

# NOCÇÕES BÁSICAS DE HIDROGEOLOGIA

**Chang, Hung Kiang**  
**UNESP / IGCE / DGA / LEBAC**  
**06/02/2006**

# Roteiro

## 1- Água em Sub-superfície

Z. não-saturada / Z. saturada

## 2- Propriedades Hidrodinâmicas

$\phi$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , S, K, T

## 3- Unidades Hidrogeológicas

Camadas Confinantes

Aqüíferos e Tipos de Aqüíferos

## 4- Produtividade e Testes de Aqüíferos

Equação Geral de Fluxo

Soluções de Theis e Jacob (Raio de Interferência)

Laboratório (Granulometria e Permeâmetros)

Traçadores

Testes de *Slug* e de Bombeamento

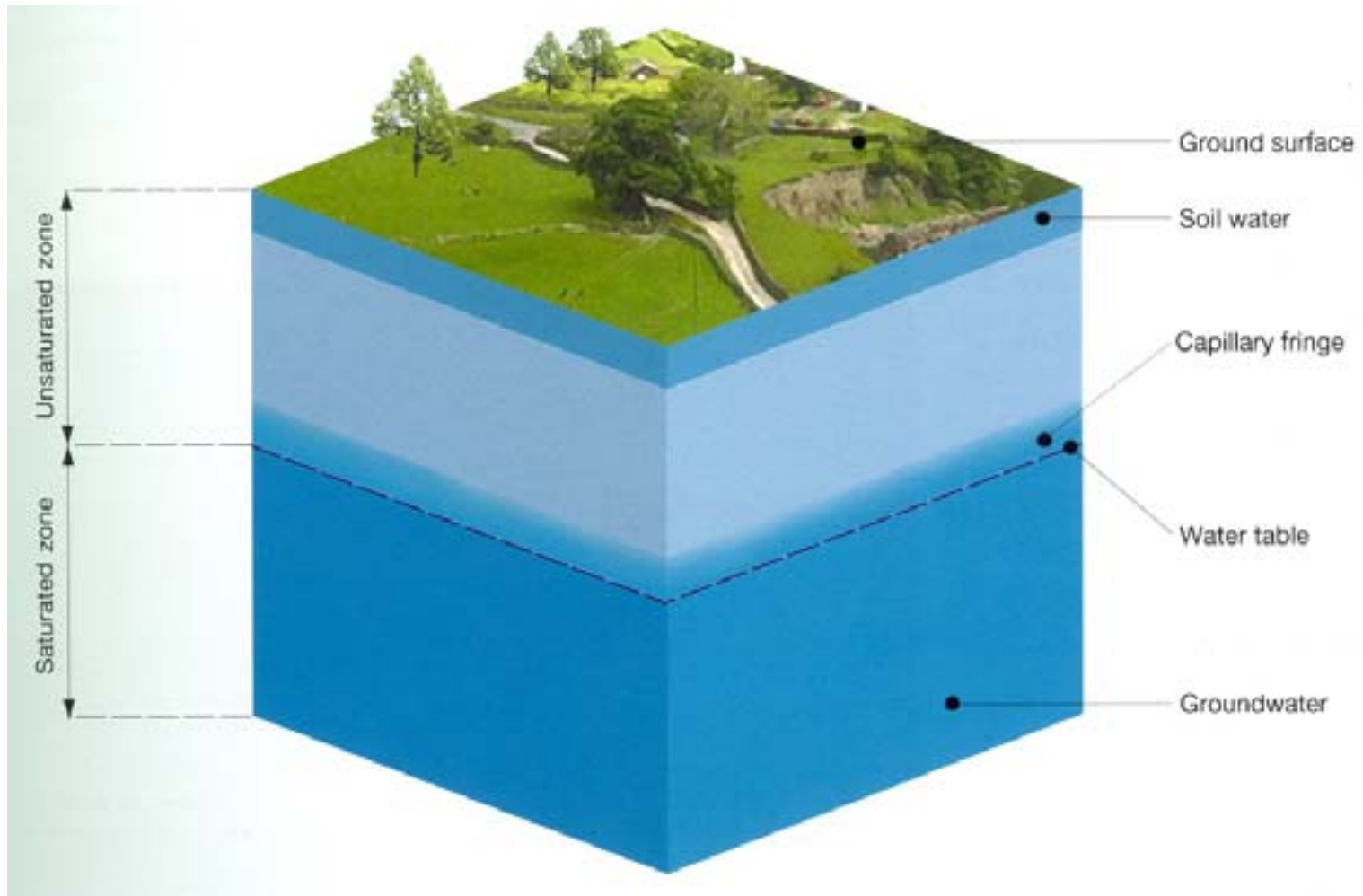
## 6- Heterogeneidades em Aqüíferos

Estruturais

Estratigráficas

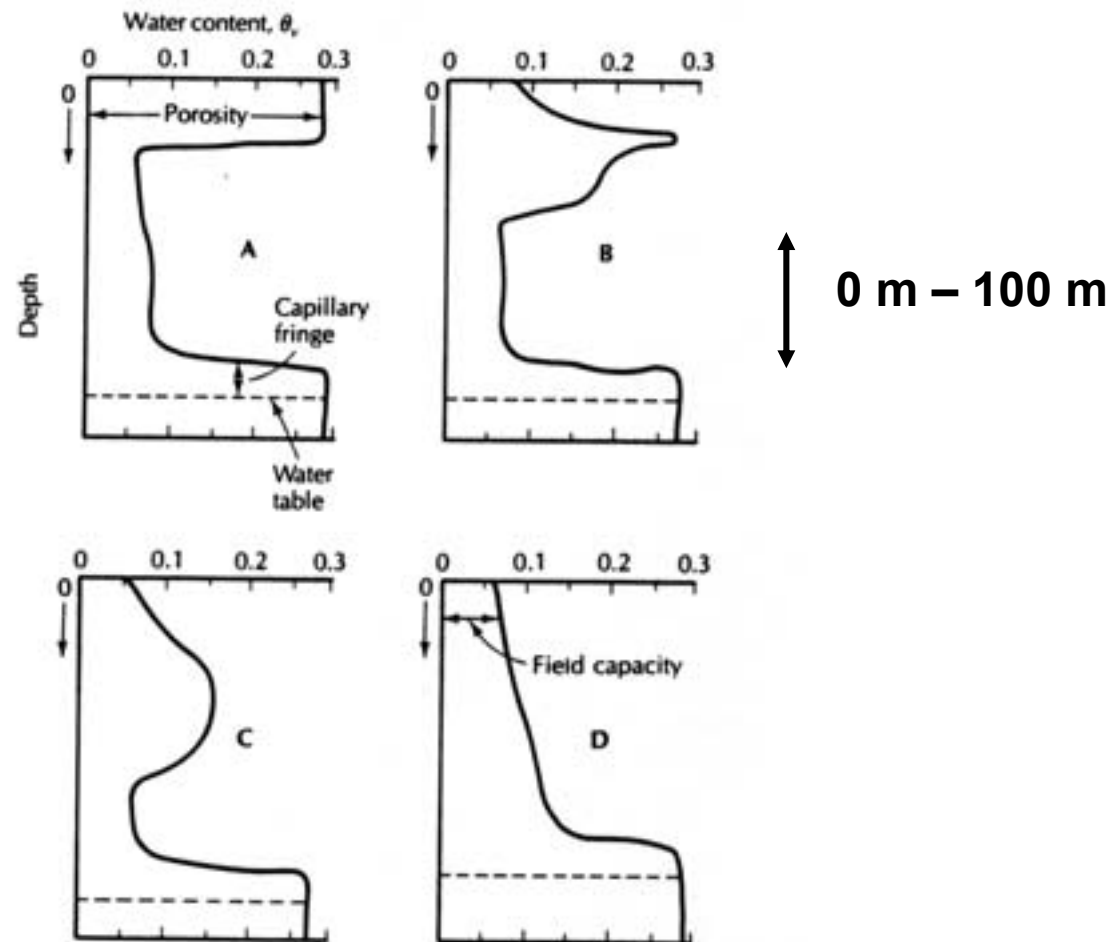
## 7- Parâmetros Importantes para Classificação de Aqüíferos

# Água em Sub-Superfície



# Água em Sub-Superfície

## Zona Não-Saturada (Vadosa)



**FIGURE 6.10** Moisture profiles showing the downward passage of a wave of infiltrated water. The soil is saturated at a water content of 0.29 and has a field capacity water content of 0.06. Source: Modified from Agronomy Monograph 17, "Drainage for Agriculture." 1974, pp. 359–405. Used with permission of the American Society of Agronomy.

# Água em Sub-Superfície

## Zona Vadosa

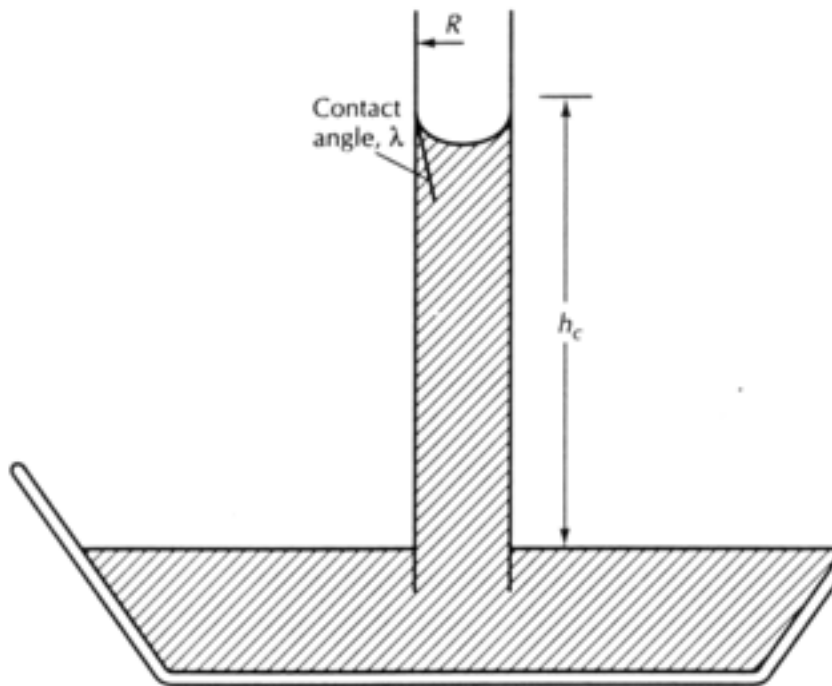


FIGURE 6.1 Rise of water in a capillary tube.

$$h_c = \frac{2\tau}{R\gamma} \cos \lambda$$

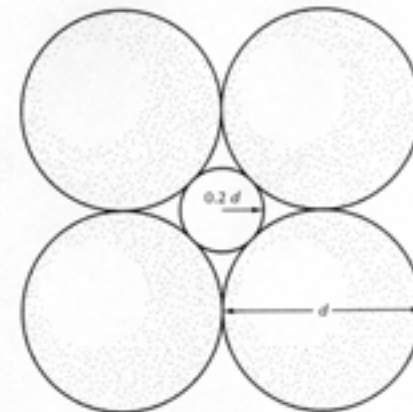
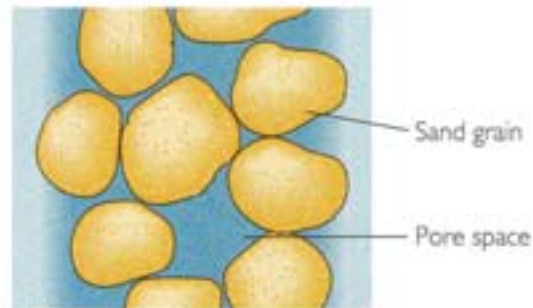


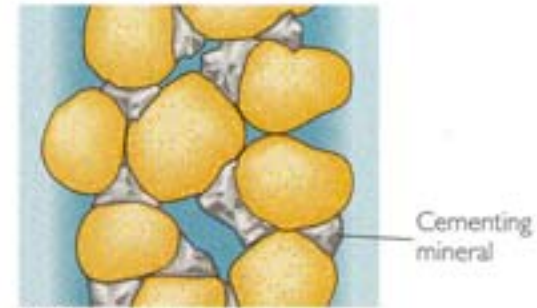
FIGURE 6.2 Idealized pore diameter in a sediment with cubic packing. The equivalent capillary tube has a radius of 0.2 the diameter of the grains.

