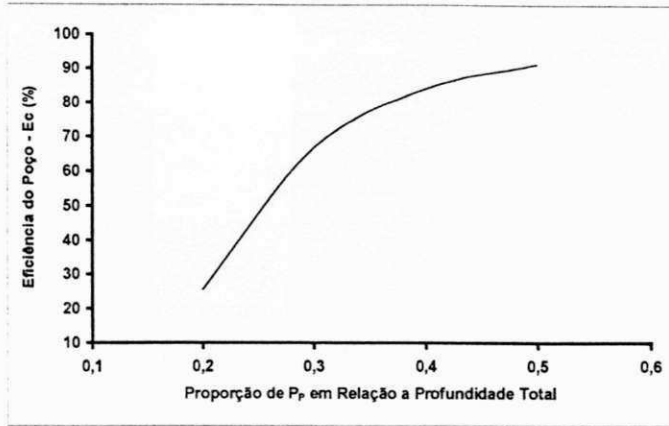


Figura 8.5b - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_C vs. a profundidade do poço, P_P - vazão $30\text{m}^3/\text{h}$

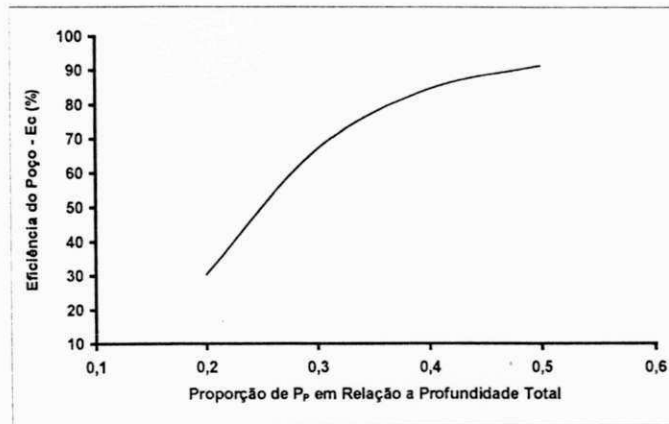


Figura 8.5c - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_C vs. a profundidade do poço, P_P - vazão $35\text{m}^3/\text{h}$.

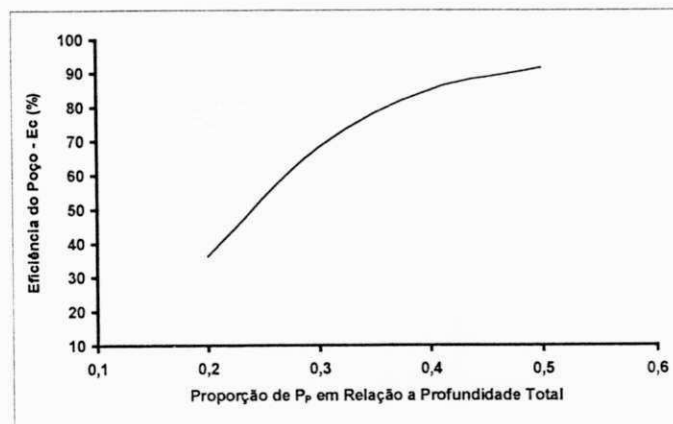


Figura 8.5d - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_C vs. a profundidade do poço, P_P - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$.

A capacidade do sistema de remediação composto por um poço horizontal, sob as mesmas variações impostas de vazão e profundidade, de permitir a passagem do fluxo subterrâneo é apresentada no item 4 do anexo 2.

Os gráficos 8.5e, 8.5f, 8.5g e 8.5h, descrevem a variação do comprimento da zona de captura do sistema de remediação adotado, em função do bombeamento (25, 30, 35 e 40 m³/h), e da variação na profundidade do poço (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j).

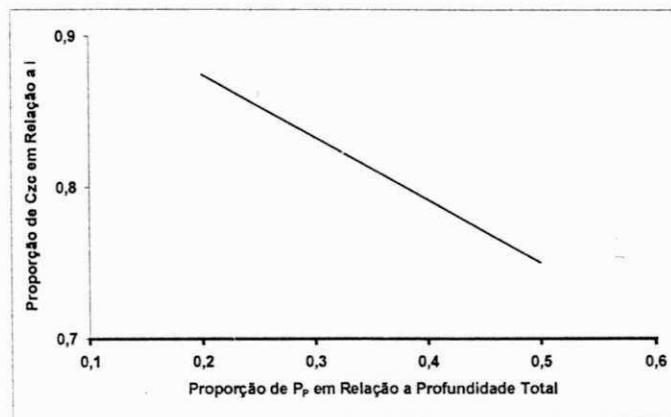


Figura 8.5e - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 25m³/h

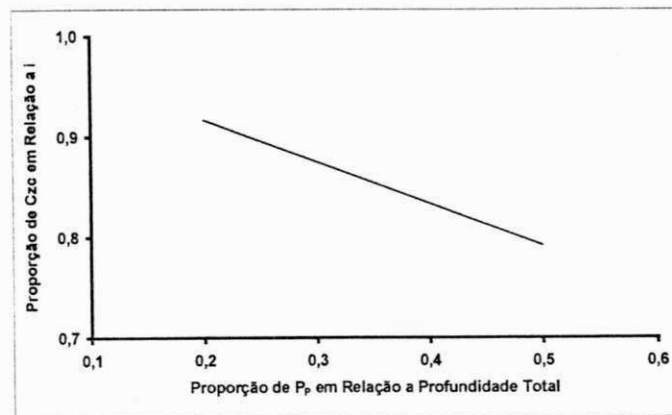


Figura 8.5f - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 30m³/h

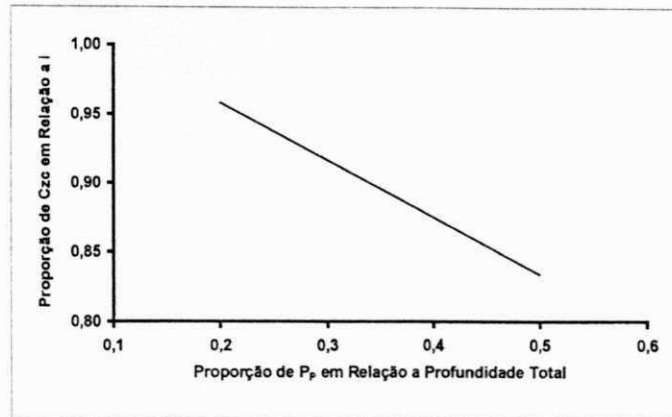


Figura 8.5g - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $35\text{m}^3/\text{h}$

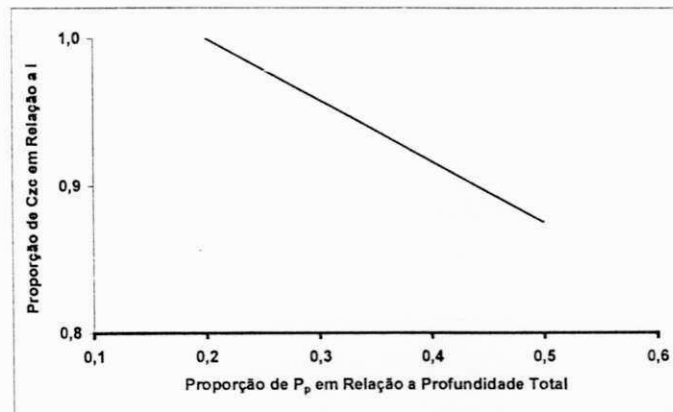


Figura 8.5h - Gráfico do comprimento da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, C_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$

Os gráficos 8.5i, 8.5j, 8.5L e 8.5m, descrevem a variação da profundidade da zona de captura resultante do bombeamento (25, 30, 35 e $40\text{m}^3/\text{h}$) em um único poço de extração, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j).

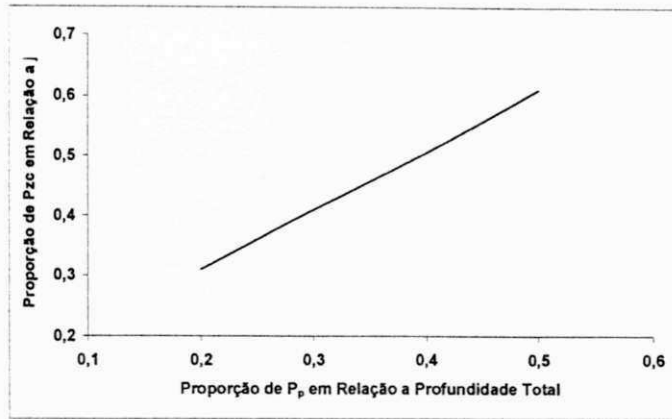


Figura 8.5i - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, P_{zc} vs. a Profundidade do Poço, P_p - Vazão $25\text{m}^3/\text{h}$

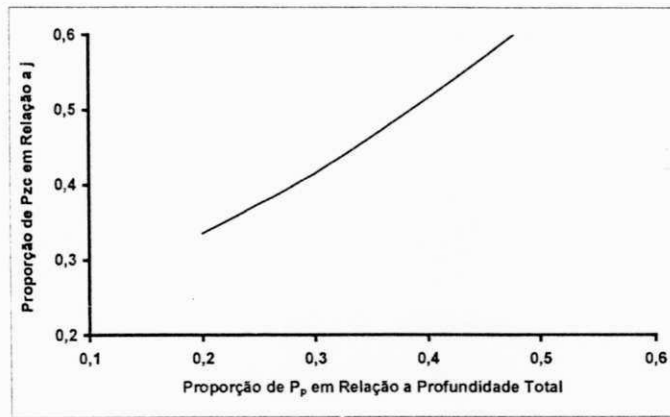


Figura 8.5j - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - Vazão $30\text{m}^3/\text{h}$.

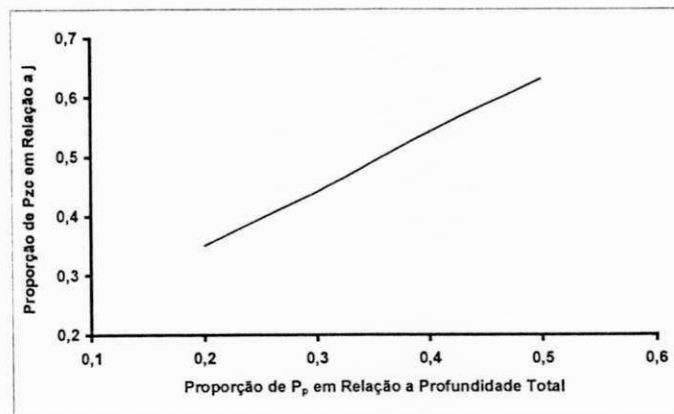


Figura 8.5L - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $35\text{m}^3/\text{h}$.

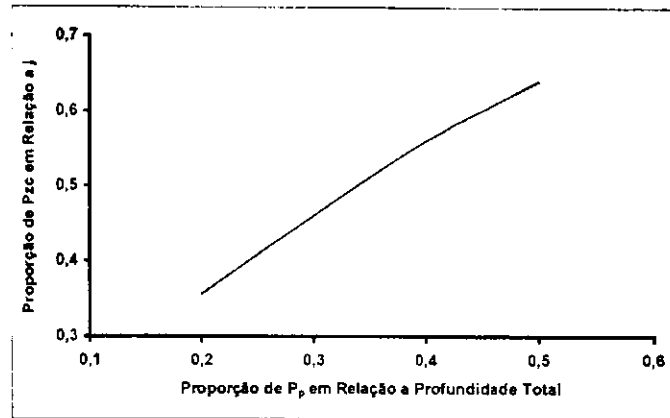


Figura 8.5m - Gráfico da profundidade da zona de captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, P_{zc} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$.

Na Tabela 8.5e são apresentados os resultados da variação da eficiência de captura do sistema de remediação, com dois poços horizontais de extração, em função do aumento na vazão, para as penetrações de 0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j.

Tabela 8.5e - Tabela da eficiência de captura do sistema de remediação, com um poço horizontal, em função das vazões de extração, para as penetrações de 0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j

Vazão - Q (m^3/s)	$E_{C-0,2\%}$	$E_{C-0,3\%}$	$E_{C-0,4\%}$	$E_{C-0,5\%}$
25	23,2	66,4	83,8	91,2
30	25,3	66,7	84,1	91,3
35	30,3	66,9	84,5	91,4
40	36,0	68,0	84,9	91,5

A partir da Tabela 8.5e foram obtidos os gráficos 8.5n, 8.5o, 8.5p e 8.5q.

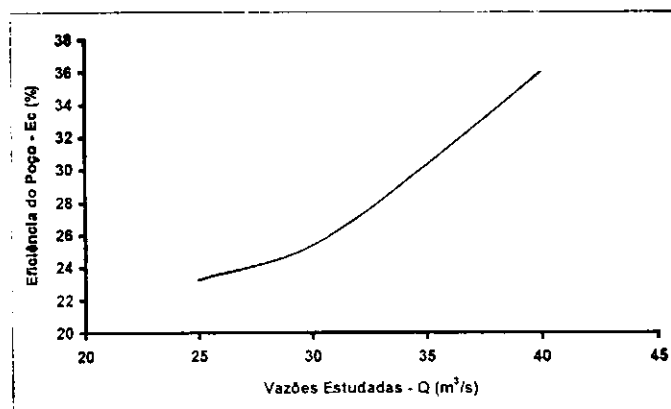


Figura 8.5n - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com dois poços horizontais, E_c vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,2j

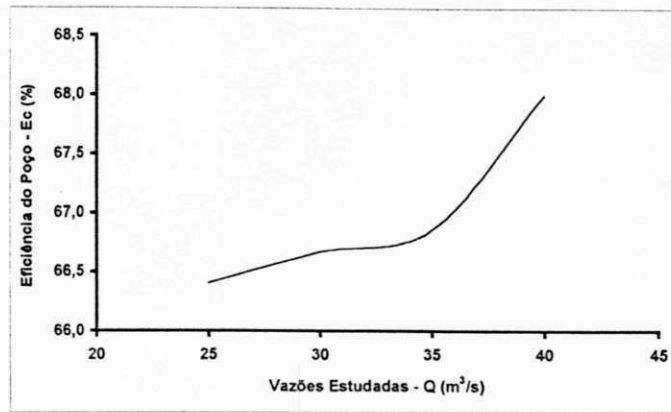


Figura 8.5o - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com dois poços horizontais, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,3j

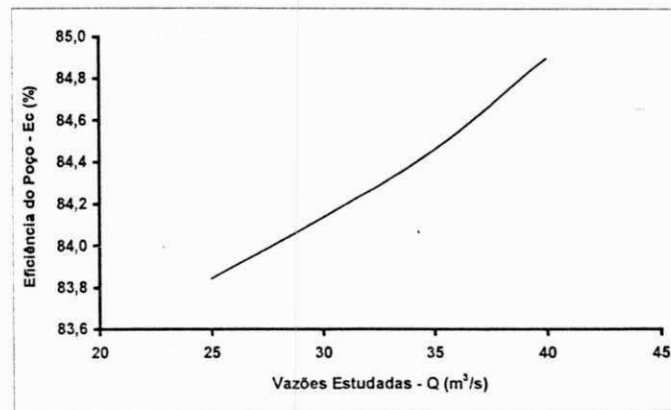


Figura 8.5p - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com dois poços horizontais, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,4j

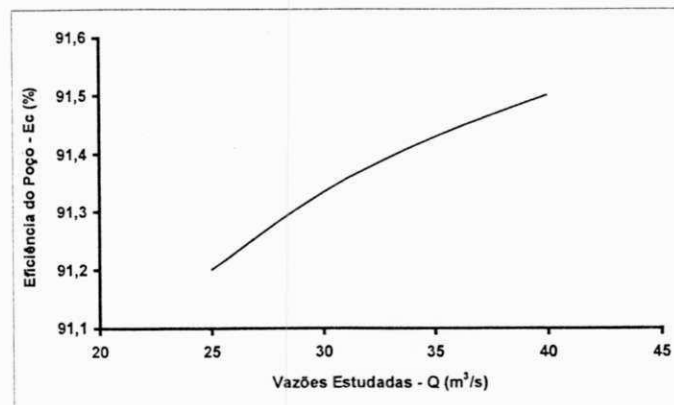


Figura 8.5q - Gráfico da eficiência de captura do sistema de remediação com dois poços horizontais, E_C vs. vazão, Q - para a profundidade de 0,5j

Capítulo IX

Discussão dos Resultados e Conclusões

Visto os resultados apresentados na forma das Tabelas 8.1a a 8.5e e dos Gráficos 8.1a 8.5q, foi feita uma análise dos gráficos em relação à formação das zonas de captura - nos casos respectivos de poços verticais e horizontais. Foi enfatizada a necessidade da descontaminação da parte rasa do aquífero, com o objetivo de aplicar estes resultados em casos práticos que poderão ser empregados no campo caso haja contaminação.

Como é conhecido, cada tipo de contaminação possui características únicas, e a escolha do método de descontaminação adequado recairá sobre o sistema de contenção hidráulica que melhor se adequa a situação. A geometria da pluma de contaminantes influenciará na escolha do melhor sistema de contenção hidráulica da pluma. Assim foi estabelecido o procedimento para um conjunto de um ou mais (2 ou 3) poços (sejam no caso de poços horizontais ou verticais) que criem uma zona de captura que englobe a pluma inteiramente.

A respeito dos Poços Verticais: a fim de remover os poluentes nos aquíferos rasos, foi empregada uma bateria de poços verticais, contendo um, dois e até três poços de extração, como medida de contenção hidráulica dos contaminantes. A variação dos parâmetros físicos dos poços verticais envolvidos incluiu o tamanho, a profundidade e o espaçamento entre os poços, além das permeabilidades do meio da matriz e do material do poço. Os

resultados comprovaram a eficiência e a aplicabilidade deste método para região em estudo. A medida em que aumentamos o número de poços de extrações verticais, estaremos reduzindo o impacto sobre o campo de fluxo. Porém, a espessura do aquífero é um fator limitante para a contenção dos contaminantes, pois a vazão total para o conjunto dos poços tende a diminuir com no aumento do número dos mesmos.

O método apresentado para determinar as características das zonas de captura num domínio retangular de fluxo, é útil na elaboração de projetos, locação e operação de sistemas de extração para as plumas de contaminantes que penetram parcialmente nos aquíferos rasos. As soluções bidimensionais assumem que as zonas de captura são totalmente penetrantes, e na verdade superestima a quantidade de fluxo necessária para a obtenção da capturada pluma. Ao se fazer, uma análise usando a secção vertical do aquífero, o efeito da penetração parcial pôde ser tratado, e um resultado mais preciso obtido.

Em termos de remediação, não há vantagem em se aumentar a profundidade dos poços verticais para valores maiores que 80% da profundidade total, visto que não se verifica um incremento significativo na captura dos tubos de fluxo que justifique tal ação.

Especificações gerais para os poços verticais: As tabelas 8.1a a 8.3.e mostram a eficiência dos poços verticais (sejam com um, dois ou três poços espaçados de acordo com o capítulo 8) em função do número total dos tubos de fluxo capturados. Os parâmetros usados foram a profundidade do poço em termos de J , posicionamento dos poços, vazão q em m^3/s , e incremento i .

Caso de um poço vertical: As eficiências obtidas em termos de porcentagem de tubos capturados, para um único poço vertical, variaram de 24,8 até 64,0 (vazão $Q=25m^3/s$), enquanto que para $Q = 30, 35$ e $40 m^3/s$, variaram de 26,7 a 64,0, 26,9 a 64,6 e 28,0 a 65,0, respectivamente. Em todos os casos as profundidades adimensionais em termos de J , variaram de $0,2j$ a $0,5j$.

