

# 16 – Escoamento Subterrâneo

- Escoamento permanente em aquíferos confinados e não confinados
- Exploração de poços

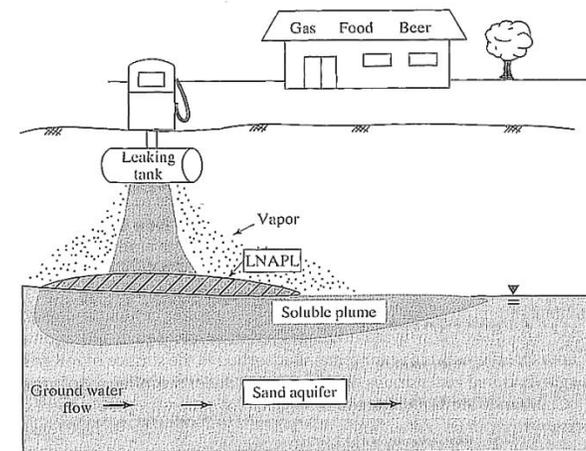
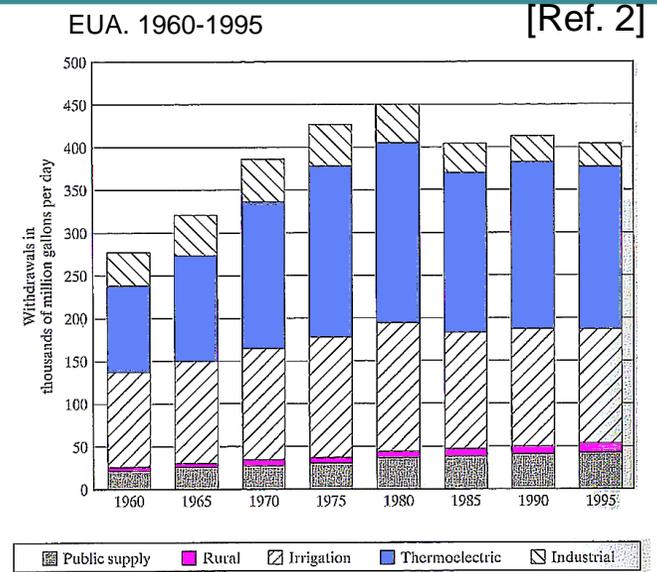
# Hidrologia de Água Subterrânea

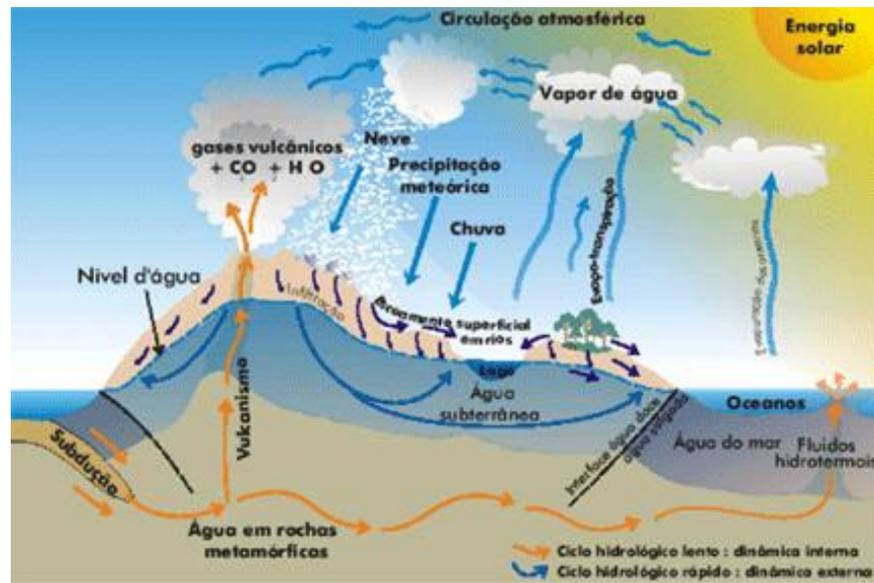
16

Ciência da ocorrência, distribuição e movimento da água abaixo da superfície do solo.