# Água em Sub-Superfície

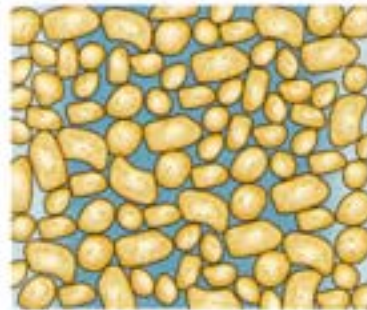
## Zona Saturada



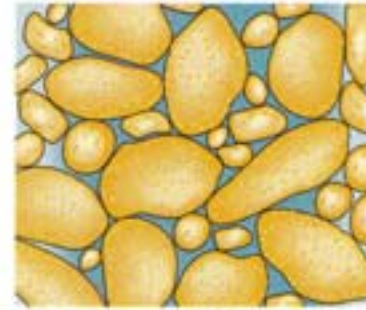
(a) Porous sandstone



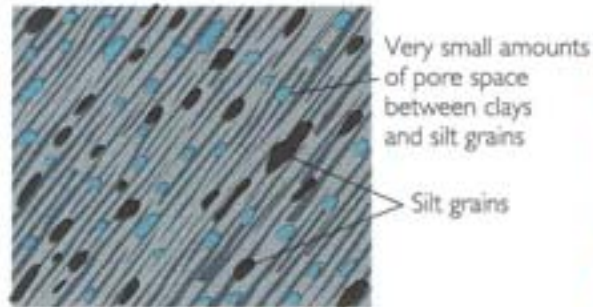
(b) Cemented sandstone



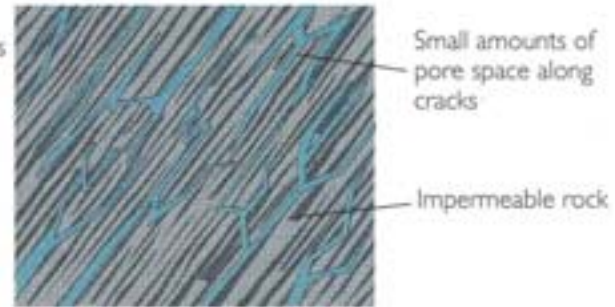
(c) Fine-grained sandstone



(d) Sandstone with irregular shapes



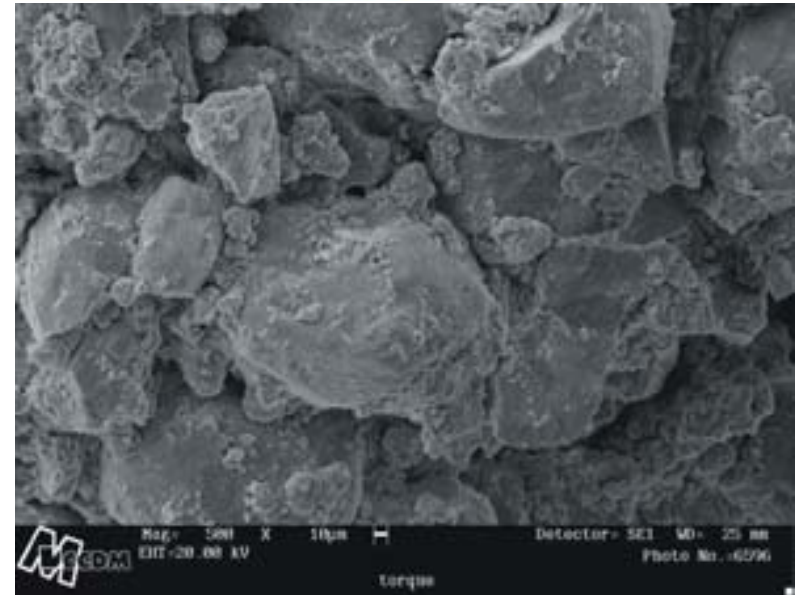
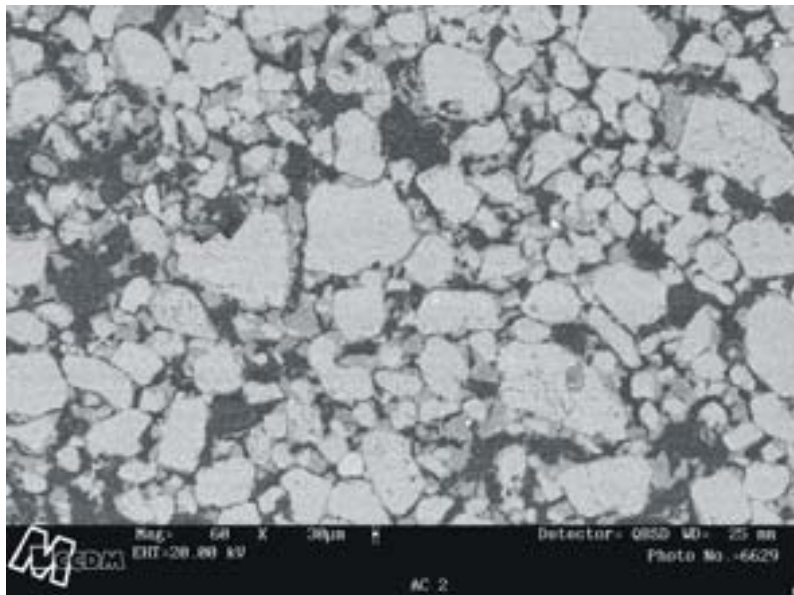
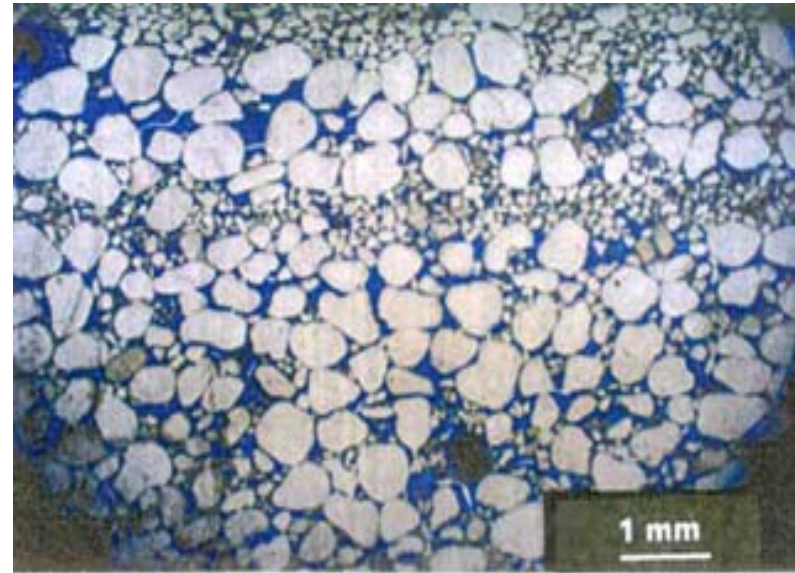
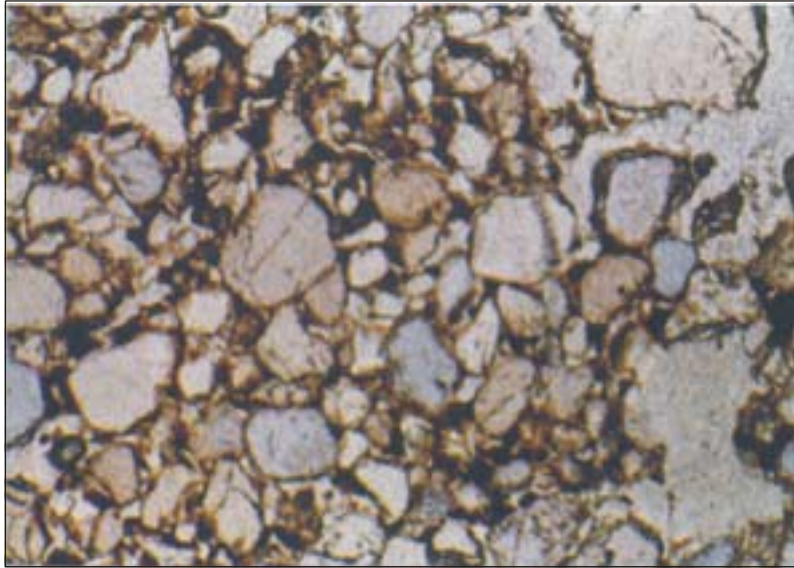
(e) Unfractured shale



(f) Fractured shale

# Água em Sub-Superfície

## Zona Saturada



# Propriedades Hidrodinâmicas

## Porosidade

**Porosidade** - % de vazios no total da rocha ou solo

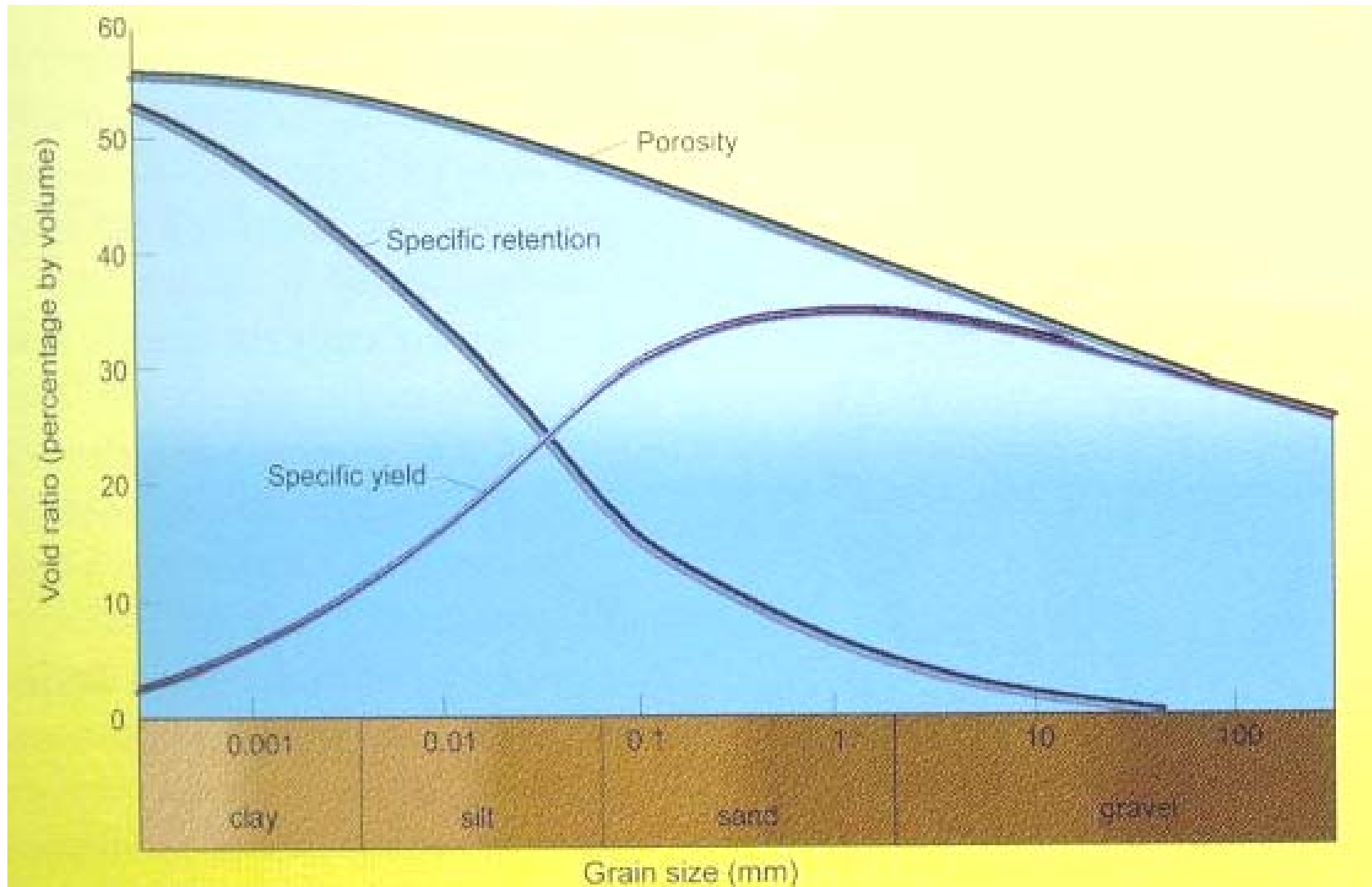
$$\phi = \frac{100 V_v}{V}$$

- **Produção específica (*specific yield*)** – qtidade de água que flui da rocha, sob ação da gravidade
- **Retenção específica (*specific retention*)** – qtidade de água que não drena, sob ação da gravidade
- **Porosidade = Produção específica + Retenção específica**
- **Porosidade efetiva** – vazios que permitem o escoamento de fluido
- **Porosidade primária** – vazios formados junto c/ a rocha
- **Porosidade secundária** – vazios formados após a consolidação da rocha (dissolução, fraturamento)



# Propriedades Hidrodinâmicas

## Porosidade



# Propriedades Hidrodinâmicas

## Porosidade

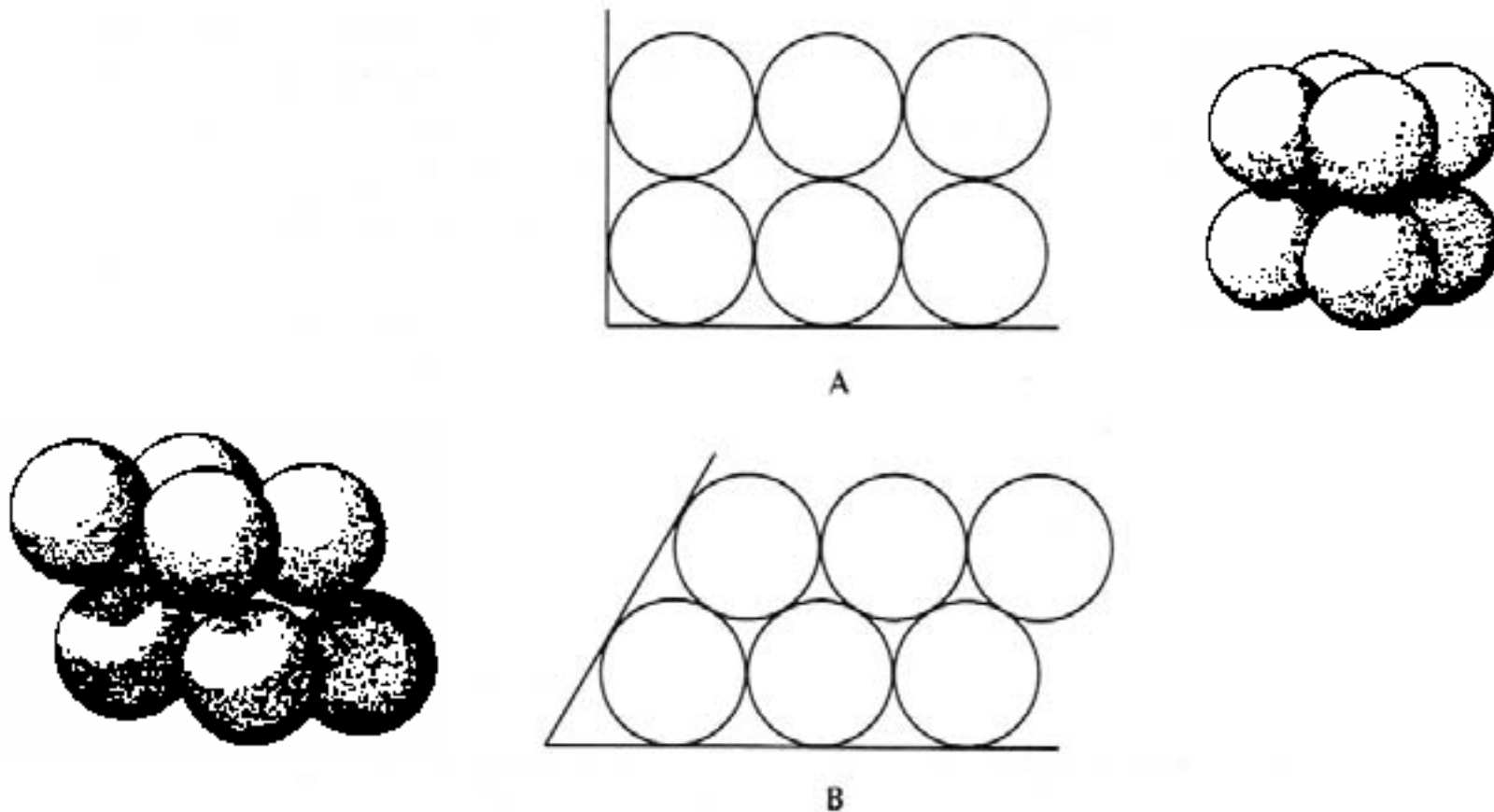


FIGURE 4.1 A. Cubic packing of spheres with a porosity of 47.65% B. Rhombohedral packing of spheres with a porosity of 25.95%.