Contatou-se que com o aumento da vazão de 25 a 40, e com aumentos correspondentes de profundidades de 0,2j a 0,4j, houve um aumento na eficiência de captura do poço de 24,8% para 62,5%. Entretanto sob a mesma variação de vazão no intervalo de 0,4j para 0,5j houve um aumento de 61,6% para 65,0%, o que não é significativo. Sendo assim a implantação de poços a profundidades acima de 40% da profundidade total, resultariam em um ganho de eficiência de 3,4%.

Caso de dois poços verticais: As eficiências obtidas em termos de porcentagem de tubos capturados, para dois poços verticais, variaram de 23,2 até 91,2 (vazão $Q=25\text{m}^3/\text{s}$), enquanto para as vazões de $Q = 30, 35$ e $40 \text{ m}^3/\text{s}$, variaram de 25,3 a 91,3, 30,3 a 91,4 e 36,0 a 91,5, respectivamente. Em todos os casos as profundidades adimensionais em termos de J, variaram de 0,2j a 0,5j.

Contata-se que com o aumento da vazão de 25 a 40, e com aumentos correspondentes de profundidades de 0,2j a 0,5j, houve um aumento na eficiência de captura dos poços de 23,2% para 84,9%. Entretanto sob a mesma variação de vazão no intervalo de 0,4j para 0,5j houve um aumento de 83,8% para 91,5%, o que não é significativo. Sendo assim a implantação de poços a profundidades acima de 40% da profundidade total, resultariam em um ganho de eficiência de 7,7%.

Caso de três poços verticais: As eficiências obtidas em termos de porcentagem de tubos capturados, para três poços verticais, variaram de 39,2 até 92,6 (vazão $Q=25\text{m}^3/\text{s}$), enquanto para as vazões de $Q = 30, 35$ e $40 \text{ m}^3/\text{s}$, variaram de 40,0 a 92,7, 42,9 a 92,9 e 44,0 a 93,2, respectivamente. Em todos os casos as profundidades adimensionais em termos de J, variaram de 0,2j a 0,5j.

Observou-se que com o aumento da vazão de 25 a 40, e com aumentos correspondentes de profundidades de 0,2j a 0,4j, houve um aumento na eficiência de captura dos poços de 39,2% para 85,1%. Entretanto sob a mesma variação de vazão no intervalo de 0,4j para 0,5j houve um aumento de 84,2%

para 93,2%, o que não é significativo. Sendo assim a implantação de poços a profundidades acima de 40% da profundidade total, resultariam em um ganho de eficiência de 9,0%.

De acordo com o exposto acima, de uma maneira geral, os sistemas de remediação composto por uma bateria de poços verticais (seja um, dois ou três poços), apresentou um aumento significativo de eficiência para as profundidades relativas de 0,2j a 0,3, um aumento menor para as profundidades no intervalo 0,3j a 0,4j e um aumento mínimo de 0,4j a 0,5j. No ultimo intervalo, o aumento na eficiência do sistema vertical composto por um, dois e três poços foi de 3,4%, 7,7% e 9,0%, respectivamente. Sendo assim o maior ganho de eficiência, para ambos os sistemas, dar-se para as profundidades de instalação menores que 40% (0,4j) da profundidade total do aquífero.

Poços Horizontais: O conceito de uso do Poços Horizontais é uma técnica mais recente e que está sendo seguido no mundo inteiro devido aos custos baixos e alta eficiência do mesmo. Os Poços horizontais terão acesso exato para qualquer situação, até para abaixo dos containers/tanques vazantes de contaminantes, e sem perturbar o ambiente natural, dá para se realizar a captura total dos poluentes.

O sistema de contenção hidráulica de contaminantes, composto por um único poço horizontal, mostrou-se mais eficiente do que os compostos por poços verticais. Entretanto tal eficiência, poderia ser mais evidente, caso o aquífero apresentasse uma espessura maior, pois embora o uso de poço(s) horizontal não tenha como fator limitante a espessura do aquífero, este método é bastante sensível à flutuação do nível freático, que torna-se bem mais preponderante nos aquíferos rasos.

A análise dos resultados para o caso dos poços horizontais deixa claro que na área selecionada, o aumento na profundidade de instalação a partir de 0,8 da profundidade total não se justifica, pois não foi verificado aumento relevante na captura dos tubos de fluxo.

O uso de um sistema de contenção hidráulica com dois poços horizontais foi tratado unicamente com interesse acadêmico, tendo em vista que o custo com a sua instalação e manutenção tornaria tal sistema economicamente inviável.

Especificações gerais para os poços horizontais: As tabelas 8.4a a 8.5s mostram a eficiência dos poços horizontais (sejam com um ou dois poços espaçados de acordo com o capítulo 8) em função do número total dos tubos de fluxo capturados. Os parâmetros usados foram a profundidade do poço em termos de J , posicionamento dos poços, vazão em m^3/s , e incremento i .

Caso de um poço horizontal: As eficiências obtidas em termos de porcentagem de tubos capturados, para um único poço horizontal, variaram de 24,8 até 71,2 (vazão $Q=25m^3/s$), enquanto que para $Q = 30, 35$ e $40 m^3/s$, variaram de 26,7 a 77,3, 28,0 a 81,7 e 29,0 a 82,0, respectivamente. Em todos os casos as profundidades adimensionais em termos de J , variaram de $0,2j$ a $0,5j$.

Constatou-se que com o aumento da vazão de 25 a 40, e com aumentos correspondentes de profundidades de $0,2j$ a $0,4j$, houve um aumento na eficiência de captura do poço horizontal de 24,8% para 80,0%. Entretanto sob a mesma variação de vazão no intervalo de $0,4j$ para $0,5j$ houve um aumento de 68,0% para 82,0%, o que não é significativo. Sendo assim a instalação de poços horizontais a profundidades maiores que 40% da profundidade total, resultariam em um ganho de eficiência de 14,4%.

Caso de dois poços horizontais: As eficiências obtidas em termos de porcentagem de tubos capturados, para dois poços verticais, variaram de 23,2 até 91,2 (vazão $Q=25m^3/s$), enquanto para as vazões de $Q = 30, 35$ e $40 m^3/s$, variaram de 25,3 a 91,3, 30,3 a 91,4 e 36,0 a 91,5, respectivamente. Em todos os casos as profundidades adimensionais em termos de J , variaram de $0,2j$ a $0,5j$.

Contata-se que com o aumento da vazão de 25 a 40, e com aumentos correspondentes de profundidades de 0,2j a 0,5j, ouve um aumento na eficiência de captura dos poços horizontais de 24,2% para 85,9%. Entretanto sob a mesma variação de vazão no intervalo de 0,4j para 0,5j ouve um aumento de 84,8% para 95,5%, o que não é significativo. Sendo assim a instalação de poços horizontais a profundidades maiores que 40% da profundidade total, resultariam em um ganho de eficiência de 10,7%.

Comparação entre as Zonas de Captura de Poços Verticais e Poços Horizontais:

O comprimento das zonas de captura obtidas com um único poço vertical, variara de 34,0 até 40,0 (vazão $Q=25\text{m}^3/\text{s}$), enquanto que para $Q = 30, 35$ e $40 \text{ m}^3/\text{s}$, variaram de 36,0 a 42,0, 38,0 a 44,0 e 40,0 a 46,0, respectivamente.

O comprimento das zonas de captura obtidas com dois poços verticais, variara de 54,0 até 63,0 m (vazão $Q=25\text{m}^3/\text{s}$), enquanto que para $Q = 30, 35$ e $40 \text{ m}^3/\text{s}$, variaram de 57,0 a 66,0 m, 60,0 a 69,0 m e 63,0 a 72,0 m, respectivamente.

O comprimento das zonas de captura obtidas com três poços verticais, variara de 75,0 até 87,0 m (vazão $Q=25\text{m}^3/\text{s}$), enquanto que para $Q = 30, 35$ e $40 \text{ m}^3/\text{s}$, variaram de 79,0 a 91,0 m, 83,0 a 95,0 m e 84,0 a 96,0 m, respectivamente.

O comprimento das zonas de captura obtidas com um único poço horizontal, variara de 102,0 até 120,0 m (vazão $Q=25\text{m}^3/\text{s}$), enquanto que para $Q = 30, 35$ e $40 \text{ m}^3/\text{s}$, variaram de 108,0 a 126,0 m, 114,0 a 132,0 m e 120 a 138,0 m, respectivamente.

O comprimento das zonas de captura obtidas com dois poços horizontais, variara de 108,0 até 126,0 m (vazão $Q=25\text{m}^3/\text{s}$), enquanto que para $Q = 30, 35$ e $40 \text{ m}^3/\text{s}$, variaram de 114,0 a 132,0 m, 120,0 a 138,0 m e 126,0 a 144,0 m, respectivamente.

De acordo com os parágrafos acima, fica clara a maior eficiência do poço horizontal em relação aos verticais na contenção de contaminantes, visto que este tipo de sistema de remediação produz uma zona de captura maior do que as dos sistema compostos por poços verticais. A zona de captura obtida com o emprego de um poço horizontal foi em média 3 vezes maior do que a obtida com um único poço vertical, 1,9 vezes maior do que a com o uso dois poços verticais e 1,38 do que a obtida com três poços verticais.

Capítulo X

Recomendações

9.1 – Recomendações

Devido as limitações inerentes de recurso e de tempo, muita vezes somos impedidos de ampliar o horizonte de nossas metas, ou até mesmo de atingi-las totalmente, todavia tais fatos não torna o nosso trabalho irrelevante ou incompleto, mais sim passível de ser retomado mediante o emprego de novas metodologias e conceitos. A seguir são apresentadas recomendações para as futuras pesquisas que venham a abordar este tema, como enfoque central.

O meio externo aos poços foi tratado como homogêneo e isotrópico, sendo assim sugere-se que sejam tratadas a heterogeneidade e a anisotropia do meio externo.

Neste trabalho foram tratadas apenas as zonas de captura em torno dos poços, sejam horizontais ou verticais, não foi simulado o fluxo dos contaminantes. Sendo assim recomenda-se que tal abordagem seja feita.

Devido à inexistência recursos para a coleta de dados de campo, os dados utilizados foram os que foram extraídos da CDRM. Desta forma recomendamos que tais valores sejam conferidos, mediante coletas de dados na área aluvial estudada.

A malha do modelo adotada apresentou dimensões fixas. O uso de uma malha mista, que possibilite uma maior discretização nas áreas próximas ao poço é recomendado.

Nesta pesquisa não foi tratado um sistema de tratamento para água contaminada extraído do aquífero, sendo assim recomendamos tal abordagem.

Capítulo XI

Bibliografia

- Apgar, M. A. & Satherthwaite, W. B. Jr., groundwater contamination associated with the llangollen landfil, new castle county, Delaware. In: RES. SYMP. GAS AND LEACHATE FROM LANDFILLS, New Brunswick, Proc...EPA-NERC, Cincinnati, Ohio, 1975.
- Ayers, R. S. & Branson, R. C., Nitrates in the upper Santa Anna River in relation to ground water pollution. Calif. Agr. Exp. Sta. Bull. 861, p.60, 1973.
- Bear, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*.. New York: American Eisevier, 1972.
- Bear, J., *Hydraulics of Groundwater*. USA: McGraw, Hill Book Company, 1979.
- Bear, J., and Verruijt, A., Modeling groundwater flow and pollution: theory and application of transport in porous media, D. Reidel Publishing Company, Dordrechd, Holland, 1987.
- Broadbent, F. E. 1971. Nitrogen in soil and water. In: SYMP. NITROGEN SOIL WATER, Guelph: University of Guelph, p. 56. 1971.
- Cade, R. W., Horizontal wells: development and applications, present at IOR Conference sponsored by UK Dept. Of Trade and Industry, 1997.
- CDRM: Relatório final – abastecimento d'água e captações concluídas, São Bento, PB, Divisão de Hidrogeologia e Sondagens, Campina Grande, 1986.
- Custodio, E. & Llamas, M. R., *Hidrologia Subterranea*, 2e d., Barcelona: Ediciones Omega, 1983.
- Filho, João M., Feitosa, Fernando A. Carneiro e Costa, Waldir Duarte, Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. 412p: il

- Foster, M. D. & Crease, R. L., Nitrate pollution of chalk ground water in east Yorkshire: a hydrogeological appraisal. In: *Nitrate pollution in Europe*. New York: Water Information Center, Port Washington, p. 269-271, 1972.
- Freeze, A., and Cherry, J.A., *Groundwater*, New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 604 p. 1979.
- Freeze, A., Gorelick, Steven M., Donohue, David and Keely, Joseph F., *Groundwater contamination: optimal capture and containment*, LEWIS PUBLISHERS, 1993.
- Freyberg, D. L., A Natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer, 2. Spatial movements and the advection and dispersion of nonreactive tracers. *Water Resour. Res.*, v. 22, n. 13, p. 2031-2047, 1986.
- Flipse, W. J. Jr., Katz, B. G., Linder, J. B. and Markel, R., Sources of nitrate in ground water in a sewered housing development, central Long Island, New York. *Ground Water*, v. 22, n. 4, p. 418-425, 1984.
- Gariand, G. A. & Mosher, D. C., Leachate effects from improper land disposal. *J. Wasteage*, 6, p. 42-48. 1975.
- Griffin, R. A., Cartwright, K., Shimp, N. F. et al., Alteration of pollutants in municipal landfill leachate by clay minerals: Part 1. Column leaching and field verification. *Illinois State Geol. Surv. Bull.* 78. 1976.
- Groba, F. & Hahn, J., Variations of groundwater chemistry by anthropogenic factors in northwest Germany. In: INTERN. GEOL. CONGR., 24. Montreal, 1972. Proc... Montreal; IGC, sec. 11, *Hydrogeology*, p. 270-281, 1972.
- Harr, M. E., *Groundwater and Seepage*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1962.
- Hazardous Waste Remedial Actions Program (HAZWRAP), "In Situ Bioremediation Using Horizontal Wells", Innovative Technology Summary Report, prepared for U.S. Department of Energy, available at <http://www.gnet.org/gnet/tech/reports/sbu.html>, 1996.
- Hill, A. R., Nitrate distribution in the ground water of the Alliston region of Ontario, Canada, *Ground Water*, v. 20, n. 6, p. 696-702, 1982.
- IARHA – Informação para Análise dos Recursos Hídricos e do Meio Ambiente, <http://www.hidricos.mg.gov.br/in-in.htm>, 1998.

- Javandel, Iraj and Chin-Fu Tsang., Capture-zone type curves: a tool for aquifer cleanup. *Ground Water*. v. 24, no. 5, 1986.
- Kinzelbach, W. *Groundwater Modelling: an introduction with simple programs in Basic*. development in water science, 26-Elsevier, Amsterdam, 1986.
- Koch, M., Dupuit-Forchheimer formulation of a transport finite element model: application to remediation of a shallow, unconfined aquifer, *Hydraulic Engineering Software*, 509-515p, 1998.
- Krone, R. B., Orlab, G. T., Hodgkinson, C., Movement of coliform bacteria through porous media. *Sewage Industrial Wastes*, v. 30, p. 1 - 13, 1958.
- Leckie, J. O., Pace, J. G., Halvadakis, C., Accelerated refuse stabilization through controlled moisture application. *Dep. Environm. Eng.*, Stanford University, Stanford, Calif. 1975. (inédito).
- Mackay, D. M., Freyberg, D. L., Roberts, P. V., Cherry, J. A., A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer, 1. approach and overview of plume movement. *Water Resour. Res.* v. 22, n. 13, p. 2017-2030, 1986.
- Miller, Ralinda R., *Horizontal Wells, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center*, October 1996.
- Morese, Alex, Michigan's drinking water, <http://gem.msu.edu/gw/tutorial>, 1998.
- Perimutter, N. M., Lieber, M. and Frauenthal, H. L., Contamination of ground water by detergents in a suburban environment: south Farmingdale area, Long Island. New York. p. 170-175 (U. S. Geol. Surv. Prof. Paper 501-C), 1964.
- Philip, Ross D. and Gary R. Waiter., Prediction of flow and hydraulic head fields for vertical circulation wells. *Ground Water*. v. 30, no. 5, 1992.
- Rebouças, A. C., Diagnóstico do setor hidrogeologia. [s.l]: Ass. Bras. Água Subt. /ABAS/PADCT (inédito), 1996.
- Roberts, P. V., Goltz, M. N. and Mackay, D. A., A natural gradient experiment on solute transport, 3. Retardation estimates and mass balances for organic solutes. *WaterResour. Res.* v. 22, n. 132, p. 2047-2059, 1986.

- RADAMBRASIL, Rio de Janeiro, Folha SB. 26/27, Jaguaribe/Natal. Vol. 23 – Levantamento de reservas naturais, pp 574-576, 1981.
- Schafer, David C., Determining 3D capture zones in homogeneous, anisotropic aquifers, *GROUND WATER*, vol. 34, No. 4, July-August, 1996.
- Sarma, Seemanapalli V. K. e Silva, T. C., Respostas hidráulicas do aquífero ao bombeamento, *ABAS*, nº 11, p 26-32, 1987.
- Sarma, Seemanapalli V. K. e Oliveira, Carlos S. S. "O papel da recarga na remoção dos poluentes nos aquíferos rasos" *ABRH*, 20-23, Nov. 1997, Vitória, ES pp. 507-512
- Sarma, Seemanapalli V. K. e Oliveira, Carlos S. S. "Drenos Interceptores nas Terras Agrícolas - Uma Solução para conter poluição por Agrotóxicos", XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - Semi-árido desafio da Enga. Agrícola - Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA), 21 a 25 de julho, 97, Campina Grande -PB.EAS 019
- Sarma, Seemanapalli V. K. e Pereira, Antonio de A., O papel da infiltração induzida de um rio sobre a zona de captura do poço no estudo da poluição e descontaminação da mesma, *ABRH*, p1997.
- Sarma, Seemanapalli V. K. e Nobrega, Silvestre L. da "O Fluxo Bi-D aplicado para proteção de Poço - O Papel da Zona de Extração na Descontaminação Subterrânea", XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola-Semi-árido desafio da Eng. Agrícola, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA), 21-25, Julho,97, C. Grande -PB. EAS 017
- Sarma, Seemanapalli V. K. e Pereira, Antônio de Araújo "Influência do Fluxo Induzido do Rio sobre o Aquífero - Um Método útil para descontaminar o Aquífero poluído", XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - Semi-árido desafio da Eng. Agrícola - Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA), 21 a 25 de julho, 97. EAS 018
- Sarma, Seemanapalli V. K. e Oliveira, Carlos S. S. "Use of Interceptor Drains to Decontaminate Polluted Aquifers and Modelling of the Same in T-Pascal", (em Portugues: Uso dos Drenos Interceptores na Descontaminação dos Aquíferos Poluídos e Modelação dos mesmos em T-Pascal), Conferência Internacional sobre desenvolvimento dos Projetos Recursos Hídricos de grande escala, 20 a 23 Out. 97 em Kathmandu, Nepal, pp. MM 180-186.