- Importância do estudo para engenharia:
  - Aquífero = Fonte de água potável
  - Tratamento da água subterrânea contaminada
    - Propriedades do meio poroso e geologia da subsuperfície governam **taxas e direção do fluxo** da água subterrânea no sistema aquífero
  - Medidas de proteção

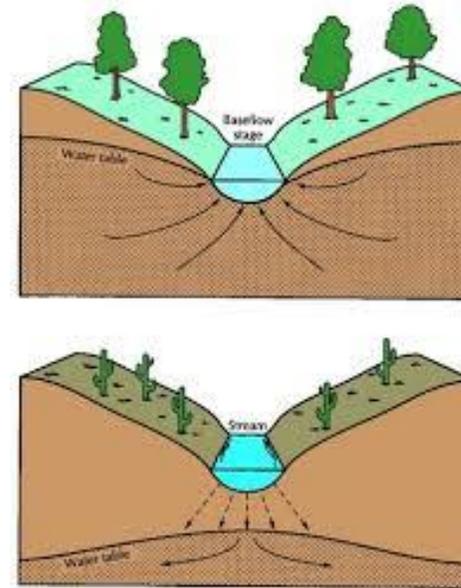
Final da década de 70 e início da 80:  
descoberta de vários perigos e contaminações





Ciclo da água

Estiagem prolongada

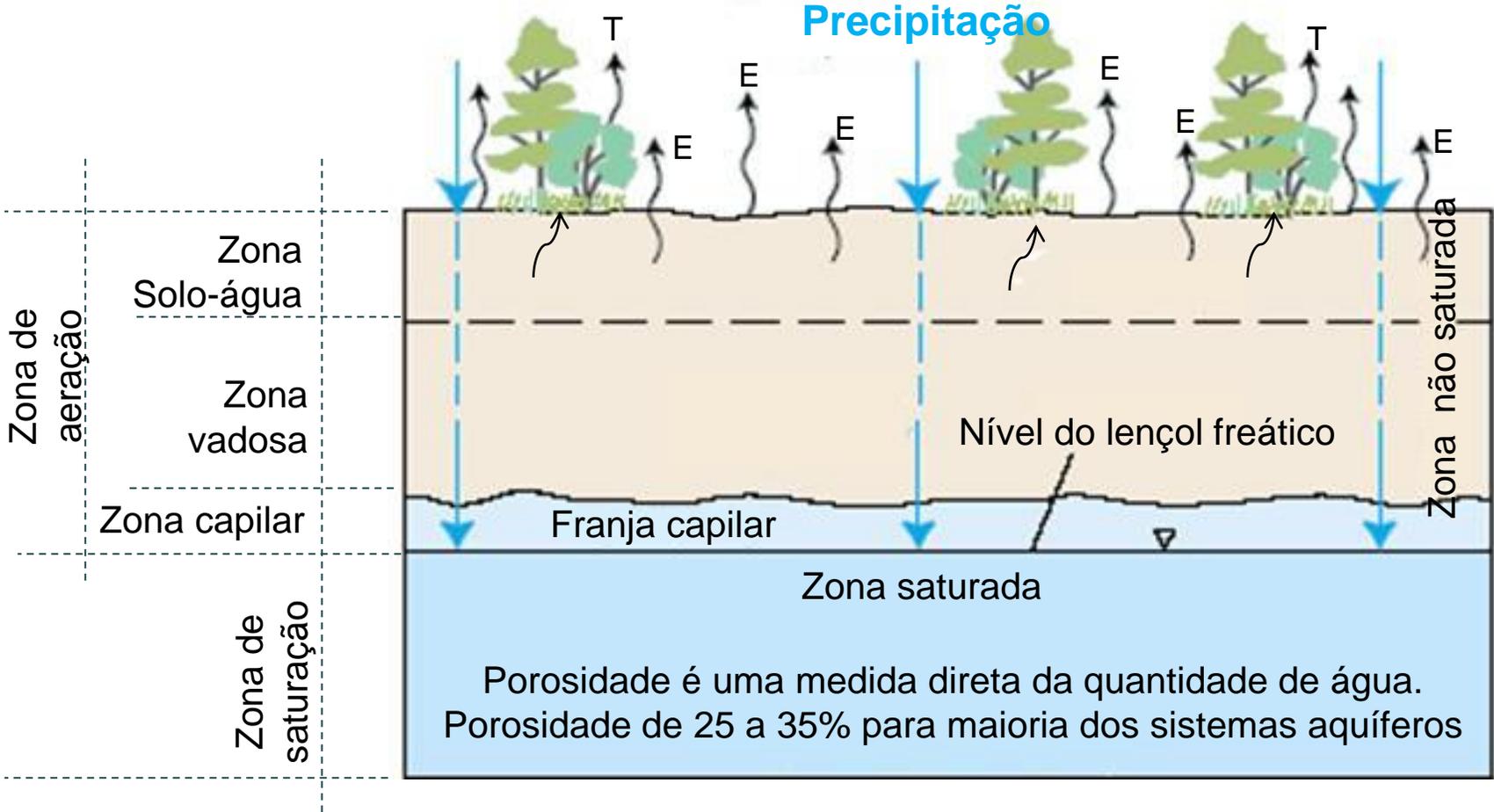


Águas Subterrâneas (DRM)



Ler!