# Propriedades Hidrodinâmicas

## Compressibilidade

AQUÍFERO

$$\alpha = - \frac{dV_T / V_T}{d\sigma_e}$$

$d\sigma_e \rightarrow$  variação na tensão efetiva

ÁGUA

$$\beta = - \frac{dV_W / V_W}{dp}$$

TIPO DE ROCHA	$\alpha$ ( $m^2/N$ ou $Pa^{-1}$ )
<i>Argila</i>	$10^{-6}$ a $10^{-8}$
<i>Areia</i>	$10^{-7}$ a $10^{-9}$
<i>Cascalho/rocha fraturada</i>	$10^{-3}$ a $10^{-10}$

$$\beta = 4.4 \times 10^{-10} m^2 / N (Pa^{-1})$$

# Propriedades Hidrodinâmicas

## Coeficiente de Armazenamento ( $S$ )

- Aquífero Confinado

$$S_s = (\alpha + n\beta) \rho g ,$$

$$S = S_s \cdot b ,$$

$$S = (\alpha + n\beta) \rho g b ,$$

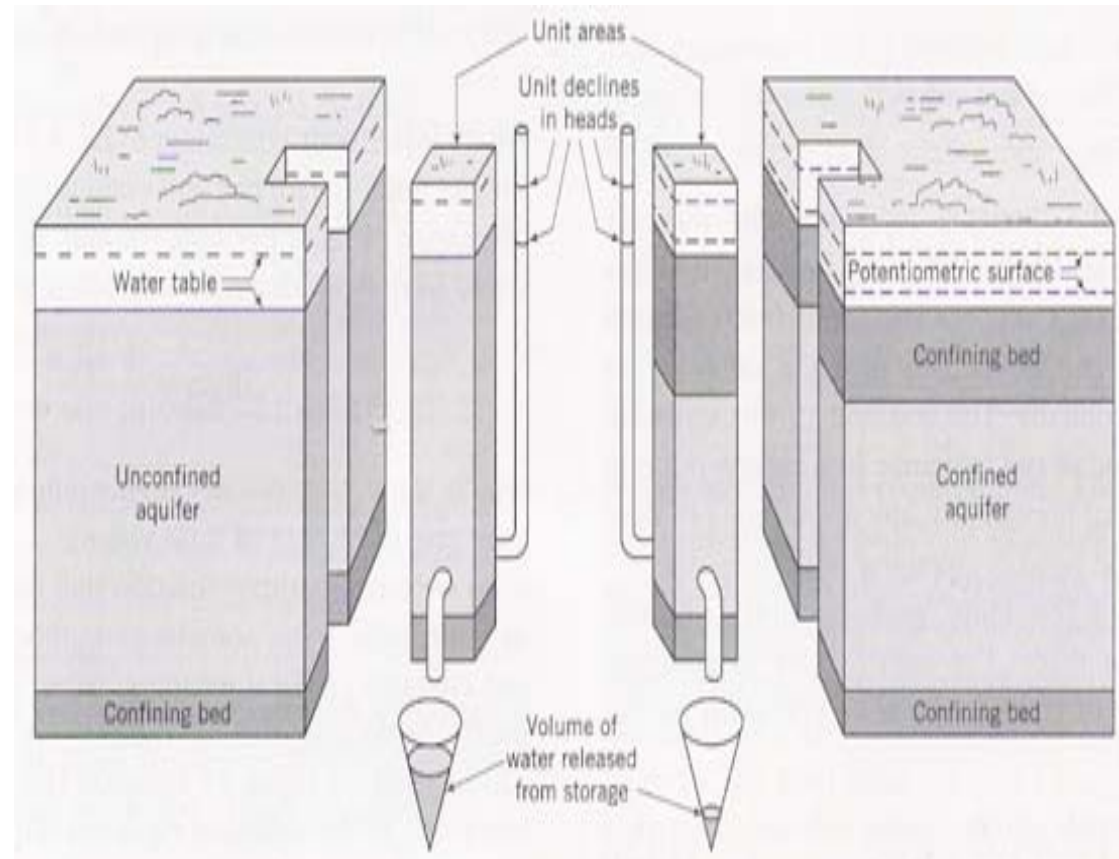
$b$  = espessura do aquífero

- Aquífero Não-Confinado (Livre)

$$S = (S_s + S_Y) h$$

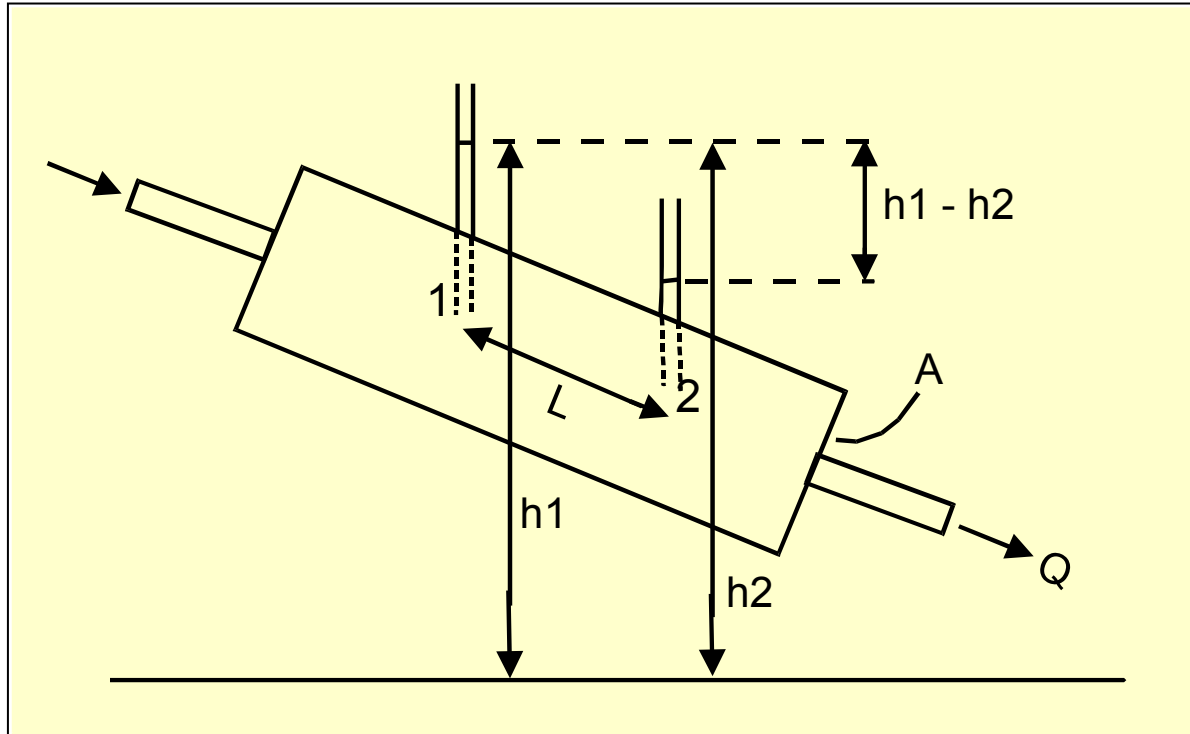
$$S = [(\alpha + n\beta) \rho g + S_Y] h ,$$

$h$  = espessura da zona saturada



# Propriedades Hidrodinâmicas

## Experimento de Darcy



$$Q \propto h_1 - h_2$$

$$Q \propto 1/L$$

$$Q \propto A$$

$$Q = -K A \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right) \quad \text{Lei de Darcy}$$

$$Q = -K A \frac{dh}{dl}, \quad v = -K \frac{dh}{dl}$$

$$V_x = -\frac{K}{ne} \frac{dh}{dl}$$

Velocidade Linear Média

# Propriedades Hidrodinâmicas

## Permeabilidade Intrínseca ( $K_i$ )

$$K = \frac{K_i \rho g}{\mu} \quad \text{ou} \quad K_i = \frac{K \mu}{\rho g}$$

## Transmissividade (T)

$$T = K \cdot b \quad (\text{L}^2/\text{T}),$$

ou

$$T = \frac{K_i \rho g}{\mu} b$$

$T > 0.015 \text{ m}^2 / \text{s}$  - bom aquífero

## Difusividade Hidráulica (D)

$$D = \frac{T}{S} = \frac{K}{S_s} \quad (\text{L}/\text{T})$$

# Unidades Hidrogeológicas

**Camada Confinante** – unidade geológica que apresenta baixa ou nula condutividade hidráulica.  $K < 10^{-5}$  cm/s. O limite de K é arbitrário, depende das condições locais.

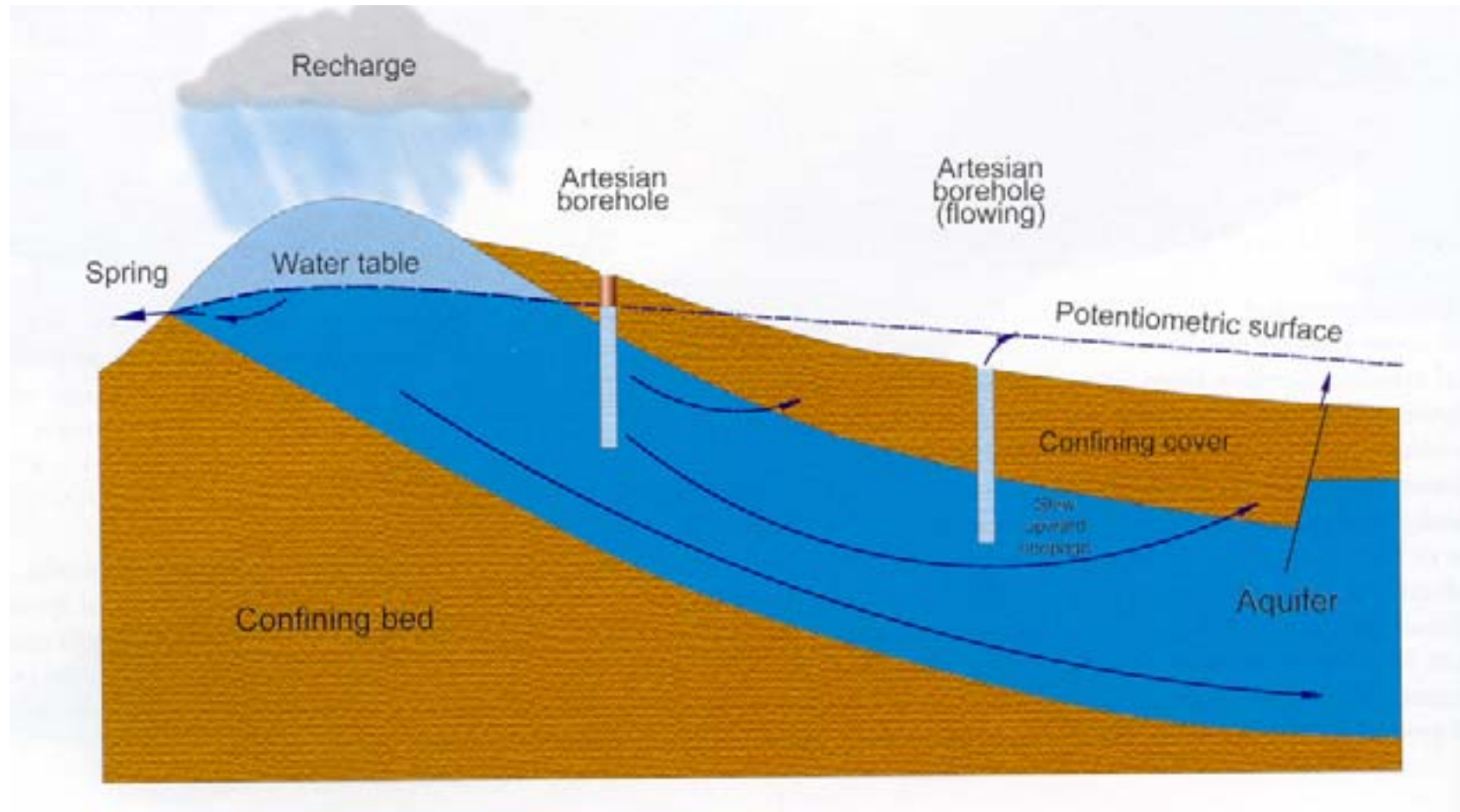
**Aquitardo** – unidade geológica de baixa permeabilidade que pode armazenar água subterrânea e transmiti-la lentamente de um aquífero para outro