- Sarma, Seemanapalli V. K. e Pereira, Antonio de Araujo "Decontamination of Polluents from Aquifers using the Concept of Induced Flow from Adjacent Rivers", (em Portugues: Descontaminação de Poluentes dos Aquiferos usando o Conceito de Fluxo Induzido dos Rios Adjacentes - Conferência Internacional sobre desenvolvimento de Projetos de Recursos Hídricos de grande escala, 20 a 23 Out. 97 em Kathmandu, Nepal, pp. EI 17-24.
- Sarma, Seemanapalli V. K., Pereira, Antonio de Araujo e Nobrega, Silvestre Lopes da "O Papel da Zona de Extração na Descontaminação Subterrânea", ABRH, 20-23, Nov. 1997, Vitória, ES, pp. 513-518
- Sarma, Seemanapalli V. K., Pereira, Antonio de Araujo and Borges, Gilliano V. L. "Effect of Induced Infiltration from River which might pollute the adjacent Agricultural Lands due to Undue Pumping", International Conference on Food Security and Crop Science, Nov. 3-6, 1998, Hisar, India, pp.148
- Sarma, Seemanapalli V. K. e Lopes, Walszon Terllizzie A. "Simulação de Transporte de Contaminantes" , IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 09-12 de Nov. De 1998, Campina Grande, PB, Brasil, p. 69
- Sarma, Seemanapalli V. K., Oliveira, Carlos S. S. and Alex Neyves ", Subsurface Polution Control using Interceptor Drains" National Groundwater Association, Convention, NGWA, Nashville, TN, USA, Dec. 3-6, 1999
- Sastry, Seemanapalli V. e Sarma, Seemanapalli V. K., "Rede de Fluxo em Aquíferos Livres usando Computação Gráfica", Atmosfera e Água, Revista Científica, Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos de Alagoas, Nov. 1999-10-21
- Shan, Chao, Ronald W. Falta, and Iraj Javandel. 1992. Analytical solutions for steady state gas flow to a soil vapor extraction well.
- Silva, Rosa Beatriz Gouvêia da - As Águas Subterrâneas: um valioso recurso que requer proteção. São Paulo, DAEE, 1987. 26p. il. 11cm.
- Spalding, R. F., Gormly, J. R. Curtis, B. H. and Exner, M. E., Nonpoint nitrate contamination of groundwater in Merrick Country, Nebraska. *Ground Water*, n. 16, p. 86-95, 1978.
- Strack, Otto D. L., Groundwater Mechanics. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- Todd, D. K., Ground Water Hydrology. New York: Jonh Wiley. 332p.

Wang, H. F., and Mary P. Anderson, *Introduction to Groundwater Modelling*, W. H. Freeman, 1982.

Wilson, David D., "Horizontal Environmental Wells", available at <http://www.horizontalwell.com/>, 1996.

Anexo I

Figuras resultantes da simulação dos poços verticais e horizontais

Item 1 - Um Poço vertical

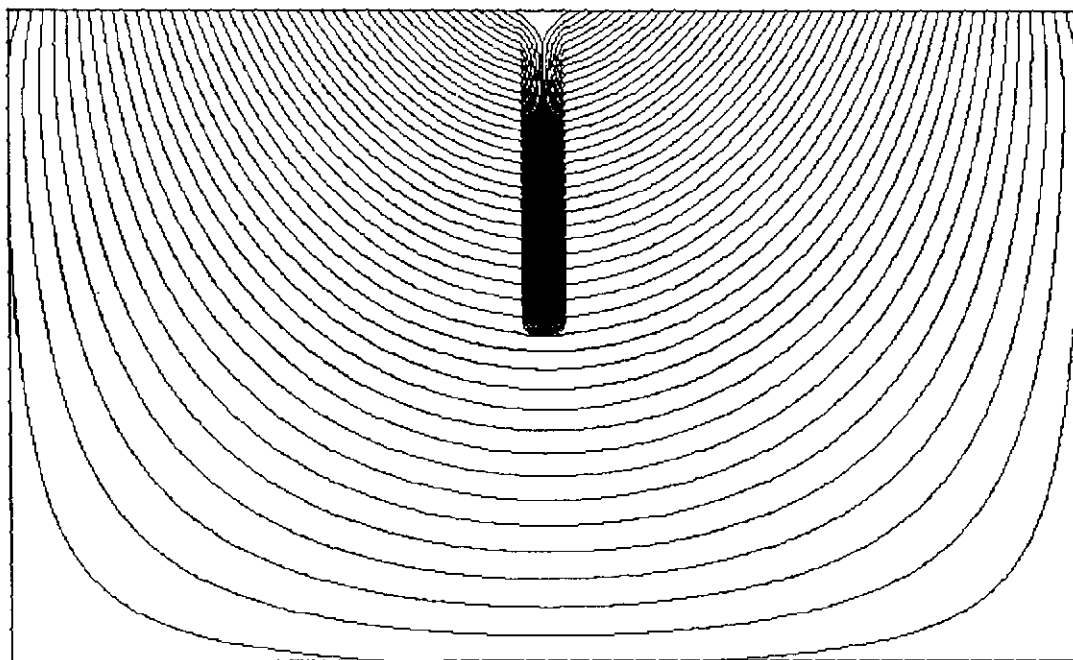


Figura A1-1a – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de um único poço vertical de extração com profundidade $0,5j$, vazão Q de $25\text{m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K \text{ real} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

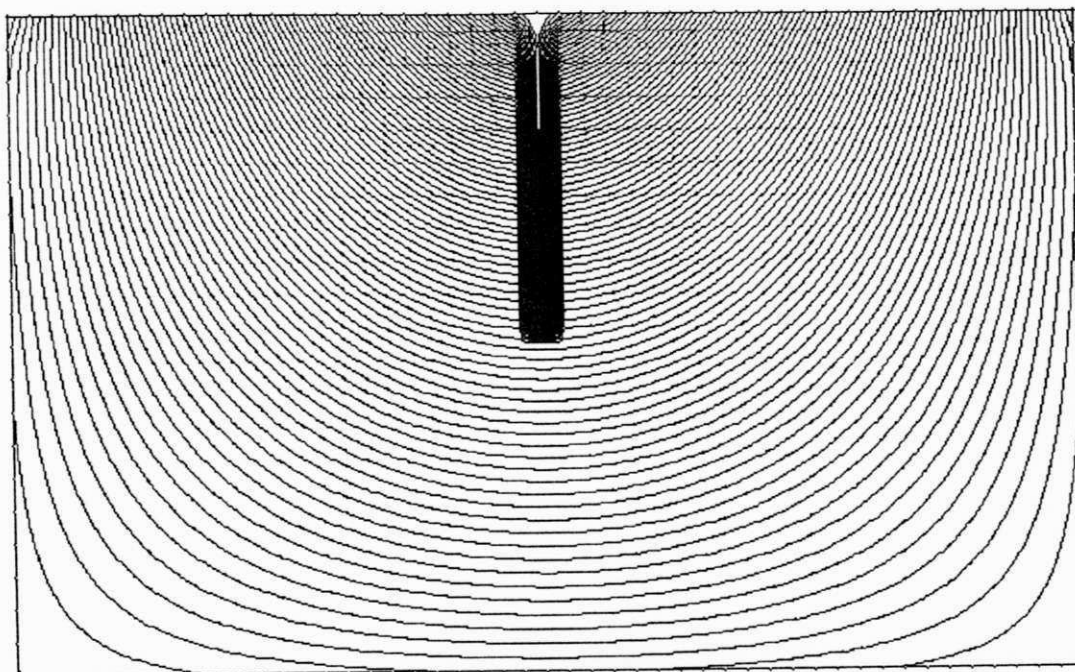


Figura A1-1b – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de um único poço vertical de extração com profundidade $0,5j$, vazão Q de $40\text{m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K \text{ real} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

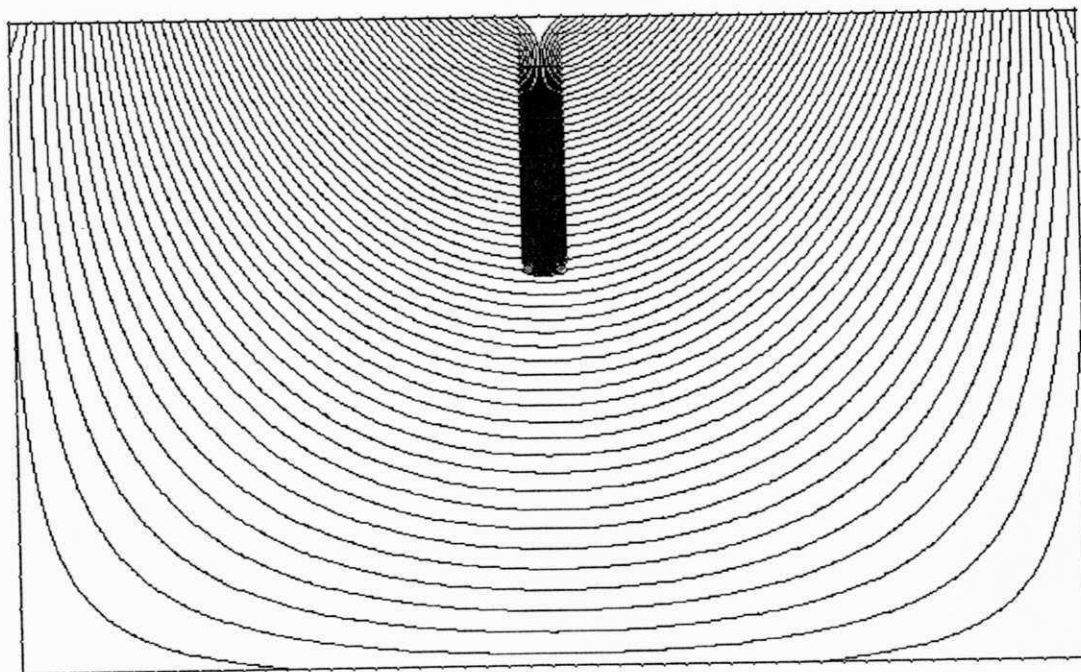


Figura A1-1c – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de um único poço vertical de extração com profundidade $0,4j$, vazão Q de $40\text{m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K \text{ real} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

Item 2 - Dois Poços Verticais

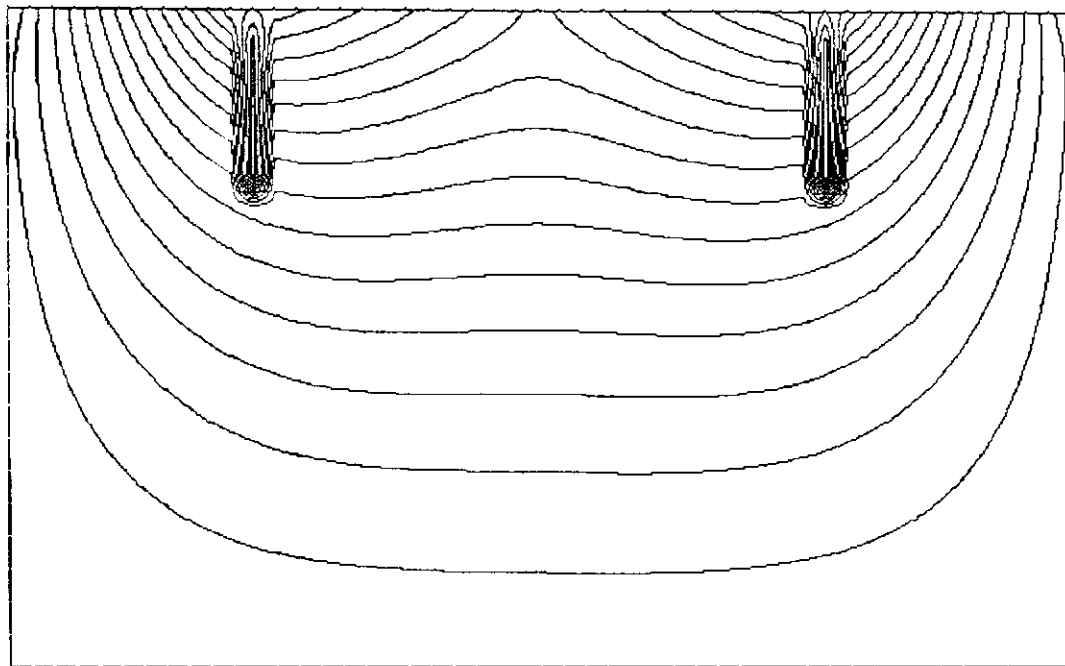


Figura A1-2a – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de dois poços verticais de extração com profundidade 0,3j, vazão Q de $25\text{m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K_{\text{real}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

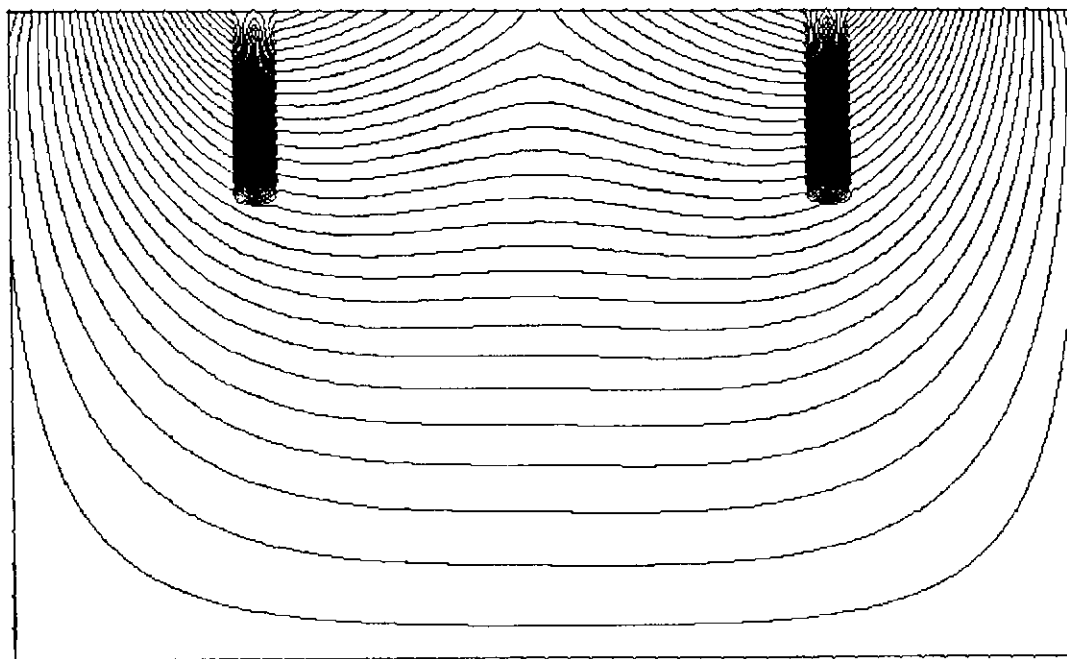


Figura A1-2b – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de dois poços verticais de extração com profundidade 0,3j, vazão Q de $40\text{m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K_{\text{real}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

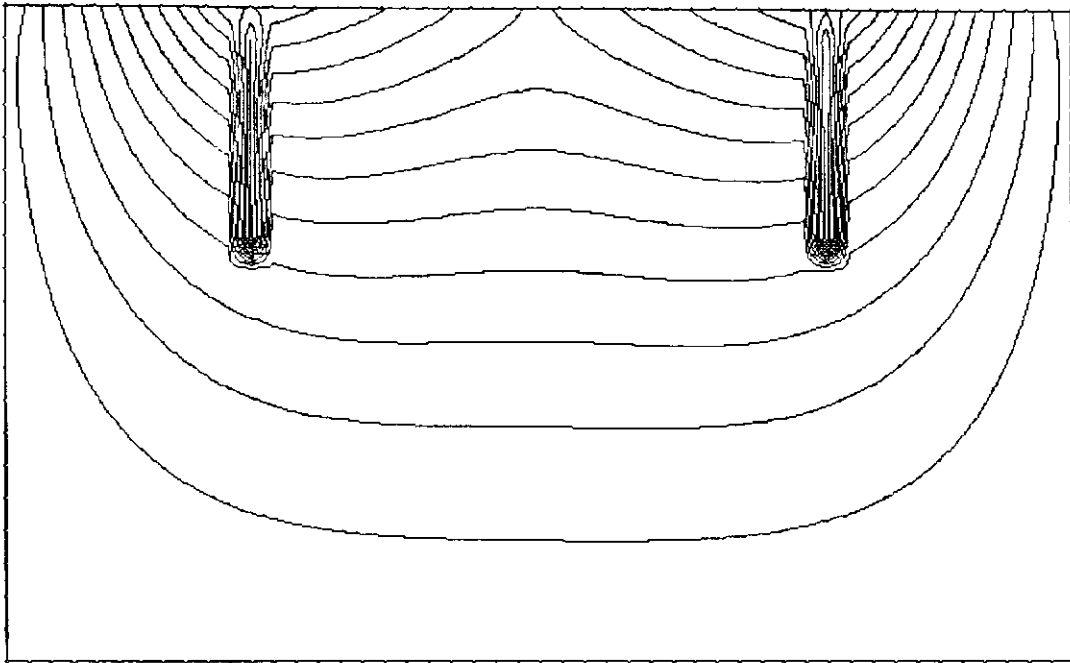


Figura A1-2c – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de dois poços verticais de extração com profundidade $0,4j$, vazão Q de $25 \text{ m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K \text{ real} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

Item 3 - Três Poços Verticais

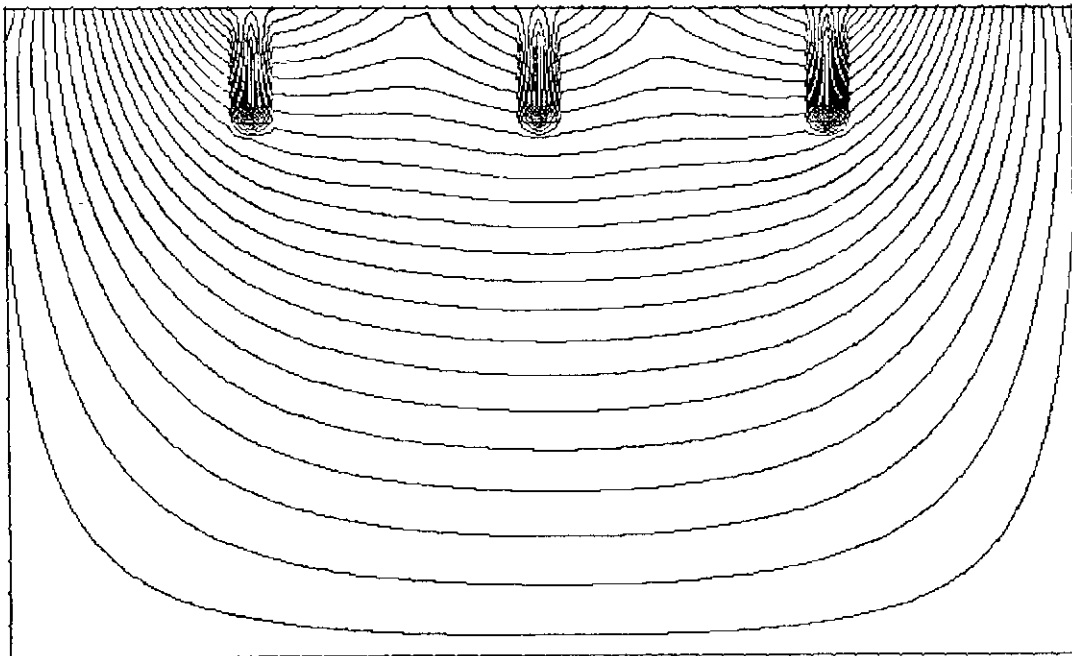


Figura A1-3a – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de três poços verticais de extração com profundidade $0,2j$, vazão Q de $25 \text{ m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K \text{ real} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

