



Araken Dumont Ramos Lima

**Avaliação Numérica de Zonas de Captura de
Contaminantes por Poços em Aquífero Confinado**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Celso Romanel

Rio de Janeiro
Outubro de 2019



Araken Dumont Ramos Lima

**Avaliação Numérica de Zonas de
Captura de Contaminantes por Poços
em Aquífero Confinado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Celso Romanel

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Wagner Nahas Ribeiro

Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes)

Prof.^a Thais Cristina Campos de Abreu

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de outubro de 2019.

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

Araken Dumont Ramos Lima

Graduou-se em Engenharia de Minas (Universidade Federal da Bahia) em 1993. Completou o Mestrado em 1996 e o Doutorado em 2001, ambos em Ciências da Engenharia Civil – Geotecnia (Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio). Coursou Especialização em Engenharia de Petróleo, em nível de Pós-Graduação *Lato Sensu*, em 2004 (CCE/Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio).

Ficha Catalográfica

Lima, Araken Dumont Ramos Lima

Avaliação numérica de zonas de captura de contaminantes por poços em aquífero confinado / Araken Dumont Ramos Lima; orientador: Celso Romanel. – 2019.

93 f.; 30cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental – Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental – Teses. 3. Aquífero confinado. 4. Descontaminação 5. Bombeamento. 6. Modelagem numérica. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Para as minhas amadas senhoras, Osvani, Livia e Laís.

Agradecimentos

À minha senhora Osvani pela compreensão e apoio em todos os momentos de nossas vidas.

Às minhas meninas Lívia e Laís por serem a minha principal motivação e pelos sorrisos.

Ao tio e amigo Ney Augusto Dumont (Augustinho) por sempre estar ao meu lado.

Ao meu orientador Professor Celso Romanel pelo apoio para a realização deste trabalho e pela amizade.

Ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio pela oportunidade.

À PUC-Rio por ser uma segunda casa.

Resumo

Lima, Araken Dumont Ramos; Romanel, Celso (Orientador). **Avaliação Numérica de Captura e Controle de Pluma Contaminante em Aquífero Confinado**. Rio de Janeiro, 2019. 93 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A água de um aquífero não é totalmente pura, ela contém substâncias constituintes dissolvidas como sulfatos e cloretos, líquidos e constituintes orgânicos, inorgânicos dissolvidos e patógenos. É importante a remediação da água contaminada com o controle ou remoção da fonte de contaminação, evitando a contínua propagação do poluente no aquífero. A captura da pluma de contaminação pode ser realizada com poços de bombeamento, formando zonas de captura, impedindo sua propagação para áreas limpas e removendo o poluente. Esta extração deve ser com o menor volume de água possível pois esta deverá ser descontaminada e utilizada ou descartada. Tendo esta direção de pesquisa, este trabalho baseia-se no desenvolvimento de um *software*, que possa simular o fluxo de água em um aquífero confinado e a formação de zonas de captura para a extração de poluentes por poços; na investigação de diferentes operações de bombeamento minimizando as zonas de estagnação. O *software* desenvolvido utiliza elementos finitos 2d; variação no tempo das condições de fluxo monofásico; obtém a solução no tempo pelo método da integração temporal. Os estudos numéricos consideraram o aquífero homogêneo ou heterogêneo e isotrópico, e o fluxo de água segue a lei de Darcy. Foram analisadas zonas de captura sob diferentes condições hidrogeológicas; com poços em diferentes posições, com diferentes vazões e com bombeamento constante e; a utilização de poços de injeção reinjetando água extraída. Foi constatado que a modelagem numérica é importante na avaliação de estratégias de bombeamento.

Palavras-chave

Aquífero confinado; descontaminação; bombeamento; modelagem numérica.

Abstract

Lima, Araken Dumont Ramos; Romanel, Celso (Advisor). **Numerical evaluation of contaminant capture zones by wells in confined aquifer.** Rio de Janeiro, 2019. 93 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Introduction

The aquifer water is not totally pure, it contains dissolved constituents from natural solids sources such as sulfates and chlorides. Also, there are organic liquids, organic and inorganic constituents dissolved or pathogens from an anthropogenic source. It is important the contaminated water remediation with the control or removal of the source of contamination, avoiding the continuous propagation of the contamination plume in the aquifer and the reduction of contaminant concentration levels. Control and capture of the contamination plume can be done by pumping wells positioned at the edge of the plume, forming the capture zones to prevent the plume propagation to the not contaminated areas and to remove the pollutant from the aquifer. This extraction should be with a few water volumes, as this should be decontaminated and used or discarded. With this research direction, this work is based on the development of a software to simulate the water flow in a confined aquifer and the formation of the capture zone by pumping wells. Also, it is based on the investigation of different pumping operation features to maximize the contaminant extraction with the minimizing of the withdrawn water volume. The developed software uses bi and three-dimensional finite elements; time variation of monophasic flow conditions; obtains the solution in time by the method of direct temporal integration. The numerical studies considered homogeneous or heterogeneous and isotropic aquifer, and the groundwater flow follows Darcy's law. The formation of the capture zone under different hydrogeological conditions was analyzed; also, with pumping wells in different positions, with different flows conditions and with constant pumping and; the use of injection wells reinjecting extracted water. It was verified that the numerical modeling is important to the evaluation of pumping strategies that provide the greatest removal of solute mass with the lowest water volume extraction.

Groundwater movement

Darcy's Law

In 1856, Henri Darcy, a water engineer, investigated the water flow through a vertical, saturated and homogeneous column of sand filters used in the fountains. From his observations on porous flow, Darcy concludes that the flow rate (water volume passing per time unit - flow), Q , through a homogeneous sand column of constant cross-sectional area is: (1) proportional to the area, A , of the column cross section; (2) to the difference between the water level of the column flow inlet and

outlet, $h^{(1)}$ and $h^{(2)}$, respectively (proportional to the column pressure drop) and; (3) inversely proportional to the column length, L . Darcy's law can be expressed as

$$Q = K \cdot A \frac{h^{(1)} - h^{(2)}}{L} \quad (1)$$

where K is the proportionality coefficient, called hydraulic conductivity. The specific discharge (Darcy flow), q , is defined as the water volume that passes through a transverse unit area of the porous medium, in the normal direction, per time unit

$$q = \frac{Q}{A} = K \frac{h^{(1)} - h^{(2)}}{L} \quad (2)$$

Darcy's law can be written as

$$Q = -K \cdot A \frac{dh}{dl} \quad \text{or} \quad q = -K \frac{dh}{dl} \quad (3)$$

The specific discharge is a vector, q , which has three components, q_x , q_y and q_z , when measured from the Cartesian coordinate axes. Hydraulic conductivity is a second order symmetrical tensor, \mathbf{K} , being described by nine components. Considering the x , y and z coordinate system oriented with the three main directions and the material being isotropic, we have

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial x} - K \frac{\partial h}{\partial y} - K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (4)$$

Flow equation

Applying the law of conservation of mass in a fluid that passes through a representative elementary volume (REV) and using Darcy's law, having the xyz coordinate system aligned with the anisotropy main axes, the transient flow equation can be obtained in an anisotropic porous material with the coordinate system oriented along the anisotropy main axes

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

where S_s is the specific storage.

Numerical modeling

For the modeling of the flow in a confined aquifer, a program based on the finite element method (FEM) was developed with the time variation of the problem conditions. This solves the monophasic flow questions according to the boundary conditions imposed, obtaining hydraulic load potentials and flow velocity throughout the finite element mesh.

Direct integration

For the water flow problem, a time varying solution obtained by the method of direct temporal integration was used

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\Delta t} [\mathbf{A}] + \beta [\mathbf{K}] \right) \{\mathbf{P}\}_{n+1} \\ = \left(\frac{1}{\Delta t} [\mathbf{A}] - (1 - \beta) [\mathbf{K}] \right) \{\mathbf{P}\}_n + (1 - \beta) \{\mathbf{R}\}_n + \beta \{\mathbf{R}\}_{n+1} \end{aligned} \quad (6)$$

where, in water flow, $\{\mathbf{P}\}$ is the potential vector of the element, $[\mathbf{K}]$ is the hydraulic conductivity matrix, $[\mathbf{A}]$ is the compressibility matrix (capacitance) which is null considering the incompressible aquifer. $\{\mathbf{R}\}$, which contains the flow rate per unit volume, area or length (the natural boundary conditions), is obtained by the Galerkin method, where the independent weighting function, the weight used in the Galerkin method, is the finite element interpolation function, N .

The β factor can assume different values according to the finite difference algorithm: $\beta = 0$, forward difference or Euler method (conditionally stable); $\beta = 1/2$, Crank-Nicolson or trapezoidal method (unconditionally stable); $\beta = 2/3$, Galerkin method (unconditionally stable); $\beta = 1$, backward difference, unconditionally stable. If $\beta = 0$, the algorithm is called explicit (the variables in the next time interval are determined only as a function of the variables obtained in the past time intervals), the computational effort is less as well as Δt . If $\beta > 0$ it is implicit, where the variables in the next time interval are dependent on their own value, in addition to history over the past times. Among the implicit methods, $\beta = 1/2$ is the most used, but generates oscillation of the solution.

Remediation

The purpose of this section is to briefly describe the use of extraction wells for the capture and control of the contaminant plume as part of remediation techniques.

Hydrodynamic isolation

To isolate an aquifer contaminated zone, an extraction well can be positioned at the edge of the plume to stabilize its position. The plume stabilization well extracts the contaminated water, which must be treated before any use, preventing contamination of the aquifer uncontaminated areas. With the plume isolated, other remediation techniques can be used.

The combination of extraction and injection wells can be used to create a hydraulic isolation zone around the contamination plume. In this case, the extraction well removes contaminated water and, after being treated, it is reinjected into the aquifer, increasing the hydraulic gradient at the plume position, creating a circulation cell.

Pump and treat system

The water extraction and treatment system is the most common technology used for the remediation of a contaminated aquifer. This technique involves the removal of contaminant from the aquifer with the water pumped through wells, located (spatial distribution and depth) in order to maximize the removal of the contaminating mass with a minimum water volume extracted. The pumped water is sent to a treatment plant, where it is remedied, according to the chemical nature of the contaminant, to a level that allows this water to be discharged into a drainage system or a nearby body of water. In some cases, the reinjection of treated water in the aquifer itself is permitted (artificial recharge).

Capture zone

The capture zone is presented in different ways, for example: in a flat aquifer, with no local flow, the capture zone is radially symmetrical, centered in the well and extending to the limits of the depression cone; if the aquifer has a slope and there is a flow of water, the capture zone is asymmetrical and may extend upwards.

Capture zone calculation

One of the methods for determining the number, location and flow rate of pumping wells was developed by Javandel and Tsang (1986). This method produces curves of capture zones for a single or multiples wells, defining their capture range. This solution considers the aquifer to be confined and have a uniform thickness, B (m), and a specific uniform regional discharge (Darcy velocity), U (m/s). Also, it is considered that the extraction wells penetrate the

entire aquifer and have a flow rate Q (m³/s). For a single pumping well located at the origin, in a Cartesian coordinate system, the equation of the lines that separates the area to be captured by the well from the field flow is

$$y = \pm \frac{Q}{2BU} - \frac{Q}{2\pi BU} \operatorname{tg}^{-1} \frac{y}{x} \quad (7)$$

Figure 1 shows the solution of equation 7 for different values of Q/BU with the units in meters and seconds. In this, all the water within a given type curve will flow to the well located at the source (all flow paths end at the well).

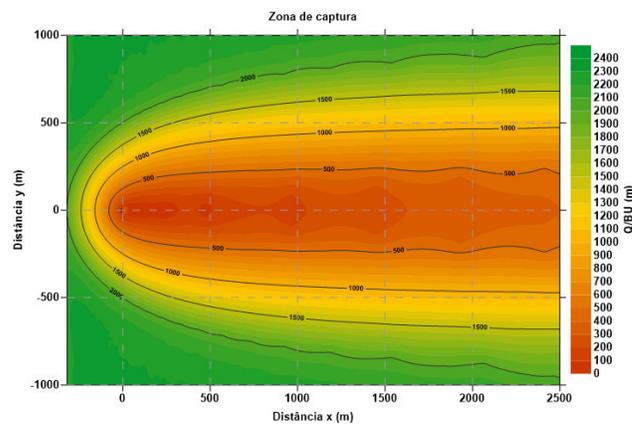


Figure 1 - Analytical solution for the single well capture zone.

Simulations

Single well capture zone in homogeneous aquifer

The capture model of a contaminating plume in an aquifer by an extraction well was performed with the confined aquifer homogeneous and with isotropic conductivity of 25×10^4 m/a (684.93 m/d; 0.8 cm/s), hydraulic gradient of 0.006667 m/m, thickness of 1 m and $\Delta t = 1$ d. The hydraulic conductivity for the isotropic formation was chosen at random, not reflecting any real case. The 2d simulation used a 150 m by 60 m mesh.

The continuous flow occurs from left to right, as shown by the loads in figure 2, at a constant speed of 0.1667×10^4 m/a (45.66 m/d).

Figure 3 shows the capture zone type curves, obtained from equation 7, to define the capture zone type curve for a given contaminant plume. Defining the objective of capturing a plume in the 15 m Q/BU envelope, the continuous extraction flow rate of 2.5×10^4 m³ / a (685 m³/d) is obtained, with the well positioned at $x = 96$ m (figure 4).

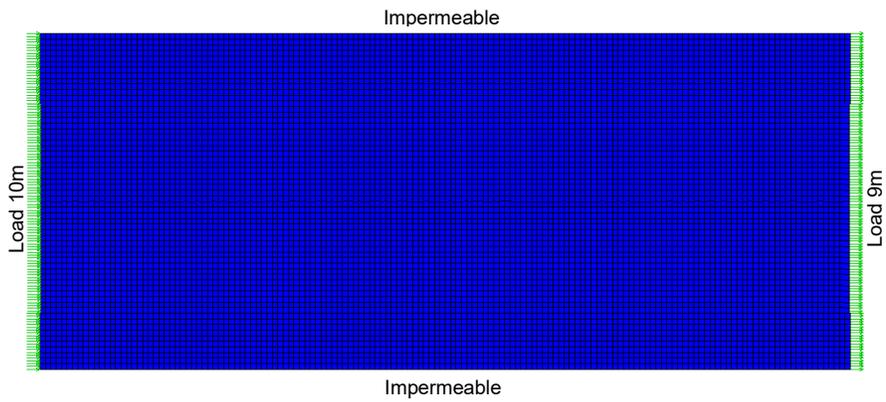


Figure 2 – Mesh and boundary conditions

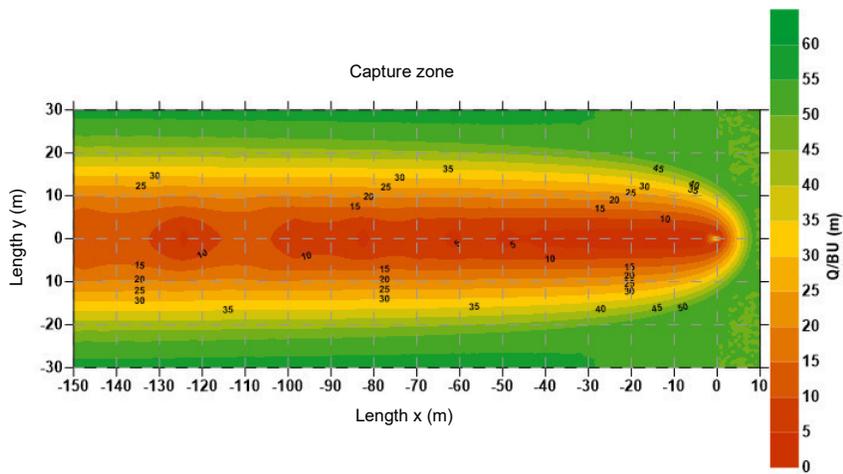


Figure 3 – Capture curves to define the solute plume capture ratio.

The distribution and profile of the velocity modulus in the aquifer for the combined effects of the continuous flow of the aquifer and the extraction well in operation are shown in figure 4. Note the formation of a velocity stagnation zone immediately downstream of the well. Figure 5 shows the resulting flow velocity vectors, where a set of flow vectors converging to the well is noted, forming the capture zone.

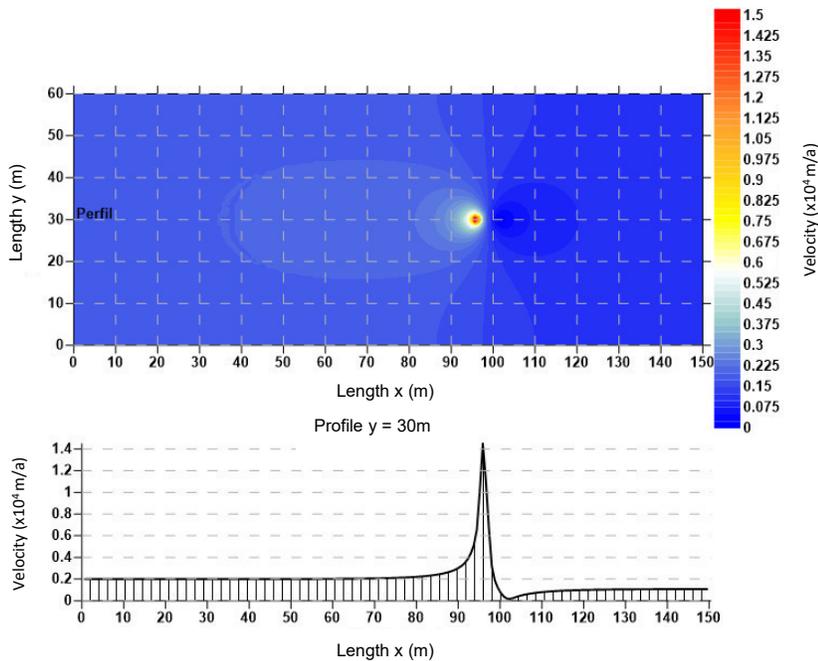


Figure 4 - Velocity flow

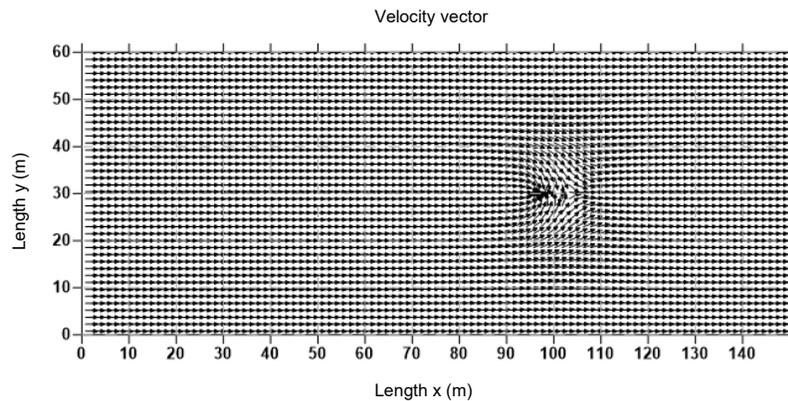


Figure 5 – Velocity vectors

Four wells in line with continuous pumping in heterogeneous aquifer

The heterogeneous aquifer was represented by two hydraulic conductivities: $25 \times 10^4 \text{ m/a}$ (684.93m/d; 0.8cm/s), material 1, and $200 \times 10^4 \text{ m/a}$ (5479.45m/d), material 2. This second hydraulic conductivity, eight times greater than the previous one, was chosen in order to generate a great contrast in the flow velocity field for the heterogeneous aquifer simulation. Both hydraulic conductivities were chosen at random, not reflecting any real cases. For this example, figure 6 presents the boundary conditions.

The four extraction wells used and their coordinates are: P1 (118; 30), P2 (80; 30), P3 (90; 30) and P4 (100; 30). In the simulation, the four wells working

together and with continuous rate flows of $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, in well P2, and $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, in wells P1, P3 and P4.

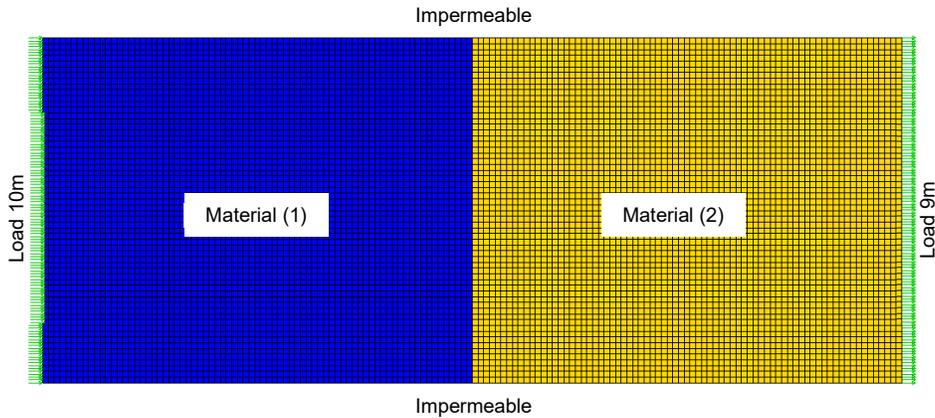


Figure 6 – Boundary conditions for the heterogeneous aquifer

Figures 7 illustrate the flow velocity module. It is observed that the flow velocity field of well P3 has some interference on the P2stagnation zone, and vice versa, and that the same occurs with P4 in relation to P3. The interference of the flow of P1 over the P4 zone is less, due to the distance between these two.

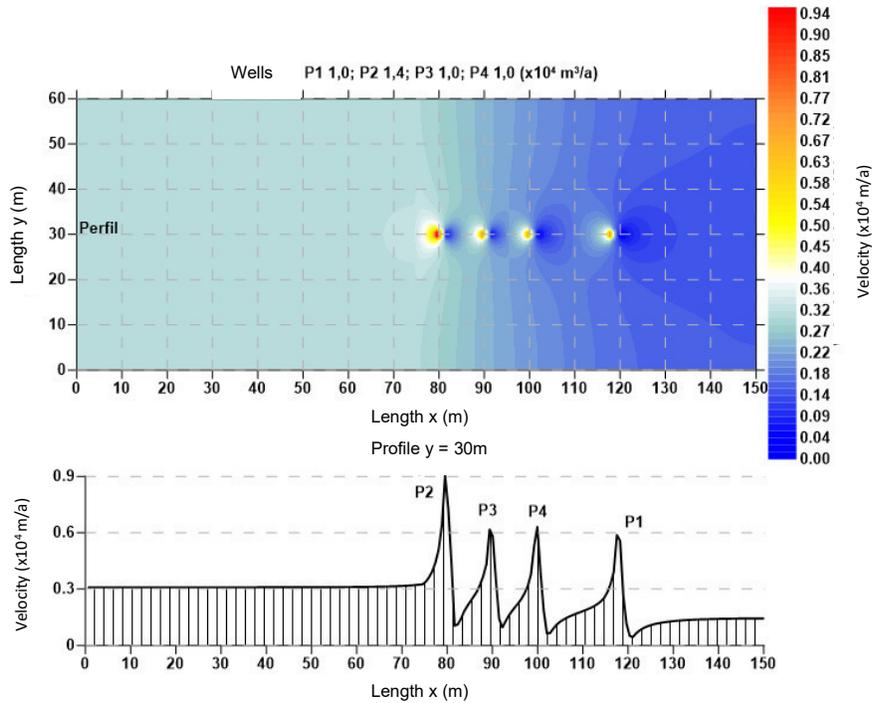


Figure 7 - Aquifer velocity module with 4 in line active wells

Three wells in triangular formation in a homogeneous aquifer

For modeling the formation of the capture zone by three wells arranged in a triangular formation, as in the first simulation, a homogeneous confined aquifer with isotropic conductivity was considered. For this simulation, the boundary conditions presented in figure 2 and the 1-day time increment were also used. The three wells (P1, P2 and P3) were positioned to form a triangle, as shown in figure 8.

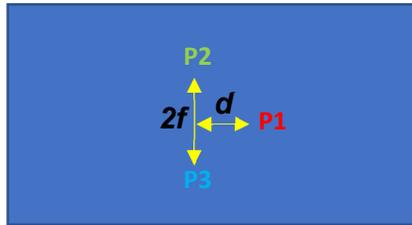


Figure 8 - The 3 wells in triangular formation.

The simulation showed that the use of three extraction wells in triangular formation can be efficient if the distance between the wells is not large and if the well in the position of P1 operates with the highest pumping flow. For the simulated conditions, the best result was obtained with the distances $f = 4\text{m}$ and $d = 2\text{m}$ and considering the three wells with flow rates of $1.5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$, $0.5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ and $0.5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ for well P1, P2 and P3, respectively. Figure 9 illustrates this condition.