**Aquiclude** – unidade geológica de baixa permeabilidade que forma o limite superior ou inferior de um sistema de fluxo subterrâneo

**Aquifuge** – unidade geológica absolutamente impermeável que não armazena, nem transmite água

**\*Sup. Potenciométrica** – superfície que representa o nível que a água alcança em poços revestidos

# Unidades Hidrogeológicas





# Unidades Hidrogeológicas

**Aqüífero** – unidade geológica que pode armazenar e transmitir água a taxas suficientemente rápidas para abastecer um número razoável de poços.  $K \geq 10^{-5}$  cm/s

**Aqüífero Confinado** – aqüífero que é limitado acima e abaixo por camadas confinantes

**Aqüífero Livre** – aqüífero não limitado por camada confinante entre a zona saturada e a superfície (lençol freático)

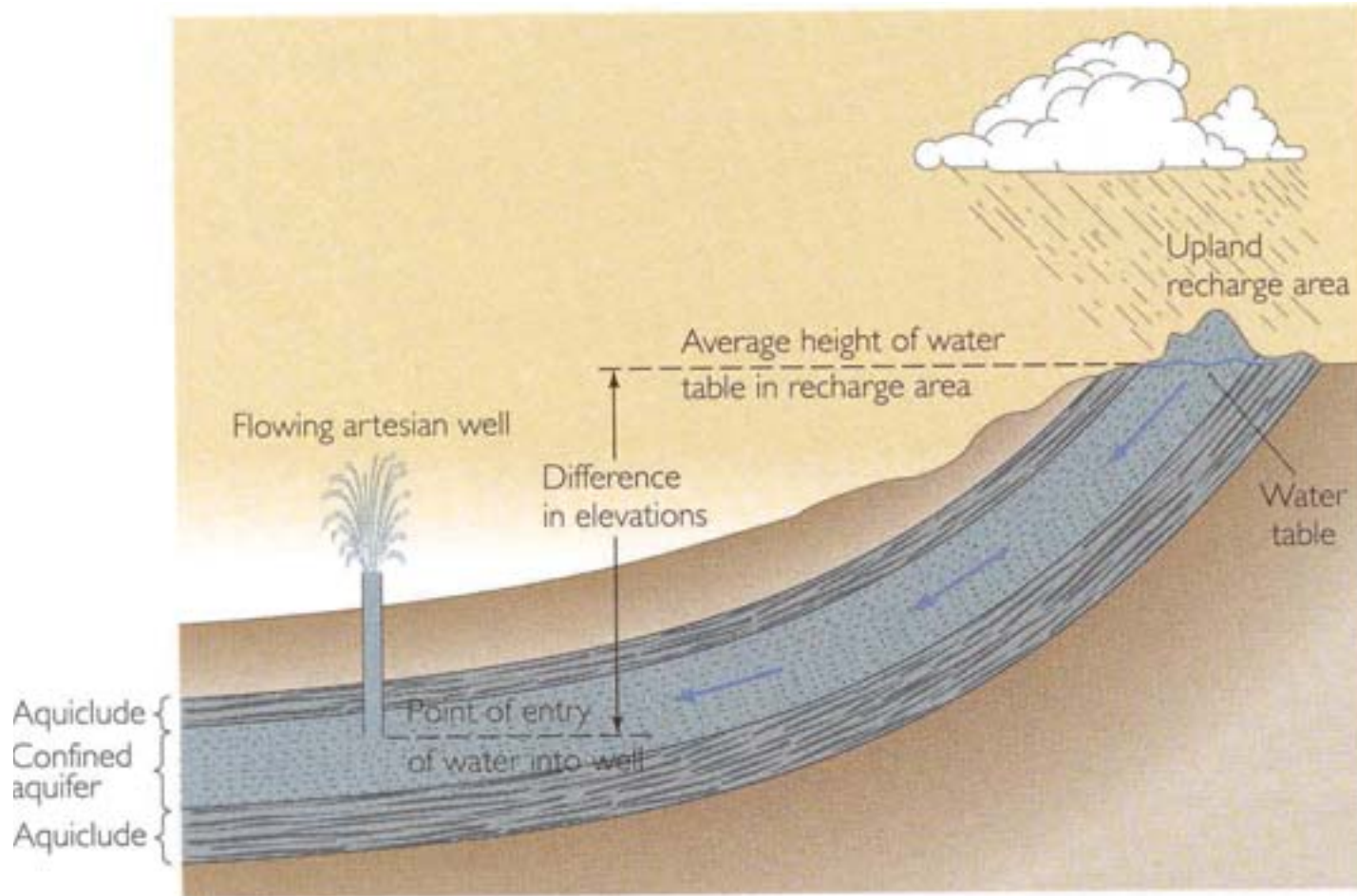
**Aqüífero Suspenso** – camada saturada de solo/sedimento que se forma acima do lençol freático

**Aqüífero Cárstico** – aqüífero formado em terrenos “cavernosos”, contendo fendas ampliados por dissolução de rochas

**Aqüífero Fraturado** – aqüífero formado em terrenos contendo fraturas tectônicas “abertas”

# Unidades Hidrogeológicas

## Aquífero Confinado



# Unidades Hidrogeológicas

## Aqüífero Livre

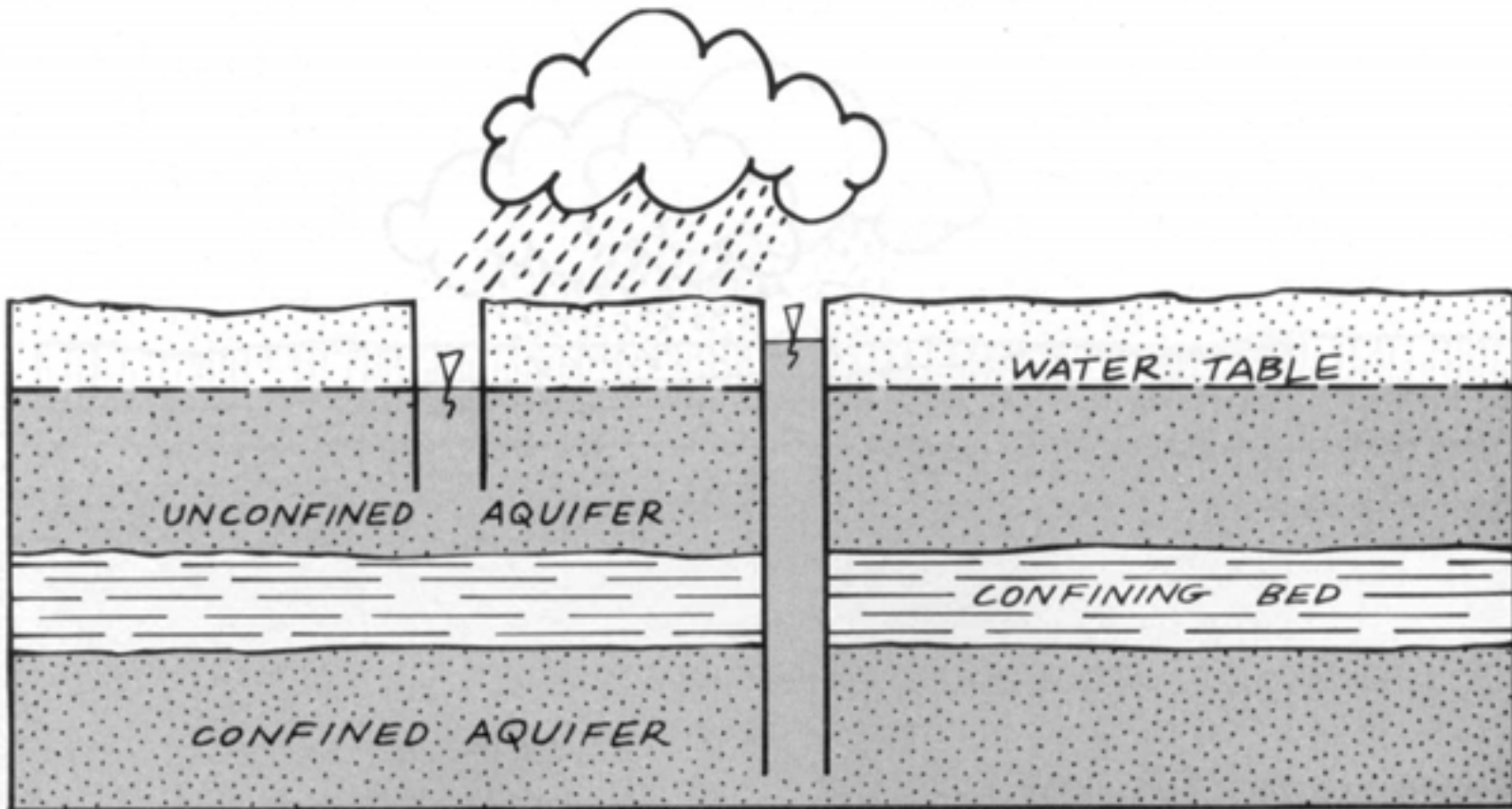
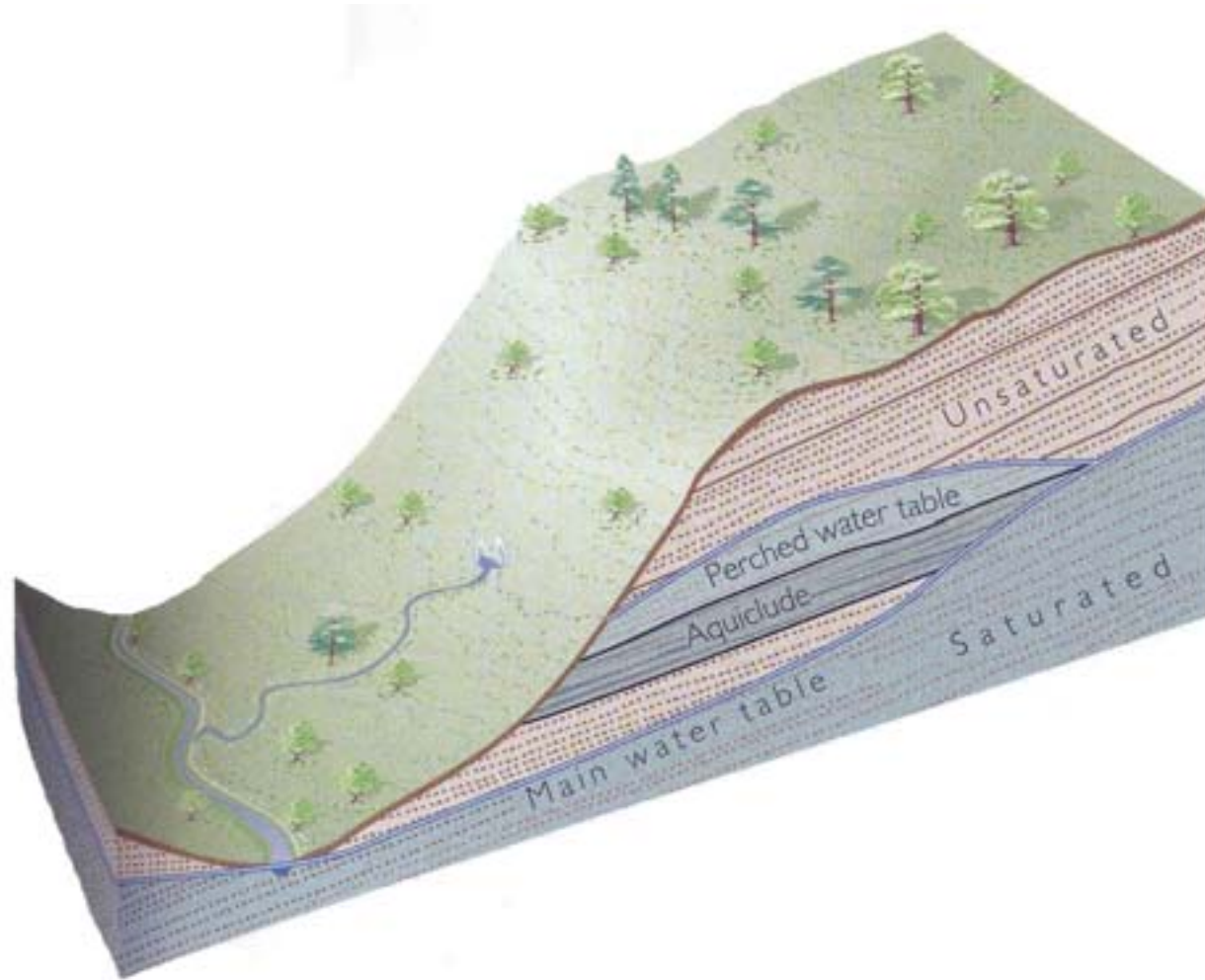


Figure 7.8 Typical occurrence of groundwater in confined and unconfined aquifers.