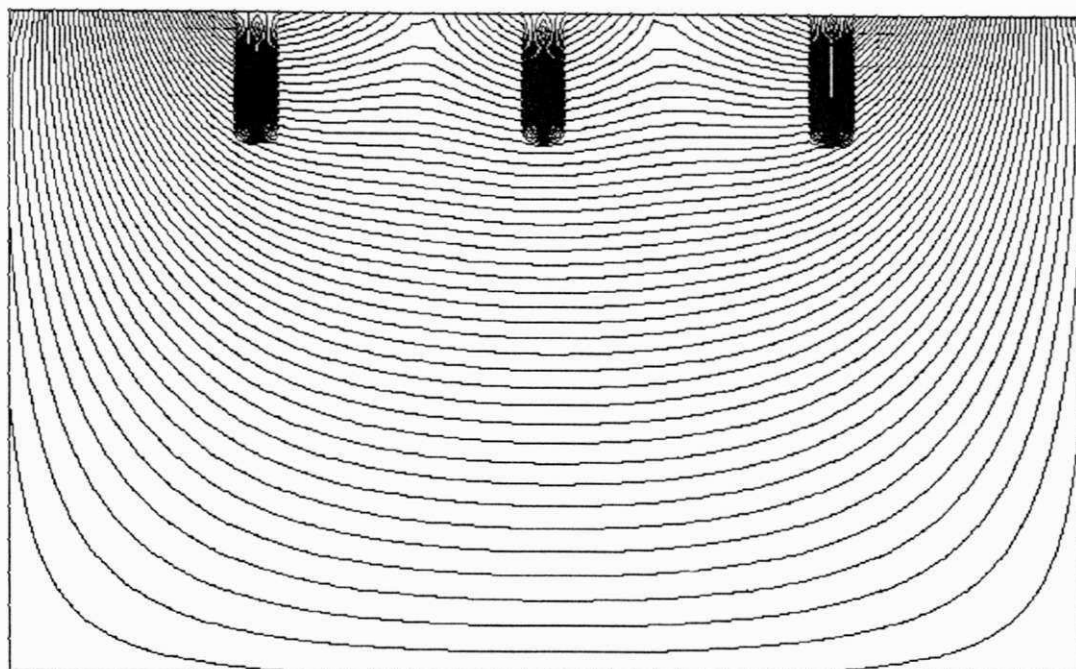


Figura A1-3b – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de três poços verticais de extração com profundidade $0,2j$, vazão Q de $40 \text{ m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K \text{ real} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

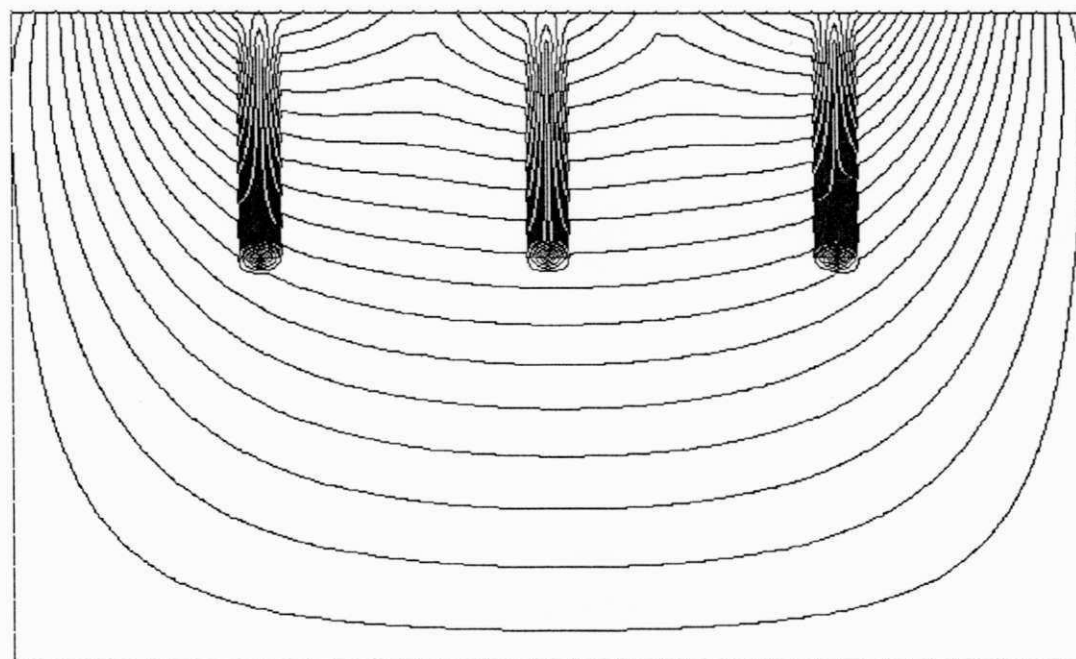


Figura A1-3c – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de três poços verticais de extração com profundidade $0,4j$, vazão Q de $25 \text{ m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K \text{ real} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

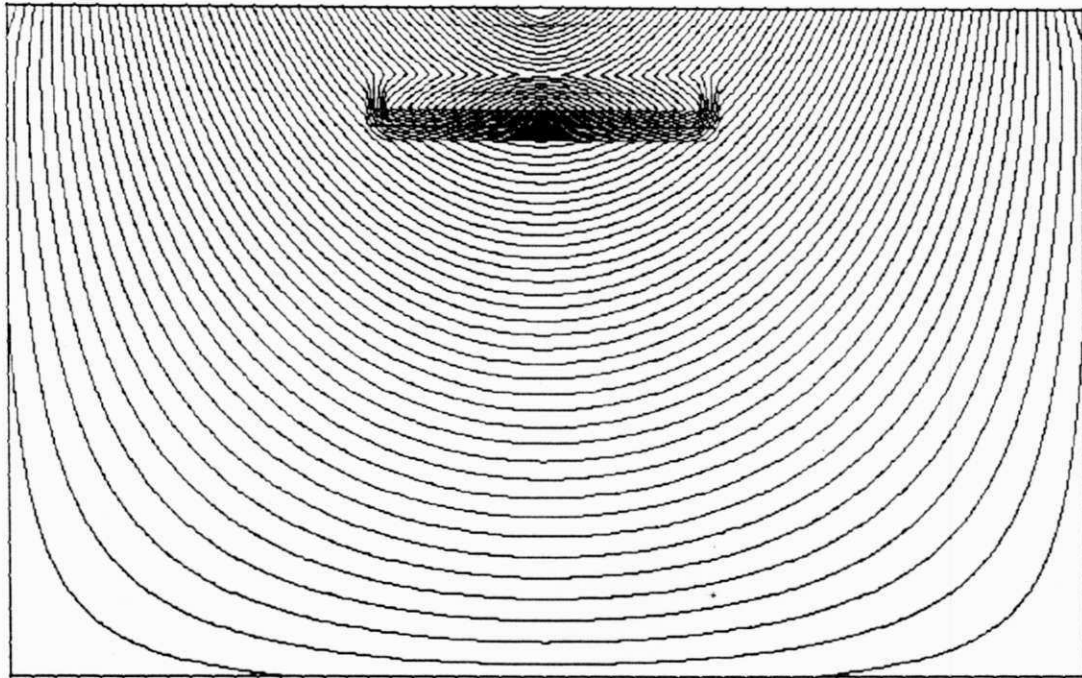
Item 4 - Um Poço Horizontal

Figura A1-4a – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de um único poço horizontal de extração com profundidade 0,2j, vazão Q de 30m³/h, permeabilidade hidráulica $K_x = 1$ m/s ($K_{\text{real}} = 2,7 \cdot 10^{-3}$ m/s) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

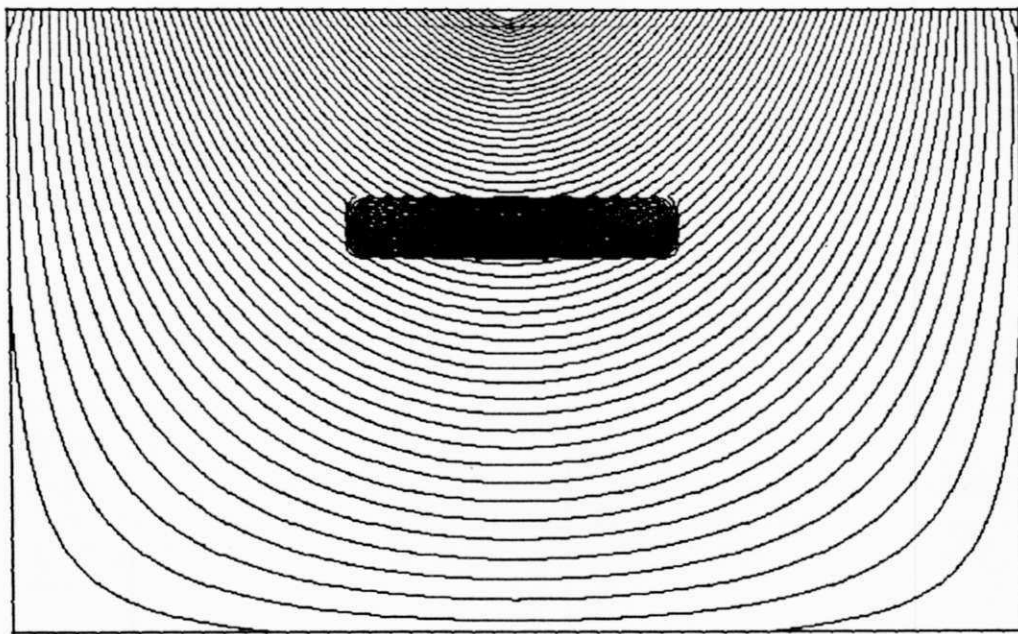


Figura A1-4b – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de um único poço horizontal de extração com profundidade 0,4j, vazão Q de 35m³/h, permeabilidade hidráulica $K_x = 1$ m/s ($K_{\text{real}} = 2,7 \cdot 10^{-3}$ m/s) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

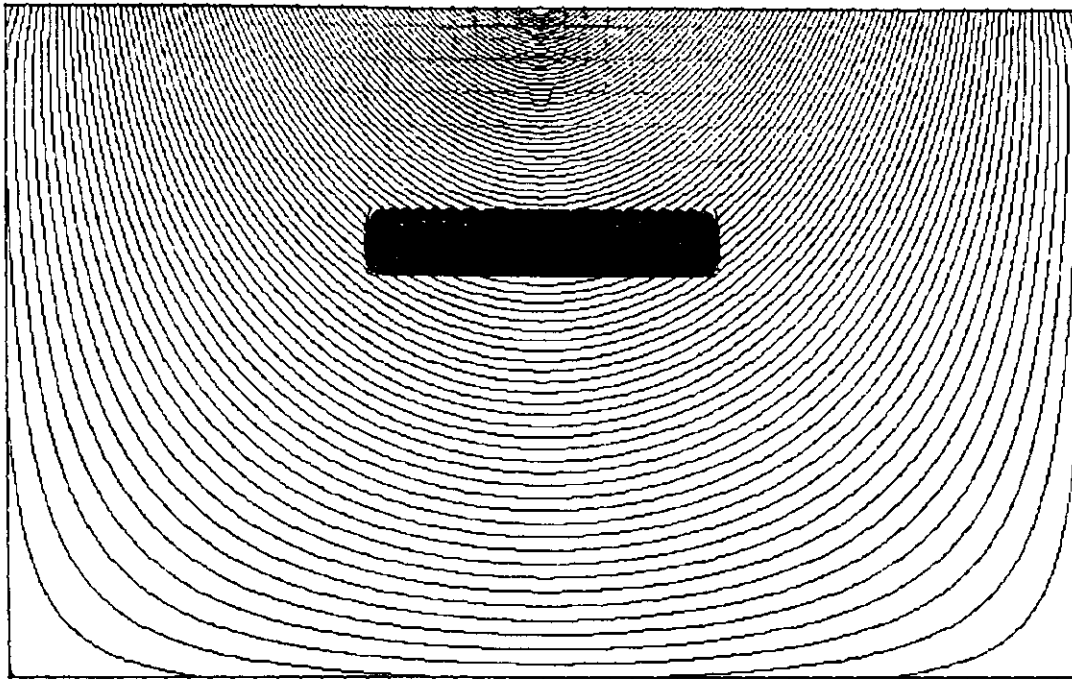


Figura A1-4c – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de um único poço horizontal de extração com profundidade $0,4j$, vazão Q de $40\text{m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K \text{ real} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

Item 5 - Dois Poços Horizontais

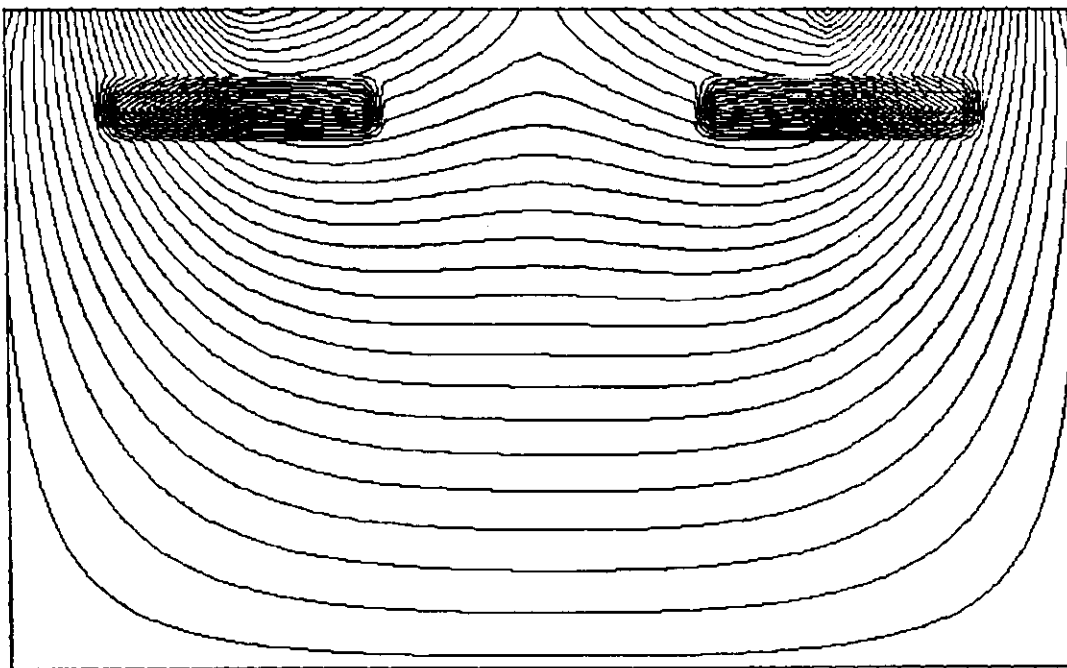


Figura A1-5a – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de dois poços horizontais de extração com profundidade $0,2j$, vazão Q de $25\text{m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K \text{ real} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

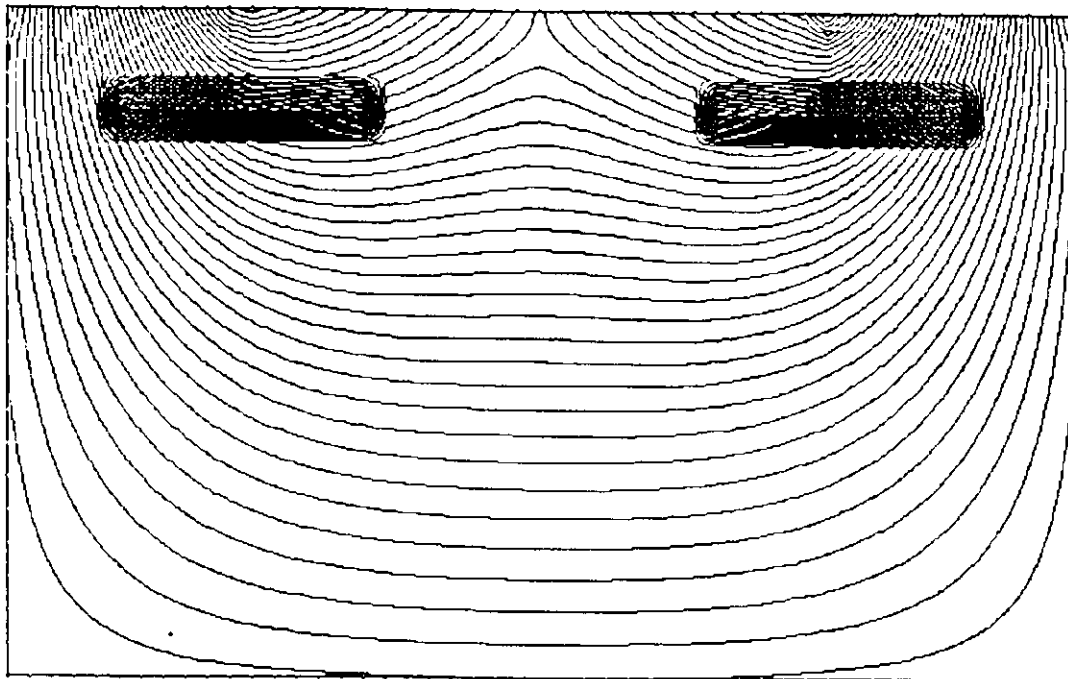


Figura A1-5b – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de dois poços horizontais de extração com profundidade $0,2j$, vazão Q de $30\text{m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K \text{ real} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

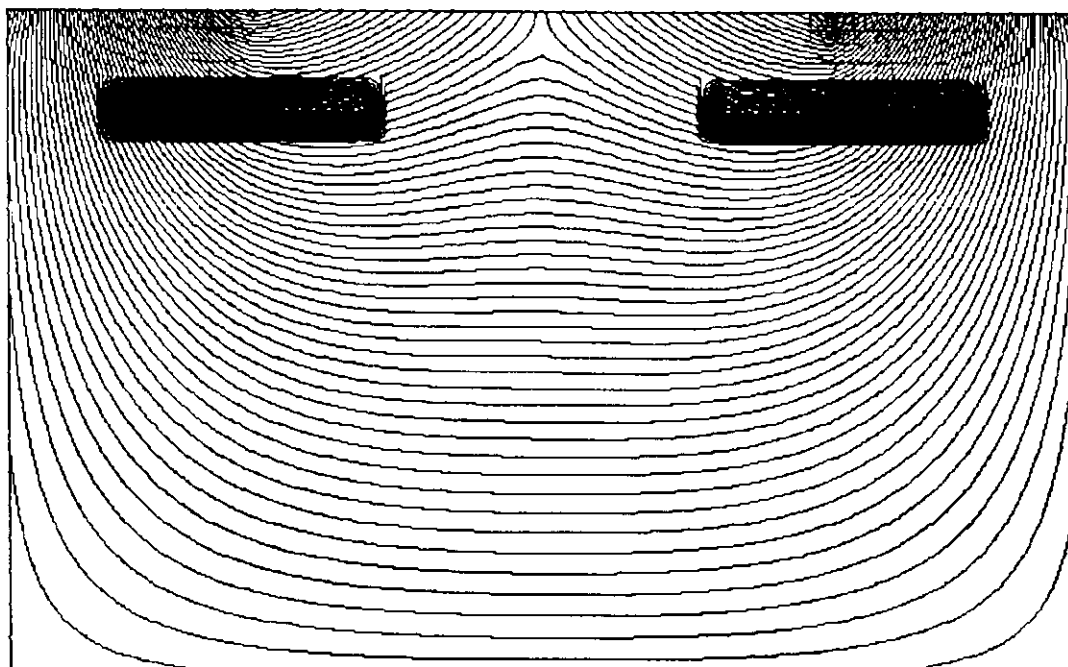


Figura A1-5c – Linhas de fluxo desenvolvidas para o caso de dois poços horizontais de extração com profundidade $0,2j$, vazão Q de $40\text{m}^3/\text{h}$, permeabilidade hidráulica $K_x = 1 \text{ m/s}$ ($K \text{ real} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e permeabilidade hidráulica na região do poço $K_{\text{poço}} = 1,001K_x$

Anexo II

Item 1

A capacidade do sistema de remediação composto por um poço vertical de extração de permitir a passagem do fluxo subterrâneo, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j), para as vazões estudadas (25, 30, 35 e 40 m³/h), é apresentada sob a forma dos gráficos abaixo.