# Distribuição vertical da água subterrânea



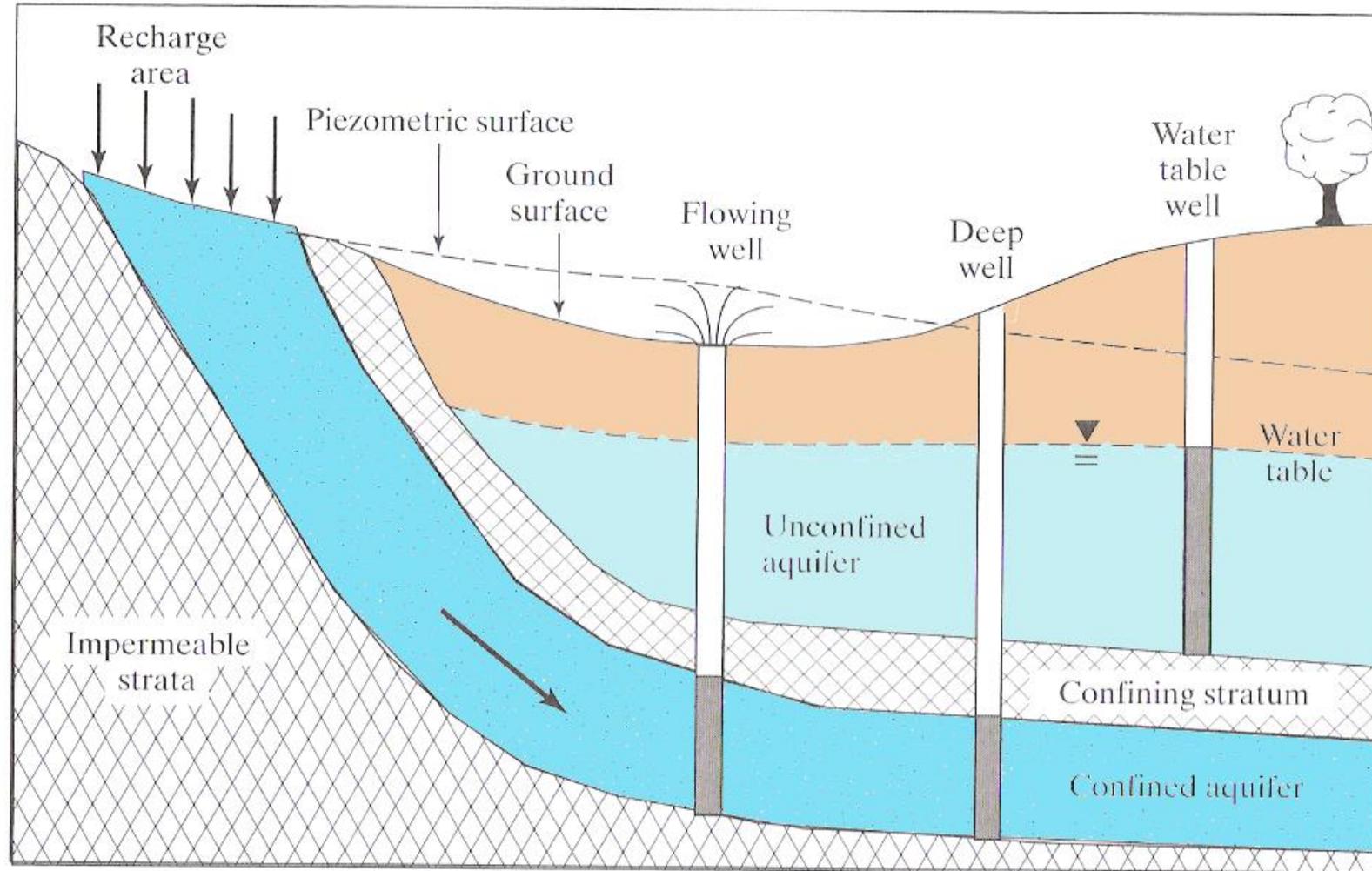
# Sistemas aquíferos

16

- **Aquífero**
  - Formação que contém material permeável suficiente para admitir quantidades suficientes de água e permitir seu escoamento
- **Aquiclude**
  - Unidades relativamente impermeável, não permitindo que a água flua em seu meio.
  - Ex.: argilas, que podem atuar como camada confinante; certas rochas vulcânicas, que possuem poros, mas que não se comunicam entre si.
- **Aquitarde**
  - Estrato com baixa permeabilidade, como uma argila siltosa, que pode permitir passagem de água de um aquífero para outro.