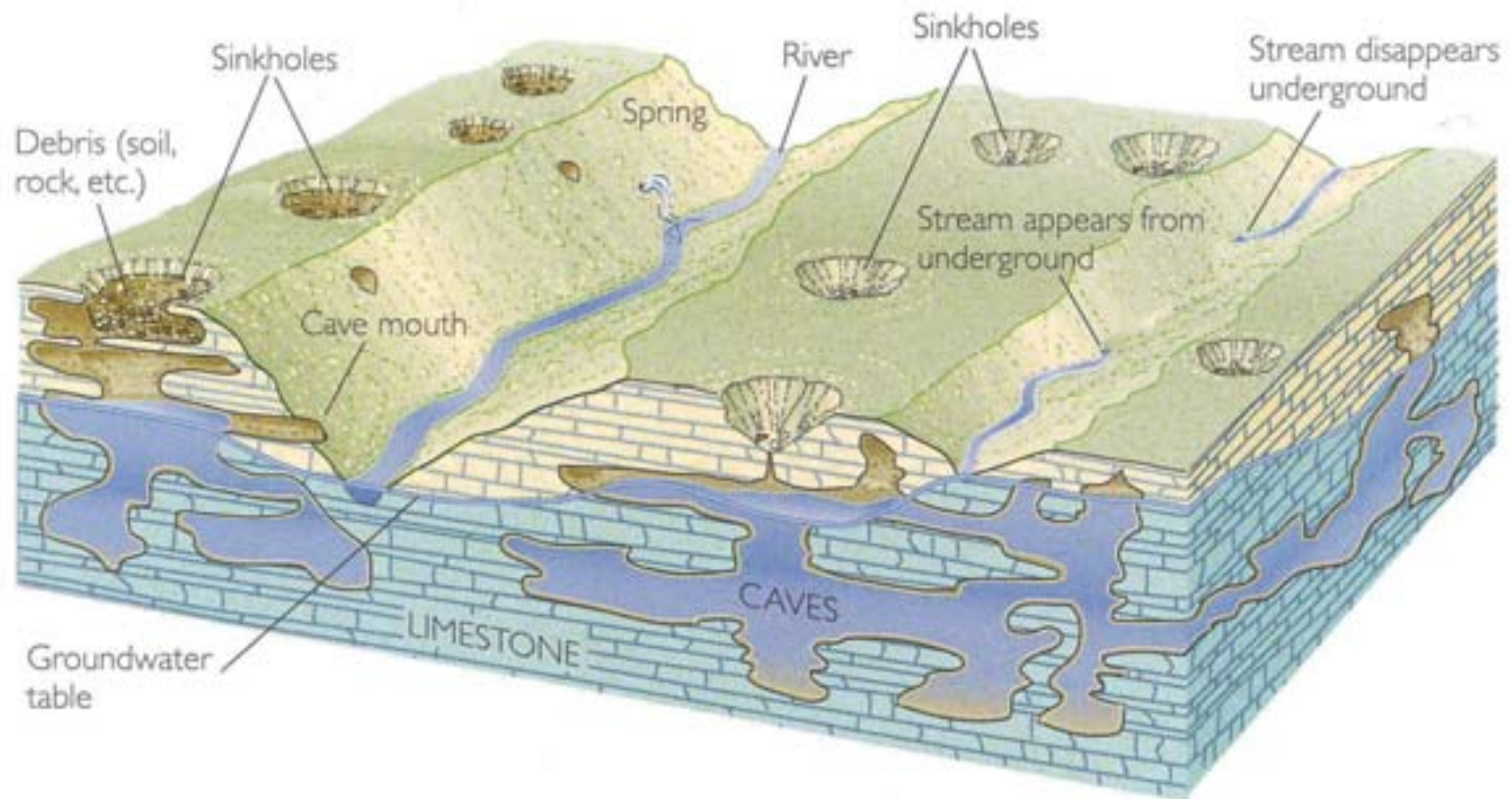
# Unidades Hidrogeológicas

## Aquífero Suspenso



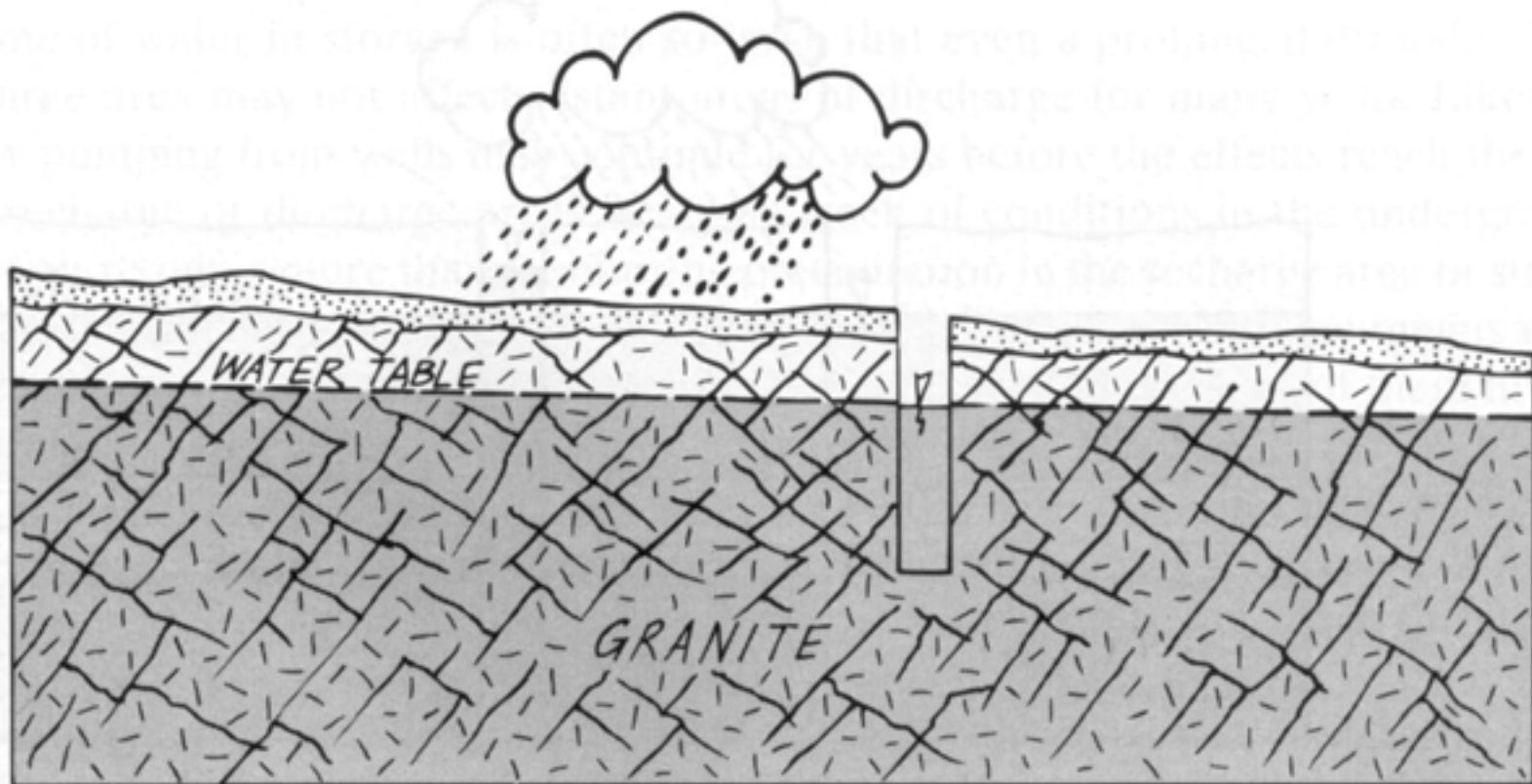
# Unidades Hidrogeológicas

## Aquífero Cárstico



# Unidades Hidrogeológicas

## Aquífero Fraturado



**Figure 7.7** Groundwater in fractured granite.

# Unidades Hidrogeológicas

## Aquífero Fraturado

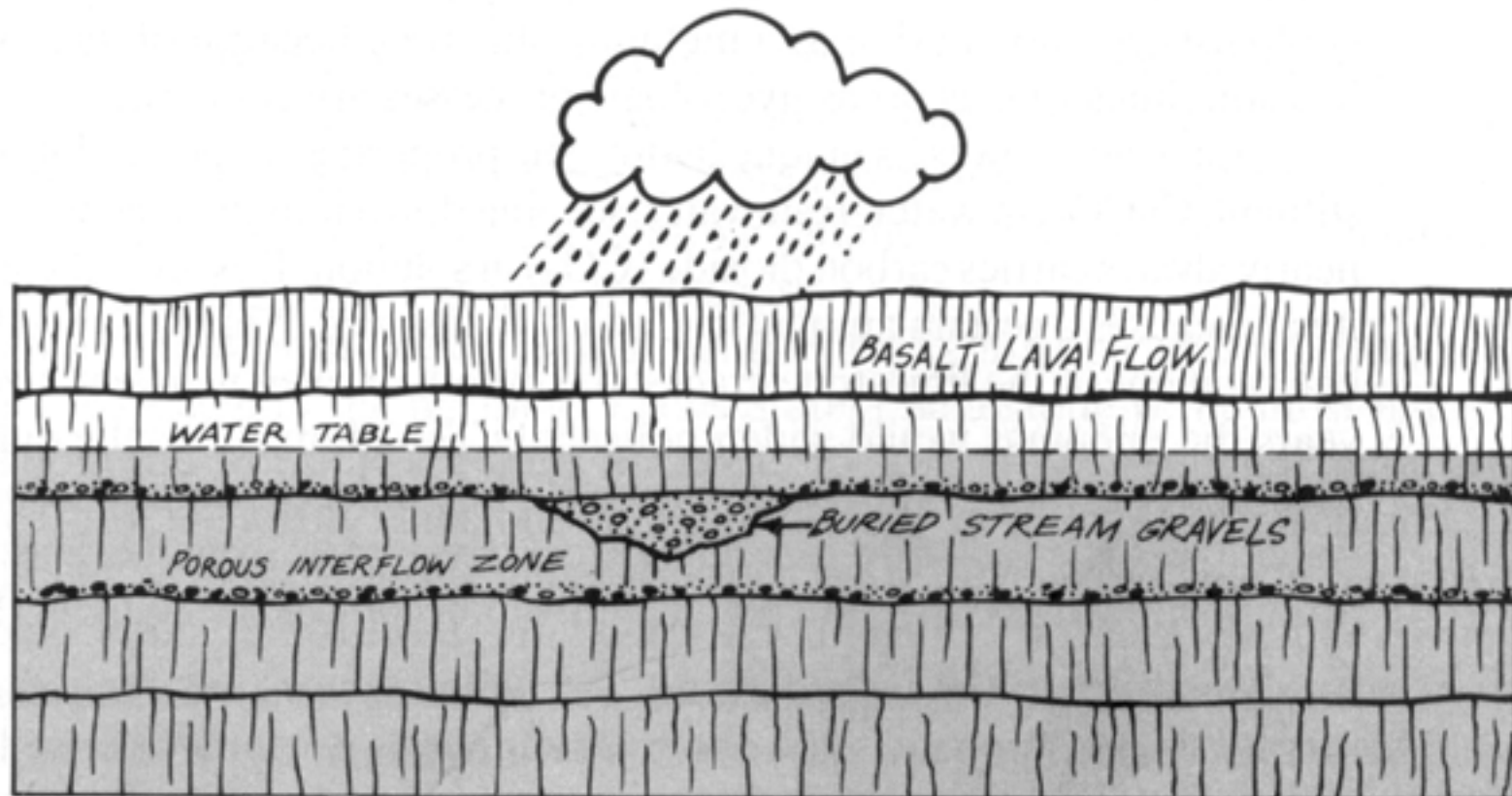
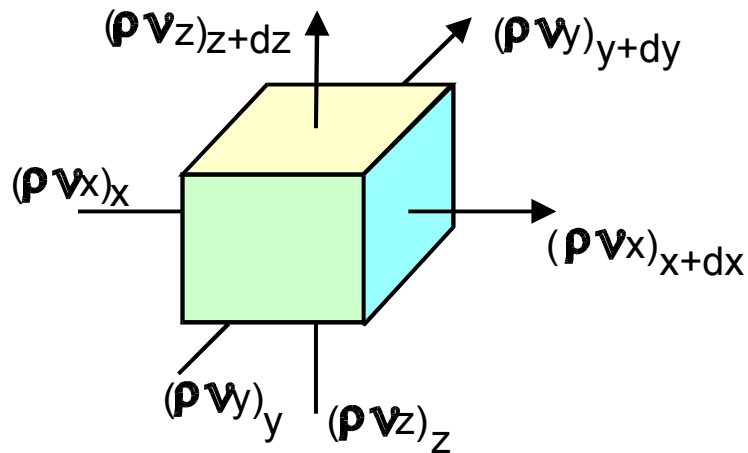


Figure 7.6 Distinctive features of basalt aquifers.