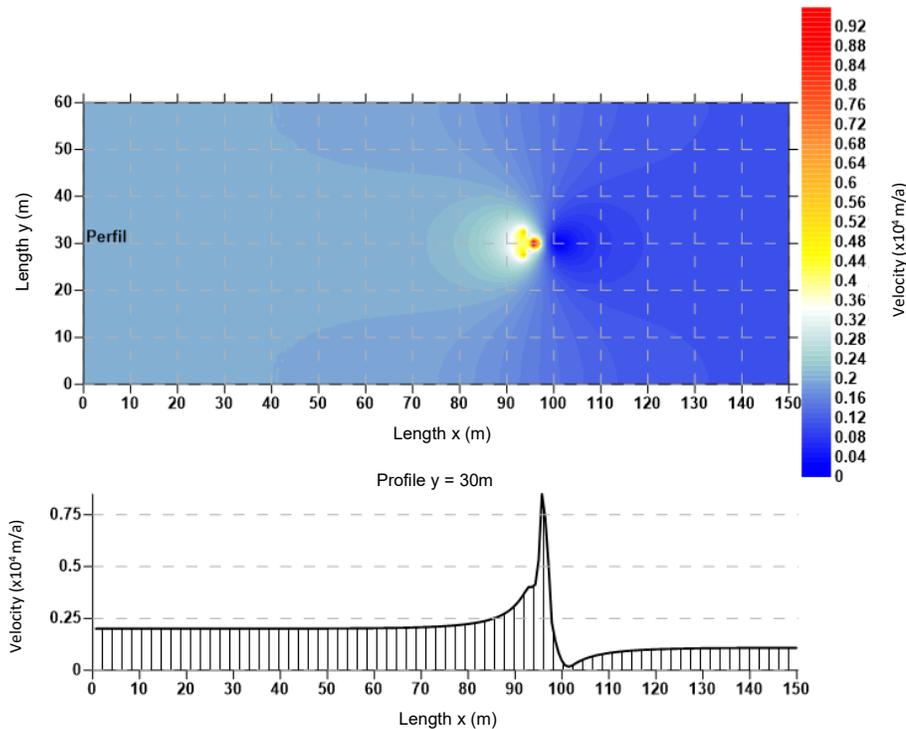


Figure 9 - Flow rate module of wells in triangular formation

Capture zone with extraction and injection wells forming circulation cells in a heterogeneous aquifer

Simulation in heterogeneous aquifer, with the same hydraulic conductivities as before, $25 \times 10^4 \text{m/a}$ and $200 \times 10^4 \text{m/a}$, but with a different geometry formation aiming to highlight the contrasts between the speed fields provided by the two conductivities. The boundary conditions are shown in figure 10.

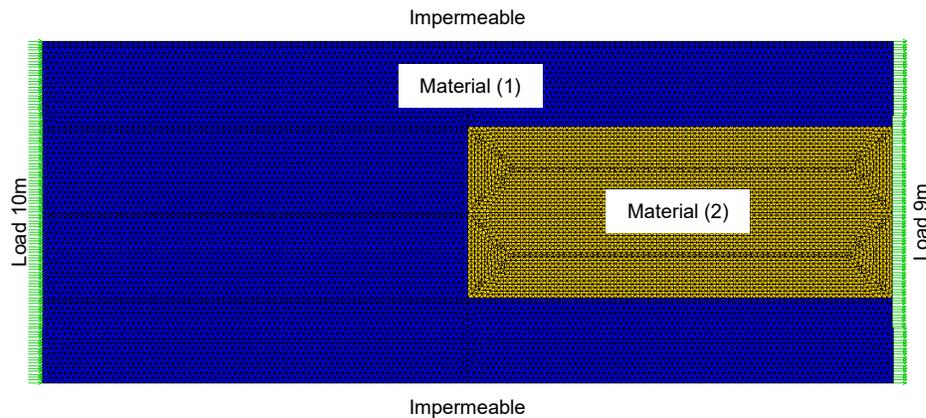


Figure 10 – Boundary conditions for the simulation with circulation cells.

In this analysis, the following four wells, with their respective coordinates and flow rate, were considered: P1 pumping $1 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ in $(x; y) = (120; 30)\text{m}$; P2 injecting $0.5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ in $(x; y) = (60; 30)\text{m}$; P3 pumping $0.5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ in $(x; y) = (115; 30)\text{m}$; P4 injecting $1.0 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ in $(x; y) = (45; 30)\text{m}$.

As can be seen in figure 11, the flow velocities decrease immediately upstream of the injector wells and downstream from the extraction wells, where there is the formation of the stagnation zone. In this figure, it can see the formation of the capture zone between the extraction and injection wells. The formation of this capture zone is aided by the heterogeneous characteristics of the aquifer.

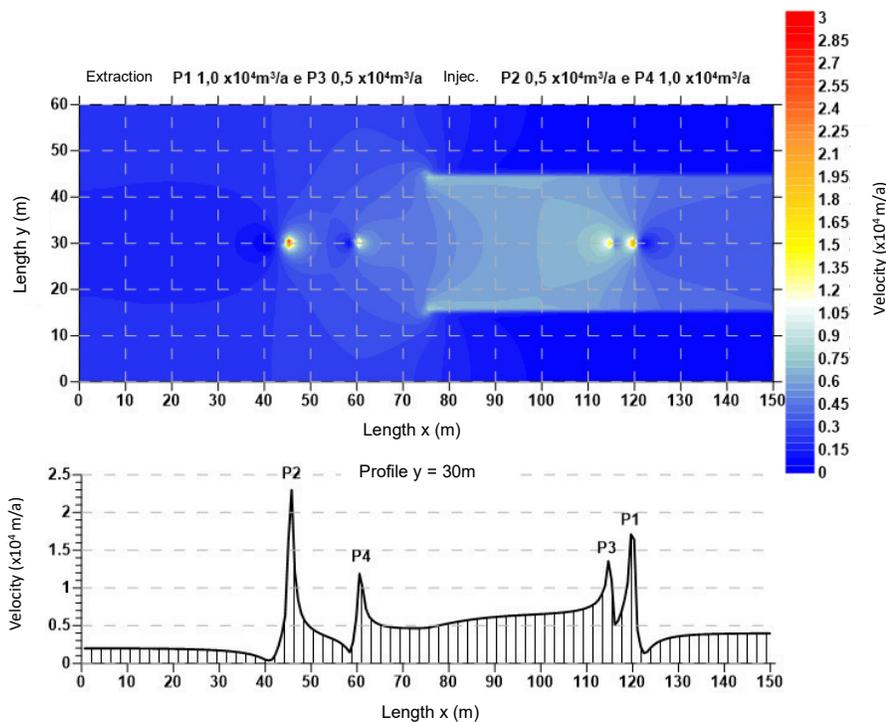


Figure 11 - Flow velocity field and profile through the four wells

Conclusions

In modeling the formation of a contaminant capture zone by pumping wells, the numerical model has a good correlation with the literature theory.

The capture zone of a well for the control and cleaning of a contaminating plume obtained by the numerical model is consistent with theoretical models.

With extraction wells in a triangular arrangement, the positioning of the wells and the flow distribution must not be such that one well negatively interferes with the other. The pumping flows must be selected for what the three wells work together without the formation of a zone of stagnation detrimental to the triangular formation.

The use of injection wells in together with pumping wells can generate a greater displacement of water and result in better cleaning by the extraction wells. However, in nonuniform flow conditions, with the aquifer being composed of different materials, a numerical study of the possibilities for well positioning and pumping flow rate is necessary.

In view of the complex conditions that an aquifer decontamination project with the pumping wells may encounter, the methodology is to numerically analyze each design option, well configuration and pumping scheme, aiming to reduce the uncertainties that may generate errors before start applications in the field.

Suggestions

Perform 3d simulations and modeling the capture zone together with the transport of solute mass (contaminant); model development for unconfined aquifers; coupling with mechanical strain model; consider different numerical tools

Keywords

Confined aquifer; decontamination; pumping; numerical modeling.

Sumário

1. Introdução	26
1.1. Comentários gerais	25
1.2. Definição de aquífero	25
1.3. Distribuição de umidade em um perfil geológico	27
1.4. Tipos de aquífero	29
1.5. O poço	31
1.6. Contaminação de subsuperfície	32
1.7. Contaminante fase líquida não aquosa	34
1.8. Objetivo e metodologia	35
2. Movimento da água subterrânea	36
2.1. Lei de Darcy	36
2.2. Equação de fluxo	40
3. Modelagem numérica	44
3.1. Integração direta	44
4. Remediação	47
4.1. Considerações gerais	47
4.2. Isolamento hidrodinâmico	48
4.3. Sistema de bombeamento e tratamento	49
4.4. Zona de captura	52

4.4.1. Cálculo da zona de captura	52
4.5. Sistema de extração e injeção	55
4.6. Bombeamento em pulso	57
5. Simulações	59
5.1. Zona de captura de um único em aquífero homogêneo	61
5.2. Poço de extração com bombeamento contínuo em aquífero heterogêneo	67
5.3. Quatro poços em linha com extração contínua em aquífero heterogêneo	72
5.4. Três poços em formação triangular em um aquífero homogêneo	76
5.5. Formação de zona de captura com poços de extração e injeção formando uma e duas células em aquífero heterogêneo	81
6. Conclusões e sugestões	89
6.1. Conclusões	89
6.2. Sugestões	90
7. Referências bibliográficas	92

Lista de figuras

Figura 1.1 – Zonas de umidade em subsuperfície	28
Figura 1.2 – (a) Aquífero confinado. (b) Aquífero freático. (c) Aquífero empoleirado. (d) Aquífero de vazamento	30
Figura 1.3 – Projeto simplificado de um poço	31
Figura 2.1 – Fluxo em uma coluna porosa inclinada	37
Figura 2.2 – Volume elementar representativo para fluxo de fluido	41
Figura 4.1 – Poço para estabilização da pluma	48
Figura 4.2 – Célula única de contenção hidráulica de pluma de contaminação	49
Figura 4.3 – Célula dupla de contenção hidráulica de pluma de contaminação	49
Figura 4.4 – Estratégias de descontaminação de aquífero usando o sistema de bombeamento e tratamento (Cohen, Mercer, Greenwald & Beljin ,1997)	50
Figura 4.5 – Solução analítica para a zona de captura de um único poço	54
Figura 4.6 – Possíveis esquemas de poços de extração e extração-injeção, (Satkin & Bedient (1988), <i>apud</i> Fetter (1993)	56
Figura 4.7 – Carga hidráulica e zonas de captura simulados para diferentes esquemas de extração e injeção em um aquífero uniforme (Cohen, Mercer, Greenwald & Beljin, 1997)	57
Figura 5.1 – Malha de elementos finitos quadrilaterais de 8 nós e condições de contorno	61
Figura 5.2 – Distribuição das cargas hidráulicas ao longo do aquífero	62

Figura 5.3 – Curvas tipo de captura para definir a relação de captura da pluma de soluto	62
Figura 5.4 – Carga hidráulica no aquífero, unicamente com o efeito do poço	63
Figura 5.5 – Módulo, em (a), e vetor, em (b), da velocidade de fluxo devido ao poço	64
Figura 5.6 – Carga potencial no aquífero com um poço de extração	65
Figura 5.7 – Velocidade de fluxo total com um poço de extração	66
Figura 5.8 – Vetores de velocidade de fluxo do aquífero e do poço	66
Figura 5.9 – Malha de elementos finitos para o aquífero heterogêneo	67
Figura 5.10 – Campo de cargas potenciais do aquífero heterogêneo	68
Figura 5.11 – Módulo e vetores de velocidade de fluxo no aquífero heterogêneo	68
Figura 5.12 – Distribuição da velocidade de fluxo de todo o aquífero simulado	68
Figura 5.13 – Carga hidráulica no aquífero heterogêneo: bombeamento de $2,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, em (a), e de $3,8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, em (b)	69
Figura 5.14 – Módulo da velocidade no aquífero heterogêneo para a extração de $2,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, em (a), e $3,8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, em (b)	70
Figura 5.15 – Vetores de velocidade de fluxo do aquífero heterogêneo para o bombeamento de $2,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, em (a), e de $3,8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, em (b)	71
Figura 5.16 – Malha de elementos finitos para o aquífero da	

simulação 5.3 e as condições de contorno	72
Figura 5.17 – Campo de cargas hidráulicas do aquífero heterogêneo da simulação 5.3	73
Figura 5.18 – Distribuição das cargas hidráulicas no aquífero com os quatro poços ativos em linha. Da esquerda para a direita: P2, P3, P4 e P1	74
Figura 5.19 – Módulo da velocidade no aquífero com 4 poços ativos em linha	75
Figura 5.20 – Sobreposição dos vetores de velocidade de fluxo no campo de distribuição do módulo da velocidade de fluxo do aquífero com 4 poços ativos em linha	75
Figura 5.21 – Os 3 poços em formação triangular	76
Figura 5.22 – Módulo de velocidade de fluxo para a simulação 6.5.1, 6.5.2, 6.5.3 e 6.5.4, em (a), (b), (c) e (d), respectivamente	78
Figura 5.23 – Módulo de velocidade de fluxo para a simulação 6.5.1.a	79
Figura 5.24 – Módulo de velocidade de fluxo para a simulação 6.5.1.b	80
Figura 5.25 – Malha de elementos finitos, materiais e condições de contorno para a simulação 5.5	81
Figura 5.26 – Cargas hidráulicas, em (a) e níveis, vetores e perfil de velocidade de fluxo, em (b)	82
Figura 5.27 – Perfis de velocidade de fluxo no aquífero, em $y = 30\text{m}$, para o bombeamento de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 ($\times 10^4\text{m}^3/\text{a}$)	83
Figura 5.28 – Cargas hidráulicas no aquífero com o poço P1 ativo	83
Figura 5.29 – Módulo, vetores e perfil de velocidade de fluxo com	

o poço <i>P1</i> em bombeamento de $1 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$	84
Figura 5.30 – Potencial hidráulico e seu perfil ($y = 30\text{m}$) com o poço de injeção trabalhando em conjunto com o de extração	85
Figura 5.31 – Níveis da velocidade de fluxo no aquífero com o poço <i>P1</i> de extração e o <i>P2</i> de injeção	86
Figura 5.32 – Potencial hidráulico e seu perfil ($y = 30\text{m}$) com os dois poço de injeção trabalhando em conjunto com dois os de extração	87
Figura 5.33 – Campo de velocidade de fluxo e perfil passando pelos quatro poços	88

Lista de tabelas

Tabela 5.1: Características geométricas das simulações 6.5.1 a 6.5.4	77
--	----

Lista de símbolos

A	área.
B	espessura do aquífero.
B_d	densidade aparente (<i>bulk density</i>) do aquífero.
g	aceleração da gravidade.
h	carga piezométrica (dimensão L).
i, j, k	vetor unitário.
K	condutividade hidráulica (dim. L/T).
L	comprimento de uma coluna.
n	porosidade.
N	função de interpolação do elemento.
p	pressão, potencial.
q	descarga específica, velocidade de Darcy ou fluxo de Darcy.
Q	vazão (dimensão L ³ /T).
S_s	armazenamento específico.
U	descarga específica do aquífero (velocidade de Darcy).
v_x	velocidade linear média na direção cartesiana x (L/T).
∇	operador diferencial vetorial.
Δt	incremento de tempo.
γ	peso específico.
θ	teor de umidade volumétrica ou a porosidade para o meio saturado.
ρ	densidade.
ρ_w	densidade do fluido.
grad	gradiente.
REV	volume elementar representativo.

1

Introdução

1.1.

Comentários gerais

A água subterrânea é uma fonte de água potável para muitas pessoas, especialmente em zonas rurais, desta forma a sua qualidade é de grande importância. Porém a água subterrânea não é totalmente pura, ela contém substâncias constituintes dissolvidas originadas de fontes naturais de sólidos dissolvidos como sulfatos e cloretos. Ela também pode conter líquidos orgânicos (constituintes orgânicos e inorgânicos dissolvidos) ou patógenos (organismos capazes de causar doenças, originados de uma fonte antropogênica - contaminação resultante da ação humana).

1.2.

Definição de aquífero

Os termos água de subsuperfície e água subterrânea são utilizados para definir toda água encontrada abaixo da superfície. Alguns autores usam o termo água subterrânea para se referir apenas a água encontrada em uma zona saturada, enquanto que água de subsuperfície é usado para denotar toda água localizada em subsuperfície (Bear & Cheng, 2010).

Aquífero, do latim *aqui*, água, e *ferre*, suportar, define uma formação geológica porosa que contem água em total saturação, possui os espaços vazios interconectados cheios de água, e permite que a água se mova através deles sob determinadas condições de campo. Dependendo da sua capacidade de armazenar e de transmitir (definida por sua condutividade hidráulica) água para outra formação vizinha, uma formação geológica pode ser definida como aquífero ou não. Como exemplo de níveis de condutividade hidráulica, Araújo, Abreu & Cavalcante

(2013) relatam, para o aquífero que alimenta o rio Capitão Pocinho (PA), valores entre $1,01 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ (31,85m/a) e $8,0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ (3574m/a), com velocidade de fluxo máxima de 0,8m/a ($2,5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$).

O aquífero é uma formação geológica semipermeável que transmite água em uma taxa muito baixa comparado a um aquífero. Descreve-se como aquífero uma camada de material semipermeável com espessura relativamente fina, quando comparada com a espessura de um aquífero situado abaixo ou acima desta, que tem uma permeabilidade muito baixa, quando comparada a tais aquíferos, e que se estende sobre grandes áreas horizontais. O aquífero, apesar de sua baixa permeabilidade, permite a passagem de grandes quantidades de água entre os aquíferos que são separados por ele.

A parte sólida da formação geológica é a matriz (sólido poroso) e a porção não ocupada pelo material sólido são espaços vazios ou poros. Geralmente os espaços vazios são preenchidos em parte por uma fase líquida (água) e em outra parte por uma fase gasosa (ar). Apenas os poros conectados atuam como canais dentro da formação. Estes interstícios ou canais possuem dimensões variando de grandes cavernas, em rochas calcárias, a minúsculas aberturas subcapilares. Tais interstícios são originados durante a formação da própria rocha, principalmente em rochas ígneas e sedimentares, ou criados por processos geológicos ocorridos após a formação da rocha, podendo ocorrer na forma de fissuras, juntas e passagens de soluções.

1.3.

Distribuição de umidade em um perfil geológico

O perfil geológico abaixo da superfície de uma determinada área pode ser dividido verticalmente em zonas horizontais de acordo com a proporção em que os espaços vazios são preenchidos com água. A figura 1.1 apresenta uma descrição esquemática das zonas de umidade em um perfil geológico homogêneo (Bear & Cheng, 2010). As duas principais zonas são: (1) a zona saturada, na qual todos os poros estão preenchidos com água, e (2) a zona não saturada (ou zona de aeração

ou zona vadosa), onde uma parte dos espaços vazios são ocupados com água e a outra restante é ocupada pela fase gasosa, o ar.

A água da chuva, por exemplo, infiltra pela superfície do terreno e sofre deslocamento para baixo, principalmente pela influência da gravidade, e fica acumulada sobre uma formação impermeável, esta é a zona saturada, a zona de água subterrânea. A água escapa desta zona por meio de poços, fontes e nascentes de rios. A zona saturada é limitada em seu contorno superior pela superfície freática ou, em diferentes circunstâncias, por uma camada impermeável. A superfície freática pode ser definida como uma superfície imaginária cuja a pressão em todos os seus pontos é a atmosférica. A posição desta superfície pode ser localizada pelo nível que a água alcança em um poço que penetra o aquífero.

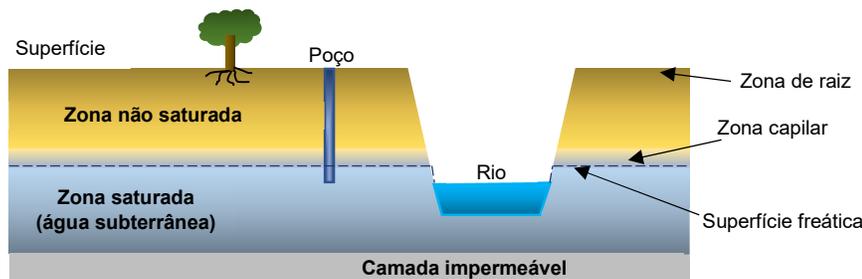


Figura 1.1 – Zonas de umidade em subsuperfície.

A zona não saturada (parcialmente saturada, vadosa ou de aeração) pode ser dividida em três subzonas:

- 1) A zona de raiz ou zona de água do solo, a zona que fornece água para a vegetação. Sua umidade é fortemente afetada pelas condições da superfície do terreno, isto é, pelas estações do ano, índice de precipitação, umidade e temperatura do ar. Durante períodos de altos níveis de precipitação e com excessiva infiltração, o solo nesta zona pode se tornar completamente saturado;
- 2) A zona intermediária que se estende do contorno inferior da zona de raiz até o limite superior da zona com as franjas capilares. A espessura desta zona depende da altura da superfície freática e ela não existe quando o nível

freático é muito alto, caso em que as franjas capilares alcançam a zona de raiz ou até mesmo a superfície do terreno;

- 3) A zona capilar onde as franjas capilares se estendem da superfície freática até o limite de surgimento capilar de água. Sua espessura depende das propriedades e homogeneidade do solo e da distribuição do tamanho dos poros. O comprimento do capilar de água varia de praticamente de nada, em material de granulometria grosseira, a mais de 2 ou 3m, em materiais muito finos como argila.

A condutividade hidráulica da zona não saturada contribui para a capacidade de recarga de um aquífero, como também para o transporte de contaminantes despejados na superfície até este. Oliveira e Bonotto (2002) relatam, para uma área de recarga do aquífero Guarani, uma condutividade hidráulica na faixa de 4,7 a $8,7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ (14,8 a 27,4m/a), que, segundo estes autores, é baixa e sugere pouca susceptibilidade à ocorrência de transporte de elementos químicos da superfície para o aquífero.

1.4.

Tipos de aquíferos

Em um aquífero com fluxo essencialmente horizontal, o nível de água em um poço de observação determina a carga piezométrica do aquífero na posição do poço. O mapeamento deste nível de água em um número de poços distribuídos espacialmente define uma superfície piezométrica, cuja elevação de um ponto em relação a um plano horizontal de referência fornece a carga piezométrica do aquífero neste ponto. A superfície piezométrica é também a superfície freática do aquífero. Dependendo da localização da superfície piezométrica, os aquíferos podem ser classificados como confinado e não confinado.

Um aquífero confinado (figura 1.2 a) é aquele cujo contorno superior e inferior é definido por uma formação impermeável e a pressão de água nele é tal que o nível de água em um poço localiza-se acima da formação impermeável

superior, isto é, a superfície piezométrica fica acima da camada confinante impermeável superior.

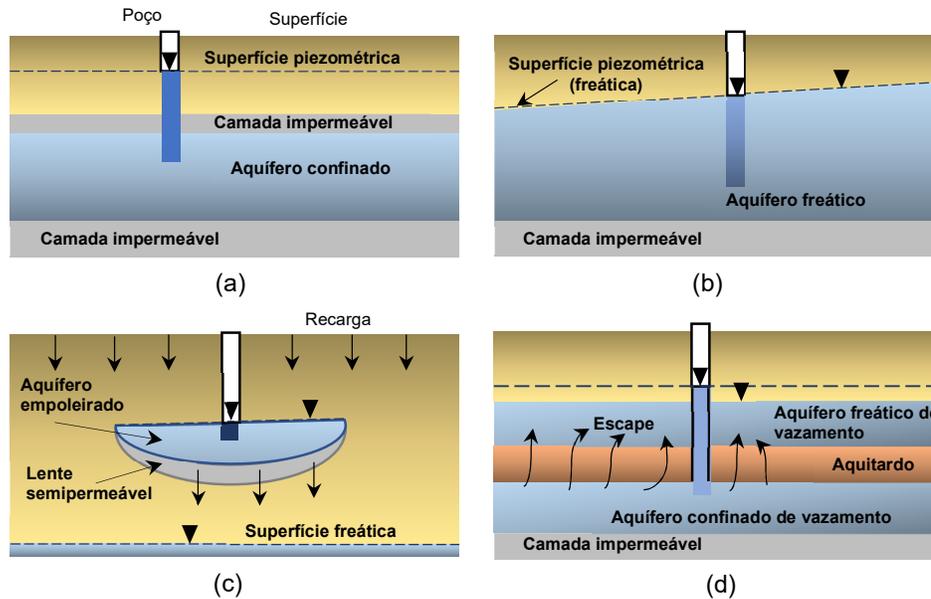


Figura 1.2 – (a) Aquífero confinado. (b) Aquífero freático. (c) Aquífero empoleirado. (d) Aquífero de vazamento.

Um aquífero que tem a parte superior limitada pela superfície freática é denominado aquífero freático ou aquífero não confinado (figura 2 b). Em um aquífero com fluxo essencialmente horizontal, a sua superfície freática é também a sua superfície piezométrica. Um exemplo de aquífero não confinado é o aquífero empoleirado (figura 1.2 c) que possui uma extensão areal limitada, formada por uma base de camada impermeável ou semipermeável localizada entre a superfície piezométrica de um aquífero freático, localizado mais abaixo, e a superfície do terreno. O tempo de existência de um aquífero empoleirado é limitado, sazonal, pois sua água migra para o aquífero freático subjacente.