# Aquíferos confinados e não confinados

16



# Movimento da água subterrânea

16

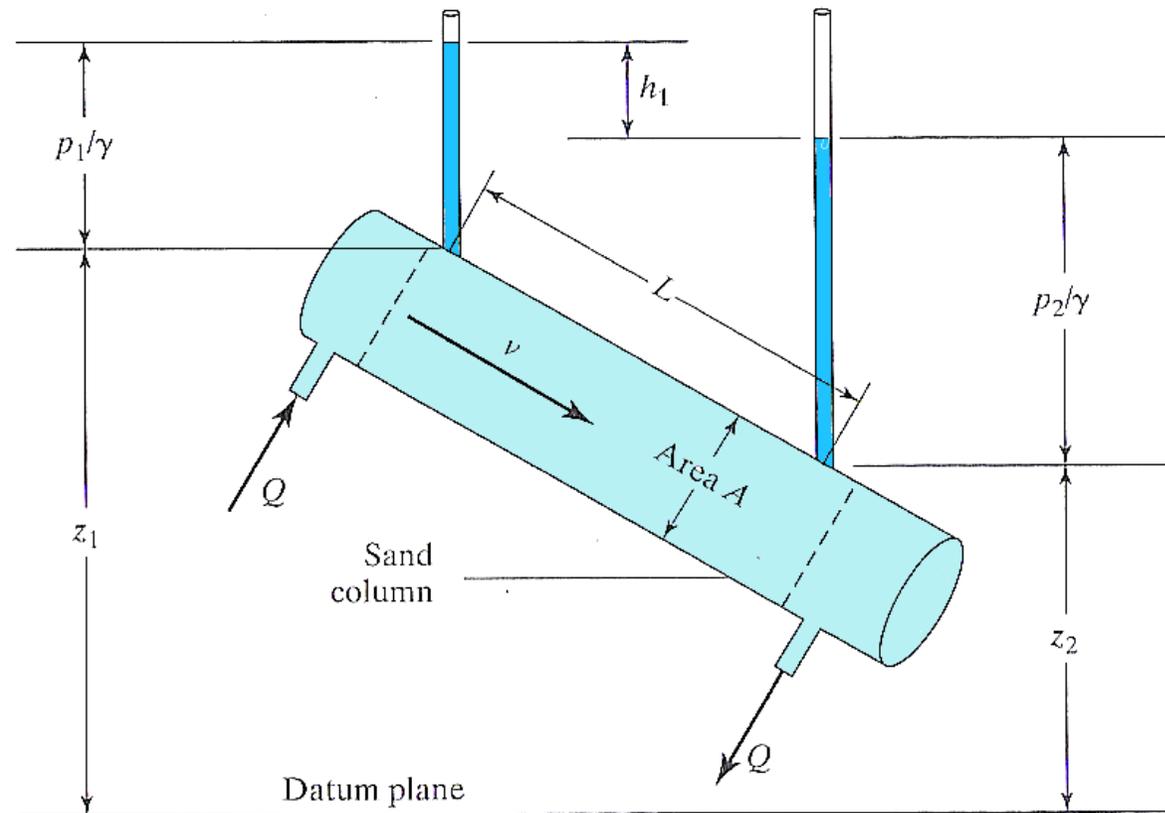
É bem estabelecido pelos princípios hidráulicos registrados por **Henri Darcy** (1856)

**Experimentos:** Perda de carga através de coluna de areia:

Energia total para o sistema → Eq. de Bernoulli

Velocidades são muito pequenas em meio poroso → cargas de velocidade podem ser negligenciadas

Perda de carga independe da inclinação da coluna



## Lei de Darcy:

Taxa de fluxo através de meio poroso é:

- proporcional à carga hidrostática (H) e
- inversamente proporcional a espessura da camada (L).