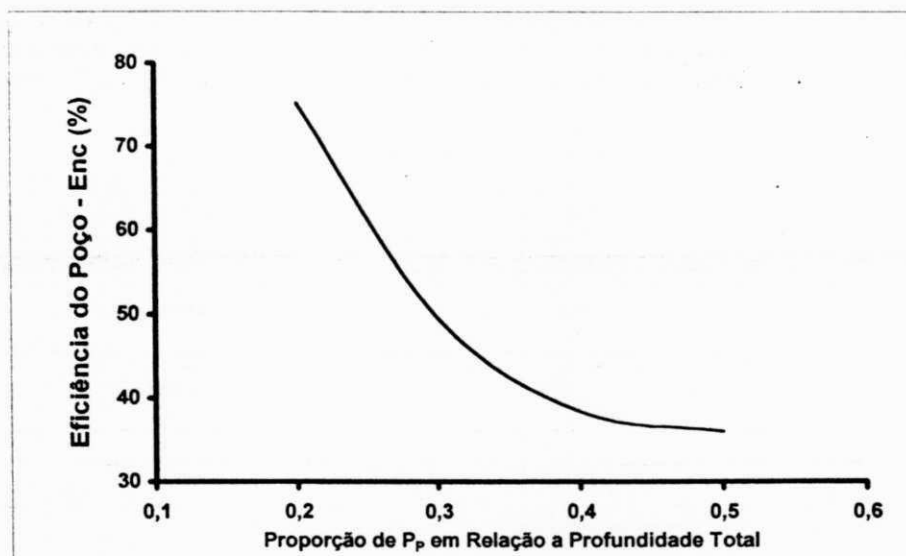


Figura A2-1a - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_P - vazão de 25m³/h

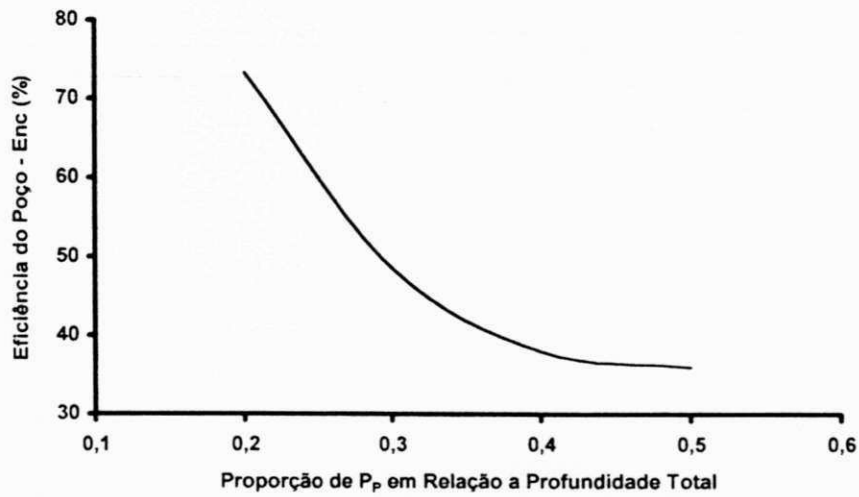


Figura A2-1b - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 30m³/h

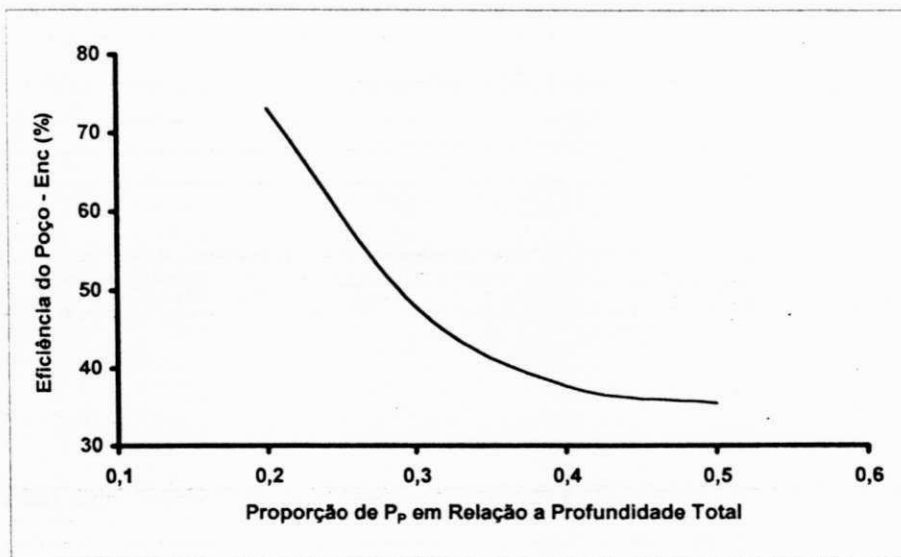


Figura A2-1c - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 35m³/h

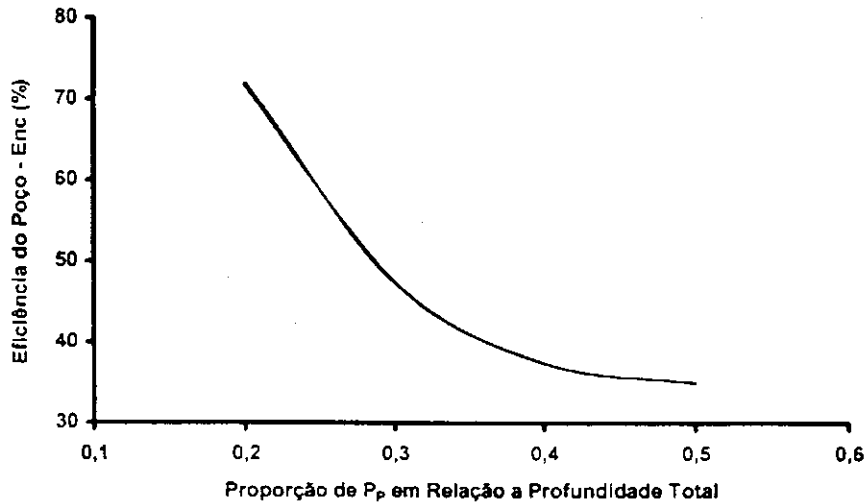


Figura A2-1d - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por um poço vertical, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$

Item 2

A capacidade do sistema de remediação composto por dois poços verticais de extração de permitir a passagem do fluxo subterrâneo, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j), para as vazões estudadas (25, 30, 35 e $40\text{ m}^3/\text{h}$), é apresentada sob a forma dos gráficos abaixo.

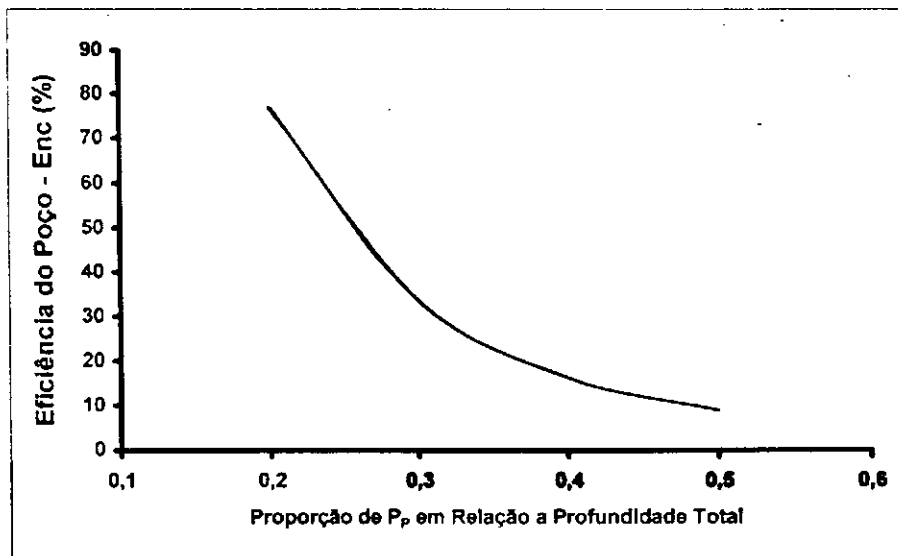


Figura A2-2a - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão de $25\text{m}^3/\text{h}$

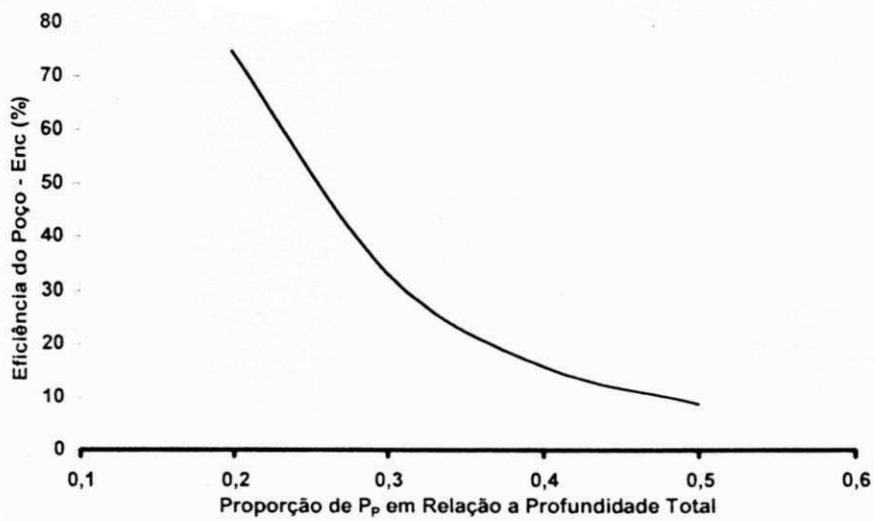


Figura A2-2b - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 30m³/h

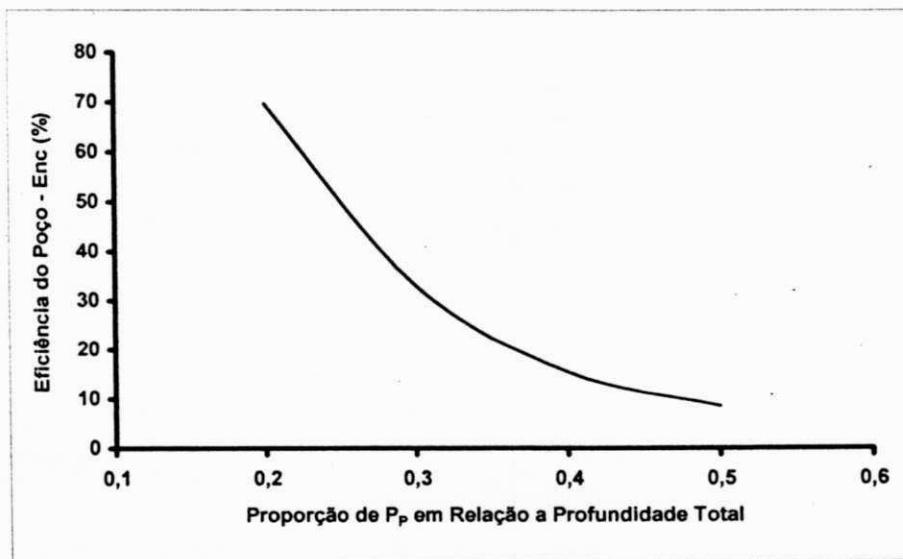


Figura A2-2c - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 35m³/h

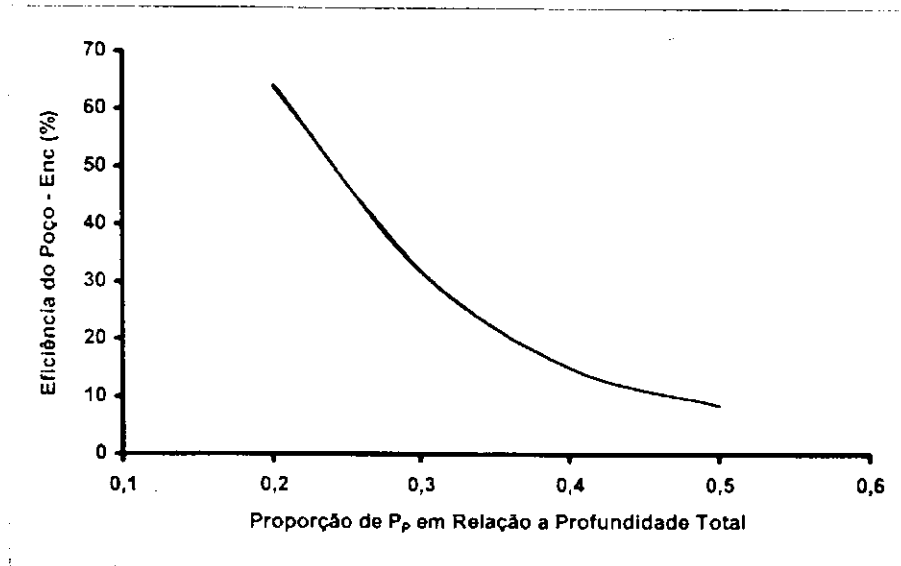


Figura A2-2d.- Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por dois poços verticais, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$

Item 3

A capacidade do sistema de remediação composto por três poços verticais de extração de permitir a passagem do fluxo subterrâneo, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j), para as vazões estudadas (25, 30, 35 e $40\text{ m}^3/\text{h}$), é apresentada sob a forma dos gráficos abaixo.

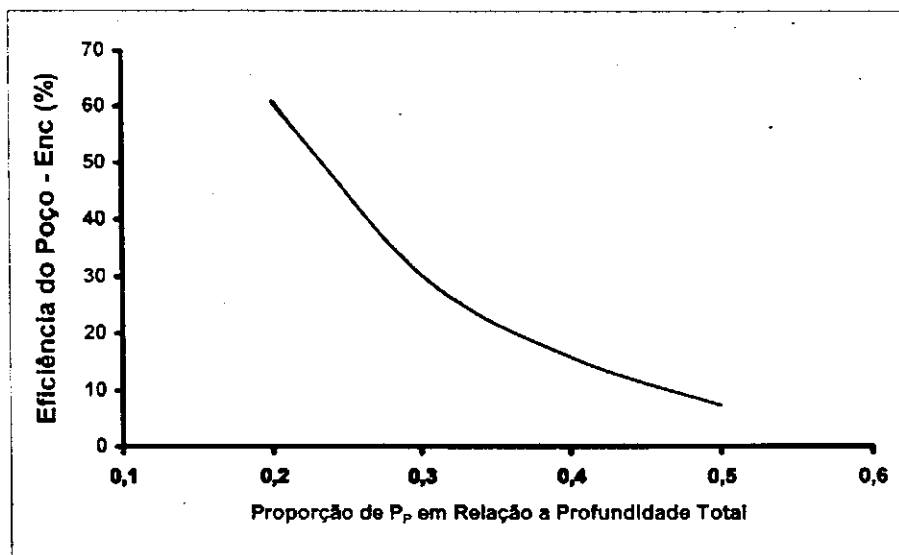


Figura A2-3a - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão de $25\text{m}^3/\text{h}$

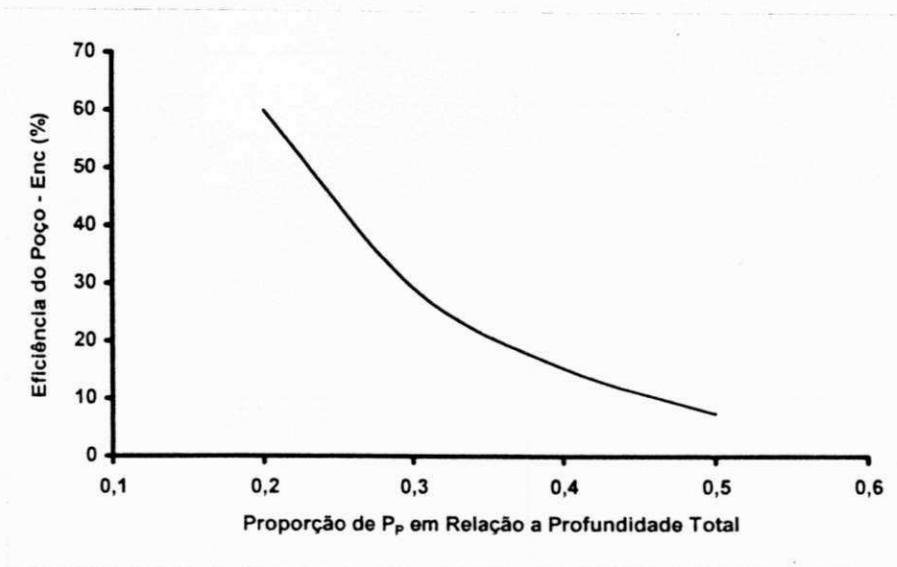


Figura A2-3b - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 30m³/h

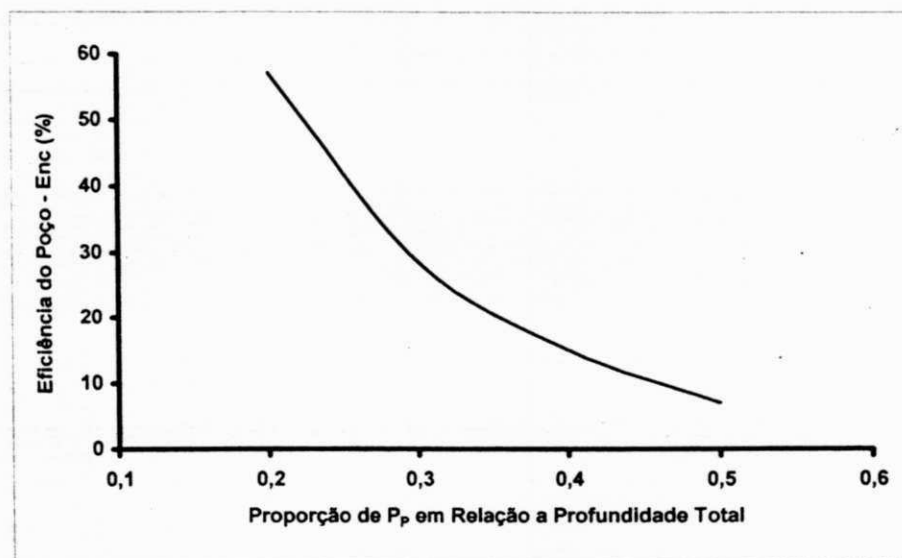


Figura A2-3c - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por três poços verticais, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_p - vazão 35m³/h