Um aquífero freático de vazamento (figura 1.2 d) é aquele que possui a sua base limitada por uma camada semipermeável, geralmente definida como uma aquitardo, que recarrega o aquífero freático de vazamento por permitir a passagem de água em direção a este.

O aquífero confinado de vazamento (figura 1.2 d) é um aquífero confinado, exceto quando uma ou ambas as suas camadas confinantes do topo e da base são

aquitardos. Neste caso a água do aquífero confinado de vazamento migra, ou escapa, através da camada semipermeável.

1.5.

O poço

A água de um aquífero pode ser retirada para a utilização por intermédio de poços rasos escavados, poços profundos tubulares ou poços horizontais. A figura 1.3 apresenta um projeto simplificado de um poço perfurado em uma formação não competente. Detalhes sobre o projeto e a construção de poços não fazem parte deste trabalho e não serão abordados aqui.

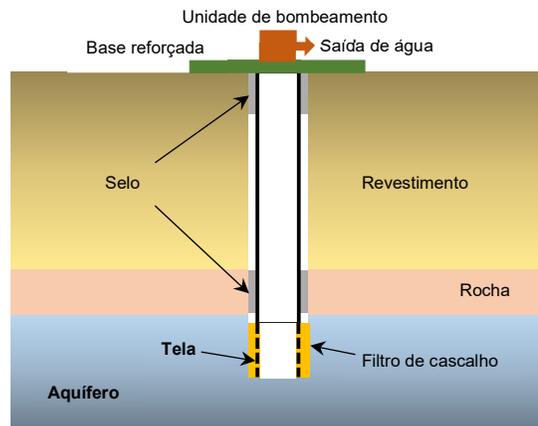


Figura 1.3 – Projeto simplificado de um poço.

Geralmente, os poços escavados ou perfurados penetram de forma parcial em um aquífero. Em um fluxo tridimensional, um poço de extração pode ser representado por isosuperfícies ou por isovolumes com uma convergência de fluxo em direção a sua localização. Em uma consideração bidimensional de fluxo horizontal, um poço de extração pode ser representado por uma convergência radial de pontos ou isolinhas de fluxo indo de sua vizinhança para a sua localização.

Em uma formação consolidada, os poços geralmente são completados sem uso de qualquer tipo de revestimento. Já em formações não consolidadas, um filtro

de cascalho é colocado em volta de uma tela no segmento de extração de água do poço com o objetivo de manter a água produzida limpa e evitar danos à formação pela remoção de finos.

1.6.

Contaminação de subsuperfície

Uma grande variedade de materiais é classificada como contaminantes de água subterrânea. Nesta classificação estão incluídos os componentes químicos orgânicos sintéticos, hidrocarbonetos, ânions e cátions inorgânicos, patógenos e radionuclídeos. Na literatura, como em Fetter (1993), não é difícil encontrar classificação mais detalhada dos diferentes tipos de contaminantes de água subterrânea. A maioria destes materiais são dissolvidos na água em diferentes graus de concentração. Alguns dos compostos orgânicos são levemente solúveis e irão existir na forma dissolvida e como uma fase insolúvel, a qual pode migrar através dos poros interconectados da formação geológica. Os cátions e ânions inorgânicos ocorrem na natureza e sua contaminação pode vir de fontes naturais como também de fontes antropogênicas. Alguns radionuclídeos também ocorrem naturalmente e podem ser originados de fontes naturais e de mineração, moagem e processamento de minérios, de rejeitos industriais, depósitos de resíduos radioativos, teste e produção de armas nucleares.

Contaminantes líquidos, como líquidos tóxicos ou como soluções de uma espécie química tóxica dissolvida em água, são muitas vezes derramados na superfície de um terreno, intencionalmente ou por acidente. Uma vez liberado, o líquido contaminante percola para baixo através da zona não saturada, eventualmente alcançando uma superfície freática subterrânea. Vários processos químicos e biológicos podem ocorrer ao longo da trajetória do contaminante antes deste alcançar um aquífero subterrâneo. Já no aquífero, o líquido contaminante é transportado através deste até alcançar seus pontos de saída de água (rios, lagos, fontes ou poço de bombeamento). Ao longo desta trajetória, a concentração do contaminante é gradualmente reduzida devido a ocorrência de vários processos

físicos, químico e biológicos. Em muitos casos, esta contaminação diminui as propostas de utilização desta água.

As contaminações antropogênicas são aquelas que são introduzidas no ambiente primariamente ou exclusivamente pela ação do homem. Elas incluem substâncias químicas orgânicas ou inorgânicas, geralmente dissolvidas em água, usadas na agricultura, indústrias e domicílios. Esta contaminação passar para o solo a partir de vazamentos em tanques de estocagem, canos e esgotos, de aterros sanitários e de lagoas de evaporação. O fluoreto e o arsênico, como outros materiais, podem ocorrer naturalmente dissolvidos na água em certas regiões de um aquífero. A contaminação com metais pesados geralmente é oriunda de rejeitos de processos industriais, tais como o chapeamento de metais ou de produtos usados na limpeza e polimento de metais. A própria água originada de precipitações raramente é pura, ela carrega diferentes elementos químicos presentes no ar atmosférico poluído. Substâncias químicas estocadas à céu aberto na superfície de um terreno devem funcionar como fontes de solutos na água de infiltração. Escoamentos de água na superfície de um terreno entra em contato, dissolve e carrega várias substâncias químicas contaminando as águas subterrâneas pela infiltração.

Além da água (fase líquida aquosa) pode haver a fase não aquosa líquida (NAPLs – nonaqueous phase liquids), como hidrocarbonetos e solventes orgânicos, presente na zona não saturada. Geralmente, a fonte deste material é um derrame ou vazamento de dutos ou reservatórios ou de resíduos descartados de forma inadequada na superfície do terreno. Apesar de pequena quantidade deste material ser dissolvido na fase aquosa, estas duas fases são assumidas ser imiscíveis.

Em baixa concentração, muitas das substâncias contaminantes não possuem cor, odor ou sabor. Apenas coletando e analisando amostras de água subterrânea é que a sua ocorrência pode ser detectada. Como existem muitos tipos diferentes de contaminantes e específicos testes para cada um deles, quando uma amostra de água é coletada e testada, um determinado contaminante pode não ser encontrado já que o teste foi realizado para um outro determinado composto ou elemento.

Uma das características da contaminação da água subterrânea é que ela pode se tornar grave devido à sua natureza de longo prazo. Resíduos enterrados podem causar uma contaminação que pode levar décadas para ser descoberta. Apesar de inicialmente muitas áreas contaminadas serem pequenas, a longo prazo muitas destas tornam-se bastante extensivas devido ao longo período que a pluma de contaminação fica migrando a partir de sua fonte.

1.7.

Contaminante fase líquida não aquosa

Um contaminante tipo fase líquida não aquosa (non-aqueous liquid phase – NAPL) é aquele na forma de uma terceira fase fluida, um líquido que praticamente é imiscível na água, que é introduzido no sistema ar-água da zona não saturada através superfície do terreno. Exemplos destes contaminantes são os líquidos orgânicos tipo os hidrocarbonetos, os solventes orgânicos e os pesticidas. Eles são introduzidos na zona não saturada por derrames ou vazamentos de tanques de armazenamento, dutos ou tonéis corroídos.

Quando está em pequena quantidade, o NAPL se desloca e se propaga na zona não saturada, ocupando parte dos poros junto com o ar e a água. Mas se a quantidade de NAPL é suficientemente grande, ele continuará se propagando, principalmente na direção descendente, até alcançar superfície freática.

Em subsuperfície, certa quantidade de um líquido orgânico deve se dissolver na água que se desloca pelos espaços vazios e, assim, este contaminante deve alcançar e contaminar um aquífero subterrâneo. Outra parte do contaminante orgânico, mais volátil, deve evaporar e se propagar por difusão na fase gasosa que ocupa parte dos poros. Uma interface microscópica é mantida entre o NAPL e ambas as fases aquosas e gasosas em cada poro. Alguns NAPLs, como a gasolina, são menos densos que a água e são denominados contaminantes fase líquida não aquosa leve (*light* NAPL ou LNAPL). Já quando o NAPL é mais denso que a água, como solventes clorados, ele é chamado de *dense* NAPL ou DNAPL. Os NAPLs podem ser compostos orgânicos puros ou misturas complexas com um grande número de compostos. Os vários compostos do NAPL devem se dissolver na fase

aquosa em pequenas quantidades, cada um de acordo com a sua própria solubilidade na água. Considerá-lo imiscível é saber que o NAPL e a água são separados, dentro dos espaços vazios, por uma interface física microscópica, apesar da pequena quantidade de componentes que é transferida entre as fases.

Quando uma grande quantidade de LNAPL é derramada na superfície de um terreno, este se desloca para baixo alcançando a zona capilar e forma uma lente flutuante que se move conforme o gradiente hidráulico. Em seu deslocamento, esta lente deixa para trás uma trilha de volumes em saturação residual do LNAPL. Eventualmente o LNAPL flutuante torna-se imóvel em uma saturação residual e a água que passar por este domínio ficará contaminada. O LNAPL permanente atua como uma fonte imóvel de longo prazo, até ser totalmente dissolvido.

No caso do DNAPL, quando há um derramamento de grande quantidade na superfície de um terreno, o contaminante quando alcançar a superfície freática continuará a percolar através da zona saturada de água, deixando para trás volumes de DNAPL em saturação residual, que se tornam fontes de poluentes. O DNAPL continuará a percolar até encontrar a formação impermeável que forma a base do aquífero, acumulando-se sobre esta em forma de lentes ou piscinas.

1.8.

Objetivo e metodologia

Este trabalho tem como objetivo principal a avaliação numérica e paramétrica de zonas de captura de poluentes de alguns esquemas de poços de controle e extração de pluma contaminante em aquíferos confinados, contaminados por substâncias dissolvidas em água. Para tal, invés de se utilizar programa comercial, optou-se por elaborar um software, baseado em elementos finitos, capaz de simular a formação de zonas de captura utilizando diferentes arranjos de poços de extração, amplamente apresentados na literatura, como: poços de extração em conjunto ou não com poços de injeção e o bombeamento contínuo. Com este software, também foram avaliadas configurações de poços que pudessem diminuir as zonas de estagnação, de acordo com as características hidrogeológicas do aquífero.

2

Movimento da água subterrânea

O objetivo aqui é de apresentar a lei de fluxo de Darcy e a equação de fluxo transiente em um meio poroso anisotrópico, ambos amplamente descritos na literatura como em Fetter (1993) e Bear & Cheng (2010).

2.1.

Lei de Darcy

Em 1856, Henri Darcy, engenheiro de água da cidade de Dijon, localizada ao sul da França, investigou o fluxo de água através de uma coluna vertical, saturada e homogênea de filtros de areia, utilizados nas fontes da cidade. De suas observações experimentais sobre escoamento através de meios porosos, Darcy conclui que a taxa de fluxo (volume de água passando por unidade de tempo - vazão), Q , através de uma coluna de areia homogênea de área de seção transversal constante é: (1) proporcional à área, A , da seção transversal da coluna; (2) proporcional à diferença entre a elevação do nível de água da entrada e da saída de fluxo da coluna, $h^{(1)}$ e $h^{(2)}$, respectivamente (proporcional à perda de carga ao longo da coluna) e; (3) inversamente proporcional ao comprimento, L , da coluna. Então, a lei de Darcy pode ser expressa como

$$Q = K \cdot A \frac{h^{(1)} - h^{(2)}}{L} \quad (2.1)$$

onde K é o coeficiente de proporcionalidade, chamado de condutividade hidráulica. A descarga específica (fluxo de Darcy), q , é definida como o volume de água que passa através de uma área unitária transversal do meio poroso, na direção normal, por unidade de tempo,

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2.2)$$

Assim, a lei de Darcy também pode ser expressa em termos da descarga específica como

$$q = K \frac{h^{(1)} - h^{(2)}}{L} \quad (2.3)$$

A lei de Darcy pode ser considerada em caso de um fluxo em uma coluna inclinada de um meio poroso, homogêneo e saturado, como apresentado na figura 2.1. Nesta figura, as cargas de elevação $h^{(1)}$ e $h^{(2)}$ também representam as cargas piezométricas nos respectivos reservatórios, definidas como

$$h = z + \frac{p}{\rho \cdot g} \quad \gamma = \rho \cdot g \quad (2.4)$$

onde z é a elevação do ponto no qual a carga piezométrica está sendo considerada, sobre um nível *datum* (nível de referência), p , ρ e γ são a pressão, a densidade e o peso específico do fluido, respectivamente, e g é a aceleração da gravidade.

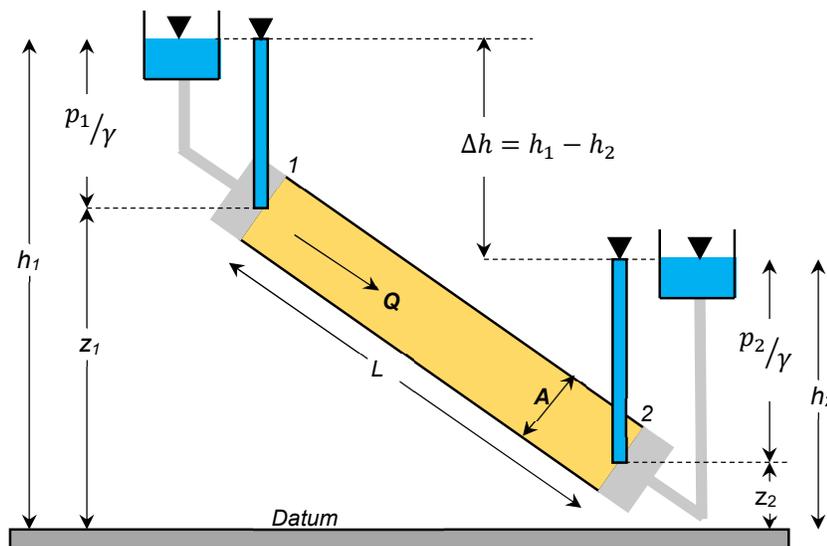


Figura 2.1 – Fluxo em uma coluna porosa inclinada.

A lei de Darcy pode ser escrita como

$$Q = -K \cdot A \frac{dh}{dl} \quad (2.5)$$

onde dh/dl é o gradiente de carga hidráulica. O sinal negativo indica que o fluxo ocorre na direção da maior carga para a menor. Em termos da descarga específica (fluxo de Darcy ou velocidade de Darcy):

$$q = -K \frac{dh}{dl} \quad (2.6)$$

A condutividade hidráulica, K , é a medida da habilidade do meio fraturado ou poroso de transmitir água. Em um meio anisotrópico, o valor de K varia com a direção e ela pode assumir valores, K_x , K_y e K_z , conforme as três direções principais. Em um meio isotrópico o seu valor é igual em todas as direções, $K_x = K_y = K_z = K$.

A carga hidráulica, h , é um escalar, contudo o gradiente de carga é um vetor com magnitude e direção. O gradiente de h é designado como $\text{grad } h$:

$$\text{grad } h = \mathbf{i} \frac{\partial h}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial h}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.7)$$

onde \mathbf{i} , \mathbf{j} e \mathbf{k} são vetores unitários na direção x , y e z . Uma notação equivalente é o uso do operador diferencial vetorial, del (ou nabla), representado por ∇ . Este operador é equivalente a

$$\mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.8)$$

A descarga específica também é um vetor, \mathbf{q} , que possui três componentes, q_x , q_y e q_z , quando medido dos eixos de coordenadas cartesianas. Este vetor possui uma magnitude q que é expressa por

$$q = |\mathbf{q}| \quad (2.9)$$

A condutividade hidráulica é um tensor de segunda ordem, \mathbf{K} , sendo descrito por nove componentes, que na forma de matriz é expresso por

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Sendo a condutividade hidráulica um tensor simétrico, $K_{ij} = K_{ji}$, então há apenas seis componentes independentes de \mathbf{K} na matriz (2.10). E se o sistema é orientado ao longo dos eixos principais, o tensor fica

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Considerando o meio como isotrópico, a condutividade hidráulica da direção em que é medida, o tensor \mathbf{K} torna-se

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K & 0 & 0 \\ 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & K \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

As três componentes do vetor de descarga específica, \mathbf{q} , são

$$\begin{aligned}
 q_x &= -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \\
 q_y &= -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \\
 q_z &= -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Considerando o sistema de coordenadas x , y e z orientado com as três direções principais de anisotropia, \mathbf{K} é a matriz (2.11) e as três componentes da velocidade de Darcy são

$$\begin{aligned}
 q_x &= -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \\
 q_y &= -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \\
 q_z &= -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

Para um material isotrópico, \mathbf{K} sendo a matriz (2.12), tem-se

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial x} - K \frac{\partial h}{\partial y} - K \frac{\partial h}{\partial z}
 \tag{2.15}$$

2.2.

Equação de fluxo

Pela lei de conservação de massa, não há mudança na massa de um fluido que passa através de um volume elementar representativo (REV) de um meio poroso. Isto é, a massa que entra em um REV menos a massa que deixa o REV é igual a massa armazenada no REV em um intervalo de tempo.

Em um volume elementar representativo (figura 2.2), os três lados têm comprimento dx , dy e dz , respectivamente. A área das duas faces normais ao eixo

x é $dy \cdot dz$, a área das faces normais ao eixo y é $dx \cdot dz$ e a das faces normais ao eixo z é $dx \cdot dy$.

A componente de fluxo de massa entrando no REV paralelamente ao eixo x é a densidade do fluido vezes a taxa de fluxo:

$$\text{influxo de massa em } x = \rho_w \cdot q_x \cdot dy \cdot dz \quad (2.16)$$

onde ρ_w é a densidade do fluido (M/L^3), q_x é a descarga específica ou o volume de fluxo por área da seção transversal (L/T) e $dy \cdot dz$ é a área da seção transversal (L^2). A unidade de influxo de massa é massa por unidade de tempo (M/T).

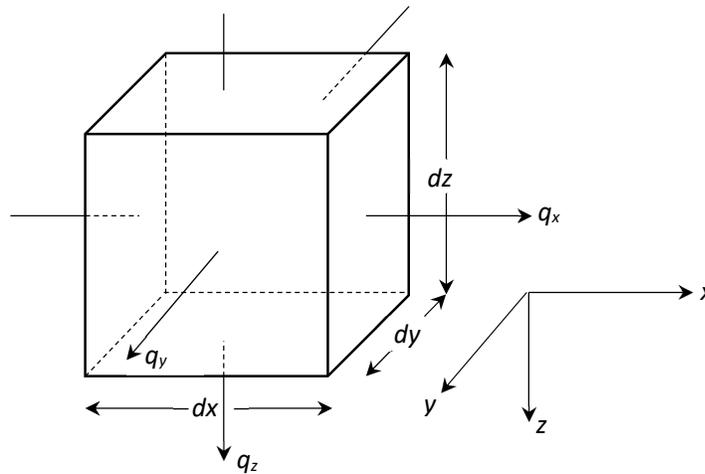


Figura 2.2 – Volume elementar representativo para fluxo de fluido.

A taxa de fluxo de massa que sai é diferente da que entra (influxo) e é dada por

$$\text{fluxo de massa que sai em } x = \left[\rho_w q_x + \frac{\partial(\rho_w q_x) dx}{\partial x} \right] \cdot dy dz \quad (2.17)$$

O acúmulo líquido de massa dentro do volume de controle devido a componente de fluxo paralelo ao eixo x é a massa que entra menos a que sai, ou

$$-\frac{\partial(\rho_w q_x) dx dy dz}{\partial x}$$

Similares termos de acúmulo líquido de massa devido as componentes de fluxo paralelo aos eixos y e z são:

$$-\frac{\partial(\rho_w q_y) dy dx dz}{\partial y}$$

$$-\frac{\partial(\rho_w q_z) dz dx dy}{\partial z}$$

Estes três termos são somados para encontrar o acúmulo total de massa dentro do volume de controle.

$$-\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho_w q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_w q_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_w q_z) \right] dx \cdot dy \cdot dz \quad (2.18)$$

A massa de água no volume elementar representativo, M , é a densidade da água, ρ_w , vezes a porosidade, n , vezes o volume, $dx \cdot dy \cdot dz$. A variação da massa de água em relação ao tempo é

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w \cdot n \cdot dx dy dz) \quad (2.19)$$

Pela lei da conservação de massa, a equação 2.18 deve ser igual a 2.19.

$$-\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho_w q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_w q_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_w q_z) \right] dx dy dz = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w n dx dy dz) \quad (2.20)$$

Assumindo que a densidade do fluido não muda, sendo a mesma em qualquer ponto do volume elementar representativo, a equação 2.20 pode ser simplificada para

$$-\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right] = \frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w n) \quad (2.21)$$

Substituindo os componentes de descarga específica, no lado esquerdo da equação 2.21, pela lei de Darcy e tendo o sistema de coordenadas xyz alinhado com os principais eixos de anisotropia, o lado esquerdo desta equação torna-se

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.22)$$

A mudança na massa dentro do REV ocorre devido a variações da porosidade e da densidade de água conforme a carga hidráulica muda com o tempo. Assim, a variação do volume de água armazenado é proporcional à variação da carga com o tempo. O lado direito da equação 2.21 pode ser expresso por uma constante de proporcionalidade, S_s , o armazenamento específico, vezes a variação da carga com o tempo.

$$\frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w n) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.23)$$

Combinando as equações 2.21, 2.22 e 2.23, obtêm-se a equação de fluxo transiente em um meio poroso anisotrópico com o sistema de coordenadas orientado ao longo dos principais eixos de anisotropia:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.24)$$

3

Modelagem numérica

Para a modelagem do fluxo monofásico em um aquífero confinado foi desenvolvido um programa baseado no método dos elementos finitos (MEF) com a variação das condições do problema no tempo. Este resolve a questão do fluxo monofásico conforme as condições de contorno impostas, obtendo em toda a malha os potenciais de carga hidráulica e as velocidades de fluxo.

Os conceitos relacionados ao método de elemento finito e a integração numérica no tempo aqui apresentados foram obtidos da literatura (Cook, Malkus & Plesha, 1989, e Zienkiewicz & Taylor, 1989).

3.1.

Integração direta

Para problema de fluxo de água utilizou-se uma solução variando no tempo obtida pelo método da integração temporal direta. Neste caso, a equação a ser resolvida é da forma

$$[\mathbf{K}] \cdot \{\mathbf{P}\} + [\mathbf{A}] \cdot \{\dot{\mathbf{P}}\} = \{\mathbf{R}\}, \quad \{\dot{\mathbf{P}}\} = \left\{ \frac{d\mathbf{P}}{dt} \right\} \quad (3.1)$$

onde, em fluxo de água, $\{\mathbf{P}\}$ é o vetor de potenciais do elemento, $[\mathbf{K}]$ é a matriz de condutividade hidráulica, $[\mathbf{A}]$ é a matriz de compressibilidade (capacitância) que é nula considerando o aquífero incompressível. $\{\mathbf{R}\}$, que contém a taxa de fluxo por unidade de volume, de área ou comprimento (as condições de contorno naturais), é obtido pelo método de Galerkin (resíduos ponderados) para a aproximação da solução da equação, onde a função independente de ponderação, o peso usado no método de Galerkin, é a função de interpolação do elemento finito, N .

Considerando uma vazão, Q , aplicada na superfície do elemento (condição de contorno), tem-se

$$\{\mathbf{R}\} = \int_{S_e} [\mathbf{N}]^T \cdot Q \cdot dS \quad (3.2)$$

Considerando dois estados de potencial, separados por um incremento de tempo Δt , e denotado por $\{\mathbf{P}\}_n$ e $\{\mathbf{P}\}_{n+1}$. Um esquema de integração no tempo, conhecido com a regra trapezoidal generalizada, supõem que duas condições separadas no tempo tem a relação

$$\{\mathbf{P}\}_{n+1} = \{\mathbf{P}\}_n + \{(1 - \beta)\dot{\mathbf{P}}_n + \beta\dot{\mathbf{P}}_{n+1}\} \cdot \Delta t \quad (3.3)$$

A equação 3.3 contém o fator β que deve ser selecionado. Escrevendo a equação 3.1 para o tempo t e o $t + \Delta t$ e multiplicando os resultados por $1 - \beta$ e β , respectivamente

$$(1 - \beta) \left([\mathbf{K}]\{\mathbf{P}\}_n + [\mathbf{A}]\{\dot{\mathbf{P}}\}_n \right) = (1 - \beta)\{\mathbf{R}\}_n \quad (3.4)$$

$$\beta \left([\mathbf{K}]\{\mathbf{P}\}_{n+1} + [\mathbf{A}]\{\dot{\mathbf{P}}\}_{n+1} \right) = \beta\{\mathbf{R}\}_{n+1} \quad (3.5)$$

Somando a equação 3.4 a 3.5 e usando a equação 3.3 para eliminar as derivadas no tempo, tem-se

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\Delta t} [\mathbf{A}] + \beta [\mathbf{K}] \right) \{\mathbf{P}\}_{n+1} \\ & = \left(\frac{1}{\Delta t} [\mathbf{A}] - (1 - \beta) [\mathbf{K}] \right) \{\mathbf{P}\}_n + (1 - \beta)\{\mathbf{R}\}_n + \beta\{\mathbf{R}\}_{n+1} \end{aligned} \quad (3.6)$$

O fator β pode assumir diferentes valores conforme o algoritmo de diferenças finitas

- $\beta = 0$, diferença para frente (*forward difference*) ou método de Euler (condicionalmente estável);
- $\beta = 1/2$, método de Crank-Nicolson ou trapezoidal (incondicionalmente estável);
- $\beta = 2/3$, método de Galerkin (incondicionalmente estável);
- $\beta = 1$, diferença para trás (*backward difference*), incondicionalmente estável.