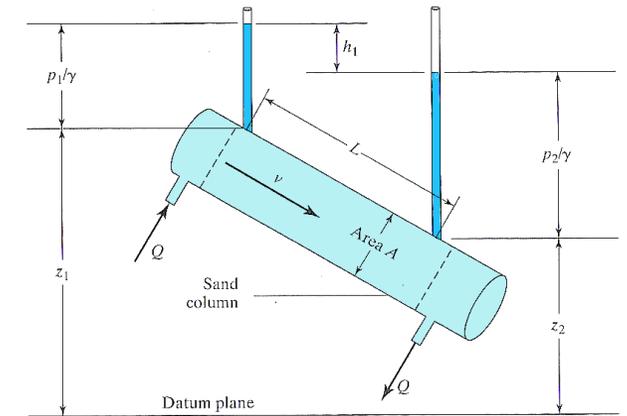
$$V = \frac{Q}{A} = -K \frac{dH}{dL}$$

Constante de proporcionalidade:  
Condutividade hidráulica

Ocorrência de fluxo no sentido dos valores  
decrecentes do potencial H

Lei de Darcy:

- Deve perder precisão com aumento da velocidade do fluxo.
- Aplica-se a fluxo laminar
- Experimentos indicam que Lei é válida para Número de Reynolds menores que 1 (talvez até 10).



## CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K):

Permeabilidade

Velocidade de filtração da água em um solo saturado com **perda de carga unitária**.

Indicador da habilidade do meio poroso em transmitir água.  
Depende de uma variedade de fatores físicos.

Embasamento do Aquífero	K (cm/s)
Sedimentos Arenosos	$10^{-2}$
Sedimentos Siltosos	$10^{-4}$
Sedimentos Argilosos	$10^{-7}$

### Determinação:

Em zonas saturadas pode ser determinada por várias técnicas em laboratório e no campo (teste de bombeamento, teste com traçadores).

## TRANSMISSIVIDADE (T):

É definida como o produto da condutividade hidráulica e a profundidade média saturada do aquífero.  
É um termo usado em hidráulica de águas subterrâneas, aplicado a aquíferos confinados

# Escoamento em regime permanente

16

## Admitindo:

- a validade da Lei de Darcy  $v_s = -K \frac{dH}{ds}$
- homogeneidade e isotropia dos meios porosos

$$\begin{aligned} v_x &= -K \frac{\partial H}{\partial x} \\ v_z &= -K \frac{\partial H}{\partial z} \end{aligned}$$

## Regime permanente:

Equação da continuidade  $dq = 0$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0$$