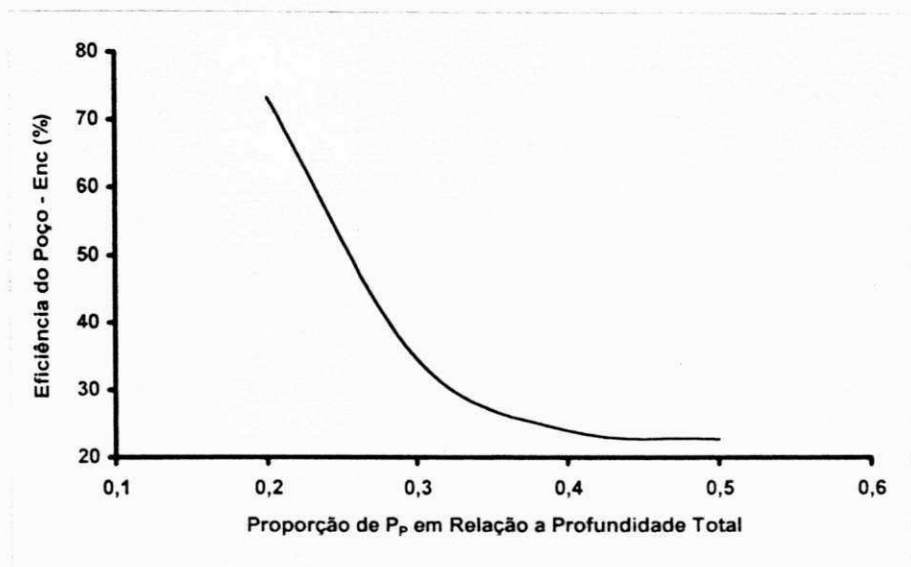


Figura A2-4b - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 30m³/h

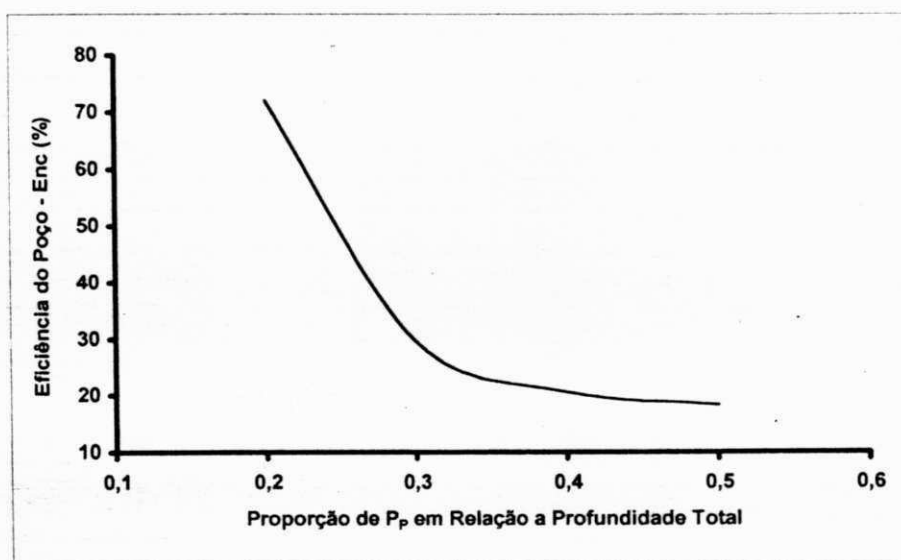


Figura A2-4c - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 35m³/h

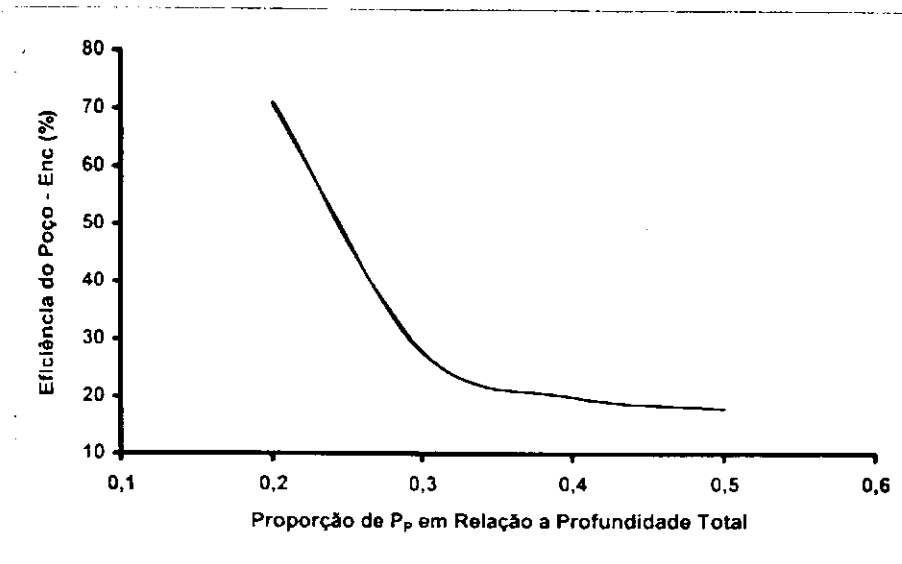


Figura A2-4d - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por um poço horizontal, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_P - vazão 40m³/h

Item 5

A capacidade do sistema de remediação composto por dois poços horizontais de extração de permitir a passagem do fluxo subterrâneo, devido à variação na sua profundidade (0,2j, 0,3j, 0,4j e 0,5j), para as vazões estudadas (25, 30, 35 e 40 m³/h), é apresentada sob a forma dos gráficos abaixo.

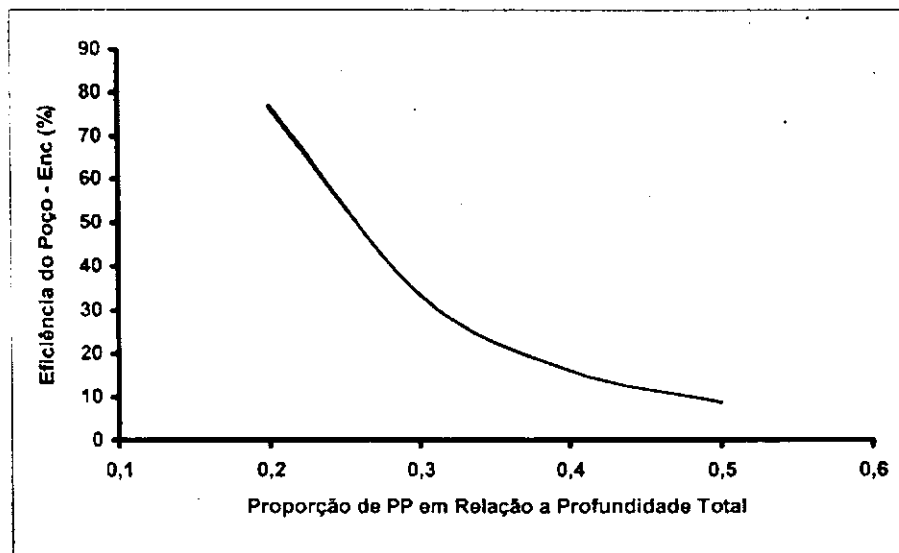


Figura A2-5a - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_P - vazão de 25m³/h

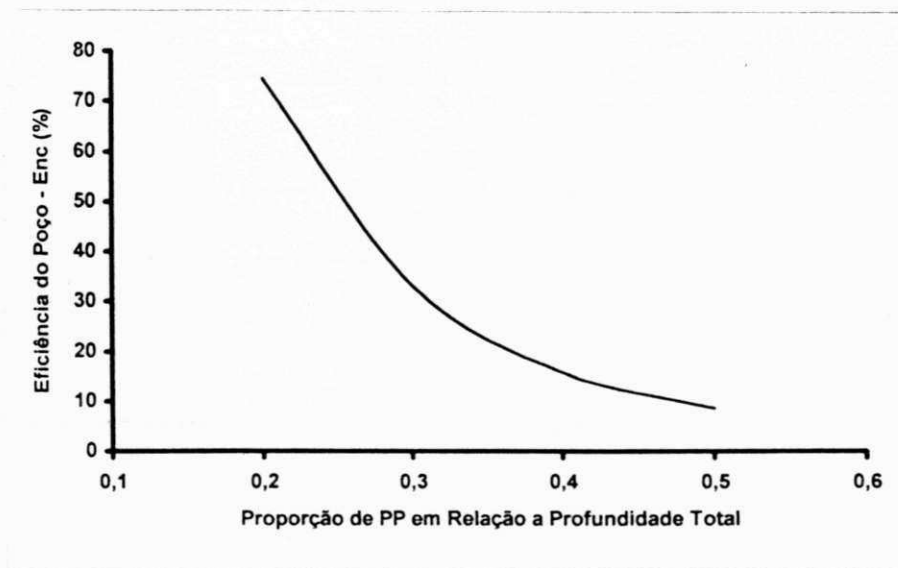


Figura A2-5b - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_P - vazão $30\text{m}^3/\text{h}$

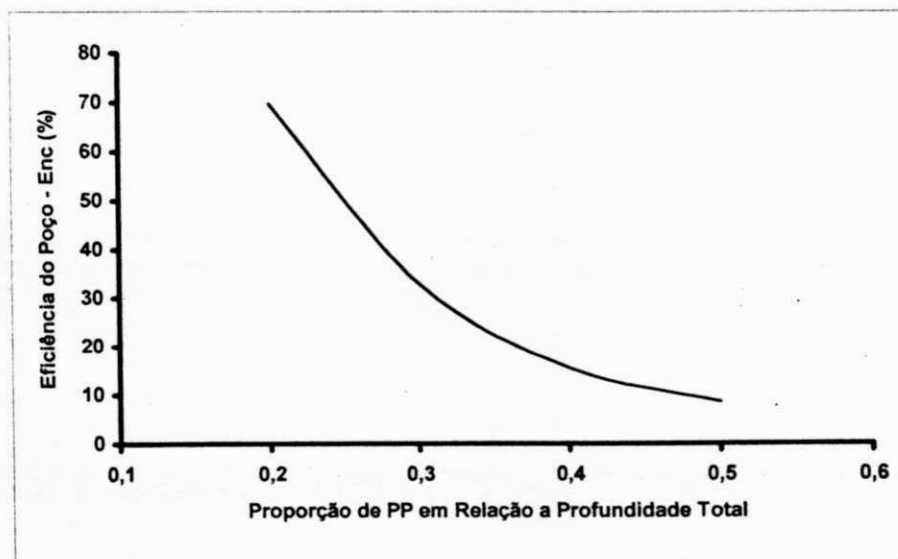


Figura A2-5c - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_P - vazão $35\text{m}^3/\text{h}$

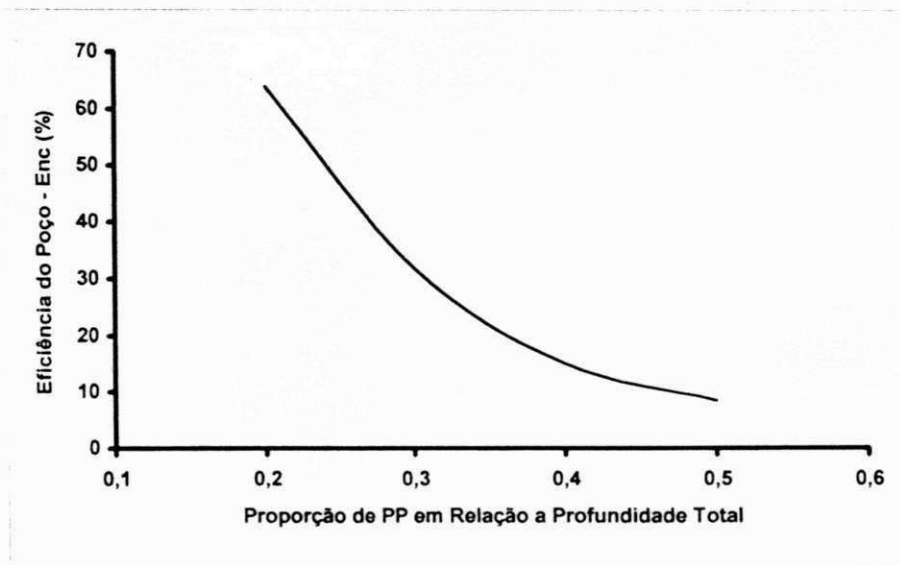


Figura A2-5d - Gráfico da eficiência de não captura do sistema de remediação composto por dois poços horizontais, E_{NC} vs. a profundidade do poço, P_P - vazão $40\text{m}^3/\text{h}$

Anexo III

Programa de Um Poço Vertical

```
PROGRAM V1;
{$n+,e+}
USES CRT;
TYPE
  VECTOR = ARRAY [1..60,1..40] OF real;
VAR
  H:VECTOR;
  posicao, P, R, C, MO, NUMIT, J, I:INTEGER;
  kx, ky, m, AMAX, OLDVAL, RRE, dx, MIN, MAX, INITIAL, W, Q:REAL;
  A:CHAR;

PROCEDURE RECORD_FILE (F:VECTOR;VAR pos,M,N:INTEGER;dx,MAX,MIN:REAL);
VAR
  PSIPAS:text;
  I,J,c:INTEGER;
  AR:real;
BEGIN
  ASSIGN (PSIPAS,'lv25xq2.dat');
  REWRITE (PSIPAS);
  C:=N-1;
  Writeln (PSIPAS,M,' ');
  Writeln (PSIPAS,C,' ');
  Writeln (PSIPAS,MAX,' ');
  Writeln (PSIPAS,MIN,' ');
  Writeln (PSIPAS,dx,' ');
  Writeln (PSIPAS,dx,' ');
  FOR I:=1 TO M DO
    FOR J:=2 TO N DO
      BEGIN
        AR:=F[J,I];
        Writeln (PSIPAS,AR:10:6,' ');
      END;
  CLOSE (PSIPAS)
END;
```

```

BEGIN
clrscr;
  r := 22; c := 51; initial := 100.0; dx := 1; m := 0.011;
  Q := -2;
  FOR J:=1 TO R DO
  FOR I:=1 TO C DO
    H[I,J]:=INITIAL;
  W:=DX*m*(C-3)+q;
  P:=25;
  FOR I:=2 TO p DO
    H[I,1]:=INITIAL+W*((i-2)/(p-2));
  FOR I:=p TO (p+1) DO
    H[I,1]:=INITIAL+w;
  FOR I:=p+1 TO (c-1) DO
    H[I,1]:=(initial+w)-W*((i-p-2)/(c-3-p));
  NUMIT:=0;
  AMAX:=1;

  WHILE AMAX > 0.001 DO
  BEGIN
    NUMIT:=NUMIT + 1;
    AMAX:=0;
    FOR J:=2 TO (R-1) DO
    FOR I:=2 TO (C-1) DO
    BEGIN
      OLDVAL:=H[I,J];
      kx:=1;
      ky:=1;
      H[I,J]:=[(h[I-1,J]+H[I+1,J])+(h[I,J-1]+H[I,J+1])+
      DX*DX*Q/(kx*j)]/4;
      RRE:=H[I,J]-OLDVAL;
      IF RRE < 0 THEN RRE:=RRE*(-1);
      IF RRE > AMAX THEN AMAX:=RRE;
    END
  end;
  WRITELN ('O NUMERO DE INTERACOES FOI :',NUMIT);
  WRITELN ('COLUNAS=',C,' LINHAS=',R,' DX=',DX:6:2,' C=',m:6:2);
  MIN:=H[2,1];
  MAX:=H[2,1];
  FOR J:=1 TO (R-1) DO
  BEGIN
    WRITELN;
    If j>1 then
    FOR I:=2 TO (C-1) DO
    BEGIN
      if (i=p+1) and (j<11)
      then h[i,j]:= 1.001*kx*h[i,1];
      IF H[I,J] < MIN THEN MIN:=H[I,J];
      IF H[I,J] > MAX THEN MAX:=H[I,J];
      WRITE (H[I,J]:7:2)
    END
  END;
  writeln;
  RECORD_FILE (H,p,J,I,DX,MAX,MIN);
END.

```

Programa de Dois Poços Verticais

```

PROGRAM v2;
{$n+,e+}
USES CRT;
TYPE
  VECTOR = ARRAY [1..60,1..40] OF real;
VAR
  H:VECTOR;
  posicao, P1, P2, R, C, MO, NUMIT, J, I: INTEGER;
  kx, ky, m, AMAX, OLDVAL, RRE, dx, MIN, MAX, INITIAL, W1, W2, Q1, Q2: REAL;
  A: CHAR;

PROCEDURE RECORD_FILE (F:VECTOR;VAR pos,M,N: INTEGER;dx,MAX,MIN:REAL);
VAR
  PSIPAS:text;
  I,J,c: INTEGER;
  AR:real;
  BEGIN
  ASSIGN (PSIPAS, '2v15xq2.dat');
  REWRITE (PSIPAS);
  C:=N-1;
  WRITELN (PSIPAS,M, ' ');
  WRITELN (PSIPAS,C, ' ');
  WRITELN (PSIPAS,MAX, ' ');
  WRITELN (PSIPAS,MIN, ' ');
  WRITELN (PSIPAS,DX, ' ');
  WRITELN (PSIPAS,DX, ' ');
  FOR I:=1 TO M DO
    FOR J:=2 TO N DO
      BEGIN
        AR:=F[J, I];
        WRITELN (PSIPAS,AR:10:6, ' ');
      END;
  CLOSE (PSIPAS)
  END;

BEGIN
clrscr;
  r := 22; c := 51; initial := 100.0; dx := 1.5; m := 0.011;
  Q1 := -1.5; Q2 := -1.5;
  FOR J:=1 TO R DO
    FOR I:=1 TO C DO
      H[I, J]:=INITIAL;
  W1:=DX*m*(C-3)+q1;
  W2:=DX*m*(C-3)+q2;
  P1:=12;
  P2:=38;
  FOR I:=2 TO p1 DO
    H[I, 1]:=INITIAL+W1*((i-2)/(p1-2));
  FOR I:=p1 TO (p1+1) DO
    H[I, 1]:=INITIAL+w1;
  FOR I:=(p1+1) TO (C-25) DO
    H[I, 1]:=(initial+w1)-W1*((i-p1-2)/(c-3-p1));

```

```

FOR I:=(c-25) TO p2 DO
  H[I,1]:=INITIAL+W2*((i-2)/(p2-2));
FOR I:=p2 TO (p2+1) DO
  H[I,1]:=INITIAL+w2;
FOR I:=(p2+1) TO (C-1) DO
  H[I,1]:=(initial+w2)-W2*((i-p2-2)/(c-3-p2));
NUMIT:=0;
AMAX:=1;
  WHILE AMAX > 0.001 DO
    BEGIN
      NUMIT:=NUMIT + 1;
      AMAX:=0;
      FOR J:=2 TO (R-1) DO
        FOR I:=2 TO (C-1) DO
          BEGIN
            OLDVAL:=H[I,J];
            kx:=1;
            ky:=1;
            H[I,J]:=[(h[I-1,J]+H[I+1,J])+(h[I,J-1]+H[I,J+1])]+
              DX*DX*Q/(kx*j)]/4;
            RRE:=H[I,J]-OLDVAL;
            IF RRE < 0 THEN RRE:=RRE*(-1);
            IF RRE > AMAX THEN AMAX:=RRE;
          END
        END
      end;
      WRITELN ('NO OF ITERATIONS WAS :',NUMIT);
      WRITELN ('COLUMNS=',C,' ROWS=',R,' DX=',DX:6:2,' C=',m:6:2);
      MIN:=H[2,1];
      MAX:=H[2,1];
      FOR J:=1 TO (R-1) DO
        BEGIN
          WRITELN;
          IF J>1 THEN
            FOR I:=2 TO (C-1) DO
              BEGIN
                if (i=p1+1) and (j<5)
                  then h[i,j]:= 1.001*kx*h[i,1];
                if (i=p2+1) and (j<5)
                  then h[i,j]:= 1.001*kx*h[i,1];
                IF H[I,J] < MIN THEN MIN:=H[I,J];
                IF H[I,J] > MAX THEN MAX:=H[I,J];
                WRITE (H[I,J]:7:2)
              END
            END
          END;
          writeln;
          RECORD_FILE (H,p1,J,I,DX,MAX,MIN);
        END.