Se $\beta = 0$, o algoritmo é denominado explícito (as variáveis no intervalo de tempo seguinte são determinadas apenas em função das variáveis obtidas nos intervalos de tempo passado), o esforço computacional é menor como também o Δt . Se $\beta > 0$ ele é implícito, onde as variáveis no intervalo de tempo seguinte são dependentes do seu próprio valor, além da história ao longo dos tempos passados. Entre os métodos implícitos, $\beta = 1/2$ é o mais usado mas gera oscilação da solução. Oscilações podem ser reduzidas com pequenos valores de Δt ou com amortecimento numérico usando $\beta > 1/2$. Se o problema é não linear, o único algoritmo incondicionalmente estável é $\beta = 1$, embora não seja preciso.

4

Remediação

4.1.

Considerações gerais

Geralmente a remediação de água subterrânea contaminada envolve dois passos. O primeiro passo está em localizar e controlar a fonte de contaminação para prevenir a continua liberação de contaminantes para a subsuperfície e/ou da subsuperfície para a água subterrânea. O segundo passo da remediação é o tratamento da água subterrânea contaminada para remover ou reduzir fortemente os níveis de concentração de contaminante. Esta remediação pode ir do isolamento da fonte contaminante, evitando a liberação de mais contaminantes, à completa remoção de todos os traços de contaminação, o que usualmente é tecnicamente e/ou economicamente impraticável.

A estratégia de remediação de um dado aquífero contaminado depende das condições hidrogeológicas, do tipo da fonte de contaminante e do destino da água (uso para beber, doméstico, industrial, agrícola, recreação e proteção ambiental). Uma ótima estratégia de remediação é geralmente composta pela combinação de mais de uma técnica, cada uma destinada a alcançar um específico objetivo. Cada técnica deve ser escolhida de acordo com as informações sobre a fonte contaminante, a natureza química/biológica do contaminante, a extensão da zona contaminada, a hidrogeologia do aquífero e os objetivos da remediação.

Amplamente apresentadas na literatura, alguma das principais técnicas de remediação de aquíferos são: (1) extração e remoção da fonte de contaminantes; (2) contenção da fonte e da pluma de contaminantes, utilizada quando não é possível remover a fonte contaminante e a pluma; (3) isolamento hidrodinâmico, utilização de poços de extração para estabilizar a pluma de contaminantes; (4) bombeamento e tratamento, utilização de poços de extração para retirar a água contaminada seguido do tratamento orgânico e/ou inorgânico dos contaminantes; (5) barreira permeável reativa, consiste de um material poroso permeável

posicionado dentro do aquífero para extrair (adsorção) ou degradar (reações químicas) os contaminantes dissolvidos na água que passa através dele.

O objetivo desta seção é de descrever de maneira breve a utilização de poços de extração para a captura e controle da pluma de contaminante como parte de técnicas de remediação.

4.2.

Isolamento hidrodinâmico

Para isolar uma zona do aquífero com água contaminada, um poço de extração pode ser posicionado na borda da pluma para estabilizar a sua posição (figura 4.1). O poço de estabilização de pluma extrai a água contaminada, a qual deve ser tratada antes de qualquer utilização, prevenindo a contaminação de áreas não contaminadas do aquífero. Com a pluma isolada, outras técnicas de remediação podem ser empregadas.

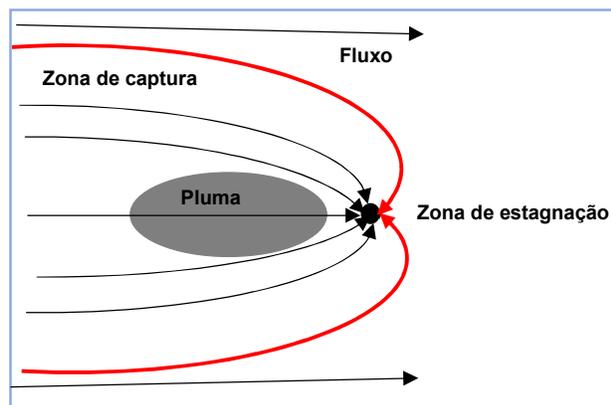


Figura 4.1 – Poço para estabilização de pluma.

A combinação de poços de extração e injeção pode ser usada para criar uma zona de isolamento hidráulico em volta da pluma de contaminação. Neste caso, o poço de extração retira a água contaminada e, depois de ser tratada, esta é reinjetada no aquífero aumentando o gradiente hidráulico na posição da pluma (figura 4.2), formando uma célula de circulação (Fetter, 1993).

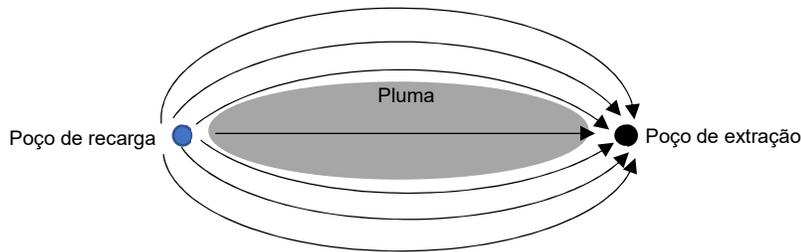


Figura 4.2 – Célula única de contenção hidráulica de pluma de contaminação.

No sistema de reinjeção a água não tratada pode ser utilizada, porém o poço de estabilização da pluma contaminante não pode parar de funcionar, caso contrário a pluma começará a migrar para áreas não contaminadas do aquífero. O sistema de contenção hidráulica de dupla célula de circulação (figura 4.3), onde dois pares de poços de extração e de injeção são usados, promove o isolamento da pluma contaminante, criando uma célula interna menor onde um menor volume de água é extraído. Neste caso há a possibilidade de interrupções programadas no funcionamento dos poços sem a perda na eficiência da contenção da pluma contaminante.

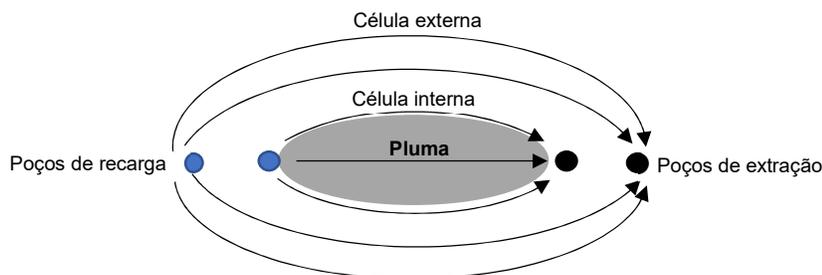


Figura 4.3 – Célula dupla de contenção hidráulica de pluma de contaminação.

4.3.

Sistema de bombeamento e tratamento

O sistema de extração de água e tratamento é a tecnologia mais comum usada para a remediação de um aquífero contaminado, uma vez que tenha sido

identificada a natureza química e a extensão da pluma de contaminação. Esta técnica envolve a remoção do contaminante do aquífero com a água bombeada através de poços especialmente instalados, localizados (distribuição espacial e profundidade) de maneira maximizar a remoção da massa contaminante com um mínimo volume total de água extraída.

Um sistema de bombeamento e tratamento deve ser projetado de forma a: (1) reduzir as concentrações dos contaminantes a níveis aceitáveis; (2) maximizar a remoção de massa; (3) minimizar o tempo de limpeza e; (4) minimizar os custos. As estratégias para gerenciar a água contaminada de um aquífero usando um sistema de bombeamento e tratamento (figura 4.4) devem considerar o uso de contenções físicas e/ou hidráulicas, a restauração da qualidade da água subterrânea e a combinação de técnicas e objetivos (Cohen, Mercer, Greenwald & Beljin ,1997).

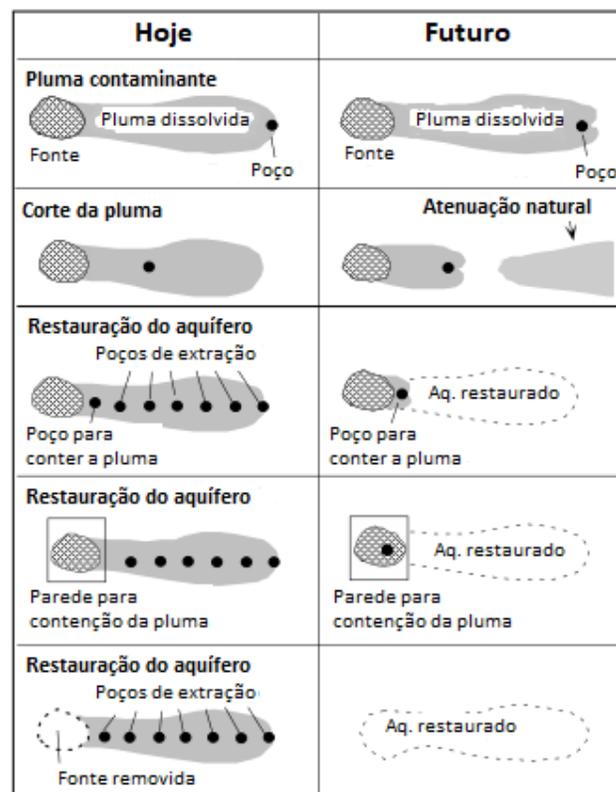


Figura 4.4 – Estratégias de descontaminação de aquífero usando o sistema de bombeamento e tratamento (Cohen, Mercer, Greenwald & Beljin ,1997).

No sistema de bombeamento e tratamento, a água bombeada é enviada para uma estação de tratamento, onde ela é remediada de acordo com a natureza química do contaminante para um nível que permite a esta água ser descartada em um sistema de drenagem ou em um corpo de água próximo. Em alguns casos é permitida a reinjeção da água tratada no próprio aquífero, usando uma tecnologia de recarga artificial. Esta técnica de bombear-tratar-reinjetar apresenta algumas vantagens (Bear & Cheng, 2010): (1) poupa água; (2) o padrão de fluxo criado pela operação de bombeamento e injeção pode ser projetado para ser mais eficiente do que apenas bombear (extrair) e tratar; (3) o posicionamento dos poços pode ser feito de tal forma a evitar a criação de zonas de estagnação ou zonas de baixa velocidade de onde os contaminantes não podem ser removidos. O sistema de bombeamento e tratamento da pluma de contaminante tem melhor rendimento junto com alguma medida de controle da fonte de contaminante para parar a liberação de material dentro da pluma.

Uma célula de circulação é um especial caso da técnica de bombear-tratar-reinjetar no qual há um poço de bombeamento e um de recarga, ambos de igual força, localizados ao longo de uma direção, com o poço de reinjeção posicionado a montante daquele de extração (figura 4.2). O resultado é um padrão de fluxo do poço de recarga para o de bombeamento, na forma de uma elipse fechada (ou uma elipsoide, em um fluxo tridimensional) dentro do aquífero. Idealmente, o volume do aquífero ocupado pelo contaminante a ser removido deve ser envolvido por uma célula de circulação, isolando a pluma de contaminante do resto do aquífero.

Uma estratégia eficiente para determinar a localização e a vazão dos poços de bombeamento é instalá-los de tal forma que eles criem, individualmente ou através de efeitos combinados, uma zona de captura que force a intercepção da pluma de água contaminada, com a minimização do total de água bombeada por unidade de massa de contaminante removido.

O sistema de bombeamento e tratamento pode apresentar baixa performance, em alguns casos não sendo capaz de alcançar a restauração, a redução da concentração de contaminante a níveis padrões exigidos, do aquífero em um prazo de 5 a 10 anos. Também há a questão de metas irrealistas de descontaminação, como a completa restauração do aquífero, que levam a descrença no método de

restauração. Existem áreas do aquífero que podem conter uma concentração residual, devido a diversos fatores como a baixa permeabilidade e a baixa velocidade de fluxo e/ou a interação do contaminante com a fase sólida. Esta concentração residual pode ser liberada após uma redução da taxa de bombeamento. A completa restauração pode ocorrer em áreas com características simples, levando a total restauração da qualidade da água subterrânea em partes do aquífero (EPA, 1996).

4.4.

Zona de captura

Para capturar a pluma de água contaminada é necessário utilizar um ou mais poços de bombeamento, localizados no menor gradiente da área fonte, com suas respectivas zonas de captura (áreas de contribuição de fluxo).

A zona de captura apresenta-se de diferentes maneiras, por exemplo: em um aquífero plano, sem fluxo local, a zona de captura é radialmente simétrica, centrada no poço e se estendendo para os limites do cone de depressão; se o aquífero tem uma inclinação e há fluxo de água, a zona de captura é assimétrica e tem maior extensão na direção ascendente. A forma da zona de captura é uma função de velocidade linear média da água subterrânea, da quantidade de água sendo bombeada, do gradiente hidráulico natural e da distribuição da condutividade hidráulica. A extensão, em condições de equilíbrio, da zona de captura depende do tempo em que o bombeamento ocorre, da condutividade e da taxa de bombeamento (Cohen, Mercer, Greenwald & Beljin, 1997).

4.4.1

Cálculo da zona de captura

Nos últimos anos, muitos modelos analíticos e numéricos foram desenvolvidos para calcular a zona de captura, a localização dos poços, as trajetórias de fluxo, a taxa de bombeamento e o tempo de extração. Muitos destes modelos

fazem suposições, como, por exemplo, considerar o aquífero isotrópico, confinado e o fluxo uniforme, que podem ser muito simplistas considerando as complexidades do aquífero, os dados disponíveis e as incertezas envolvidas. A escolha de mais de um modelo deve ser considerada e, com o monitoramento do projeto e da operação, o modelo sempre deve ser refinado (Cohen, Mercer, Greenwald & Beljin, 1997).

Um dos métodos para determinar o número, a localização e a vazão de poços de extração foi desenvolvido por Javandel e Tsang (1986). Este método produz curvas de zonas de captura para um único ou múltiplos poços, definindo o seu alcance de captura. Esta solução considera o aquífero ser confinado e ter uma espessura uniforme, B (m), e uma descarga regional específica uniforme (velocidade de Darcy), U (m/s). Também, é considerado que os poços de extração penetram em todo o aquífero e possuem uma vazão Q (m³/s). Não sendo estas condições satisfeitas, os resultados obtidos devem ser ajustados e, também, recomenda-se o uso de um modelo numérico.

Para um único poço de bombeamento localizado na origem, em um sistema de coordenadas cartesianas, a equação das linhas que separa a área a ser capturada pelo poço do resto fluxo de campo é

$$y = \pm \frac{Q}{2BU} - \frac{Q}{2\pi BU} \operatorname{tg}^{-1} \frac{y}{x} \quad (4.1)$$

A figura 4.5 mostra a solução da equação 4.1 para diferentes valores de Q/BU com as unidades em metros e segundos. Nesta, toda a água dentro de uma dada curva tipo fluirá para o poço localizado na origem (todas as trajetórias de fluxo terminam no poço).

Há uma máxima quantidade de água que pode ser bombeada de um único poço de extração. Então, o uso de múltiplos poços de extração pode ser necessário quando a pluma de contaminante é mais larga do que zona de captura criada pela máxima vazão de extração de um único poço. No uso de múltiplos poços, as zonas de captura devem se sobrepor ou a água contaminada que flui no aquífero pode passar entre eles.

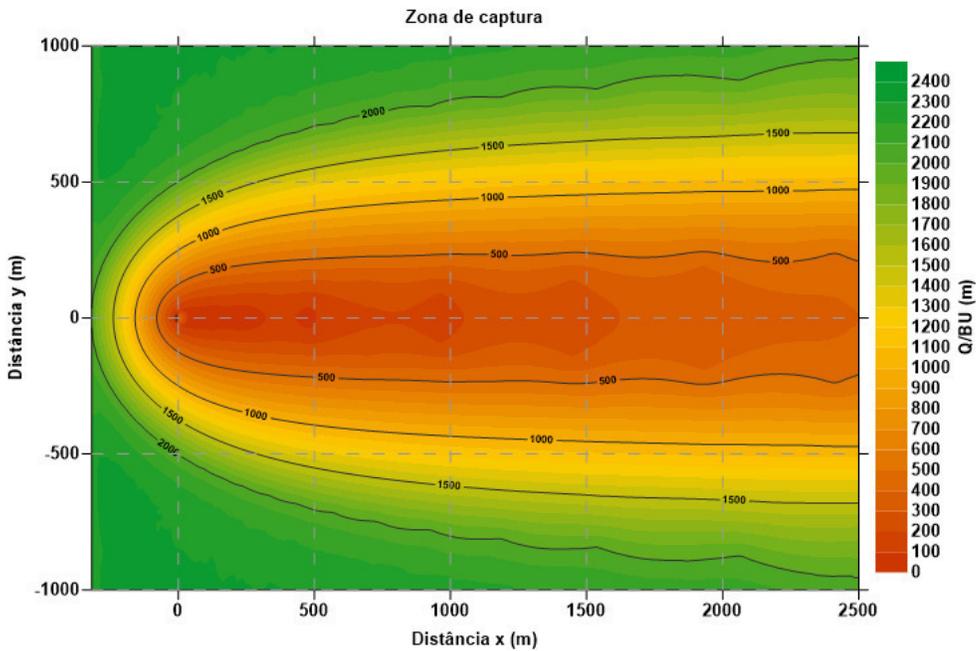


Figura 4.5 – Solução analítica para a zona de captura de um único poço.

Utilizando dois poços de extração, a distância máxima entre eles deve ser de $Q/\pi BU$. Em um aquífero confinado homogêneo, se a distância entre os dois poços, $2d$, é menor ou igual a $Q/\pi BU$, a zona de captura é definida como

$$y + \frac{Q}{2\pi BU} \left(tg^{-1} \frac{y-d}{x} + tg^{-1} \frac{y+d}{x} \right) = \pm \frac{Q}{BU} \quad (4.2)$$

Na necessidade do uso de três poços de extração, o poço central deve ser colocado na origem, no eixo x , e os outros dois devem ser separados deste em $+d$ e $-d$, ao longo do eixo y . Neste caso o espaçamento ótimo do poço é $1,26Q/\pi BU$ e o contorno da zona de captura é dado por

$$y + \frac{Q}{2\pi BU} \left(tg^{-1} \frac{y}{x} + tg^{-1} \frac{y-d}{x} + tg^{-1} \frac{y+d}{x} \right) = \pm \frac{3}{2} \frac{Q}{BU} \quad (4.3)$$

Sendo preciso utilizar quatro poços, o espaçamento ótimo do poço é definido aproximadamente por $1,20Q/\pi BU$.

4.5.

Sistema de extração e injeção

De acordo com a quantidade de água possível de ser retirada do aquífero, a remediação da água subterrânea é realizada por um sistema de extração-tratamento-injeção. Neste caso, a situação ótima é de minimizar a quantidade de água a ser retirada do aquífero, porque toda esta deverá ser tratada.

Satkin & Bedient (1988) fizeram várias simulações numéricas considerando diferentes combinações gradientes hidráulicos, condutividades, dispersividade longitudinal, configurações de poços de extração com ou sem a utilização em conjunto de poços de injeção e apresentaram sistemas alternativos para a limpeza eficiente de uma área contaminada, com tempo reduzido e retirando a menor quantidade de água possível (figura 4.6). As suas principais conclusões são: (1) se um único poço de extração é utilizado, este deve ser locado de tal forma que a sua zona de captura envolva a pluma; (2) o posicionamento de um poço o mais próximo possível do centro de massa do soluto, pode resultar em remoção mais rápida do contaminante; (3) se um único poço de extração pode capturar a pluma de soluto, então múltiplos poços alinhados ao longo do eixo da pluma aumentam a taxa de limpeza pela extração de um volume maior de água; (4) o uso de três poços, de célula dupla ou esquemas duplicados de poços são efetivos quando o gradiente hidráulico é baixo mas requerem injeção; (5) o uso de cinco poços apresenta-se relativamente ineficiente e; (6) não encontraram configurações de poços que pudessem ser eficientes com para limpar uma pluma contaminante em aquífero com alto gradiente, alta dispersividade e baixo limite de queda de carga hidráulica.

A extração de um grande volume de água sem poços de injeção pode ser um problema se não houver um corpo de água para receber a água tratada do aquífero. A utilização de poços de injeção em combinação com poços de extração reduz o tempo de limpeza pois um aumento do gradiente hidráulico pode ser criado e este produz mais fluxo de água em direção ao poço de extração. Este sistema de diminuição e aumento do gradiente hidráulico com o uso em conjunto de um poço de extração e um de injeção cria uma célula de circulação que isola a pluma. Outras combinações de dois ou mais poços de extração e injeção podem ser exploradas

quando a água tratada é disposta por injeção, porém poços de injeção são propensos a entupir e necessitam de manutenção periódica.

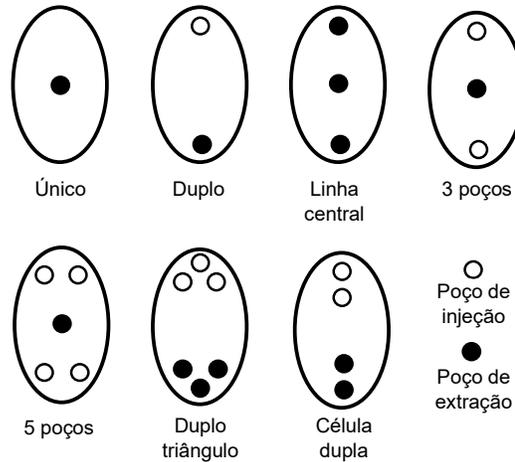


Figura 4.6 – Possíveis esquemas de poços de extração e extração-injeção, Satkin & Bedient (1988).

O sistema de bombeamento e tratamento com injeção para remediação de água subterrânea envolve a otimização da locação dos poços, das suas profundidades e das taxas de extração/injeção visando manter uma varredura hidráulica efetiva através da zona de contaminação, minimizar as zonas de estagnação, aumentar a extração de contaminante e conter a água contaminada. Exemplos de zonas de captura envolvendo sistemas de extração e injeção em diferentes situações de fluxo são apresentadas na figura 4.7 (Cohen, Mercer, Greenwald & Beljin, 1997).

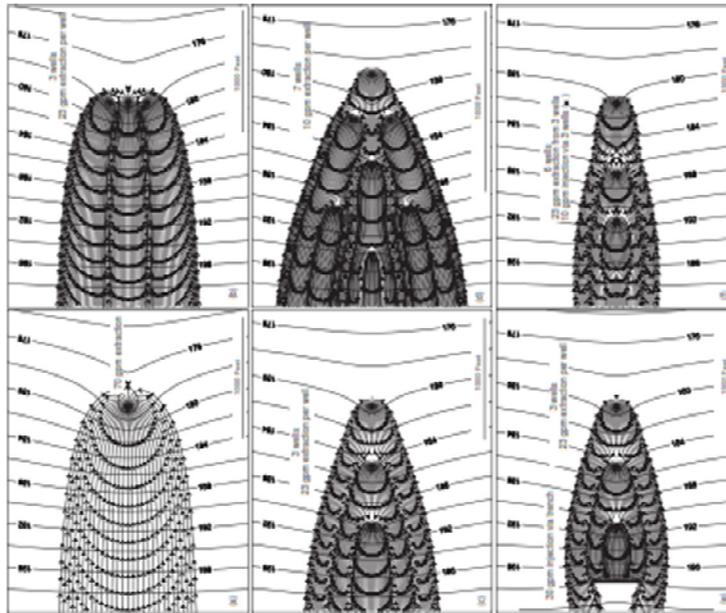


Figura 4.7 – Carga hidráulica e zonas de captura simulados para diferentes esquemas de extração e injeção em um aquífero uniforme (Cohen, Mercer, Greenwald & Beljin, 1997).

4.6.

Bombeamento em pulsos

O bombeamento em pulsos, com alternados períodos de bombeamento e repouso, é sugerido como uma abordagem para poços em linha, para liberar zonas de estagnação com ciclos seletivos e para aumentar a eficiência da técnica de extração e tratamento. As concentrações de contaminante dissolvido aumentam devido a difusão e dissolução no movimento lento da água subterrânea durante a fase de repouso do bombeamento em pulso. Quando o bombeamento de extração é reinicializado, a água com maiores concentrações é removida, assim há um aumento da taxa de remoção de massa durante o bombeamento ativo e uma diminuição progressivas das concentrações até o início da próxima fase de repouso. Durante o bombeamento contínuo as concentrações de contaminante diminuem, devido a transferência lenta de massa no fluxo da água do aquífero (Cohen, Mercer, Greenwald & Beljin, 1997).