Laplaciano nulo do potencial  
→ Condição de irrotacionalidade do movimento

# Escoamento permanente

## Aquífero confinado horizontal

### Espessura constante

$$v_x = -K \frac{dH}{dx}$$

$$v_z = 0$$

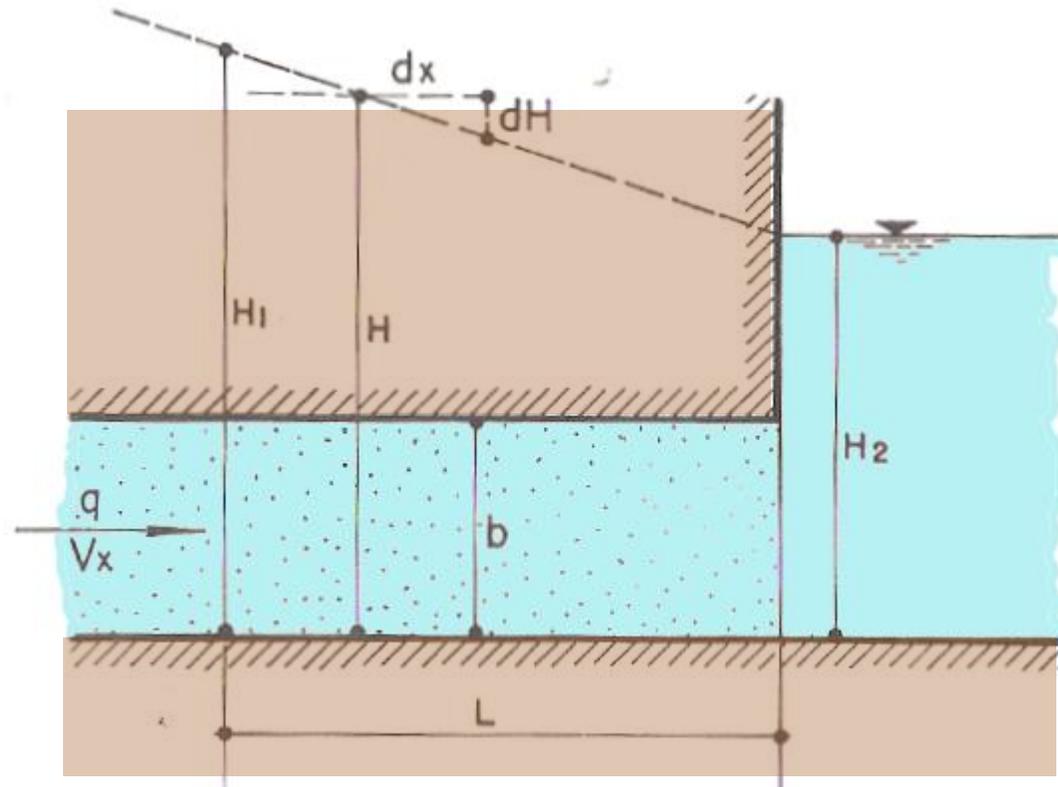
$$\frac{d^2H}{dx^2} = 0$$

**Vazão** por unidade de largura:

$$q = v \cdot A$$

$$q = -Kb \frac{dH}{dx}$$

Constante:  $\frac{dH}{dx} = \frac{H_2 - H_1}{L}$



# Escoamento permanente

## Aquífero freático sem recarga

16

### Entre dois canais de cotas diferentes

Admite-se hipóteses simplificadoras de Dupuit (1863):

$$\frac{dH}{ds} = \frac{dH}{dx}$$
$$\frac{dH}{dx} = \frac{dh}{dx}$$

Admissível para variações lentas do potencial

Correspondente a linhas de corrente horizontais e equipotenciais verticais

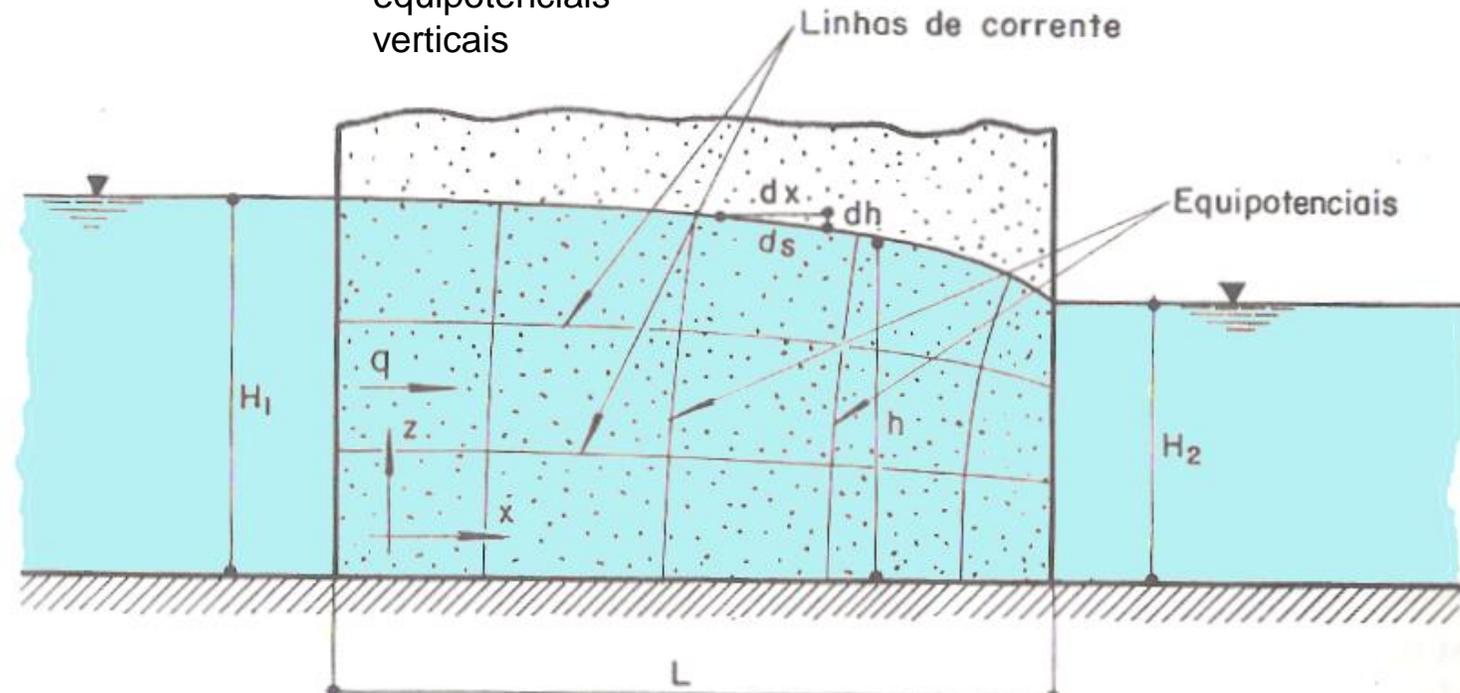
**Vazão:**

$$q = -Kh \frac{dh}{dx}$$

Integrando:

$$q = K \frac{H_1^2 - H_2^2}{2L}$$

- Superfície livre é somente levemente inclinada
- Linhas de corrente podem ser consideradas horizontais e as equipotenciais verticais
- Declividades da superfície livre e gradiente hidráulico são iguais.



As hipóteses de Dupuit são aceitáveis ao longo do escoamento com exceção da região muito próxima de efluxo onde a curvatura dos filetes é mais sensível.

# Exploração de Poços

## Aquífero CONFINADO

de espessura constante e extensão indefinida na direção horizontal

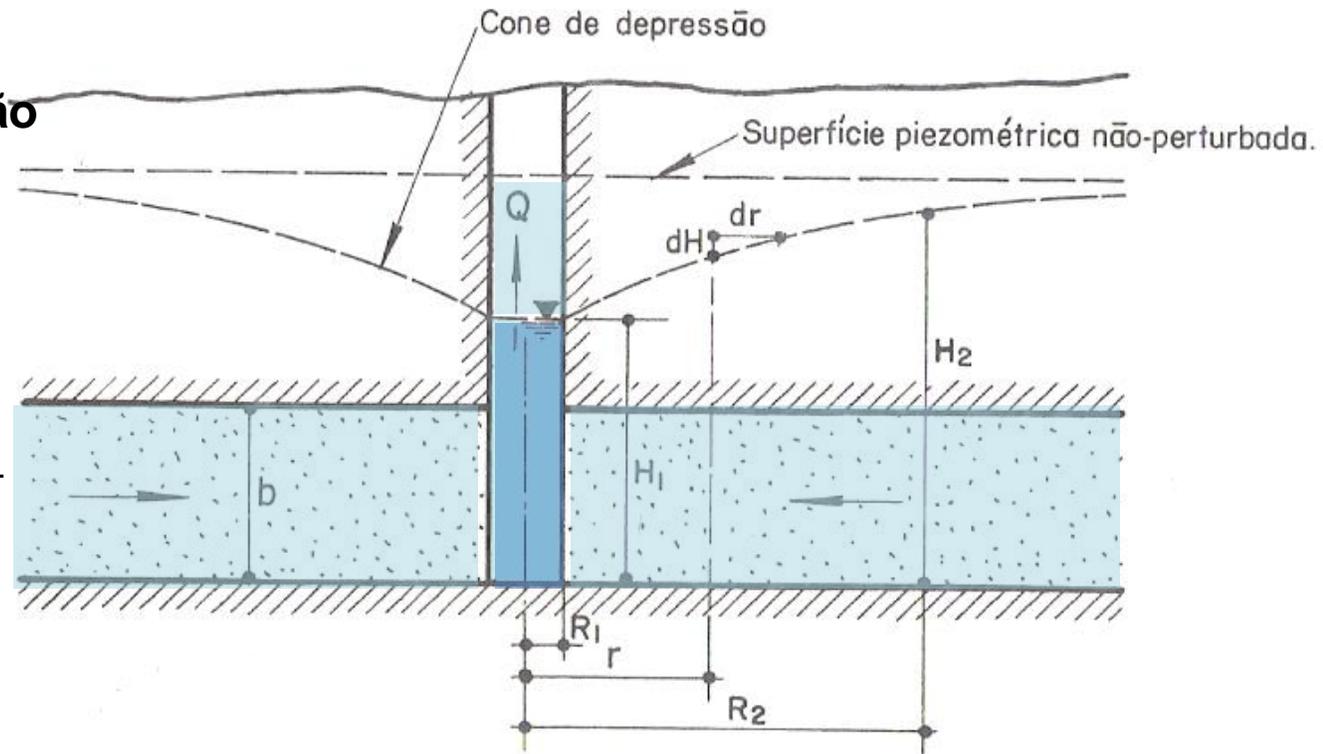
Regime permanente

### Vazão de extração

$$Q = K(2\pi r b) \frac{dH}{dr}$$

Integrando:

$$Q = 2K\pi b \frac{H_2 - H_1}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