```

Programa de Três Poços Verticais

```

PROGRAM v3;
{$n+,e+}
USES CRT;
TYPE
  VECTOR = ARRAY [1..60,1..40] OF real;
VAR
  H:VECTOR;
  posicao, P1, P2, P3, R, C, MO, NUMIT, J, I:INTEGER;
  kx, ky,
  m, AMAX, OLDVAL, RRE, dx, MIN, MAX, INITIAL, W1, W2, W3, Q1, Q2, Q3:REAL;
  A:CHAR;

PROCEDURE RECORD_FILE (F:VECTOR;VAR pos,M,N:INTEGER;dx,MAX,MIN:REAL);
VAR
  PSIPAS:text;
  I,J,c:INTEGER;
  AR:real;
BEGIN
  ASSIGN (PSIPAS, '3v25xq4.dat');
  REWRITE (PSIPAS);
  C:=N-1;
  WRITELN (PSIPAS,M, ' ');
  WRITELN (PSIPAS,C, ' ');
  WRITELN (PSIPAS,MAX, ' ');
  WRITELN (PSIPAS,MIN, ' ');
  WRITELN (PSIPAS,DX, ' ');
  WRITELN (PSIPAS,DX, ' ');
  FOR I:=1 TO M DO
    FOR J:=2 TO N DO
      BEGIN
        AR:=F[J,I];
        WRITELN (PSIPAS,AR:10:6, ' ');
      END;
  CLOSE (PSIPAS)
END;

BEGIN
  clrscr;
  r := 22; c := 51; initial := 100.0; dx := 2; m := 0.011;
  Q1 := -1.33; Q2 := -1.33; Q3 := -1.33;
  FOR J:=1 TO R DO
    FOR I:=1 TO C DO
      H[I,J]:=INITIAL;
  W1:=DX*m*(C-3)+q1;
  W2:=DX*m*(C-3)+q2;
  W3:=DX*m*(C-3)+q3;
  P1:=12;
  P2:=25;
  P3:=38;
  FOR I:=2 TO p1 DO
    H[I,1]:=INITIAL+W1*((i-2)/(p1-2));
  FOR I:=p1 TO (p1+1) DO
    H[I,1]:=INITIAL+w1;

```

```

FOR I:=(p1+1) TO (C-30) DO
  H[I,1]:=(initial+w1)-W1*((i-p1-2)/(c-3-p1));
FOR I:=(c-30) TO p2 DO
  H[I,1]:=INITIAL+W2*((i-2)/(p2-2));
FOR I:=p2 TO (p2+1) DO
  H[I,1]:=INITIAL+w2;
FOR I:=(p2+1) TO (C-20) DO
  H[I,1]:=(initial+w2)-W2*((i-p2-2)/(c-3-p2));
FOR I:=(c-19) TO p3 DO
  H[I,1]:=INITIAL+W3*((i-2)/(p3-2));
FOR I:=p3 TO (p3+1) DO
  H[I,1]:=INITIAL+w3;
FOR I:=(p3+1) TO (C-1) DO
  H[I,1]:=(initial+w3)-W3*((i-p3-2)/(c-3-p3));
NUMIT:=0;
AMAX:=1;
  WHILE AMAX > 0.001 DO
    BEGIN
      NUMIT:=NUMIT + 1;
      AMAX:=0;
      FOR J:=2 TO (R-1) DO
        FOR I:=2 TO (C-1) DO
          BEGIN
            OLDVAL:=H[I,J];
            kx:=1;
            ky:=1;
            H[I,J]:=[(h[I-1,J]+H[I+1,J])+(h[I,J-1]+H[I,J+1])]+
              DX*DX*Q/(kx*j)]/4;
            RRE:=H[I,J]-OLDVAL;
            IF RRE < 0 THEN RRE:=RRE*(-1);
            IF RRE > AMAX THEN AMAX:=RRE;
          END
        END;
      end;
      Writeln ('NO OF ITERATIONS WAS :',NUMIT);
      Writeln ('COLUMNS=',C,' ROWS=',R,' DX=',DX:6:2,' C=',m:6:2);
      MIN:=H[2,1];
      MAX:=H[2,1];
      FOR J:=1 TO (R-1) DO
        BEGIN
          Writeln;
          IF J>1 THEN
            FOR I:=2 TO (C-1) DO
              BEGIN
                if (i=p1+1) and (j<9)
                  then h[i,j]:= 1.001*kx*h[i,1];
                if (i=p2+1) and (j<9)
                  then h[i,j]:= 1.001*kx*h[i,1];
                if (i=p3+1) and (j<9)
                  then h[i,j]:= 1.001*kx*h[i,1];
                IF H[I,J] < MIN THEN MIN:=H[I,J];
                IF H[I,J] > MAX THEN MAX:=H[I,J];
                WRITE (H[I,J]:7:2)
              END
            END;
          END;
          writeln;
          RECORD_FILE (H,p1,J,I,DX,MAX,MIN);
        END.

```

Programa de Um Poço Horizontal

```

PROGRAM hl;
{$n+,e+}
USES CRT;
TYPE
  VECTOR = ARRAY [1..60,1..40] OF real;
VAR
  H:VECTOR;
  posicao,P,R,C,MO,NUMIT,J,I:INTEGER;
  kx, ky, m,AMAX,OLDVAL,RRE,dx,MIN,MAX,INITIAL,W,Q:REAL;
  A:CHAR;

PROCEDURE RECORD_FILE (F:VECTOR;VAR pos,M,N:INTEGER;dx,MAX,MIN:REAL);
VAR
  PSIPAS:text;
  I,J,c:INTEGER;
  AR:real;
BEGIN
  ASSIGN (PSIPAS,'lh.dat');
  REWRITE (PSIPAS);
  C:=N-1;
  WRITELN (PSIPAS,M,' ');
  WRITELN (PSIPAS,C,' ');
  WRITELN (PSIPAS,MAX,' ');
  WRITELN (PSIPAS,MIN,' ');
  WRITELN (PSIPAS,DX,' ');
  WRITELN (PSIPAS,DX,' ');
  FOR I:=1 TO M DO
    FOR J:=2 TO N DO
      BEGIN
        AR:=F[J,I];
        WRITELN (PSIPAS,AR:10:6,' ');
      END;
  CLOSE (PSIPAS)
END;

BEGIN
  clrscr;
  r := 22; c := 51; initial := 100.0; dx := 1; m := 0.011;
  Q := -2;
  FOR J:=1 TO R DO
    FOR I:=1 TO C DO
      H[I,J]:=INITIAL;
  W:=DX*m*(C-3)+q;
  P:=25;
  FOR I:=2 TO p DO
    H[I,1]:=INITIAL+W*((i-2)/(p-2));
  FOR I:=p TO (p+1) DO
    H[I,1]:=INITIAL+w;
  FOR I:=p+1 TO (c-1) DO
    H[I,1]:=(initial+w)-W*((i-p-2)/(c-3-p));
  NUMIT:=0;
  AMAX:=1;
  WHILE AMAX > 0.001 DO

```

```

BEGIN
  NUMIT:=NUMIT + 1;
  AMAX:=0;
  FOR J:=2 TO (R-1) DO
    FOR I:=2 TO (C-1) DO
      BEGIN
        OLDVAL:=H[I,J];
        kx:=1;
        ky:=1;
        H[I,J]:=((h[I-1,J]+H[I+1,J])+(h[I,J-1]+H[I,J+1]))+
          DX*DX*Q/(kx*j))/4;
        RRE:=H[I,J]-OLDVAL;
        IF RRE < 0 THEN RRE:=RRE*(-1);
        IF RRE > AMAX THEN AMAX:=RRE;
      END
    END;
  WRITELN ('O NUMERO DE INTERACOES FOI ',NUMIT);
  WRITELN ('COLUNAS=',C,' LINHAS=',R,' DX=',DX:6:2,' C=',m:6:2);
  MIN:=H[2,1];
  MAX:=H[2,1];
  FOR J:=1 TO (R-1) DO
    BEGIN
      WRITELN;
      If j>3 then
        FOR I:=2 TO (C-1) DO
          BEGIN
            if (i>p-7) and (i<p+9) and (j<5)
              then h[i,j]:= 1.001*kx*h[i,1];
            IF H[I,J] < MIN THEN MIN:=H[I,J];
            IF H[I,J] > MAX THEN MAX:=H[I,J];
            WRITE (H[I,J]:7:2)
          END
        END;
      writeln;
      RECORD_FILE (H,p,J,I,DX,MAX,MIN);
    END.
  END.

```


Programa de Dois Poços Horizontais

```

PROGRAM h2;
{$n+,e+}
USES CRT;
TYPE
  VECTOR = ARRAY [1..60,1..40] OF real;
VAR
  H:VECTOR;
  posicao,P1,P2,R,C,MO,NUMIT,J,I:INTEGER;
  kx, ky, m,AMAX,OLDVAL,RRE,dx,MIN,MAX,INITIAL,W1,W2,Q1,Q2:REAL;
  A:CHAR;

PROCEDURE RECORD_FILE (F:VECTOR;VAR pos,M,N:INTEGER;dx,MAX,MIN:REAL);
VAR
  PSIPAS:text;
  I,J,c:INTEGER;
  AR:real;
BEGIN
  ASSIGN (PSIPAS,'2h25xq3.dat');
  REWRITE (PSIPAS);
  C:=N-1;
  WRITELN (PSIPAS,M,' ');
  WRITELN (PSIPAS,C,' ');
  WRITELN (PSIPAS,MAX,' ');
  WRITELN (PSIPAS,MIN,' ');
  WRITELN (PSIPAS,DX,' ');
  WRITELN (PSIPAS,DX,' ');
  FOR I:=1 TO M DO
    FOR J:=2 TO N DO
      BEGIN
        AR:=F[J,I];
        WRITELN (PSIPAS,AR:10:6,' ');
      END;
  CLOSE (PSIPAS)
END;

BEGIN
  clrscr;
  r := 22; c := 51; initial := 100.0; dx := 3; m := 0.011;
  Q1 := -1.5; Q2 := -1.5;
  FOR J:=1 TO R DO
    FOR I:=1 TO C DO
      H[I,J]:=INITIAL;
  W1:=DX*m*(C-3)+q1;
  W2:=DX*m*(C-3)+q2;
  P1:=12;
  P2:=38;
  FOR I:=2 TO p1 DO
    H[I,1]:=INITIAL+W1*((i-2)/(p1-2));
  FOR I:=p1 TO (p1+1) DO
    H[I,1]:=INITIAL+w1;
  FOR I:=(p1+1) TO (C-25) DO
    H[I,1]:=(initial+w1)-W1*((i-p1-2)/(c-3-p1));

```

```

FOR I:=(c-25) TO p2 DO
  H[I,1]:=INITIAL+W2*((i-2)/(p2-2));
FOR I:=p2 TO (p2+1) DO
  H[I,1]:=INITIAL+w2;
FOR I:=(p2+1) TO (C-1) DO
  H[I,1]:=(initial+w2)-W2*((i-p2-2)/(c-3-p2));
NUMIT:=0;
AMAX:=1;
  WHILE AMAX > 0.001 DO
    BEGIN
      NUMIT:=NUMIT + 1;
      AMAX:=0;
      FOR J:=2 TO (R-1) DO
        FOR I:=2 TO (C-1) DO
          BEGIN
            OLDVAL:=H[I,J];
            kx:=1;
            ky:=1;
            H[I,J]:=[(h[I-1,J]+H[I+1,J])+(h[I,J-1]+H[I,J+1])+
              DX*DX*Q/(kx*j)]/4;
            RRE:=H[I,J]-OLDVAL;
            IF RRE < 0 THEN RRE:=RRE*(-1);
            IF RRE > AMAX THEN AMAX:=RRE;
          END
        END
      end;
      WRITELN ('NO OF ITERATIONS WAS :',NUMIT);
      WRITELN ('COLUMNS=',C,' ROWS=',R,' DX=',DX:6:2,' C=',m:6:2);
      MIN:=H[2,1];
      MAX:=H[2,1];
      FOR J:=1 TO (R-1) DO
        BEGIN
          WRITELN;
          IF J>7 THEN
            FOR I:=2 TO (C-1) DO
              BEGIN
                if (i>p1-6) and (i<p1+7) and (j<7)
                  then h[i,j]:= 1.0015*kx*h[i,1];
                if (i>p2-5) and (i<p2+8) and (j<7)
                  then h[i,j]:= 1.0015*kx*h[i,1];
                IF H[I,J] < MIN THEN MIN:=H[I,J];
                IF H[I,J] > MAX THEN MAX:=H[I,J];
                WRITE (H[I,J]:7:2)
              END
            END
          END;
          writeln;
          RECORD_FILE (H,p1,J,I,DX,MAX,MIN);
        END.

```

Programa ISONOVO5

```

program isolines;
{$N+,e+,M 53600,0,53600}
uses graph,crt,dos;
type
  vector = array [1..50,1..50] of real;
  cadeias = array [1..8] of string[48];
  cadeia = string[40];
var
  h:vector;
  fl1,numero,l,ll,c0,c1,ey:integer;
  dx,dy,dx1,dyl,max,min,max1,min1:real;
  opc:char;
  graficos : cadeias;
  boleana : boolean;

procedure tela;
var
  ii, tt : integer;
begin
  clrscr;
  window (1,1,80,25);
  textbackground (1);
  clrscr;
  textcolor (15);
  for tt:=1 to 24 do
    for ii:=1 to 80 do
      write (chr (178));
  gotoxy (1,1);
  writeln ('ROGRAMA DE APERFEICOADO DE PSI PHI');
end;

procedure windows(z,z1,z2,z3,z4:word);
var
  ii, tt : integer;
begin
  window (z,z1,z2,z3);
  clrscr;
  textbackground(z4);
  clrscr;
  gotoxy(1,1);
  write ('É');
  gotoxy(2,1);
  for tt:=1 to (z2-z-1) do
    write ('Í');
  gotoxy(2,z3-z1+1);
  for tt:=1 to (z2-z-2) do
    write ('Í');
  gotoxy(1,2);
  for tt :=1 to (z3-z1-1) do
    writeln ('°');
    gotoxy(z2-z,2);z4:=2;
  for tt:=1 to (z3-z1-1) do
    begin
      gotoxy(z2-z,z4);
      writeln ('°');
    end;
  end;

```

```

    z4:=z4+1;
    end;
    gotoxy(z2-z,1);
    write ('»');
    gotoxy(1,z3-z1+1);
    write ('E');
    gotoxy(z2-z,z3-z1+1);
    write ('%');
    window (1,1,80,25);
    window (z+1,z1+1,z2-2,z3-1);
    gotoxy(1,1);
end;

procedure cria_grade(y01:integer;
x01,lx1,ly1,nx1,sx1,sy1,ny1:integer);
var
    ii : integer;
begin
    moveto (x01,y01);
    lineto (lx1+x01,y01);
    lineto (lx1+x01,y01+ly1);
    lineto (x01,y01+ly1);
    lineto (x01,y01);
    for ii:=0 to (nx1-1) do
        begin
            putpixel (x01+ii*sx1,y01-1,15);
            putpixel (x01+ii*sx1,y01,0);
            putpixel (x01+ii*sx1,y01+ly1+1,15);
            putpixel (x01+ii*sx1,y01+ly1,0);
        end;
    for ii:=0 to (ny1-1) do
        begin
            putpixel (x01-1,y01+ii*sy1,15);
            putpixel (x01,y01+ii*sy1,0);
            putpixel (x01+lx1+1,y01+ii*sy1,15);
            putpixel (x01+lx1,y01+ii*sy1,0);
        end;
    end;
end;

procedure blocol(var ddx,del:real; nooftim,dx1,dyl:real;
eyl,y01,ny1,nx1:integer; var ex1,lx1,ly1,prov1,
sobrl,x01,sy1,sx1 : integer; fat:real);
var
    gd,gm : integer;
    invert : string;
begin
    if nooftim = 1
        then begin
            gd:=detect;
            initgraph (gd,gm,'d:\pas');
        end;
    ddx:=dx1/dyl;
    ex1:=round(ddx*eyl*1.057);
    lx1:=(nx1-1)*ex1;
    ly1:=(ny1-1)*eyl;
    prov1:=getmaxx;gotoxy(0,35);
    str(getmaxx,invert);
    (outtextxy(150,350,invert);)
end;

```

```

sobrl:=(provl-lx1);
x01:=round(sobrl * fat);
if ((lx1+abs(x01)>getmaxx) or (lx1+abs(x01)<0))
  then begin
    lx1:=getmaxx-2;
    x01:=1;
  end;
if ((ly1+y01>getmaxy) or (ly1+y01<0))
  then ly1:=getmaxy-y01-1;
syl:=ly1 div (ny1-1);
ly1:=syl*(ny1-1);
sxl:=lx1 div (nx1-1);
lx1:=sxl*(nx1-1);
del:=1/(syl+1)
end;

procedure calcula_laco(valor,kk1,kk2,kk3,kk4,dde:real; var
ee,nne,zza,ffl:real;
                                var yyi : extended;
                                ssx,ssy,xxr,yyr:integer; var xxp,ryp:integer);
begin
  while ee<=valor do
    begin
      nne:=ee*kk1-kk3;
      if nne <> 0
        then begin
          zza:=ee*kk2+kk4;yyi:=zza/nne;
          if ((yyi<=1) and (yyi>=0))
            then begin
              xxp:=trunc (xxr+ssx*ee+0.5);
              ryp:=trunc (yyr+ssy*yyi+0.5);
              if ffl=0
                then begin
                  putpixel (xxp,ryp,15);
                  ffl:=1;
                  moveto (xxp,ryp);
                end;
              lineto (xxp,ryp);
            end
          else ffl:=0;
        end;
      ee:=ee+dde;
    end;
end;

procedure plota_texto(xx0,yy0,lly : integer);
begin
  outtextxy(xx0-30,yy0-30,
    '(For given increments, No.of Phi Lines are 20 & Psi lines
are 10.4)');
  outtextxy(xx0-75,130,'Phi-lines ');
  outtextxy(xx0-75,140,'Psi-Lines ');
  outtextxy(xx0-20,lly+100,
    ' FIG. 2. PHI-PSI LINE NETWORK FOR 110-110 V POTENTIALS');
  outtextxy(xx0-40,lly+130,
    '(ddx=ddy=10 cm; Matrix 7x13(6x11 real); Gradient m=
10Volts/meter)');
end;

```

```

        end;
        xa:=1;xe:=0;fl:=0;
        if tes='P'
            then k1:=kpr;
        e:=0;

        while e<=1 do
            begin
                ne:=e*k1-k2;
                za:=e*k3+k4;
                if ne<>0
                    then begin
                        xi:=za/ne;
                        if ((xi<=1) and (xi>=0))
                            then begin
                                xp:=trunc (xr+sx*xi+0.5);
                                yp:=trunc (yr+sy*e+0.5);
                                if fl=0
                                    then begin
                                        putpixel (xp,yp,15);
                                        moveto (xp,yp);
                                        fl:=1;
                                    end;
                                lineto (xp,yp);
                                if xe<xi
                                    then xe:=xi;
                                if xa>xi
                                    then xa:=xi;
                                end
                                else fl:=0;
                            end;
                        end;
                        e:=e+de;
                    end;
                xa:=de*trunc(xa/de+1);fl:=0;e:=0;
                calcula_laco(xa,k1,k2,k3,k4,de,e,ne,
                za,fl,yi,sx,sy,xr,yr,xp,yp);
                fl:=0;e:=xe;
                calcula_laco(1,k1,k2,k3,k4,de,e,ne,za,
                fl,yi,sx,sy,xr,yr,xp,yp);
            end
        end;
        c:=c+dcl;
    end;
end;

procedure abre_arquivo(var hh:vector; var ddx,ddy,mmax,mmin:real;
    var ll,cc0 : integer; flag:integer);
var
    exercis : text;
    name_file : string[14];
    ii, jj : integer;
begin
    gotoxy(10,18+flag);
    write('Give ',flag,'st Datafile Name ');
    readln(name_file);
    assign(exercis,name_file);
    reset(exercis);
    readln(exercis,ll);