Estudos numéricos realizados para avaliar a efetividade da operação de bombeamento em pulso, para determinadas condições, podem definir para qual volume de água subterrânea extraído e tamanho do tempo de repouso, o bombeamento em pulso remove mais massa de contaminante do que o bombeamento contínuo em um mesmo período de tempo. Também, tem-se que se o bombeamento em pulso e o contínuo operam com a mesma vazão, o primeiro levará mais tempo para alcançar os níveis objetivo de concentração, mas necessitará de menos tempo de operação de bombeamento. Em muitas situações, é preferível bombear continuamente em uma vazão média mais baixa do que iniciar o bombeamento em pulso, porém a economia associada a menos tempo de operação da bomba pode tornar a extração em pulso mais vantajosa, Cohen, Mercer, Greenwald & Beljin (1997).

5

Simulações

A seguir serão apresentados cinco exemplos de modelagem de formação de zona de captura de plumas de poluentes em aquífero confinado afim de avaliar a formação de zonas de captura formadas por alguns esquemas de poços apresentados na literatura revisada. Os exemplos escolhidos são os seguintes:

a) Zona de captura de um único poço em aquífero homogêneo

Esta simulação apresenta a formação de zona de captura por um único poço de extração. Neste exemplo, a condutividade hidráulica da formação isotrópica de $25 \times 10^4 \text{m/a}$ (684,93m/d; 0,8cm/s) foi escolhida de forma aleatória, não refletindo nenhum caso real.

b) Poço de extração com bombeamento contínuo em aquífero heterogêneo

Neste exemplo, o aquífero heterogêneo foi representado por duas condutividades hidráulicas: $25 \times 10^4 \text{m/a}$ (684,93m/d; 0,8cm/s) e $200 \times 10^4 \text{m/a}$ (5479,45m/d). Esta segunda condutividade hidráulica, oito vezes maior do que a anterior, foi escolhida com o objetivo de gerar um grande contraste no campo de velocidade de fluxo do aquífero heterogêneo simulado. Ambas as condutividades hidráulicas foram escolhidas de forma aleatória, não refletindo nenhum caso real.

c) Quatro poços em linha com extração continua em aquífero heterogêneo

Como no caso anterior, as condutividades hidráulicas escolhidas para representar aquífero heterogêneo foram $25 \times 10^4 \text{m/a}$ (684,93m/d; 0,8cm/s) e $200 \times 10^4 \text{m/a}$ (5479,45m/d). Os valores de condutividade hidráulica escolhidos não representam nenhum caso real.

d) Três poços em formação triangular em um aquífero homogêneo

Esta simulação, considerando um aquífero homogêneo com condutividade de $25 \times 10^4 \text{m/a}$ (684,93m/d; 0,8cm/s), avalia o posicionamento de três poços em formação triangular e a melhor vazão de extração para cada um destes poços objetivando a melhor formação de zona de captura.

e) Formação de zona de captura com poços de extração e injeção formando uma e duas células em aquífero heterogêneo

Simulação em aquífero heterogêneo, com as mesmas condutividades hidráulicas anteriores, $25 \times 10^4 \text{m/a}$ (684,93m/d; 0,8cm/s) e $200 \times 10^4 \text{m/a}$ (5479,45m/d), mas com uma formação geometria diferente objetivando ressaltar os contrastes entre os campos de velocidades fornecidos pelas duas condutividades.

Em todas as simulações realizadas, os poços de extração só entraram em funcionamento a partir do oitavo dia de simulação de fluxo do aquífero, quando não se observou nenhuma alteração no campo de velocidade de fluxo, considerando, assim, o campo de velocidade constante.

5.1.

Zona de captura de um único poço em aquífero homogêneo

A modelagem de captura de uma pluma contaminante em um aquífero por um poço de extração foi realizada sendo o aquífero confinado homogêneo e com condutividade isotrópica de $25 \times 10^4 \text{ m/a}$ ($684,93 \text{ m/d}$; $0,8 \text{ cm/s}$), gradiente hidráulico de $0,006667 \text{ m/m}$, espessura de 1 m .

A simulação bidimensional usou uma malha, figura 5.1, de 150 m por 60 m , considerando a espessura do aquífero de 1 m , com elementos finitos de 1×1 , totalizando uma malha com 9000 elementos quadrados de 8 nós (27421 nós totais) e o incremento de tempo de 1 dia ($0,0027 \text{ ano}$).

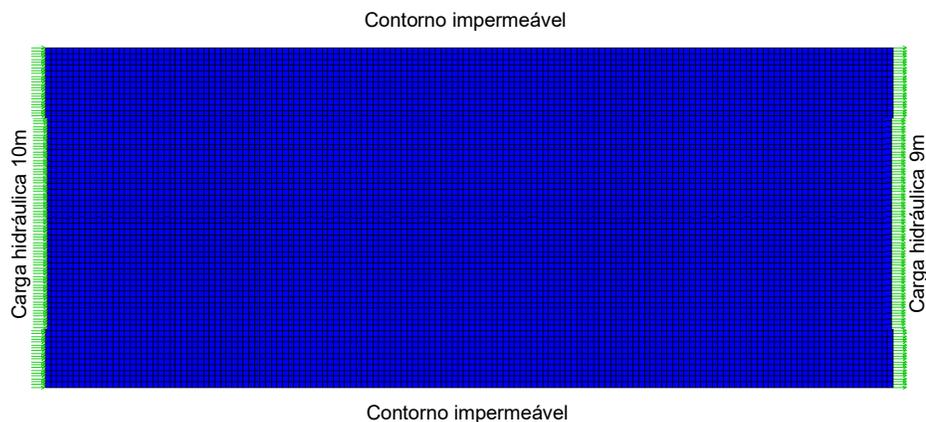


Figura 5.1 – Malha de elementos finitos quadrilaterais de 8 nós e condições de contorno.

O fluxo contínuo ocorre da esquerda para a direita, considerando impermeável o contorno superior e inferior da malha, como mostram as cargas na figura 5.2, a uma velocidade constante de $0,1667 \times 10^4 \text{ m/a}$ ($45,66 \text{ m/d}$).

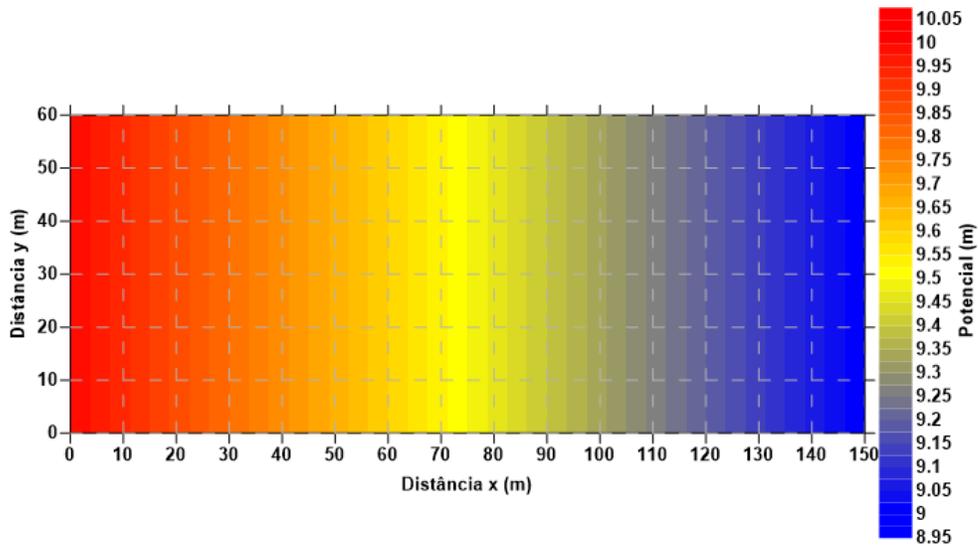


Figura 5.2 – Distribuição das cargas hidráulicas ao longo do aquífero.

A figura 5.3 apresenta as curvas tipo de zona de captura, obtidas a partir da equação 4.1, para definir a curva tipo de zona de captura para uma dada pluma de contaminante.

Definindo como objetivo capturar uma pluma na envoltória Q/BU de 15m, é obtida a vazão de extração contínua de $2,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ($685 \text{ m}^3/\text{d}$), com o poço posicionado em $x = 96\text{m}$ (figura 5.2).

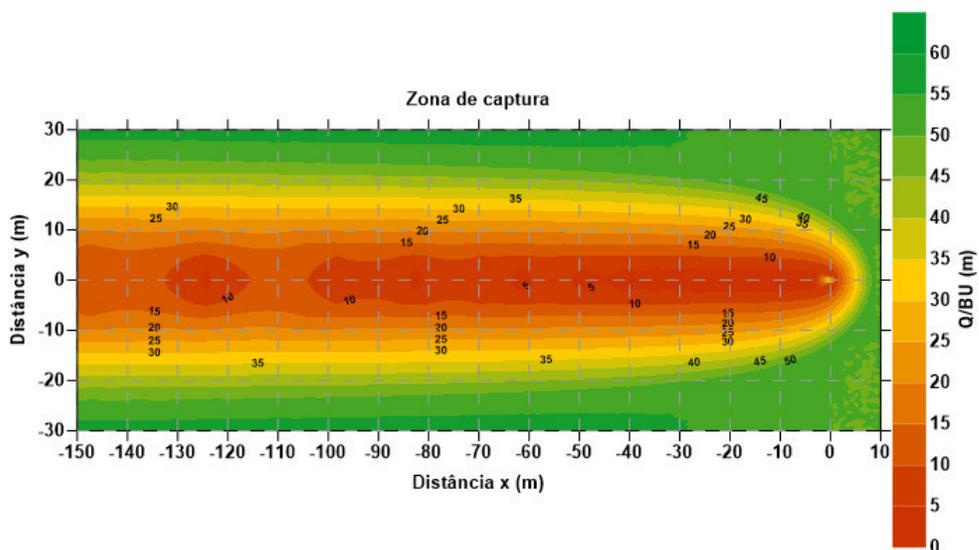


Figura 5.3 – Curvas tipo de captura para definir a relação de captura da pluma de soluto.

Posicionado o poço em $(x; y) = (96; 30)m$ e isolando seus efeitos, considerando o aquífero sem fluxo, a figura 5.4 apresenta a distribuição das cargas potenciais e seu perfil ($y = 30m$) no aquífero para o poço em operação. Observa-se a influência do poço no campo de cargas hidráulicas.

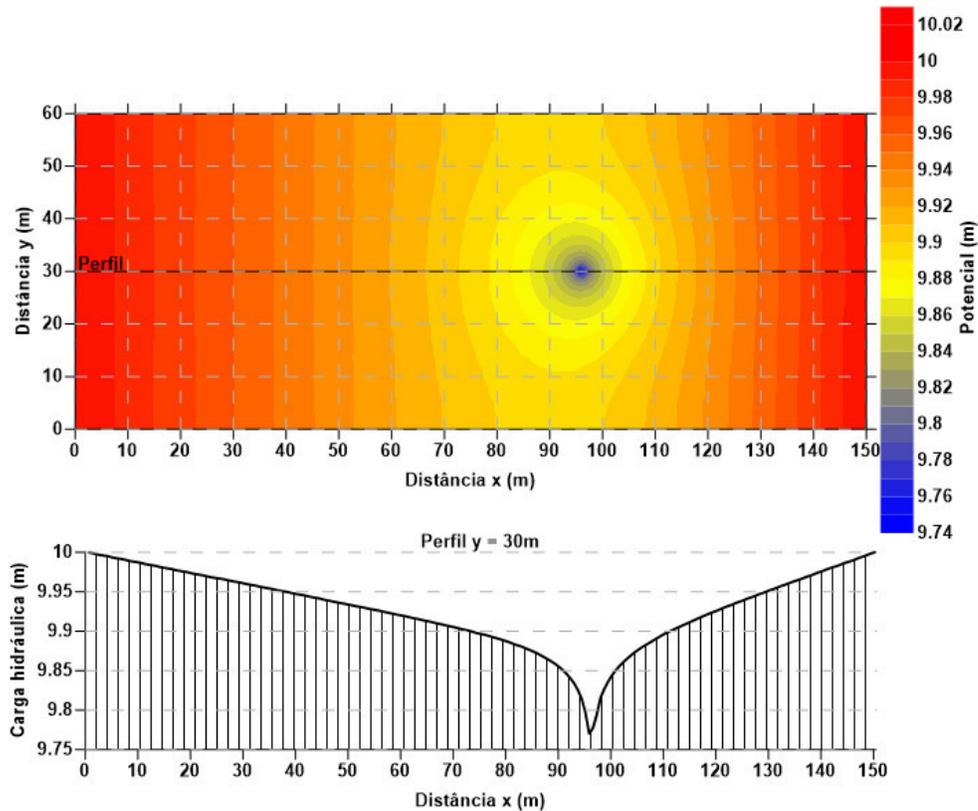


Figura 5.4 – Carga hidráulica no aquífero, unicamente com o efeito do poço.

Na figura 5.5, que mostra o campo e os vetores de velocidade de fluxo devido unicamente a ação do poço, nota-se os vetores de fluxo convergindo para o poço e a perturbação do campo de velocidade devido ao poço.

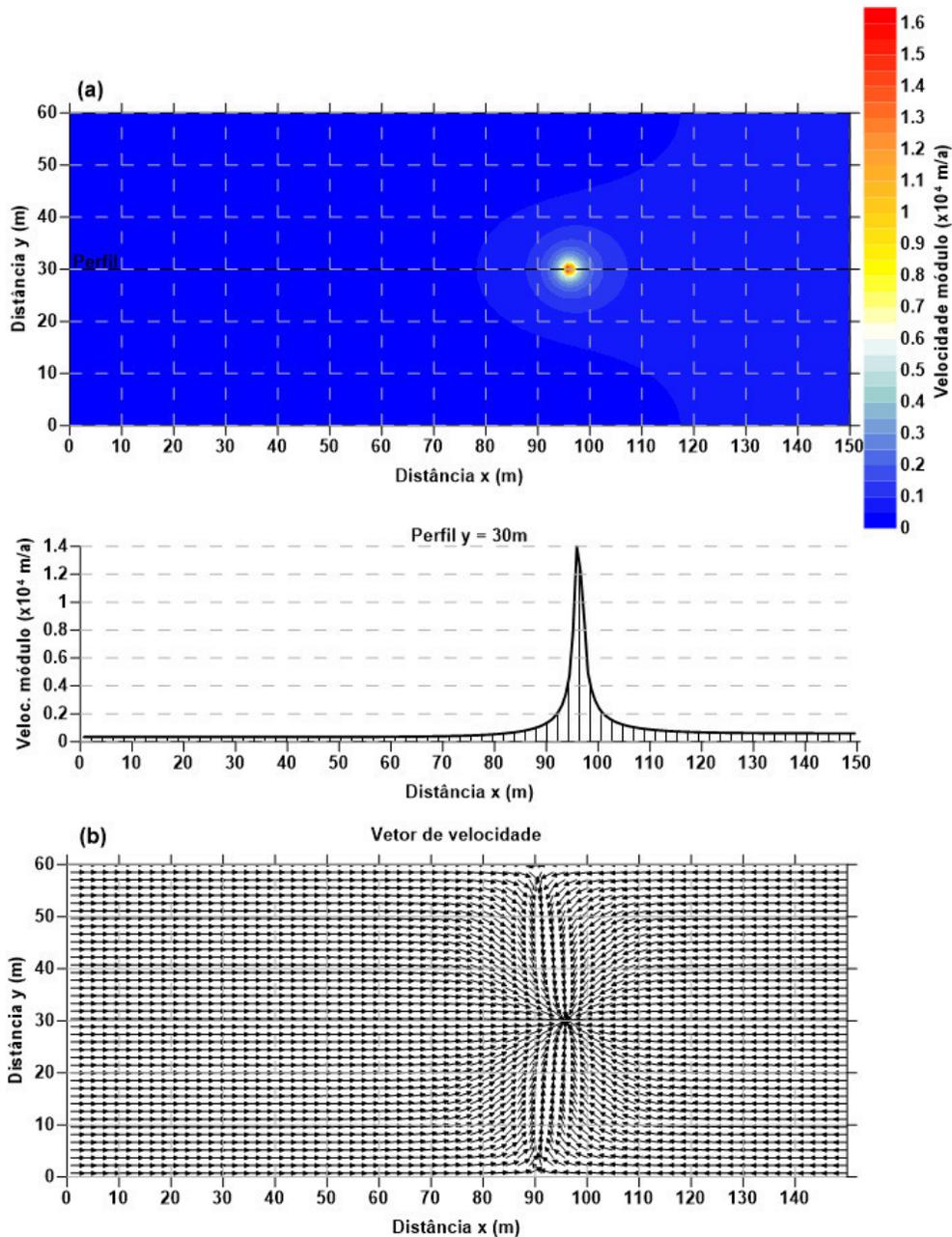


Figura 5.5 – Módulo e perfil ($y = 30\text{m}$), em (a), e vetor, em (b), da velocidade de fluxo devido ao poço.

A distribuição e perfil de carga potencial e o módulo da velocidade no aquífero para os efeitos unidos do fluxo contínuo do aquífero e do poço de extração em operação são apresentados nas figuras 5.6 e 5.7, respectivamente. Nota-se a formação de uma zona de estagnação de velocidade imediatamente a jusante do poço. A figura 5.8 apresenta os vetores de velocidade de fluxo resultante. Nesta há

um conjunto de vetores de fluxo convergindo para o poço, formação da zona de captura, e outro seguindo para a extremidade direita da malha.

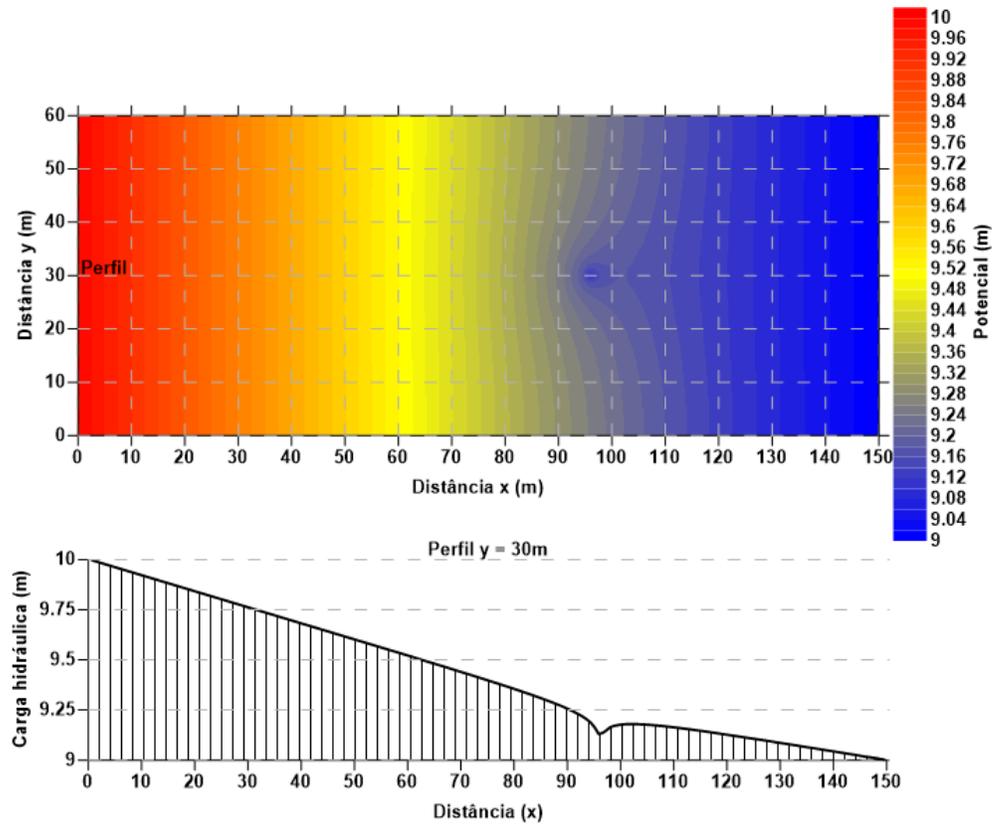


Figura 5.6 – Carga potencial no aquífero com um poço de extração.

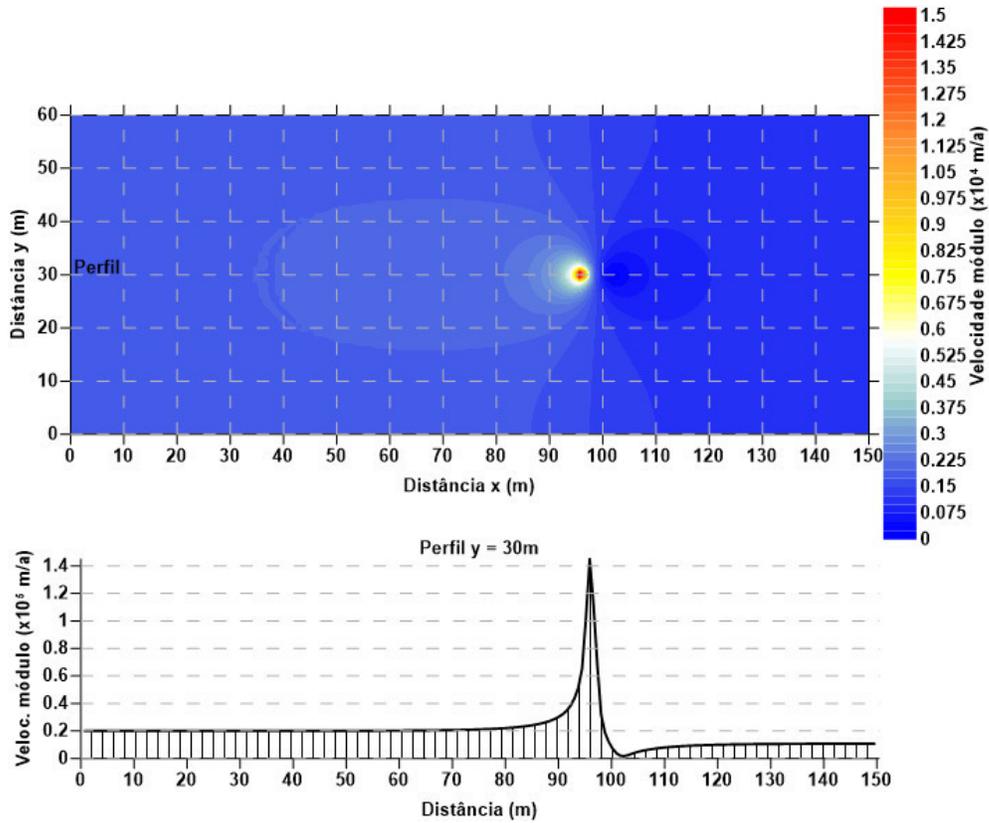


Figura 5.7 – Velocidade de fluxo total com um poço de extração.

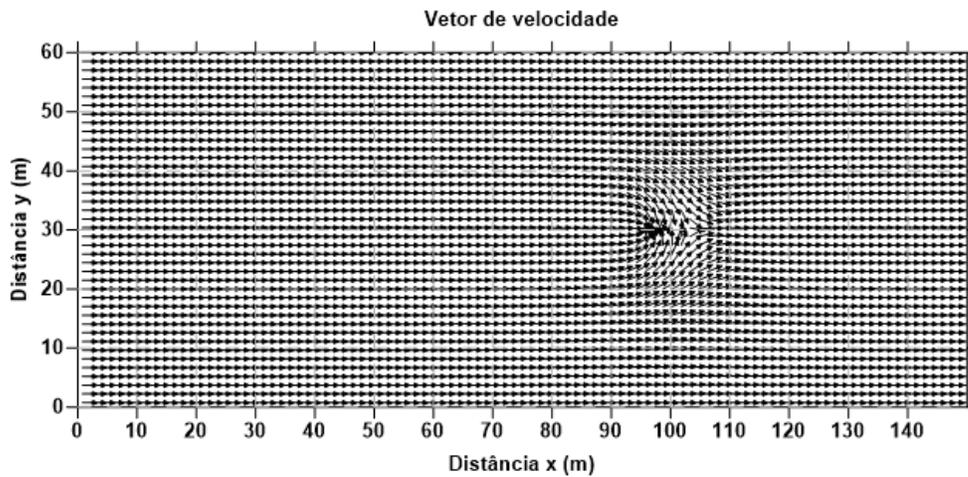


Figura 5.8 – Vetores de velocidade de fluxo do aquífero e do poço.

5.2.

Poço de extração com bombeamento contínuo em aquífero heterogêneo

Sendo um aquífero heterogêneo (figura 5.9), de geometria e gradiente hidráulico iguais aos do item anterior, composto de dois materiais diferentes: o material (1), com propriedades iguais às daquelas do item 5.1, e; o material (2), que difere do material (1) por sua condutividade de $200 \times 10^4 \text{ m/a}$ ($5479,45 \text{ m/d}$), oito vezes maior do que a do material (1).