# Produtividade e Testes de Aquíferos

## EQUAÇÃO GERAL DO FLUXO



Massa entrando – Massa saindo =  
Acumulação de Massa

Equação da continuidade (Conservação da massa)

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \rho S_s \frac{\partial K}{\partial t} = 0$$

Darcy:

$$v_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad v_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$



# Produtividade e Testes de Aquíferos

## EQUAÇÃO GERAL DO FLUXO

Substituindo Eq. Darcy na Eq. Conservação da Massa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

*desprezados os termos em  $\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2$ ,  $\left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2$ ,  $\left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)^2$  e p/ meio isotrópico:  $K_x = K_y = K_z = K$*

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Fluxo Radial [ $h = h(r, t)$ ]

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Eq. da Difusividade

# Produtividade e Testes de Aquíferos

## Solução de Theis:

Condição inicial: aquífero em equilíbrio

$$h(r, 0) = h_0$$

Condição de contorno externa: aquífero infinito

$$h(\alpha, t) = h_0$$

Condição de contorno interna: vazão constante no poço ( $r_0$ )

$$Q = 2\pi T \left( r \frac{\partial h}{\partial r} \right)_{r_0} \cong 2\pi T \lim_{r \rightarrow 0} \left( r \frac{\partial h}{\partial r} \right)$$

## Solução:

$$h_0 - h(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

onde:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

# Produtividade e Testes de Aquíferos

## Solução de Cooper-Jacob

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots \right]$$

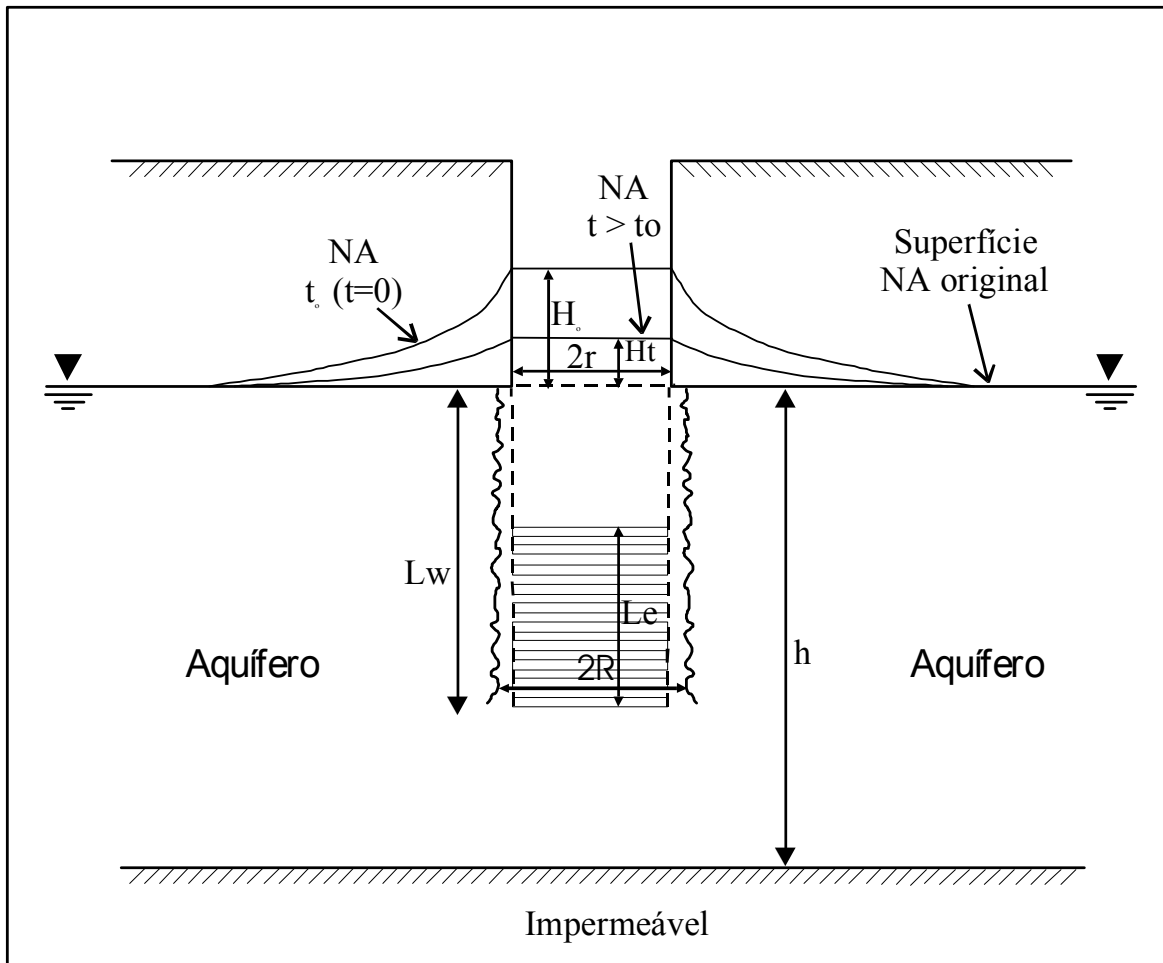
Para valores  $\downarrow\downarrow$  de  $r$  e  $\uparrow\uparrow$  de  $t$  ( $u < 0,01$ ):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ -0,5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right]$$

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

# Produtividade e Testes de Aquíferos

## Determinação de K



### Hvorslev

$$K = \frac{r^2 \ln(L_e / R)}{2L_e T_0}$$

### Bower & Rice

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R_e / R)}{2Le} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{H_0}{H_t}\right)$$

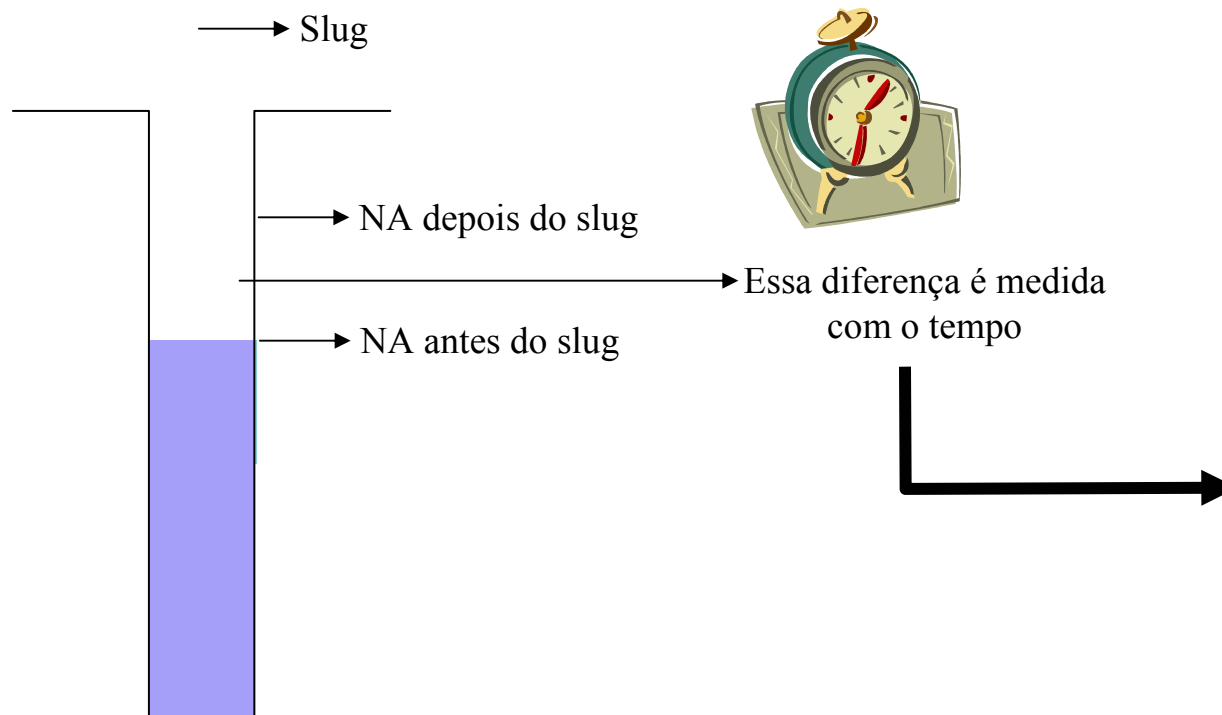
$$\ln \frac{R_e}{R} = \left[ \frac{1.1}{\ln(L_w / R)} + \frac{A + B \ln[(h - L_w) / R]}{L_e / R} \right]^{-1}$$

$$p / L_w = h,$$

$$\ln \frac{R_e}{R} = \left[ \frac{1.1}{\ln(L_w / R)} + \frac{C}{L_e / R} \right]^{-1}$$

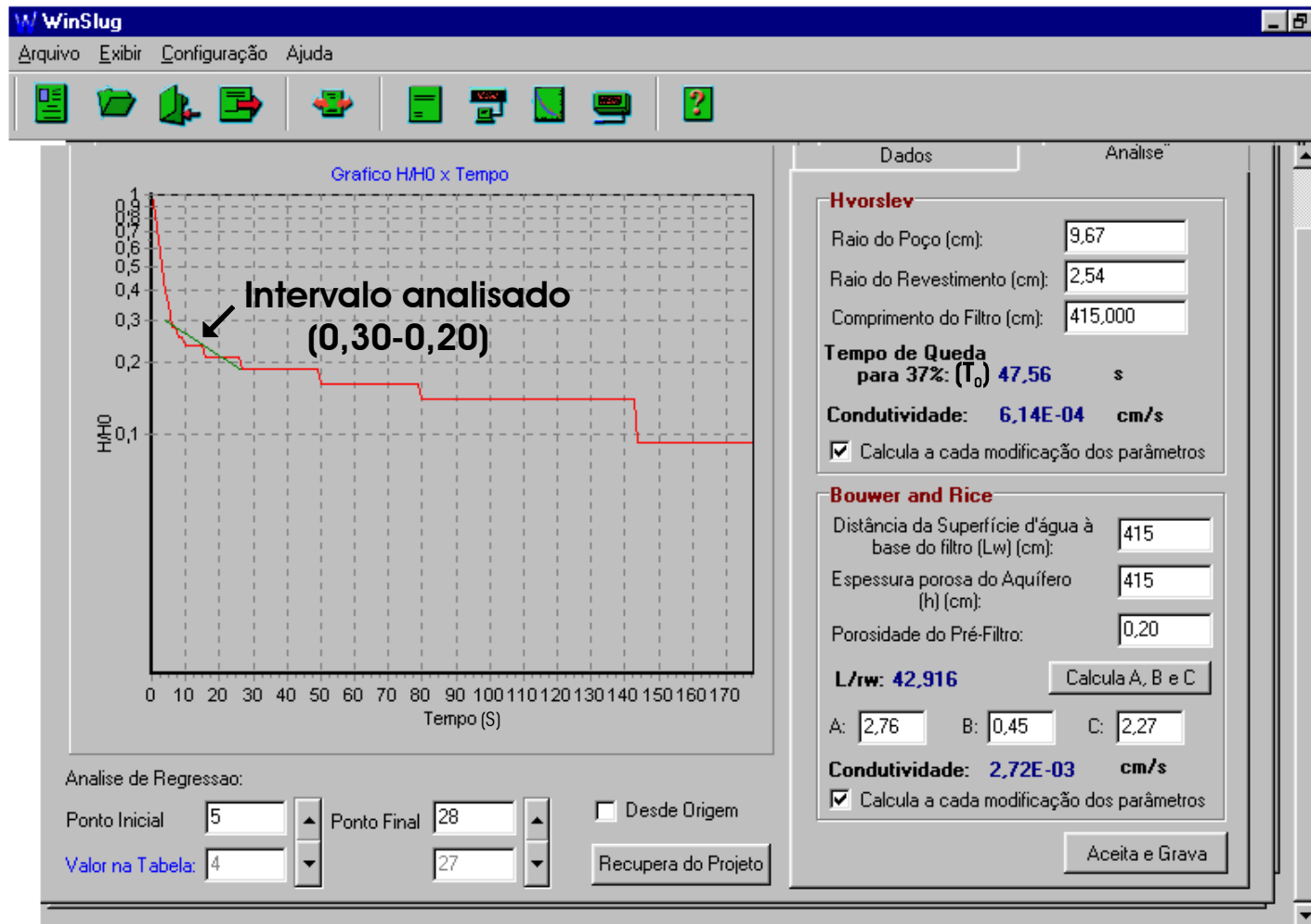
# Produtividade e Testes de Aquíferos

## Teste de Slug



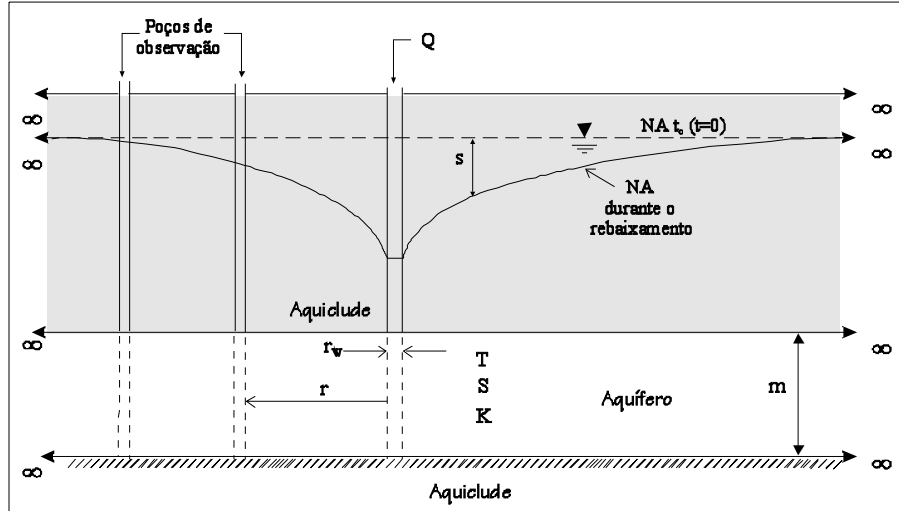
# Produtividade e Testes de Aquíferos

## Determinação de K



# Produtividade e Testes de Aquíferos

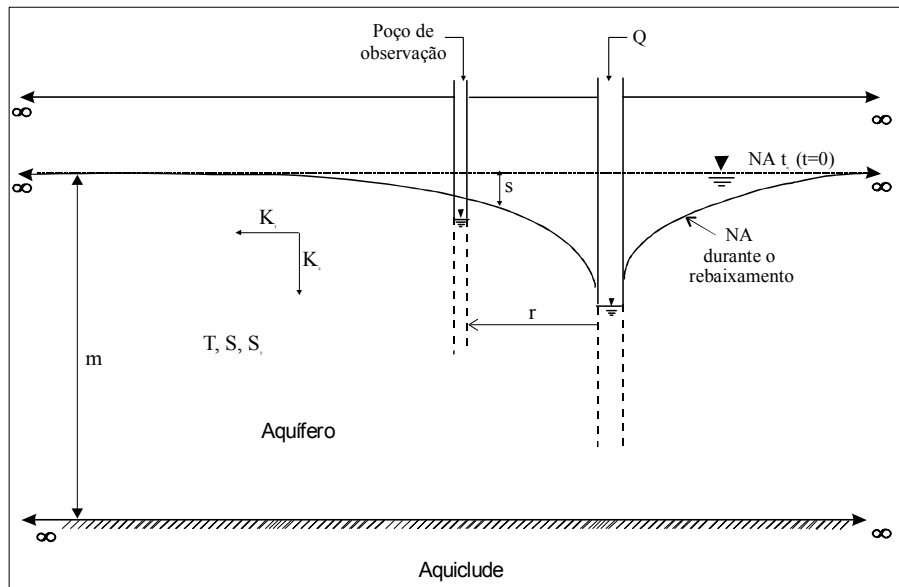
## Determinação de K, T, S



$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial s}{\partial r} = \left(\frac{S}{T}\right) \frac{\partial s}{\partial t}$$