```

```

    readln(exercis,cc0);
    readln(exercis,mmax);
    readln(exercis,mmin);
    readln(exercis,ddx);
    readln(exercis,ddy);
    for jj:=0 to (ll-1) do
        for ii:=0 to (cc0-1) do
            readln(exercis,hh[ii+1,jj+1]);
        close(exercis);
    end;

procedure seleciona_grafico(var escolha:integer; grap : cadeias);
var
    oopc : char;
    ii : integer;
begin
    gotoxy (0,20);
    writeln('Escolha o grafico a ser selecionado');
    for ii := 1 to 5 do
        writeln('          ( ',ii,' ) ',grap[ii]);
    writeln;write('          R =');
    readln(escolha);
end;

function
compara_parametro(ll, lll, cc0, ccl, ddx, ddx1, ddy, ddy1:real):boolean;
begin
    compara_parametro := FALSE;
    if (l=ll) and (c0=c1) and (dx=dx1) and (dy=dy1)
        then compara_parametro := TRUE;
end;

procedure retoma_vetor(var hh:vector; flag,cc0,ll:integer;
filel:cadeia);
var
    vet : text;
    ii,jj : integer;
begin
    assign(vet,filel);
    if flag = 1
        then begin
            reset(vet);
            for jj:=0 to (ll-1) do
                for ii:=0 to (cc0-1) do
                    readln(vet,hh[ii+1,jj+1]);
                { erase(vet); }
            end
        else begin
            rewrite(vet);
            for jj:=0 to (ll-1) do
                for ii:=0 to (cc0-1) do
                    writeln(vet,hh[ii+1,jj+1]);
            end;
        close(vet);
    end;
end;

```

```

procedure atribui_graficos(var graf : cadeias);
begin
  graf[1] := 'Phi';graf[2] := 'Psi';graf[3] := 'Phi-Psi';
  graf[4] := 'Phi e Psi separadamente';
  graf[5]:='Phi, Psi e Phi-Psi separadamente';
  graf[7] := '      Novo grafico (S/N) ?';
end;

function interroga(xx,yy:integer;grap:cadeia;flag:boolean):boolean;
var opc : char;
begin
  interroga := FALSE;
  if(flag)
    then begin
      gotoxy(xx,yy);
      write(grap);
    end
    else outtextxy(xx,yy,grap);

  opc := readkey;opc:=upcase(opc);
  if (opc = 'S')
    then interroga:= TRUE;
end;

begin
  clrscr;
  fl1 := 1;
  atribui_graficos(graficos);
  gotoxy(29,6);
  writeln('PROGRAM ISOLINES');
  abre_arquivo(h,dx,dy,max,min,l,c0,1);
  retoma_vetor(h,2,c0,1,'primeiro');
  abre_arquivo(h,dx1,dy1,max1,min1,l1,c1,2);clrscr;
  retoma_vetor(h,2,c1,l1,'segundo');

  repeat
    seleciona_grafico(numero,graficos);
    case numero of
      1 : begin
          retoma_vetor(h,1,c0,1,'primeiro');
          design_graph (h,dx,dy,max,min,l,c0,1,36,79,0.5);
        end;
      2 : begin
          retoma_vetor(h,1,c1,l1,'segundo');
          design_graph(h,dx1,dy1,max1,min1,l1,c1,1,36,79,0.5);
        end;
      3 : begin
          retoma_vetor(h,1,c0,1,'primeiro');
          design_graph (h,dx,dy,max,min,l,c0,1,36,79,0.5);
          retoma_vetor(h,1,c1,l1,'segundo');
          design_graph(h,dx1,dy1,max1,min1,l1,c1,2,36,79,0.5);
        end;
      4 : begin
          retoma_vetor(h,1,c0,1,'primeiro');
          design_graph (h,dx,dy,max,min,l,c0,1,15,28,0.18);
          retoma_vetor(h,1,c1,l1,'segundo');
          design_graph(h,dx1,dy1,max1,min1,l1,c1,2,15,250,0.18);
        end;
    end;
  end;
end;

```



```
5 : begin
  retoma_vetor(h,1,c0,1,'primeiro');
  design_graph (h,dx,dy,max,min,1,c0,1,10,28,0.12);
  retoma_vetor(h,1,c1,11,'segundo');
  design_graph(h,dx1,dy1,max1,min1,11,c1,2,10,28,0.85);
  if compara_parametro(1,11,c0,c1,dx,dx1,dy,dy1) then
    begin
      retoma_vetor(h,2,c0,1,'primeiro');
      design_graph (h,dx,dy,max,min,1,c0,2,20,200,0.45);
      retoma_vetor(h,2,c1,11,'segundo');
      design_graph(h,dx1,dy1,max1,min1,11,c1,2,20,200,0.45);
    end
  end;
end;

boleana := interroga(0,450,graficos[7],FALSE);
if(boleana)
  then closegraph;
until (boleana=FALSE);
end._
```

Anexo IV

Método das Diferenças Finitas

Metodologia:

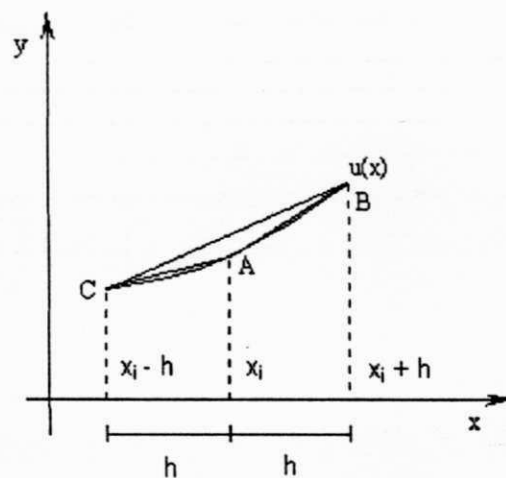


Figura A4-1 – Interpretação gráfica das aproximações de diferenças finitas

Pelo método explícito e implícito, a derivada progressiva e regressiva da função $u(x)$ no ponto $x = x_i$ é dada por:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_i} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x_i + h) - u(x_i)}{h}$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_i} = \frac{u(x_i + h) - u(x_i)}{h} \text{ (progressiva) e } \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_i} = \frac{u(x_i) - u(x_i - h)}{h} \text{ (regressiva)}$$

Pelo método da diferença central, a derivada da função $u(x)$ no ponto $x = x_i$ é dada por:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_i} = \frac{u(x_i + h) - u(x_i - h)}{2h}$$

Usando a expansão da série de Taylor, temos:

$$u(x_i + h) = u(x_i) + h \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_i} + \frac{h^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{x=x_i} + \frac{h^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right|_{x=x_i} + \dots, \text{ eq. 1}$$

$$u(x_i - h) = u(x_i) - h \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_i} + \frac{h^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{x=x_i} - \frac{h^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right|_{x=x_i} + \dots \text{ eq. 2}$$

somando-se as equações 1 e 2, temos:

$$u(x_i + h) + u(x_i - h) = 2u(x_i) + h^2 \left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{x=x_i} + \frac{h^4}{4!} \left. \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \right|_{x=x_i} + \dots$$

desprezando-se o termo de 4^o ordem, temos a seguinte expressão de diferenças finitas:

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{x=x_i} = \frac{u(x_i + h) - 2u(x_i) + u(x_i - h)}{h^2}$$

O valor da carga no ponto representado pelo índice (i, j) é $h_{i,j}$. Representando as coordenadas cartesianas (x_0, y_0) pelos índices (i, j) . Ao longo da linha horizontal $y = y_0$, considerando o perfil das cargas como uma sucessão de valores $h_{i-1,j}$, $h_{i,j}$ e $h_{i+1,j}$, temos:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \cong \frac{h_{i-1,j} - 2h_{i,j} + h_{i+1,j}}{(\Delta x)^2} \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \cong \frac{h_{i,j-1} - 2h_{i,j} + h_{i,j+1}}{(\Delta y)^2}$$

De acordo com a equação bidimensional de Laplace, devemos somar o resultado das duas equações acima e o resultado igualar a zero. Se considerarmos a malha da rede

como sendo quadrada, ou seja, $\Delta x = \Delta y$, então a aproximação pelo Método das Diferenças Finitas da equação de Laplace no ponto (i, j) é representada por:

$$h_{i-1,j} + h_{i+1,j} + h_{i,j-1} + h_{i,j+1} - 4h_{i,j} = 0 \text{ . eq. 3}$$

Usando o problema de Dirichlet, para exemplificar o método, é possível ilustrar como a equação 3 levará a uma equação algébrica para cada potencial desconhecido. Na área mostrada na figura 4 estar o domínio do problema. Note que $100 \leq x \leq 400$ m e $0 \leq y \leq 300$ m. Esta região está localizada próxima a um poço de bombeamento como mostrado na figura 4.

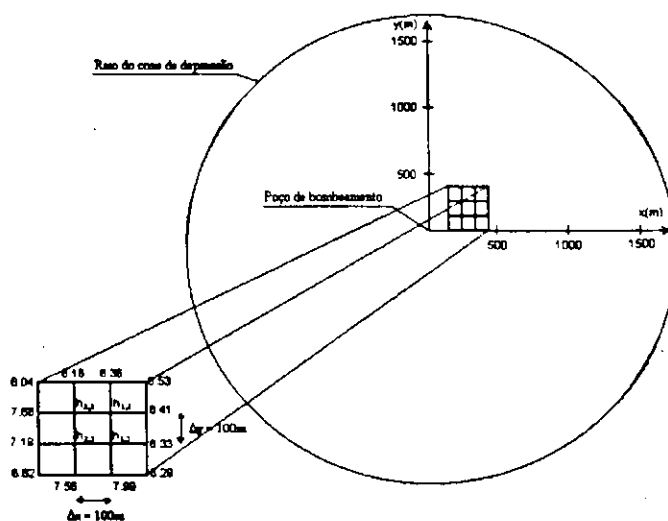


Figura A4-2 – Exemplo das aproximações de diferenças finitas

Os níveis d'água são medidos em cada poço de observação, como mostrado na figura 4. Agora especificando as condições de contorno para o problema, será usada a equação 3 para obter as cargas dos quatro pontos interiores da figura 4, nomeados $(2, 2)$, $(2, 3)$, $(3, 2)$ e $(3, 3)$.

A equação das diferenças finitas precisa ser escrita individualmente para os quatro valores não conhecidos de carga, $h_{2,2} = h(200, 200)$, $h_{2,3} = h(200, 100)$, $h_{3,2} = h(300, 200)$, e $h_{3,3} = h(300, 100)$. Atentando para a convenção de que o primeiro subscrito refere-se para o número de colunas e que o segundo refere-se para o número

de linhas. Aplicando a equação 3 para cada ponto interior, obtemos o seguinte conjunto de equações algébricas:

$$\text{para } i = 2, j = 2: h_{1,2} + h_{3,2} + h_{2,1} + h_{2,3} - 4h_{2,2} = 0$$

$$\text{para } i = 2, j = 3: h_{1,3} + h_{3,3} + h_{2,2} + h_{2,4} - 4h_{2,3} = 0$$

$$\text{para } i = 3, j = 2: h_{2,2} + h_{4,2} + h_{3,1} + h_{3,3} - 4h_{3,2} = 0$$

$$\text{para } i = 3, j = 3: h_{2,3} + h_{4,3} + h_{3,2} + h_{3,4} - 4h_{3,3} = 0$$

Se a equação de diferenças finitas, equação 3, fosse resolvida para $h_{i,j}$, então:

$$h_{i,j} = \frac{h_{i-1,j} + h_{i+1,j} + h_{i,j-1} + h_{i,j+1}}{4}, \text{ eq. 4}$$

A equação 4 é freqüentemente chamada de operador de cinco pontos porque a equação algébrica que resulta da aproximação da equação de Laplace é gerada para qualquer ponto mediante o movimento da estrela de cinco pontos, figura 5, sobre o domínio do problema.

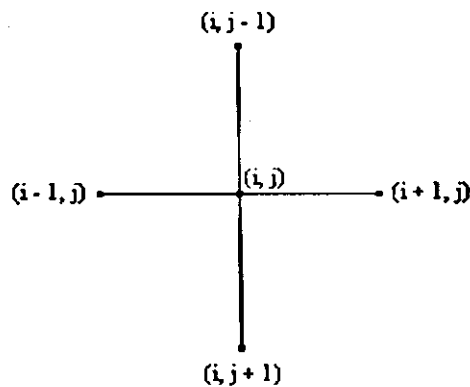


Figura A4-3 – Estrela com cinco pontos representando uma aproximação de diferenças finitas para a equação de Laplace

Usando o método iterativo de Gauss-Seidel mostrado abaixo,

$$h_{i,j} = \frac{h_{i-1,j}^{m+1} + h_{i,j-1}^{m+1} + h_{i+1,j}^m + h_{i,j+1}^m}{4}, \text{ eq. 5}$$

em conjunto com a grade de diferenças finitas, figura 6, e arbitrando os valores iniciais das quatro cargas hidráulicas localizadas no centro do domínio do problema como $h_{2,2}^1 = 8$, $h_{3,2}^1 = 8,5$, $h_{2,3}^1 = 7$, $h_{3,3}^1 = 8$, a solução converge quando todos os valores desconhecidos mudarem a uma razão inferior à 0,01 m em relação ou próximo, ou seja, $h_{n-1} - h_n \leq \varepsilon = 0,01$.

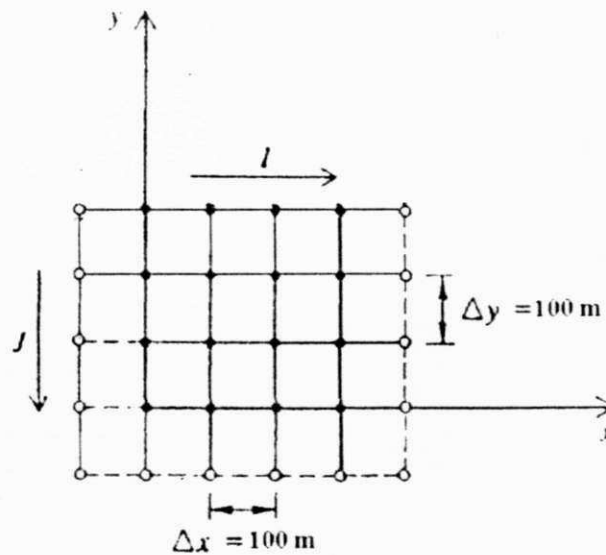


Figura A4-4 – Exemplo da grade de diferenças finitas para um modelo computacional de fluxo subterrâneo regional

A solução final para o problema é apresentada abaixo:

8,04 8,18 8,36 8,53

7,68 7,93 8,19 8,41

7,19 7,68 8,05 8,33

6,82 7,56 7,99 8,29

Anexo V

ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA

MINTER – DNOCS 3^o D.R.
Divisão de Estudos e Projetos
Laboratório

ANÁLISE DA ÁGUA

CERTIFICADO N^o 230/86
PROCEDÊNCIA Poço sede III
INTERESSADO CDRM
MUNICÍPIO São Bento – PB

RESULTADOS (mg/l ou o indicador)

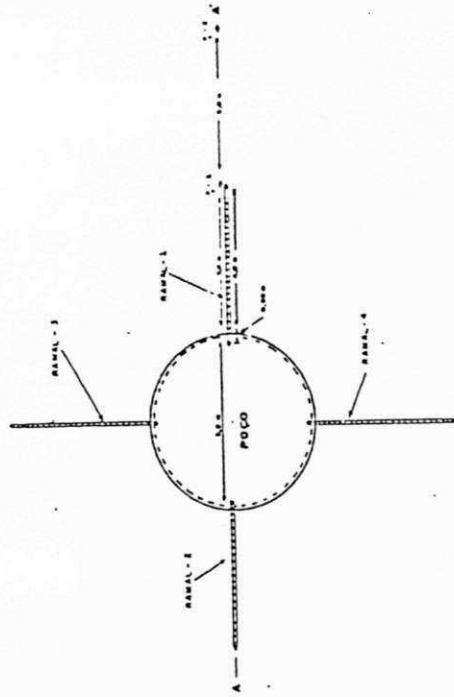
Cor:	
Turbidez em SiO ₂	
Condutividade elétrica micromhos/a 25 ^o C	800,00
pH	6,30
Amoníaco em NH ₄ ⁺	ausência
Nitratos em NO ₂ ⁻	ausência
Nitratos em NO ₃ ⁻	ausência
Cloretos em Cl ⁻	170,21
Sulfatos em SO ₄ ⁻	4,80
Alcalinidade de hidróxido em CaCO ₃	ausência
Alcalinidade de carbonato em CaCO ₃	ausência
Alcalinidade de bicarbonato em CaCO ₃	152,00
Cálcio em Ca ⁺⁺	38,08

Magnésio em Mg^{++}	15,81
Sódio em Na^+	118,22
Potássio em K^+	1,95
Ferro em Fe^{++}	ausência
dureza total em $CaCO_3$	160,00
Resíduo da evaporação	528,00
Classificação para irrigação	C3-S1

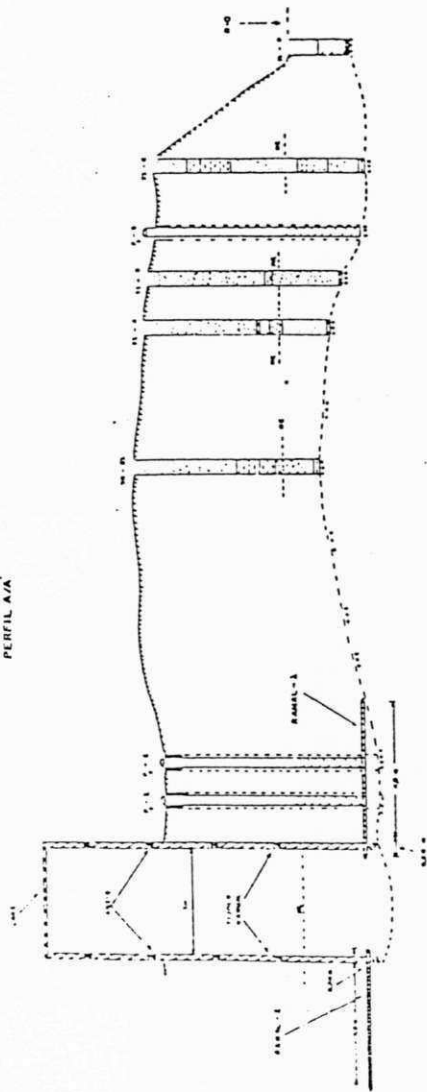
ABASTECIMENTO D'AGUA DE SÃO BENTO
CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO POÇO COLETOR Nº 1
PERFIL E MAPA

PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DO POÇO
Nº 1 - SÃO BENTO

MAPA



PERFIL A-A'





DIVISÃO DE HIDROGEOLOGIA
E SONDAGENS

SÃO BENTO - SEDE
SERVIÇOS DE PESQUISAS - DETALHAMENTO
PERFIS LITOLÓGICOS DAS SONDAGENS EM 2"