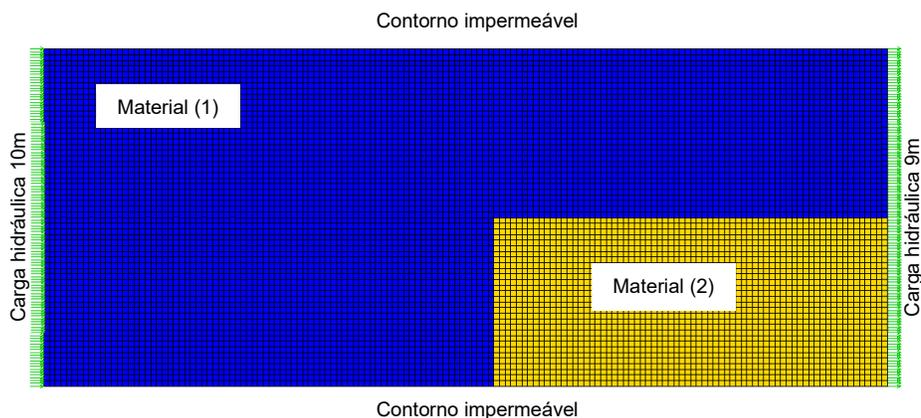


Figura 5.9 – Malha de elementos finitos para o aquífero heterogêneo.

A simulação numérica bidimensional usou a mesma malha do item 5.1, sendo que o material (2) tem 70m de comprimento por 30 de largura.

Também neste caso, o fluxo contínuo ocorre da esquerda para a direita, como mostram as cargas hidráulicas na figura 5.10. Diferente do aquífero do item anterior que tinha velocidade de fluxo constante e igual a $0,1667 \times 10^4 \text{ m/a}$, neste a velocidade de fluxo, figura 5.11, não é uniforme, varia e tem os seus maiores valores no material (2). Os vetores de velocidade de fluxo apontam um caminho preferencial do fluxo para o material (2), onde a condutividade hidráulica é maior, como ilustra a figura 5.11. A variação do módulo da velocidade de fluxo é mostrada na figura 5.12, a velocidade média é de $0,2551 \times 10^4 \text{ m/a}$, cerca de 65% maior que no caso anterior.

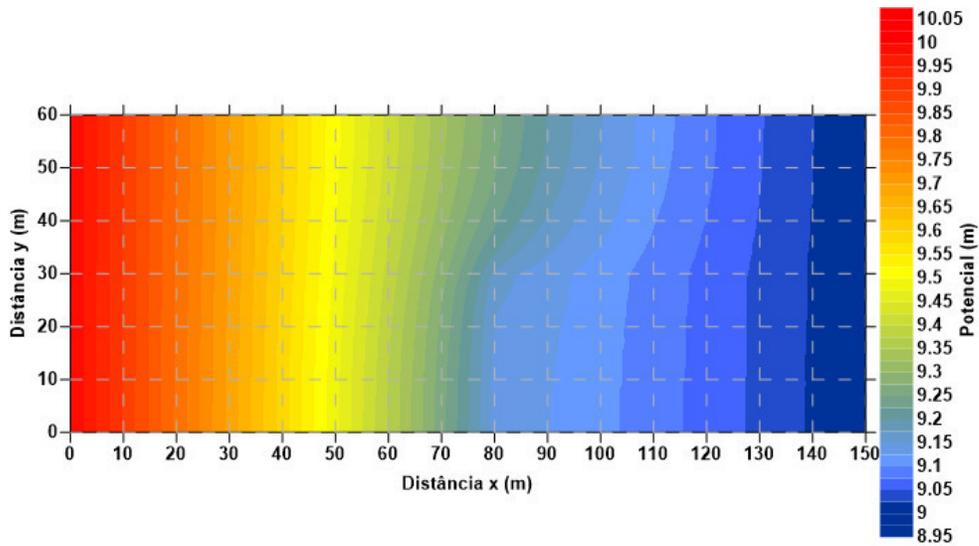


Figura 5.10 – Campo de cargas hidráulicas do aquífero heterogêneo.

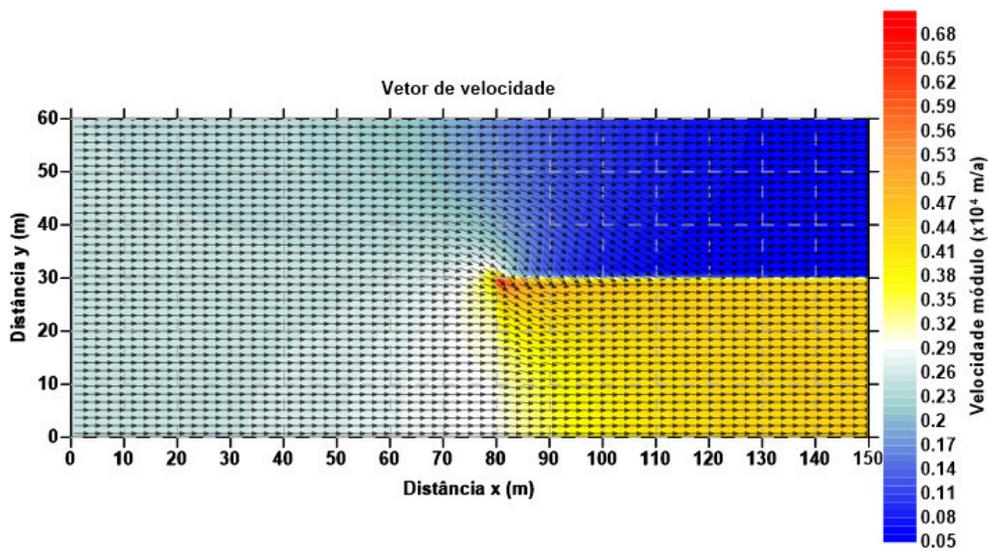


Figura 5.11 – Módulo e vetores de velocidade de fluxo no aquífero heterogêneo.

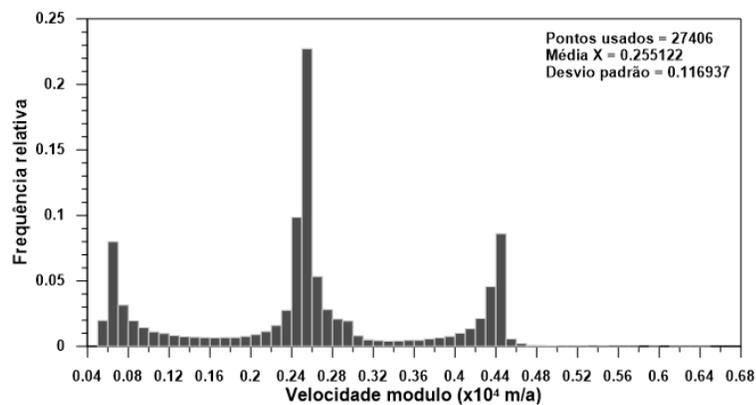


Figura 5.12 – Distribuição da velocidade de fluxo de todo o aquífero simulado.

Foi posicionado um poço em $(x; y) = (92; 24)m$, na região de maior condutividade do aquífero. As vazões de bombeamento contínuo de $2,5 \times 10^4 m^3/a$ e $3,8 \times 10^4 m^3/a$ resultam em sua locação a carga hidráulica de 9,06m e 9,032m, respectivamente. A figura 5.13 (a) e (b) apresentam a distribuição de cargas potenciais hidráulicas para estas duas vazões de poço.

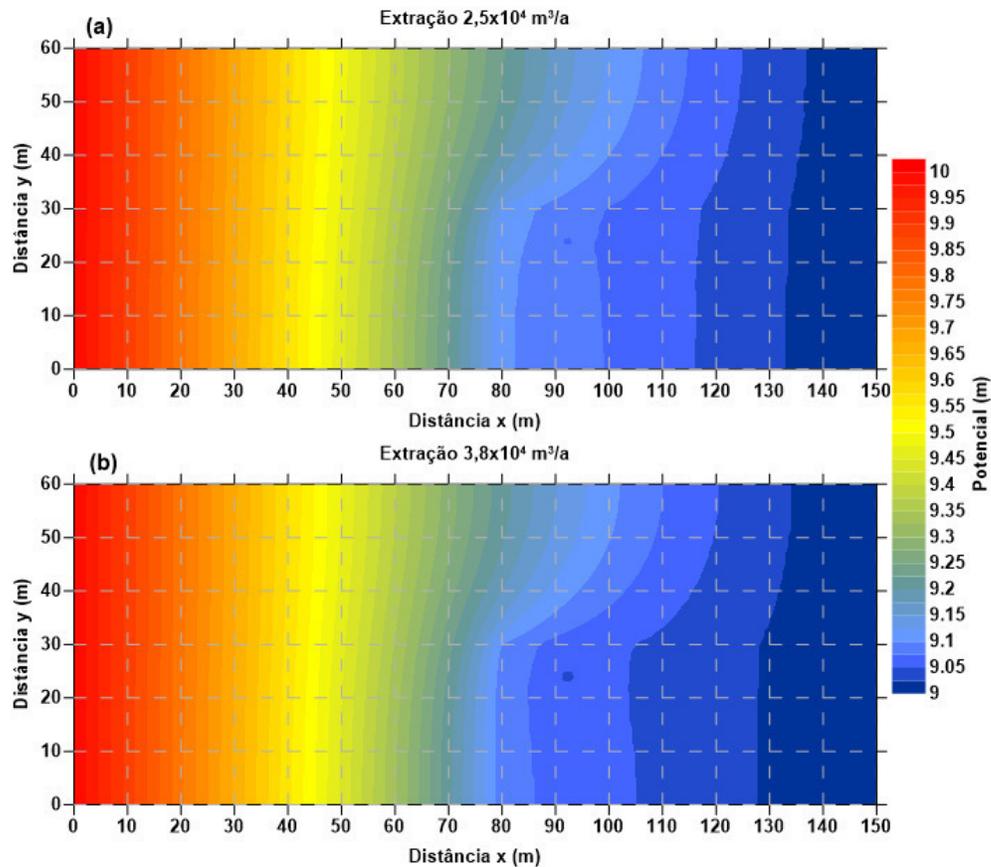


Figura 5.13 – Carga hidráulica no aquífero heterogêneo: bombeamento de $2,5 \times 10^4 m^3/a$, em (a), e de $3,8 \times 10^4 m^3/a$, em (b).

O módulo da velocidade de fluxo no aquífero com o poço de extração com a vazão de $2,5 \times 10^4 m^3/a$ e $3,8 \times 10^4 m^3/a$ é mostrado na figura 5.14(a) e (b), respectivamente. Verifica-se a formação de um campo de fluxo preferencial entre a aresta de transição dos dois materiais que compõem o aquífero e a posição do poço, sendo este mais forte com a maior vazão de bombeamento. Observa-se, também, a formação de zona de estagnação imediatamente após o poço.

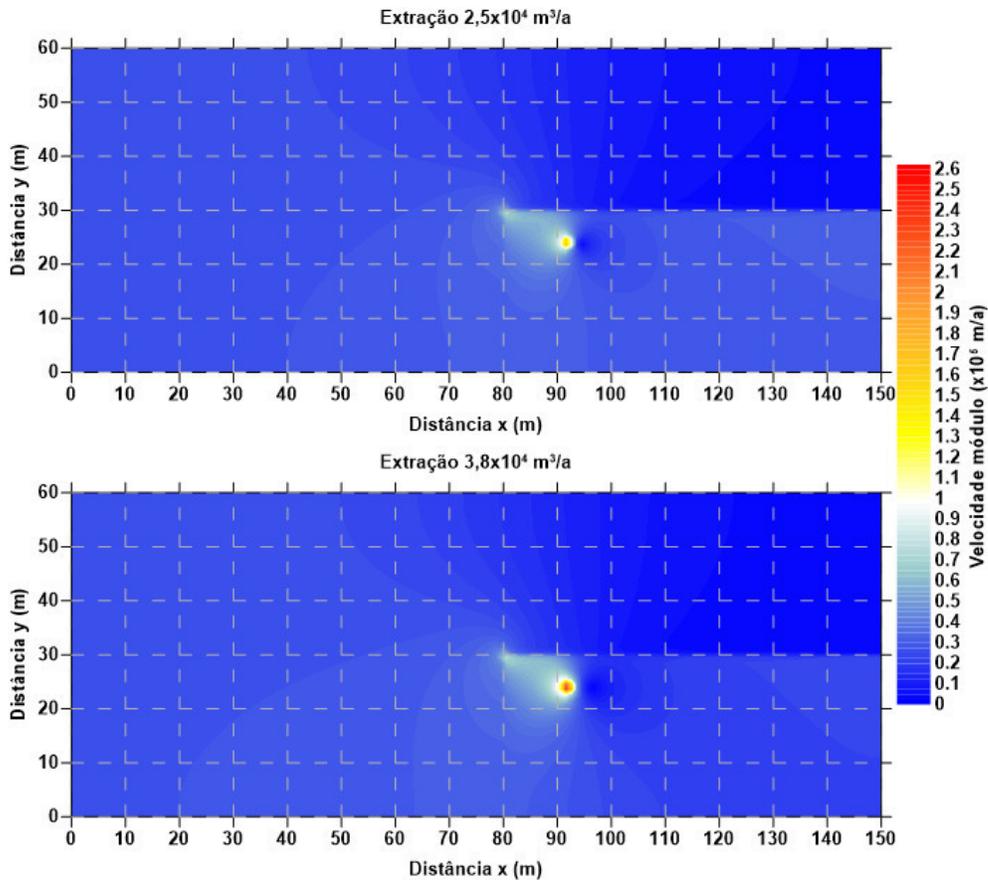


Figura 5.14 – Módulo da velocidade no aquífero heterogêneo para a extração de $2,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, em (a), e $3,8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, em (b).

As figuras 5.15 apresenta os vetores de velocidade de fluxo no aquífero para o poço de extração com vazão de $2,5 \text{ m}^3/\text{a}$ e $3,8 \text{ m}^3/\text{a}$, mostrando a formação da zona de captura do poço com ambas as vazões. Nota-se que o bombeamento de $3,8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ apresenta uma maior convergência de vetores para a posição do poço do que a extração com $2,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$. Há uma maior quantidade de água fluindo para o poço com maior vazão de extração, fornecendo-lhe uma zona de captura mais eficiente.

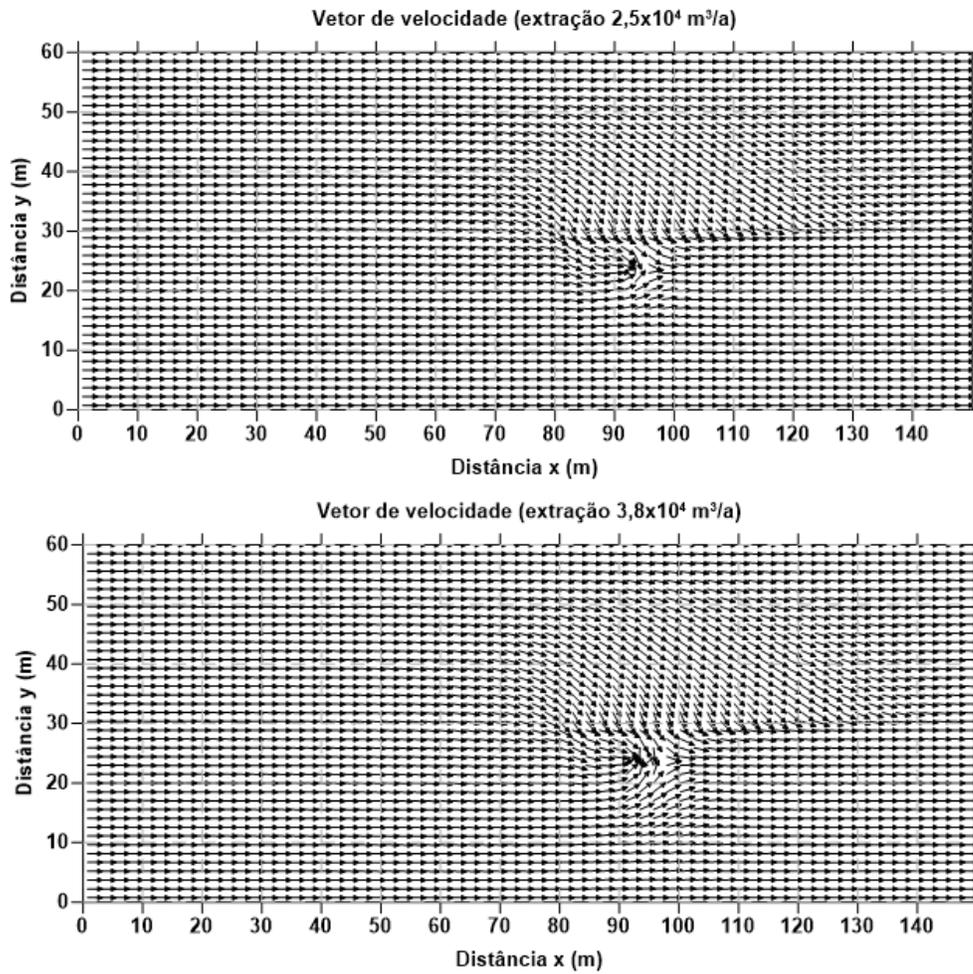


Figura 5.15 – Vetores de velocidade de fluxo do aquífero heterogêneo para o bombeamento de $2,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, em (a), e de $3,8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, em (b).

5.3.

Quatro poços em linha com extração contínua em aquífero heterogêneo

A modelagem de zona de captura por poços de extração posicionados em linha foi realizada considerando o aquífero confinado, com gradiente hidráulico de $0,006667\text{m/m}$, espessura de 1m , formado de dois materiais diferentes: o material (1), com propriedades iguais àquelas do item 5.1 e; o material (2), que difere do material (1) por sua condutividade de $200 \times 10^4\text{m/a}$ ($5479,45\text{m/d}$).

A figura 5.16 apresenta a malha (150m×60m) utilizada, tendo o aquífero 1m de espessura, com elementos finitos de 1×1 , totalizando com 9000 elementos quadrados de 8 nós (27421 nós totais). Também, o incremento de tempo utilizado foi de 1dia ($0,0027\text{ano}$).

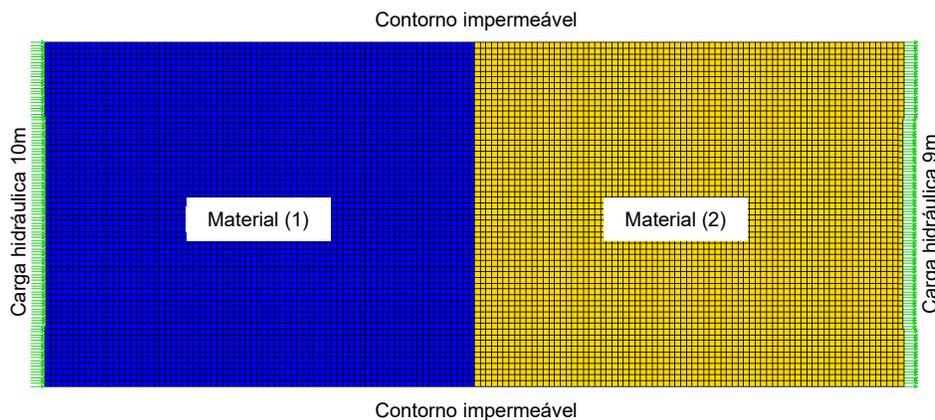


Figura 5.16 – Malha de elementos finitos para o aquífero da simulação 5.3 e as condições de contorno.

O fluxo contínuo ocorre da esquerda para a direita e com velocidade média de $0,2963 \times 10^4\text{m/a}$ ($81,2\text{m/d}$). O campo de carga potencial é apresentado na figura 5.17.

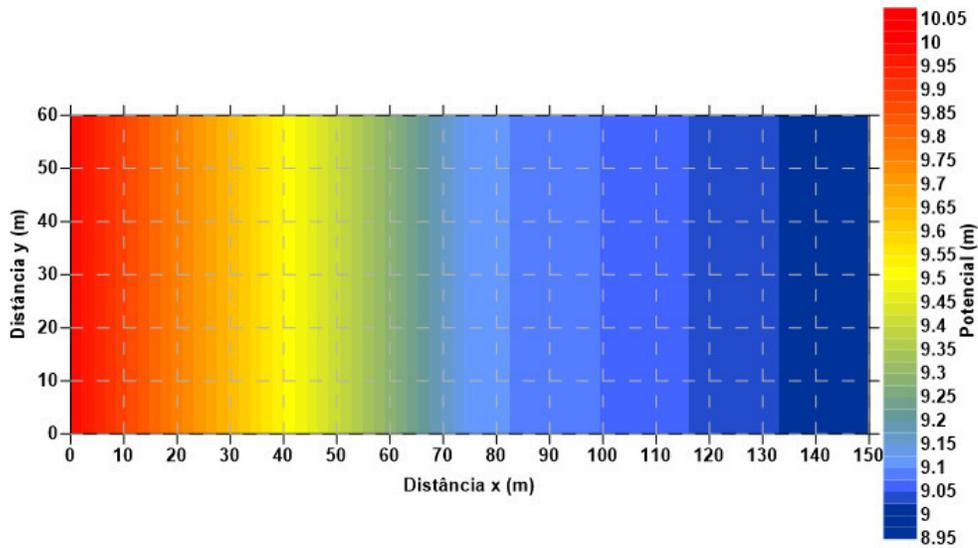


Figura 5.17 – Campo de cargas hidráulicas do aquífero heterogêneo da simulação 5.3.

Apesar do aquífero ser composto de dois materiais diferentes e de esta modelagem tratar de utilizar poços em linha, no caso quatro, foram utilizadas as curvas tipo de zona de captura para um poço, definidas pela equação 4.1 e mostradas na figura 5.3, para definir a relação Q/BU característica, como referência para a modelagem. No caso, foi utilizada a envoltória Q/BU de 15m. Os quatro poços de extração e suas coordenadas x e y de localização são: P1 (118; 30), P2 (80; 30), P3 (90; 30) e P4 (100; 30). Com a velocidade de percolação de $0,2963 \times 10^4 \text{ m/a}$ e a envoltória de 15m, a vazão máxima é de $4,4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$.

A figura 5.18 apresenta o campo de potencial para a simulação dos quatro poços trabalhando em conjunto e com as vazões contínuas de $1,4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, no poço P2, e $1,0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, nos poços P1, P3 e P4.

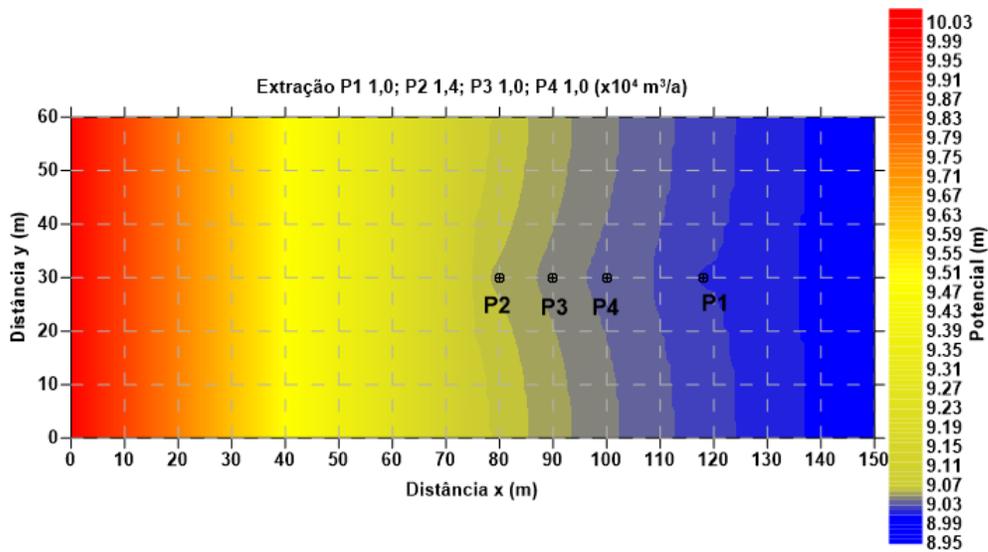


Figura 5.18 – Distribuição das cargas hidráulicas no aquífero com os quatro poços ativos em linha. Da esquerda para a direita: P2, P3, P4 e P1.

As figuras 5.19 e 5.20 ilustram o módulo da velocidade de fluxo e a sobreposição deste com os vetores de velocidade de fluxo, respectivamente, para o aquífero com os poços em bombeamento contínuo. Observa-se que o campo de velocidade de fluxo do poço P3 tem alguma interferência sobre a zona de estagnação do P2, e vice-versa, e que o mesmo ocorre com o P4 em relação ao P3. A interferência do fluxo do P1 sobre a zona de P4 é menor, devido a maior distância entre esses dois.