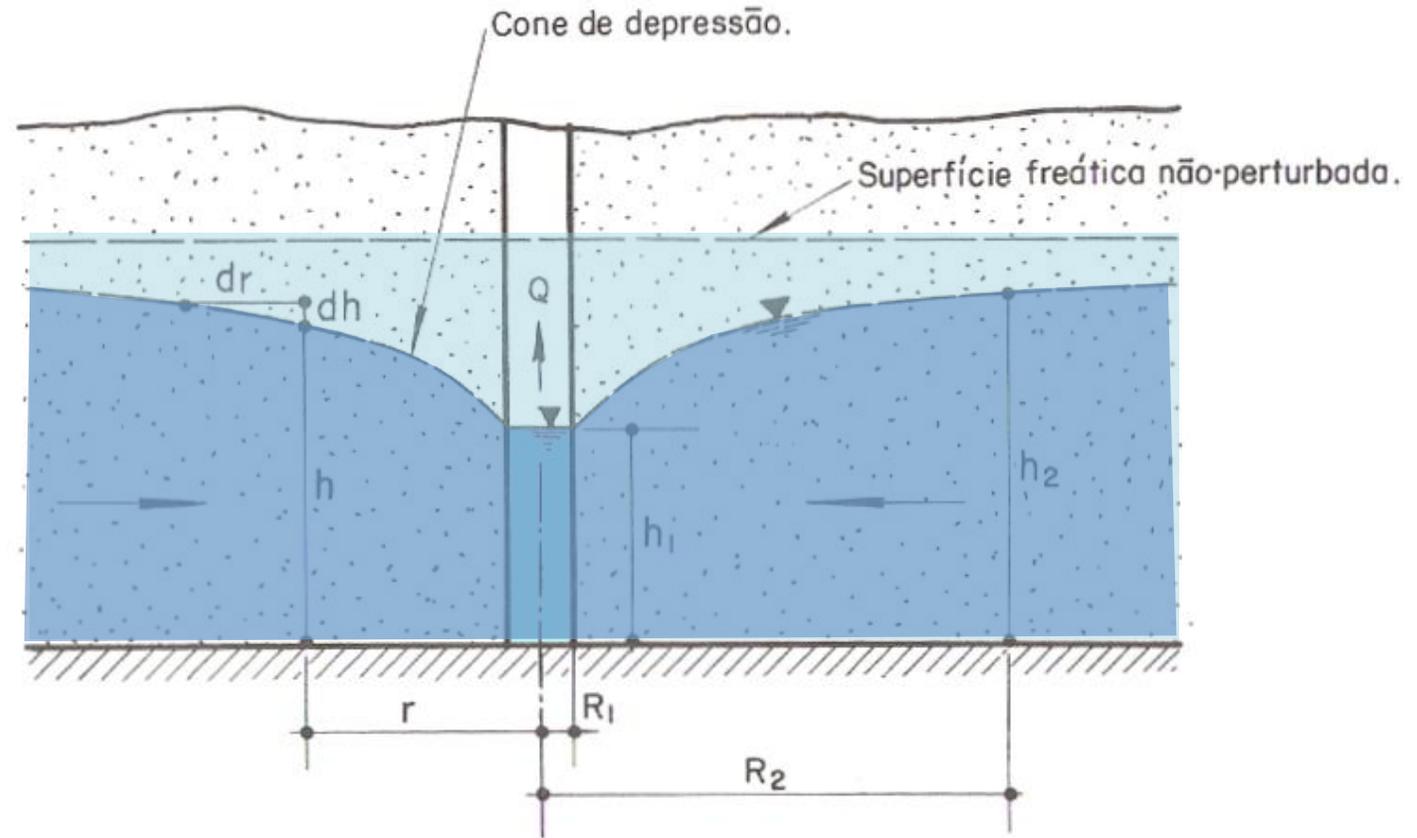


## Aquífero freático

Regime permanente

### Hipóteses simplificadoras de Dupuit:

- Despreza-se curvatura dos filetes
- Admite-se igualdade entre declividade radial da superfície freática e o gradiente hidráulico



**Vazão de extração:**

$$Q = K(2\pi r h) \frac{dh}{dr} \xrightarrow{\text{Integrando}} Q = K\pi \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

# Literatura

---

16

- [Ref. 1] Pinto et al. 1976. Hidrologia Básica. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda.
- [Ref. 2] Bedient, P.B.; Huber, W.C. & Vieux, B.E. Hydrology and Floodplain Analysis. Pearson. 5ª Edition