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u)$$

$$S = \frac{4Tut}{r^2}$$



$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{K_z}{K_r} \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \left(\frac{S_s}{K_r}\right) \frac{\partial s}{\partial t}$$

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u_A, u_B, \Gamma)$$

$$S_s = \frac{4Tu_A t}{r^2}$$

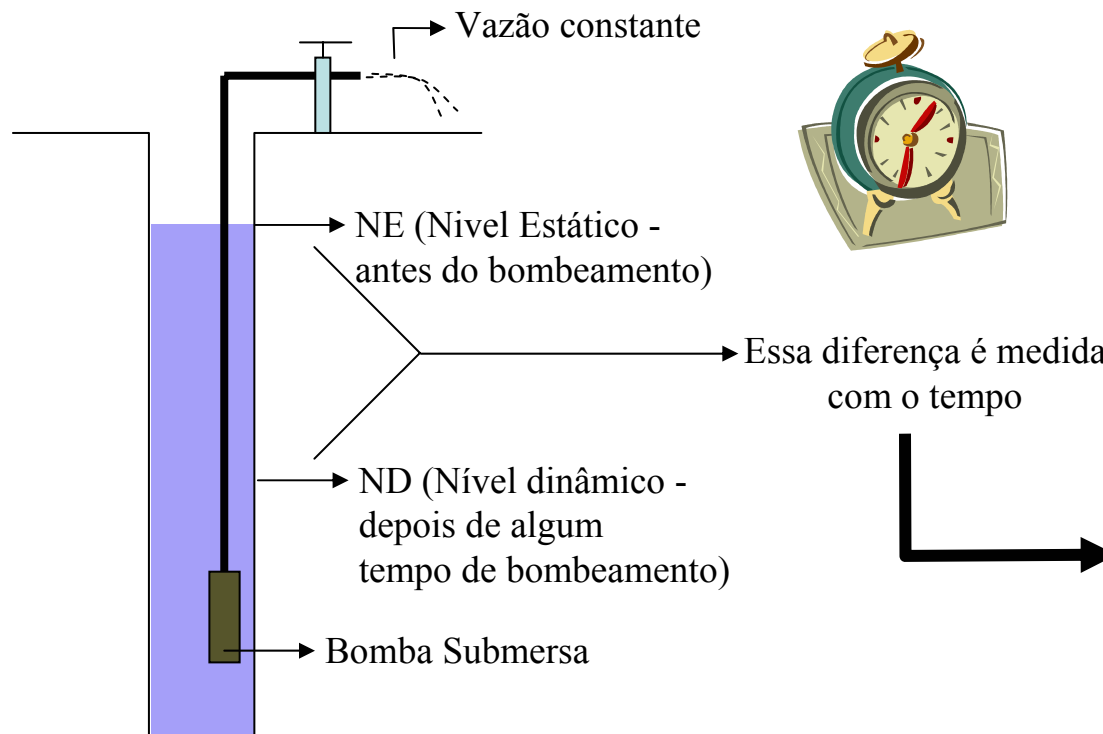
$$S_y = \frac{4Tu_B t}{r^2}$$

$$K_r = \frac{\Gamma}{m}$$

$$K_z = \frac{\Gamma m^2 K_r}{r^2}$$

# Produtividade e Testes de Aquíferos

## Teste de Bombeamento





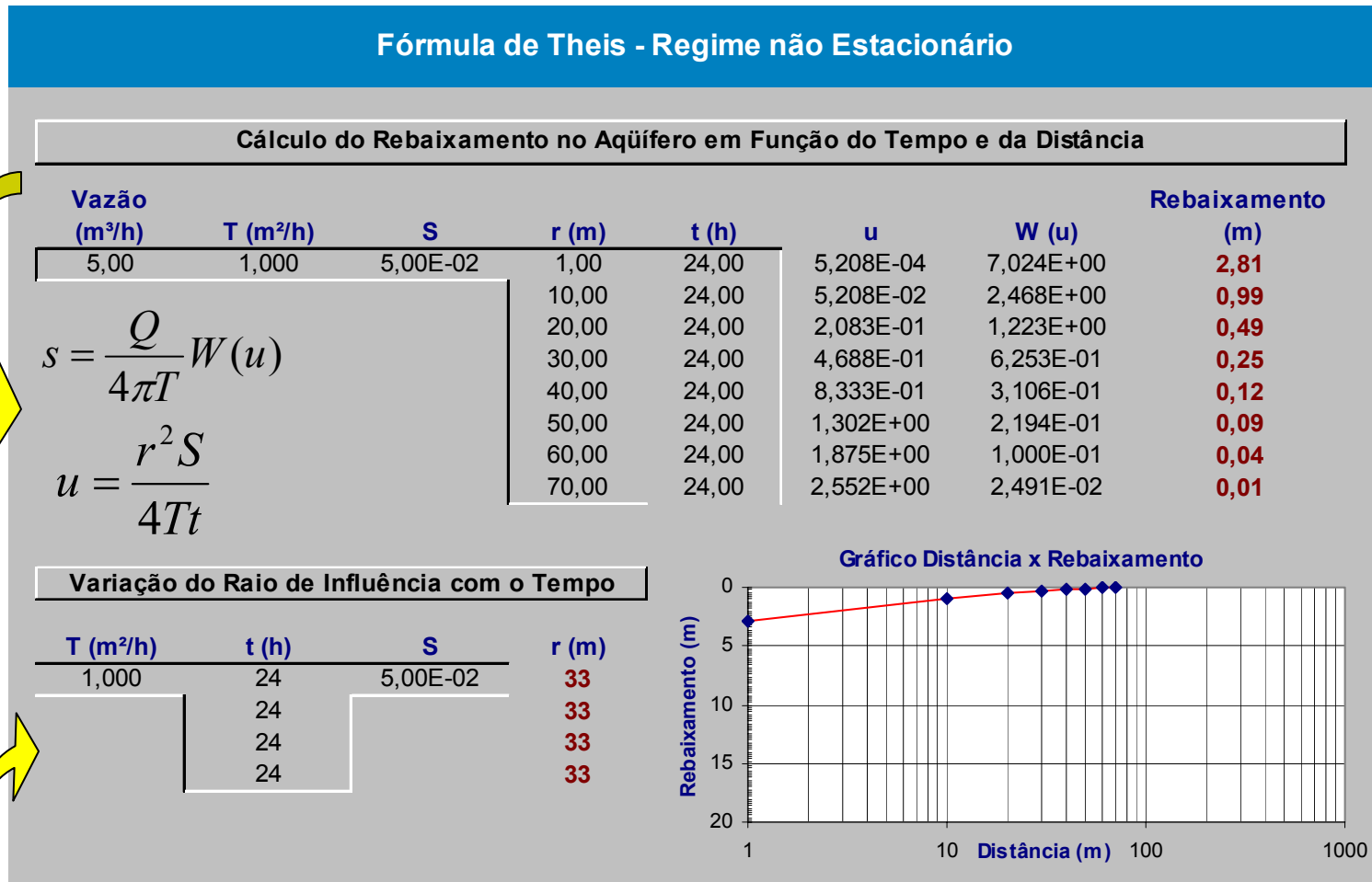
# Produtividade e Testes de Aquíferos

## Determinação de K, T, S



# Produtividade e Testes de Aquíferos

## Cálculo de raio de interferência

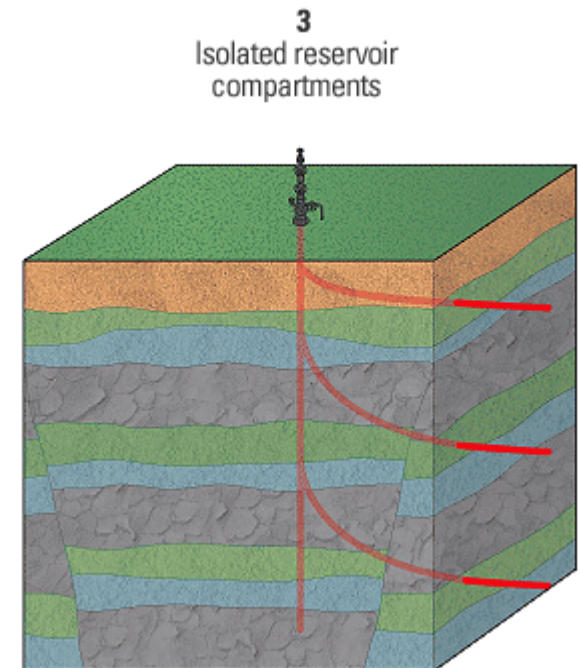


$$R = \sqrt{\frac{2,25 \cdot T \cdot t}{S}}$$

← **Transformação equação de Jacob**

# Heterogeneidades em Aquíferos

## Estrutural

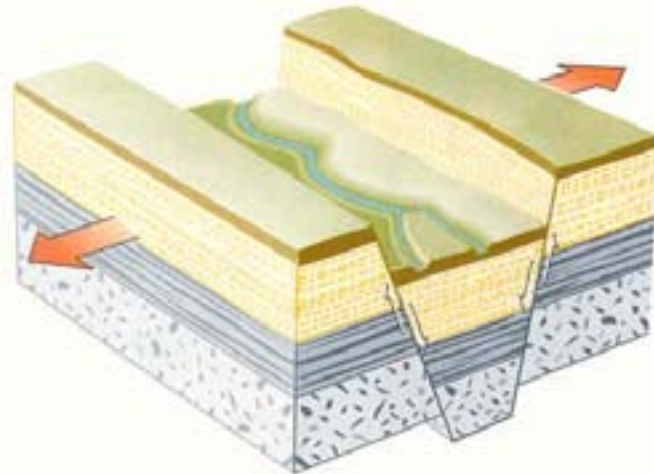


# Heterogeneidades em Aquíferos

## Estrutural

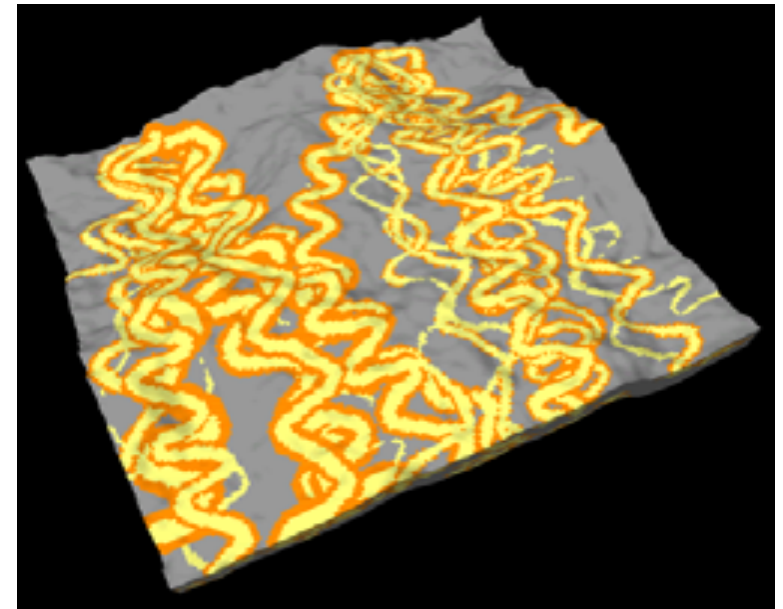
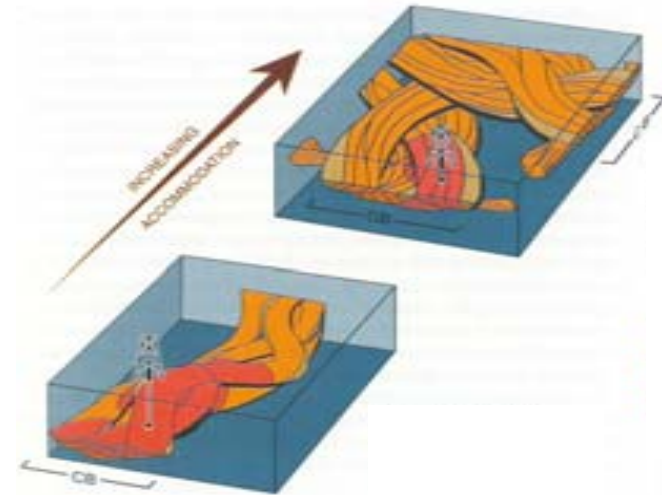