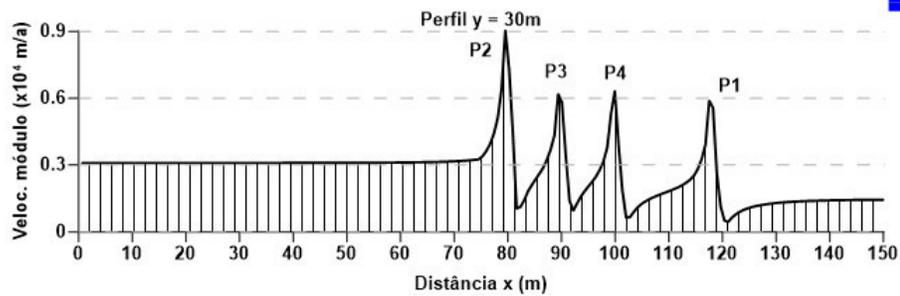
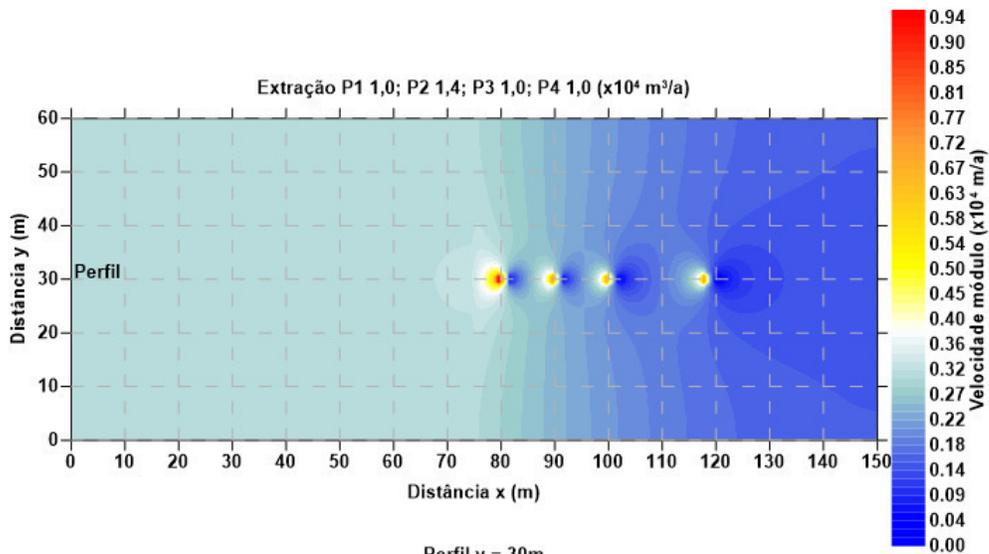


Figura 5.19 – Módulo da velocidade no aquífero com 4 poços ativos em linha.

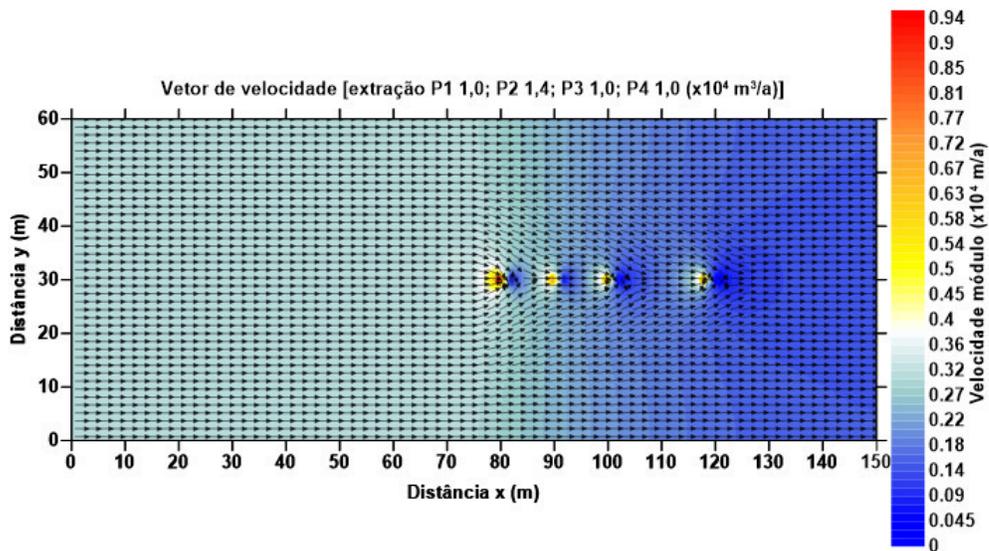


Figura 5.20 – Sobreposição dos vetores de velocidade de fluxo no campo de distribuição do módulo da velocidade de fluxo do aquífero com 4 poços ativos em linha.

5.4.

Três poços em formação triangular em um aquífero homogêneo

Para a modelagem da formação da zona de captura por três poços dispostos em formação triangular, como na simulação 5.1, foi considerado um aquífero confinado homogêneo e com condutividade isotrópica de $25 \times 10^4 \text{m/a}$ ($684,931 \text{m/d}$), gradiente hidráulico de $0,006667 \text{m/m}$. Para esta simulação, também foi utilizada a malha bidimensional de elementos finitos e as condições de contorno apresentados na figura 5.1 e o incremento de tempo de 1 dia ($0,0027 \text{ano}$).

Os três poços foram posicionados de maneira a formar um triângulo. Como mostra a figura 5.21: (1) os poços $P1$, $P2$ e $P3$ são representados por pontos nas cores vermelha, verde e azul, respectivamente; (2) poços $P2$ e $P3$ são separados pela distância $2 \cdot f$ e são equidistantes em relação ao poço $P1$; (3) o poço $P1$ é distante d do centro da linha perpendicular que separa os poços $P2$ e $P3$.

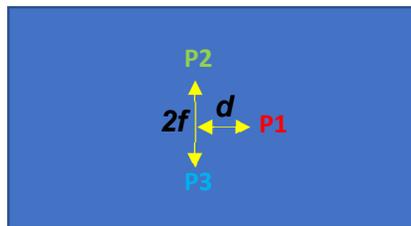


Figura 5.21 – Os 3 poços em formação triangular.

Como para a simulação 5.1 foi calculada uma vazão extração de $2,5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ para um único poço na posição do poço $P1$, esta foi considerada para ser distribuída entre os três poços desta simulação.

Inicialmente, foram realizadas quatro simulações considerando os três poços com bombeamento contínuo e com vazões de $1,5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$, $0,5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ e $0,5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ para o poço $P1$, $P2$ e $P3$, respectivamente. Estas simulações foram feitas considerando diferentes distâncias entre os poços, como apresentado na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características geométricas das simulações 6.5.1 a 6.5.4.

Simulação	d (m)	f (m)	P1 (x, y)	P2 (x, y)	P3 (x, y)
6.5.1	2	4	(96, 30)	(94, 32)	(94, 28)
6.5.2	4	8	(96, 30)	(92, 34)	(92, 26)
6.5.3	6	10	(96, 30)	(90, 35)	(90, 25)
6.5.4	8	10	(96, 30)	(88, 35)	(88, 25)

A figura 5.22 mostra o módulo da velocidade de fluxo para a simulação 6.5.1, 6.5.2, 6.5.3 e 6.5.4. Do campo de velocidade da simulação 6.5.1, tem-se que os três poços trabalham de forma integrada, como se fossem um, e que não há formação de zona de estagnação a jusante dos poços $P2$ e $P3$, devido à proximidade destes com o poço $P1$. Na simulação 6.5.2, o campo de velocidade formado entre os poços $P2$ e $P3$ há o início de formação de zona de estagnação formada a jusante deste dois poços. Nas simulações 6.5.3 e 6.5.4, o maior afastamento entre os poços $P2$ e $P3$ confirma a formação de zona de estagnação destes dois poços. No caso da simulação 6.5.4, o maior afastamento torna mais fraca a sua configuração, permite uma menor influência do poço $P1$ sobre as zonas de estagnação dos poços $P2$ e $P3$, o que deve ocasionar em menor recuperação do soluto poluente.

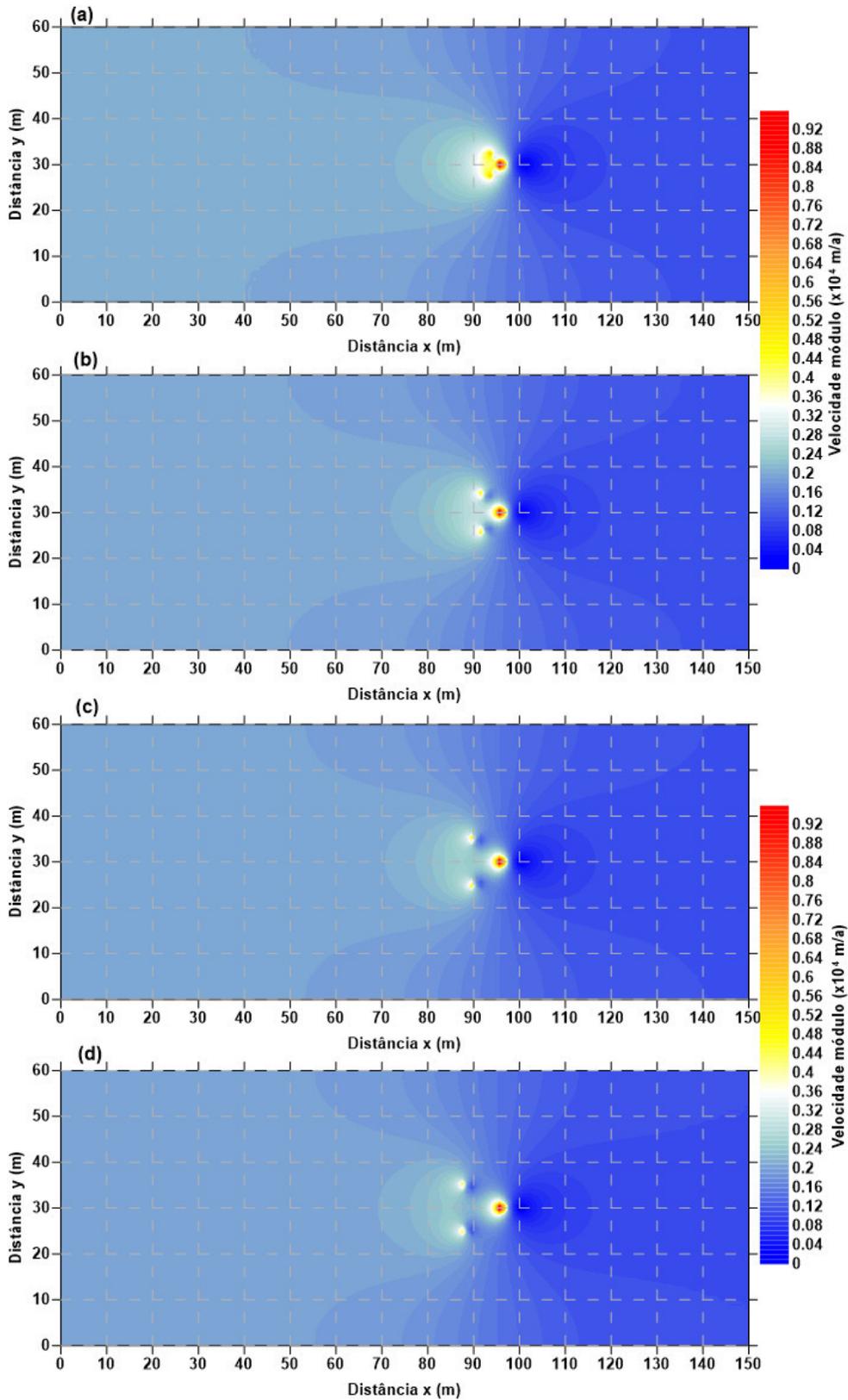


Figura 5.22 – Módulo de velocidade de fluxo para a simulação 6.5.1, 6.5.2, 6.5.3 e 6.5.4, em (a), (b), (c) e (d), respectivamente.

Considerando a configuração da simulação 6.5.1 e aplicando vazões de bombeio iguais nos três poços de $0,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ (simulação 6.5.1.a) e $0,833 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ (simulação 6.5.1.b), obtêm-se os campos de velocidade ilustrados nas figuras 5.23 e 5.24, respectivamente. Nota-se que com iguais vazões nos três poços, há uma tendência de formar uma zona de estagnação a jusante de *P2* e *P3* e esta passa a agir de forma negativa sobre *P1*, reduzindo a magnitude do campo de velocidade de fluxo em relação aos outros dois poços. Esta influência negativa sobre *P1* é maior na simulação com maior vazão, isto é, $0,833 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$. Também, com a maior vazão em *P2* e *P3*, estes passam a atuar como um único poço. Como consequência, os níveis de velocidade de fluxo que chegam em *P1* diminuem (figura 5.24).

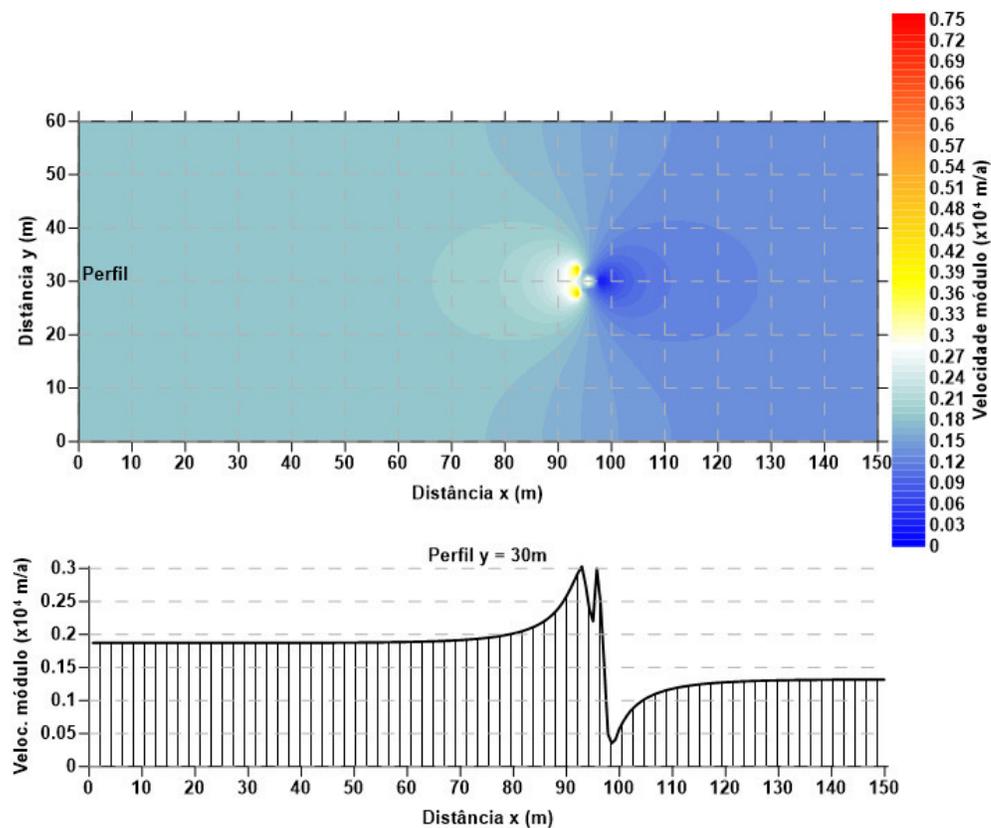


Figura 5.23 – Módulo de velocidade de fluxo para a simulação 6.5.1.a.

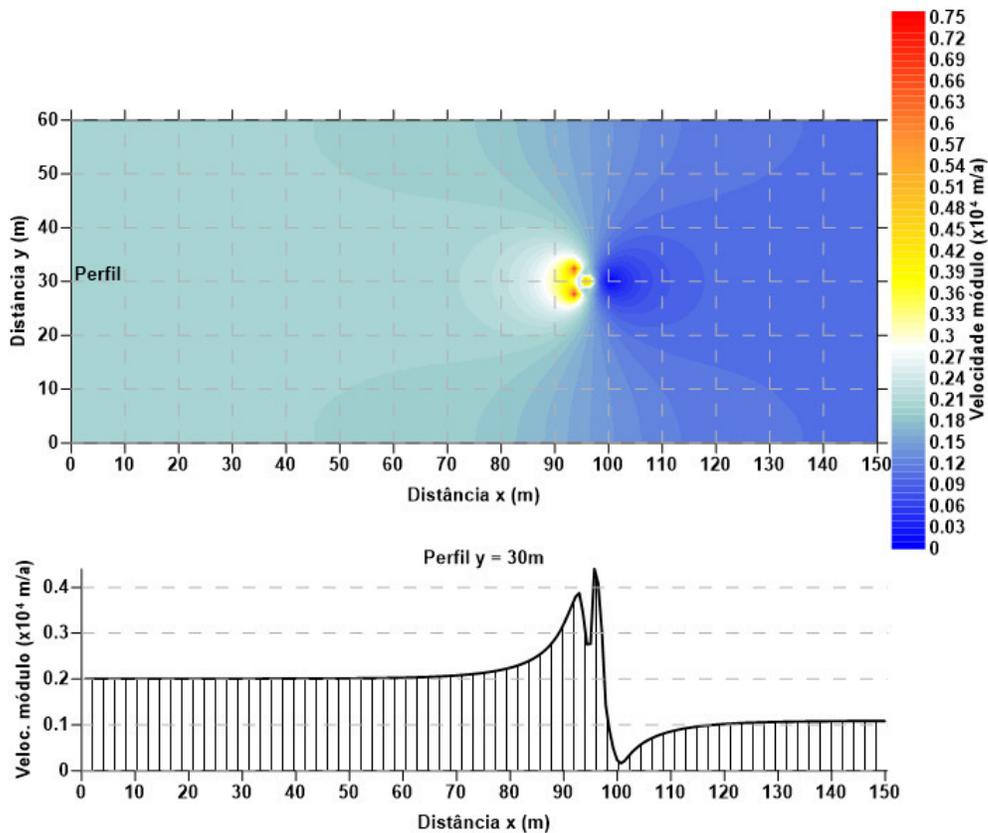


Figura 5.24 – Módulo de velocidade de fluxo para a simulação 6.5.1.b.

Dependendo das características do aquífero, do fluxo de água subterrânea e da pluma contaminante, a utilização de três poços de extração em formação triangular pode ser mais eficiente se não for grande a distância entre eles e se o poço na posição de *PI* operar com a maior vazão de bombeio.

5.5.

Formação de zona de captura com poços de extração e injeção formando uma e duas células em aquífero heterogêneo

A modelagem bidimensional de poços de injeção trabalhando em conjunto com poços de extração foi realizada considerando um aquífero confinado, representado com uma malha, dimensão 150m × 60m, de 24100 elementos triangulares com seis pontos nodais, total de 48621 nós, e com dois tipos de materiais, como apresenta a figura 5.25. Foi considerado o gradiente hidráulico de 0,006667m/m. O material (1) foi simulado com condutividade isotrópica de 25×10^4 m/a (684,9m/d) e o material (2) foi diferente do (1) por ter condutividade de 200×10^4 m/a (5479,45m/d).

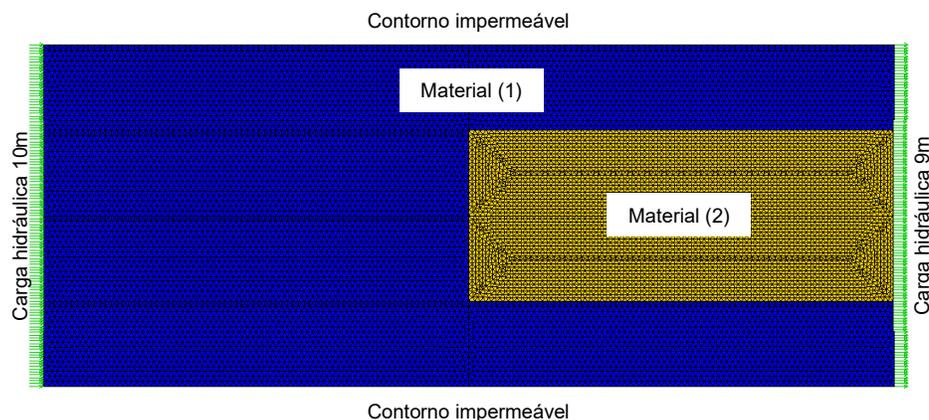


Figura 5.25 – Malha de elementos finitos, materiais e condições de contorno para a simulação 5.5.

Para as condições acima citadas, a figura 5.26 mostra a distribuição de cargas hidráulicas, em (a), e os campos, vetores e perfil de velocidade de fluxo, em (b), no aquífero. Observa-se o maior decréscimo de cargas, os maiores níveis de velocidade na região de maior condutividade e uma convergência de vetores de velocidade de fluxo para esta região.

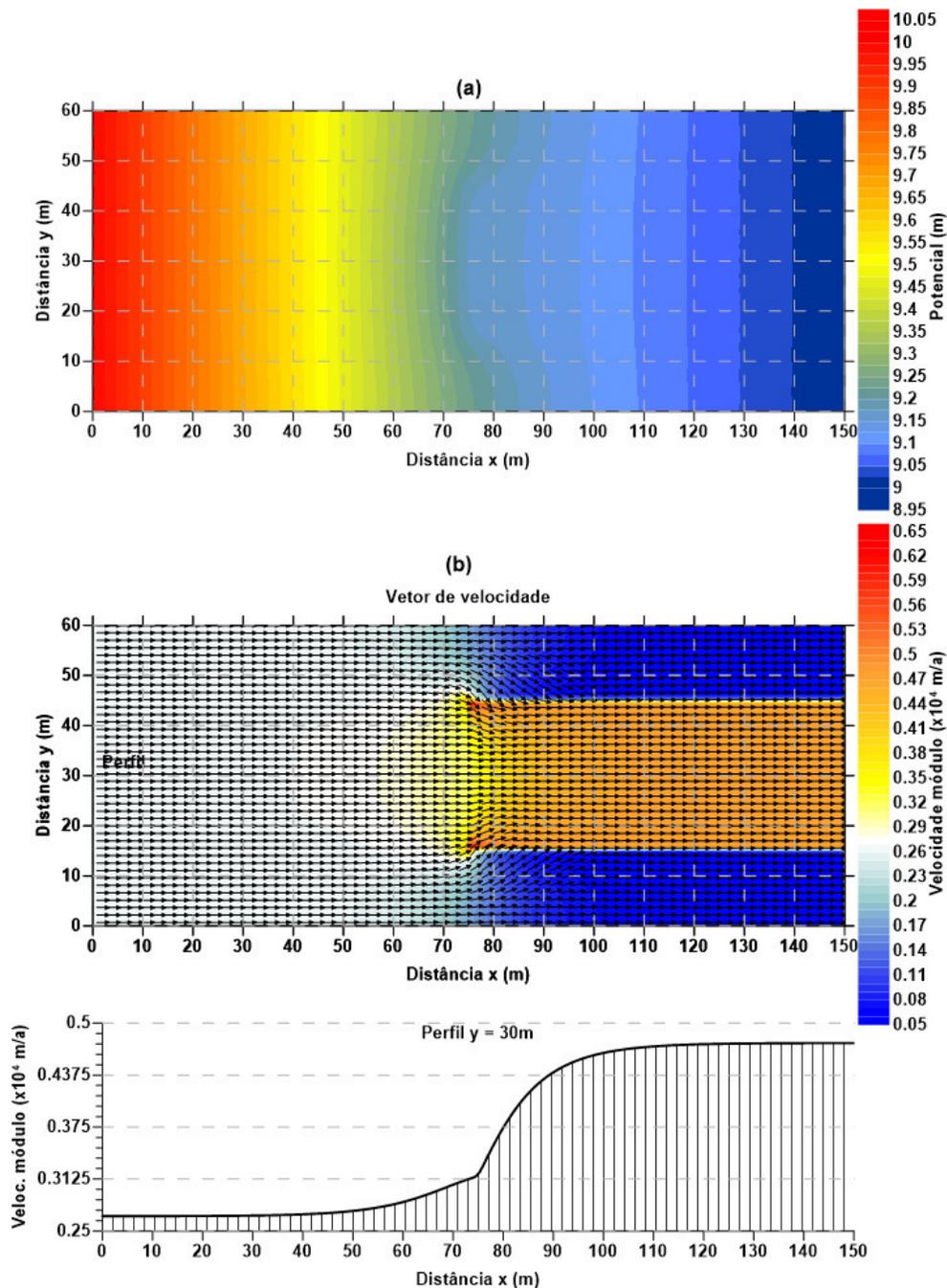


Figura 5.26 – Cargas hidráulicas, em (a) e níveis, vetores e perfil de velocidade de fluxo, em (b).

Para um poço de extração PI , posicionado em $(x; y) = (120; 30)m$, inicialmente, foram analisadas quatro diferentes vazões: $(0,5, 1,0, 1,5$ e $2,0) \times 10^4 m^3/a$, considerando o bombeamento contínuo. Os níveis de velocidade de fluxo no entorno do poço aumentam de acordo com as vazões utilizadas, chegando, para a

vazão de $2,0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, a aproximadamente 7 vezes a velocidade máxima de fluxo do aquífero sem poço (figura 5.27).

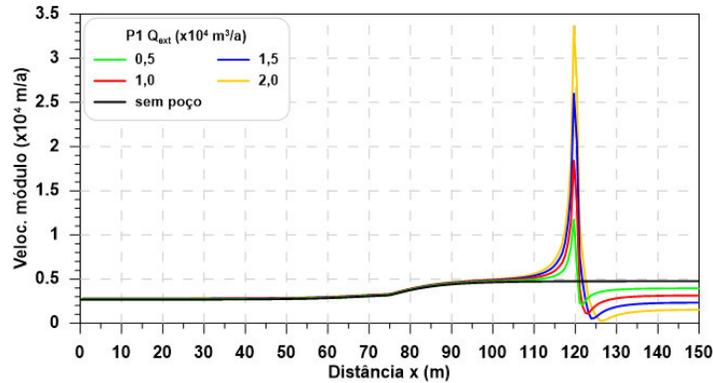


Figura 5.27 – Perfis de velocidade de fluxo no aquífero, em $y = 30\text{m}$, para o bombeamento de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$).

Foi selecionada a vazão $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ($274 \text{ m}^3/\text{d}$) para o poço $P1$, a figura 5.28 mostra as cargas potenciais hidráulicas no aquífero sob condição de bombeio neste poço.

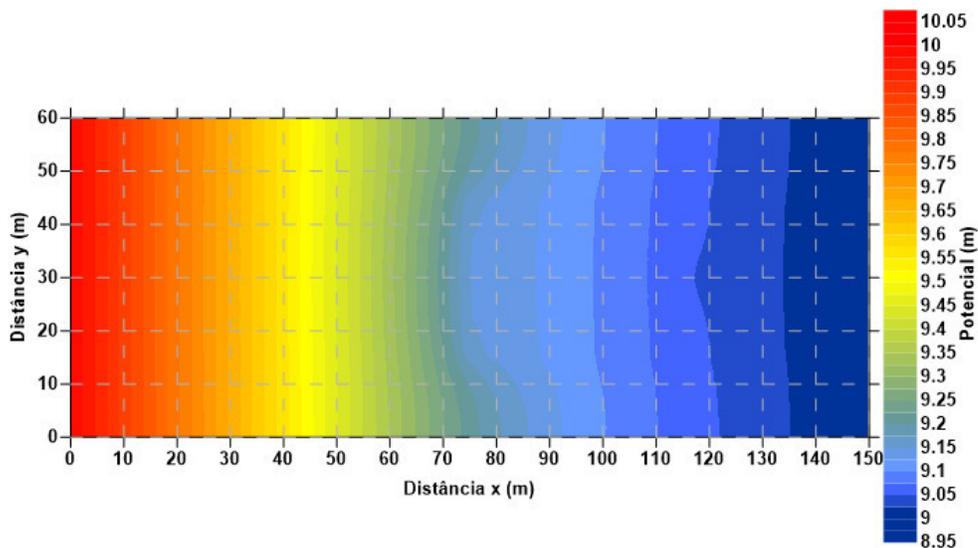


Figura 5.28 – Cargas hidráulicas no aquífero com o poço $P1$ ativo.

O módulo, o perfil do módulo em $y = 30\text{m}$ e os vetores de velocidade de fluxo com o poço $P1$ em bombeamento de $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ estão na figura 5.29. Pode

ser visto nesta figura o aumento da velocidade de fluxo na proximidade do poço alcançando um pico maior do que 3 vezes a velocidade de fluxo máxima do aquífero sem o poço. Logo imediatamente a jusante do poço há um decréscimo súbito desta velocidade onde ocorre a formação da zona de estagnação.

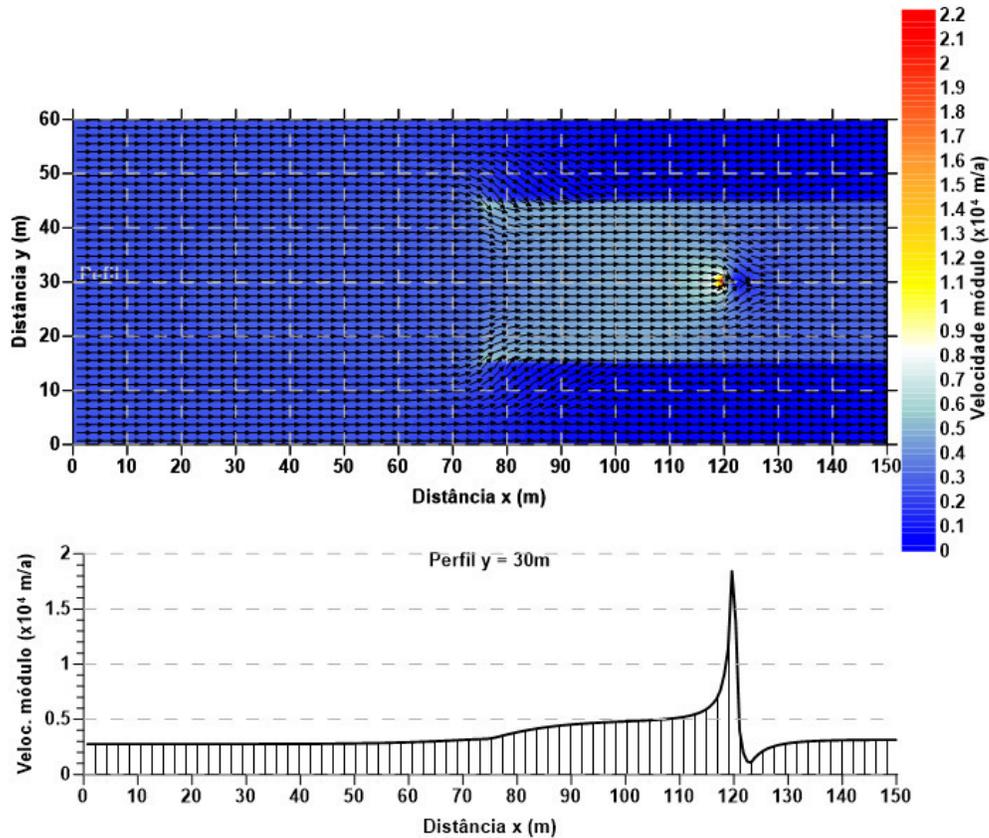


Figura 5.29 – Módulo, vetores e perfil de velocidade de fluxo com o poço *P1* em bombeamento de $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$.

Nesta análise, foi considerado um poço de injeção *P2* com vazão $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ de água, a mesma retirada em *P1*, descontaminada, sem concentração de poluente. Para definir a posição de um poço de injeção *P2*, à direita do *P1* e na área de menor condutividade, foi considerada a posição $(x; y) = (60; 30) \text{ m}$.

Como pode ser visto na figura 5.30, com os poços *P1* e *P2* trabalhando em conjunto, como esperado, há o aumento da carga hidráulica no ponto de injeção e um decréscimo desta no ponto de extração.

A figura 5.31 mostra o campo do módulo da velocidade de fluxo no aquífero com o poço de extração e injeção. Observa-se o decréscimo da velocidade tanto a montante do poço de injeção quanto a jusante do de extração, onde ocorre a formação da zona de estagnação.

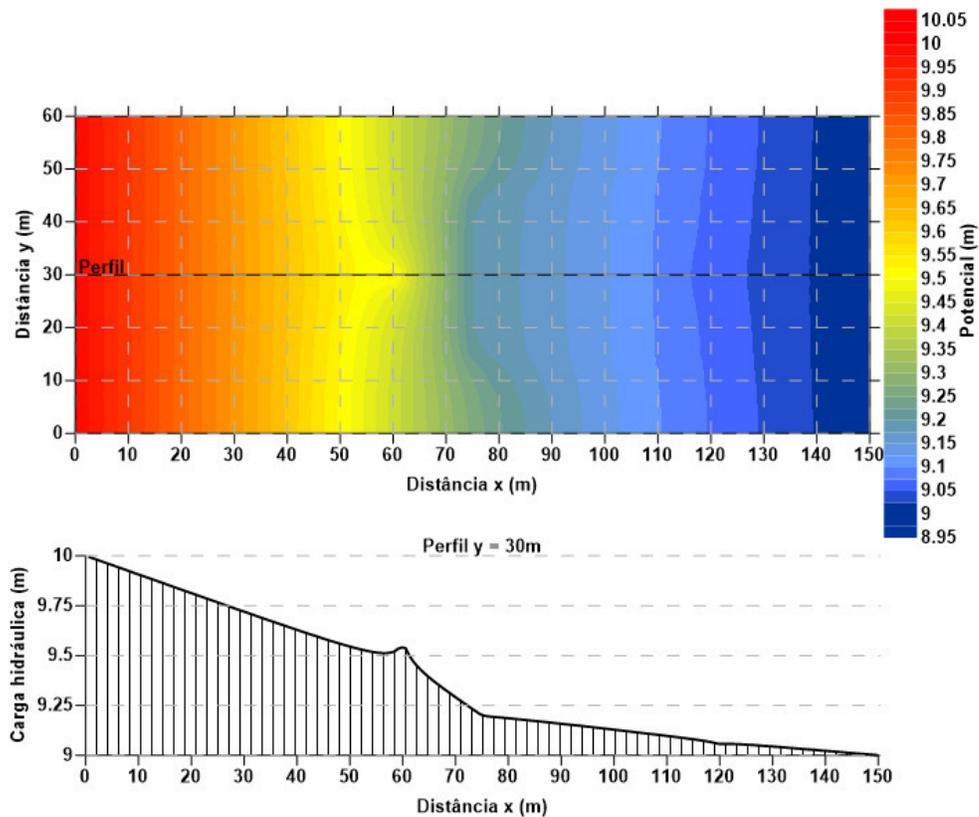


Figura 5.30 – Potencial hidráulico e seu perfil ($y = 30\text{m}$) com o poço de injeção trabalhando em conjunto com o de extração.

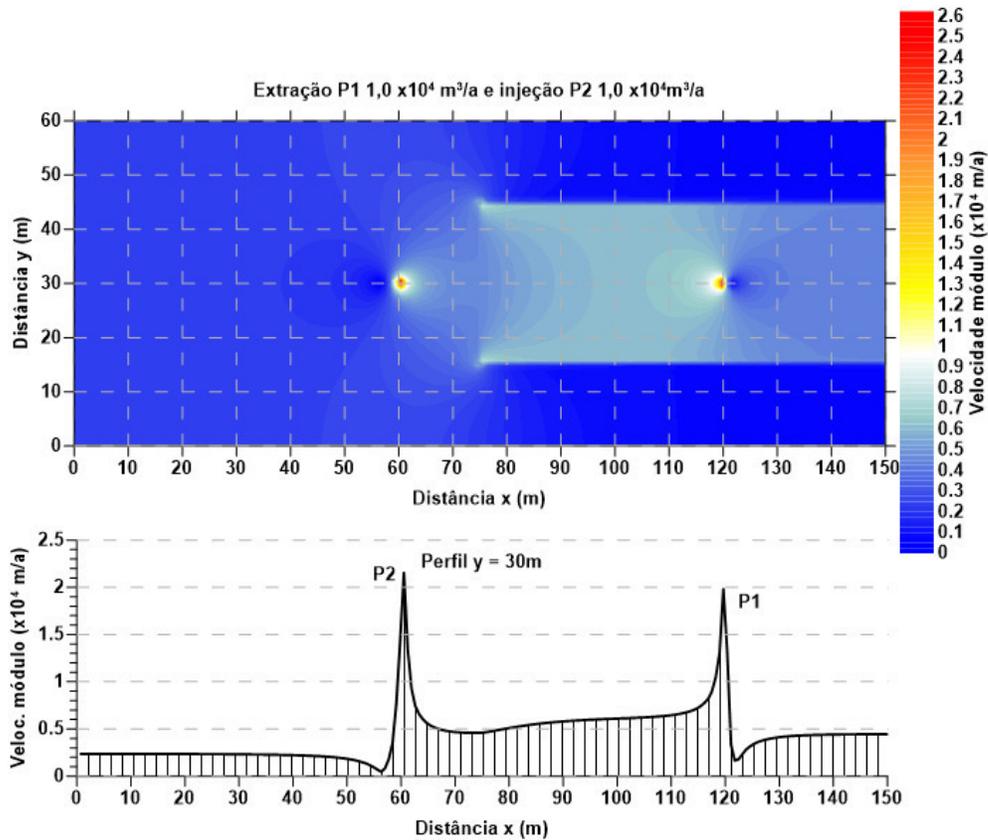


Figura 5.31 – Níveis da velocidade de fluxo no aquífero com o poço *P1* de extração e o *P2* de injeção.

Nesta análise, também foi testada a opção de um segundo poço de extração, o *P3*, posicionado próximo ao *P1*. O *P2* continuou a injetar $1,0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ de água limpa e o *P1* a bombear $1,0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$. Para o *P3*, que foi posicionado a montante do *P1*, afastado 5m deste, optou-se pelo bombeamento de $0,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$.

A entrada em operação de um segundo poço de injeção, o *P4*, foi considerada com a vazão de $1,0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, sendo que este foi posicionado em $(x; y) = (45; 30) \text{ m}$. Neste caso *P2* passou a operar com injeção de $0,5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$. O interesse foi em formar duas células de circulação, uma configuração recomendada na literatura por facilitar a manutenção dos poços envolvidos sem parada total da operação de extração e injeção. A questão para uso desta configuração passa a ser operacional.

Na figura 5.32 é mostrado campo de carga hidráulica no aquífero com os quatro poços em operação. Observa-se que a região com maior condutividade tem uma maior influência nas cargas desta área do que os poços de extração e injeção.

Como pode ser observado na figura 5.33, as velocidades de fluxo diminuem imediatamente a montante dos poços injetores e a jusante dos de extração, ande há a formação da zona de estagnação. Nesta figura, também, pode-se ver a formação da zona de captura entre os poços de extração e injeção. A formação desta zona de captura é auxiliada pelas próprias características heterogêneas do aquífero.

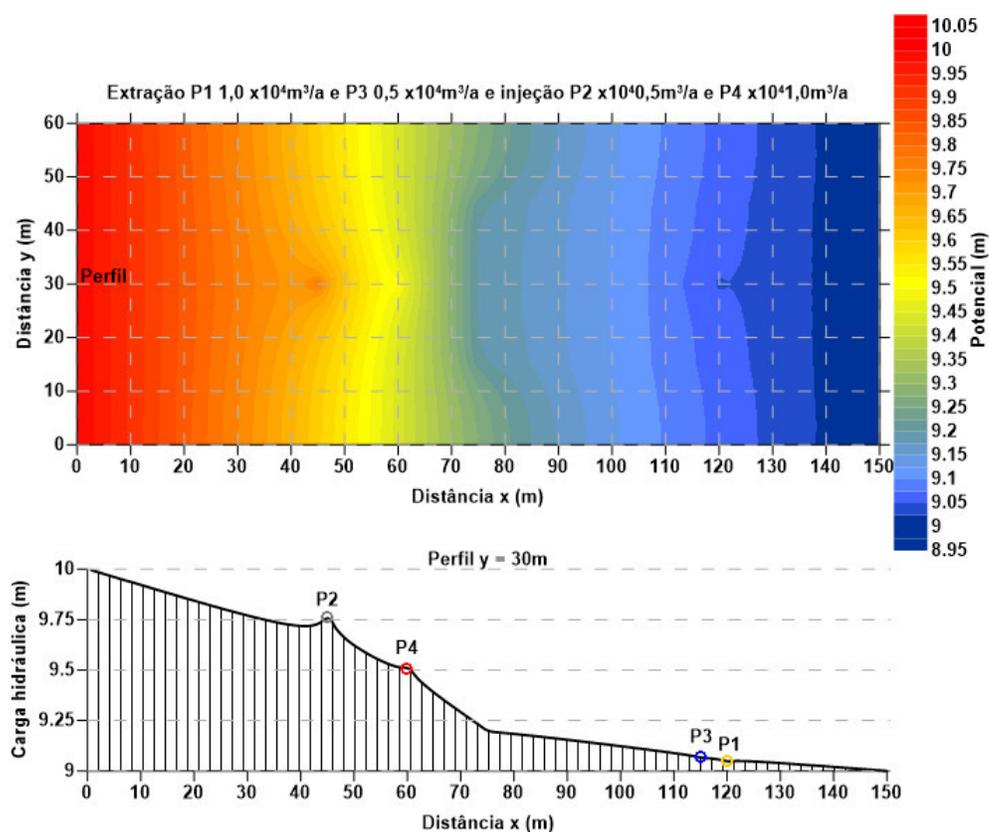


Figura 5.32 – Potencial hidráulico e seu perfil ($y = 30\text{m}$) com os dois poço de injeção trabalhando em conjunto com dois os de extração.

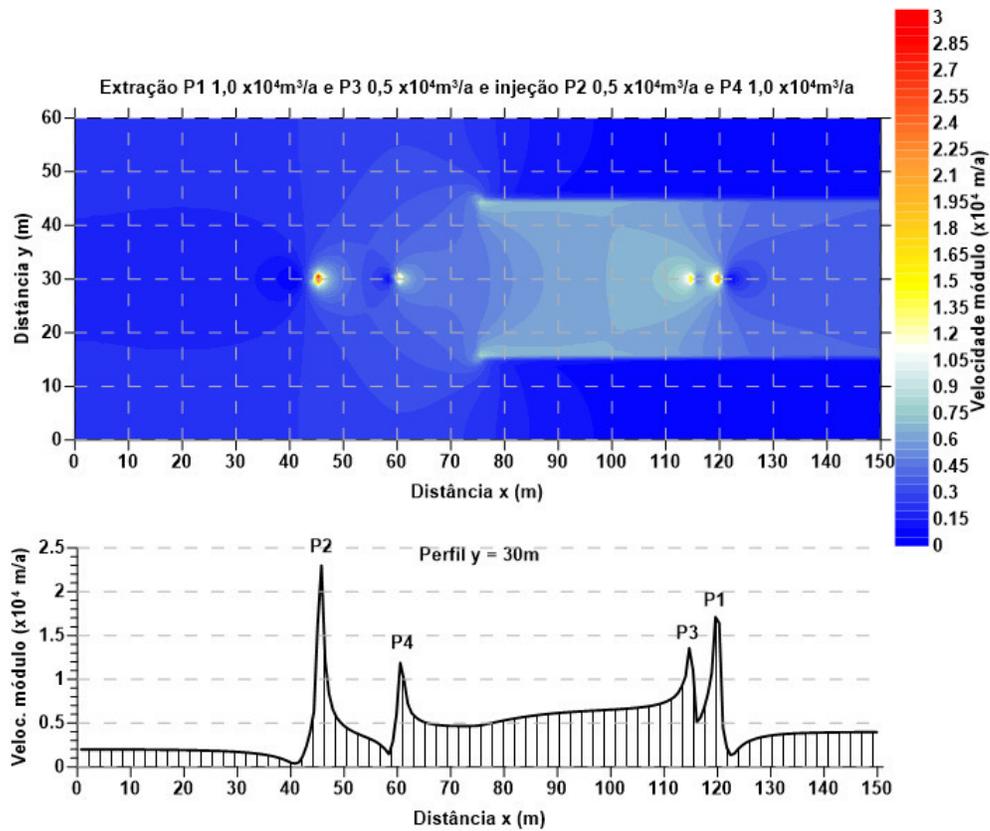


Figura 5.33 – Campo de velocidade de fluxo e perfil passando pelos quatro poços.

6

Conclusões e sugestões

6.1.

Conclusões

Na modelagem de formação de zona de captura de poluentes por poços de bombeamento, o modelo numérico apresentou boa correlação com a teoria obtida da literatura.

Das análises realizadas:

- 1) A zona da captura de um poço para o controle e limpeza de um a pluma contaminante obtida pelo modelo numérico condiz com modelos teóricos descritos a este respeito;
- 2) Em estratégia de extração com poços posicionados em linha, ao longo de um eixo, havendo um poço P2 a montante de um outro poço P1, se P2 tiver maior vazão do que P1, a distância entre eles deve ser tal que a zona de estagnação de P2 não influencie negativamente o campo de velocidade de P1 e, conseqüentemente, a extração por P1. Se P2 tiver vazão menor do que P1, este último pode ser posicionado de forma que seu campo de captura atue sobre a zona de estagnação de P2.
- 3) Com poços de extração em disposição triangular, o posicionamento dos poços e a distribuição de vazão não deve ser tal que um poço interfira negativamente sobre o outro. A vazão entre os dois poços com linha de união perpendicular a trajetória de fluxo do aquífero não deve ser muito maior do que a do terceiro poço, posicionado a jusante desta linha de união, a ponto de prejudicar a zona de captura deste terceiro poço. As vazões de bombeamento devem ser selecionadas de modo que os três poços trabalhem em conjunto sem que haja formação de zona de estagnação prejudicial à formação triangular.

4) A utilização de poços de injeção em conjunto com os de bombeamento pode gerar um maior deslocamento de água e resultar em uma maior limpeza pelos poços extratores. Porém, em condições não uniforme de fluxo, com o aquífero sendo composto de diferentes materiais, é necessário um estudo numérico das possibilidades de posicionamento dos poços e estratégia de bombeamento.

Diante das complexas condições que um projeto de descontaminação de aquífero com auxílio de poços de bombeamento possa encontrar, a metodologia é analisar numericamente cada opção de projeto, cada configuração de poço e cada esquema de bombeamento, objetivando reduzir as incertezas que possam gerar erros antes de iniciar as aplicações em campo.

Diferentes configurações de poços de extração e injeção, como posicionamentos, vazões e esquemas de bombeamento encontrados na literatura podem e devem ser utilizados em um projeto de descontaminação de água subterrânea com auxílio de bombeamento. Porém, sob condições não uniformes de fluxo, e devido as propriedades do aquífero, um modelo numérico deve ser considerado visando a otimização do projeto de descontaminação, seja na seleção do melhor posicionamento dos poços ou na configuração do esquema de bombeamento, para obter uma melhor limpeza do aquífero contaminado e viabilizar economicamente o projeto.

6.2.

Sugestões

O processo de descontaminação de aquíferos com auxílio de poços de extração pode ser bastante complexo devido as características hidrogeológicas do aquífero e da natureza do soluto contaminante. Para futuros trabalhos, seguindo esta linha de pesquisa aqui apresentada, sugere-se:

- Realizar simulações tridimensionais para uma melhor visualização e entendimento do comportamento do fluxo e formação da zona de captura de poluentes

- Realizar a modelagem de zona de captura em conjunto com a de transporte de massa de soluto (poluente), utilizando de técnicas numéricas que possam diminuir os erros numéricos durante as análises de transporte de massa. Este tipo de modelagem deve, também, fornecer a quantidade de soluto poluente recuperada.
- Desenvolvimento de modelo para aquíferos não confinados.
- Implementação de modelo bifásico para a simulação de transporte de contaminantes líquidos imiscíveis em água.
- Acoplamento com modelo mecânico de deformação.
- Considerar a utilização de diferentes ferramentas numéricas.
- Realizar um maior número de simulação para cada caso de bombeamento considerado, minimizando, em um máximo possível, o número de incertezas envolvidas.
- Variar o campo de permeabilidade.

Referências bibliográficas

Araújo, P. P; Abreu, F. A. M; Cavalcante, I. N. **Fluxo e velocidade das águas subterrâneas rasas nas nascentes do rio Capitão Pocinho, nordeste do Pará.** III Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo (III CIMAS), Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), São Paulo, BR, 2013.

Bear, J.; Cheng, A. H. -D. **Modeling groundwater flow and contaminant transport:** theory and applications of transport in porous media. New York, USA, Springer, 2010.

Bear, J., Verruijt, A. **Modeling ground water flow and pollution:** theory and applications of transport in porous media. Dordrecht, Holland, D. Reidel Publishing Company, 1987.

Cohen, R. M.; Mercer, J. W.; Greenwald, R. M.; Beljin, M. S. **Design guidelines for conventional pump-and-treat systems.** EPA/540/S-97/504, Technology Innovation Office, Office of Solid Waste and Emergency Response, US EPA, Washington, DC, 1997.

Cook, R. D.; Malkus, D. S.; Plesha, M. E. **Concepts and applications of finite element analysis**, 3 ed, John Wiley & Sons, EUA, 1989.

EPA (USA). United States Environmental Protection Agency. **Pump-and-Treat Ground-Water Remediation. A Guide for Decision Makers and Practitioner.** EPA/625/R-95/005, Office of Research and Development, Washington, DC, 1996.

Fetter, C. W. **Contaminant hydrogeology.** New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1993.

Javadel, I.; Tsang, C-F. **Capture-zone types curves: a tool for aquifer cleanup**. Vol. 24, no 5, Ground Water, September-October 1986. California – USA.

Oliveira, E. G.; Bonotto, D. M. **Avaliação da condutividade hidráulica em área de recarga do aquífero Guarani na depressão periférica, Estado de São Paulo**. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas (XII CABAS), Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), Florianópolis, SC, 2002.

Satkin, R. L.; Bedient, P. B. **Effectiveness of various aquifer restoration schemes under variable hydrogeologic conditions**. Ground Water 26(4):488-498, EUA, 1988.

Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. **The finite element method: basic formulation and linear problems**, vol 1, 4 ed, McGraw-Hill, Singapura, 1989.