10 m



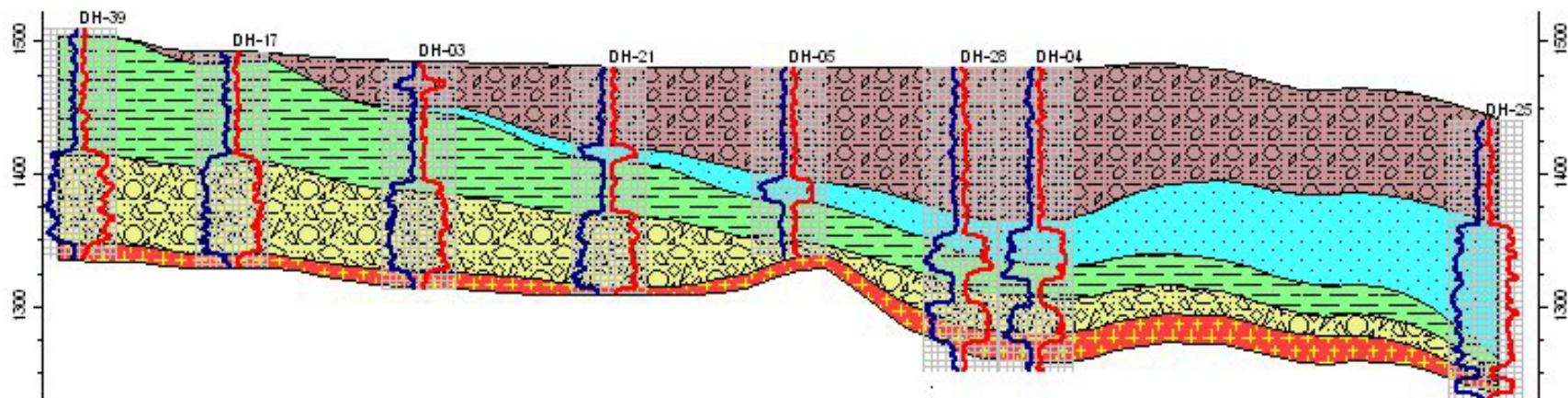
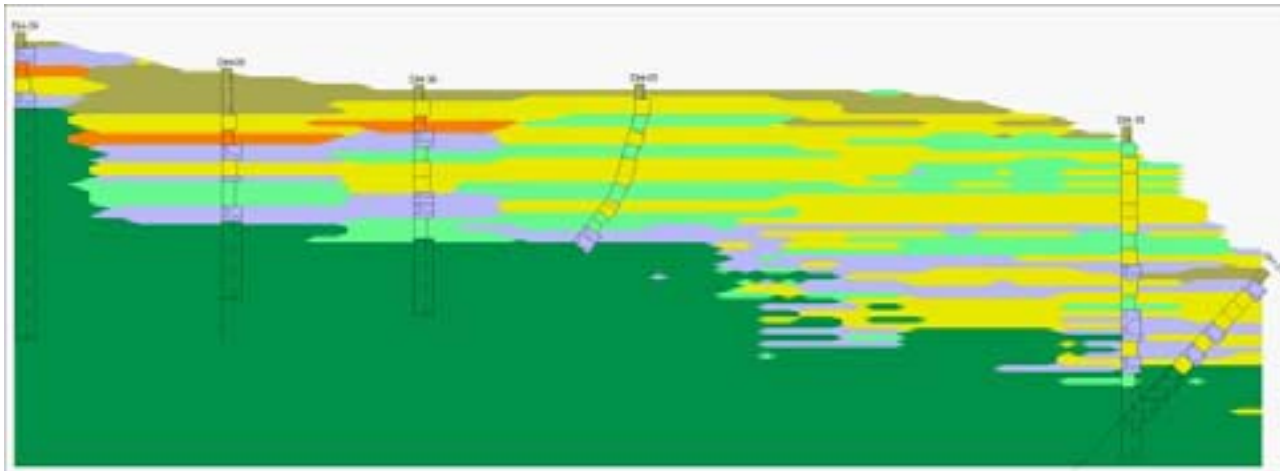
# Heterogeneidades em Aquíferos

## Estratigráfica

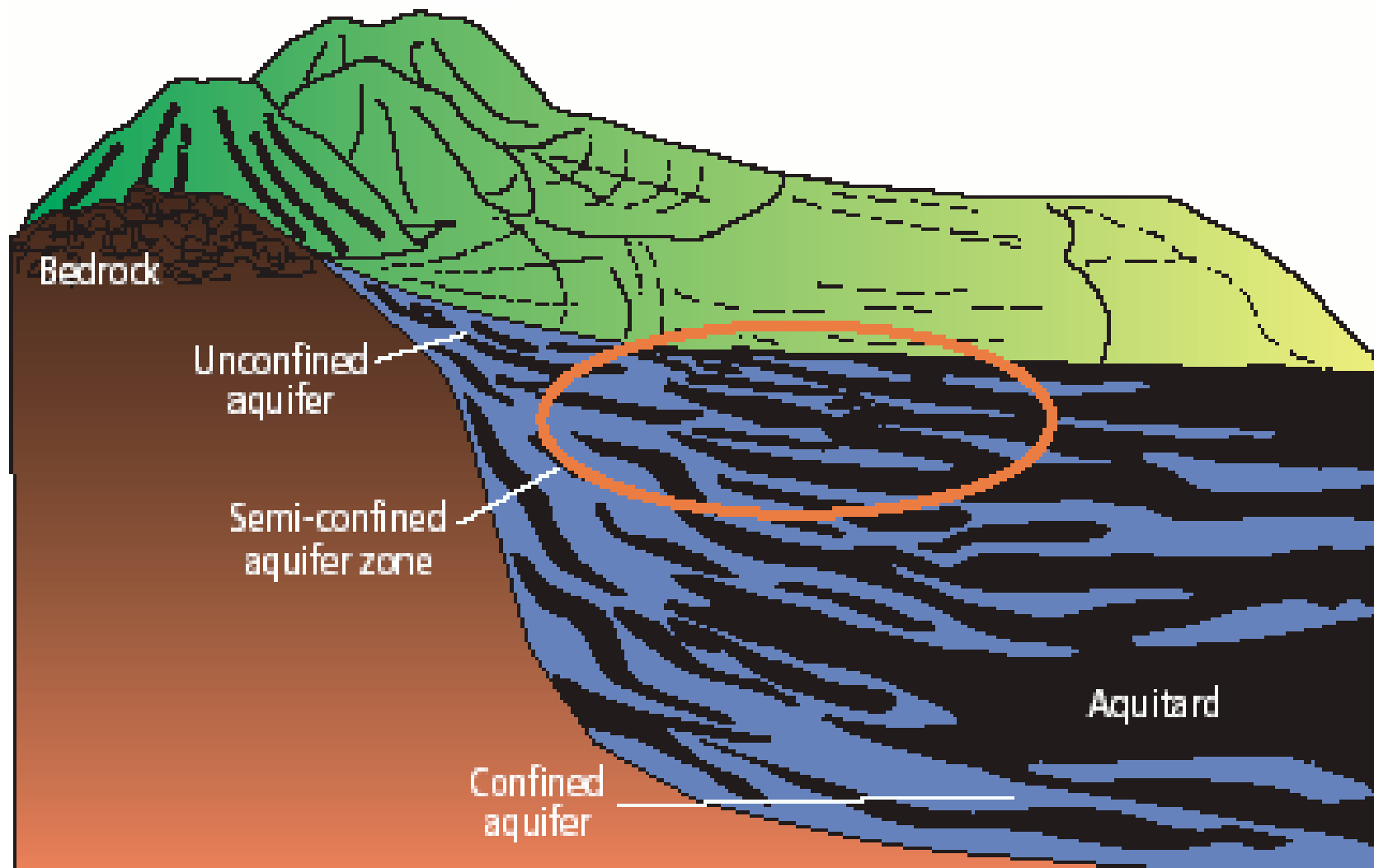


# Heterogeneidades em Aquíferos

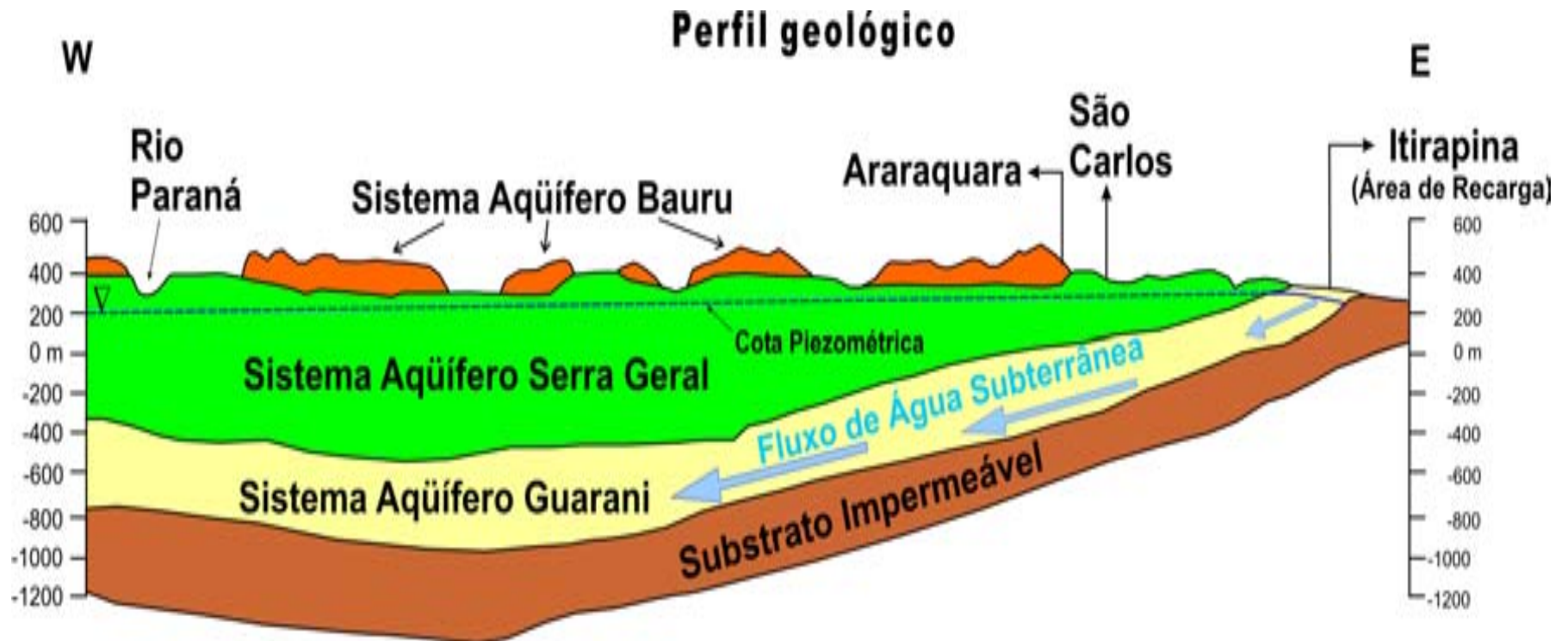
## Estratigráfica



# Heterogeneidades em Aquíferos

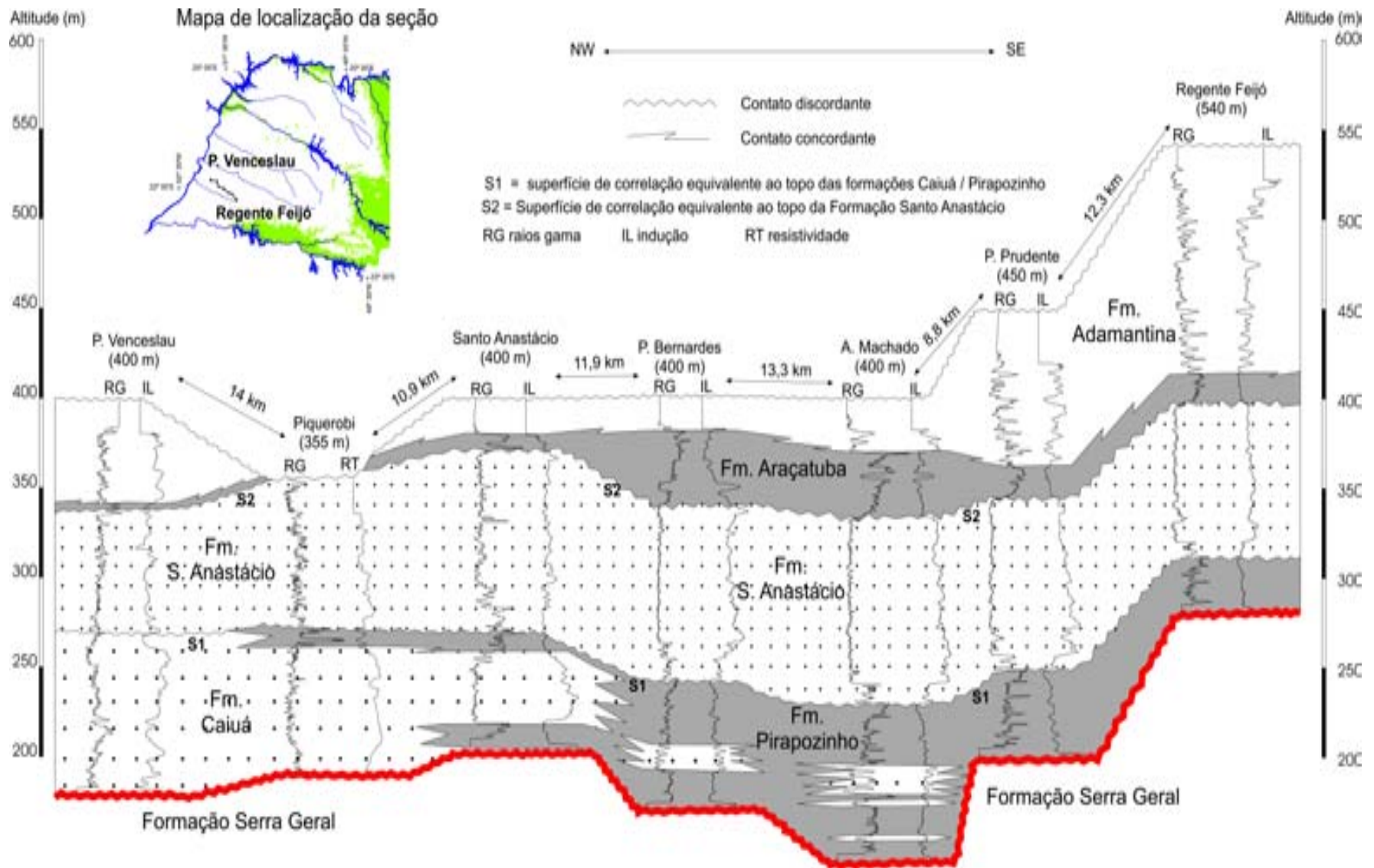


# Heterogeneidades em Aquíferos





# Heterogeneidades em Aquíferos



# Parâmetros Importantes para Classificação de Aquíferos

- **Condutividade Hidráulica**
- **Espessura Saturada**
- **Dimensões da Unidade Portadora de Água Subterrânea - (UPAS)**