



**PHA 3523
TECNOLOGIAS DE
REMEDIÇÃO DE ÁREAS
CONTAMINADAS**

PROFESSORA AMARILIS LUCIA CASTELI FIGUEIREDO GALLARDO

PHA



AULA 5

- **HIDROGEOLOGIA**
- **MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA INVESTIGAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS – PROFESSORES CONVIDADOS
OTÁVIO BRASIL E LAPS - IPT**

AGENDA DA AULA DE HOJE: ÁGUA SUBTERRÂNEA E MÉTODOS GEOFÍSICOS

- **ÁGUA SUBTERRÂNEA**
- **MÉTODOS GEOFÍSICOS**

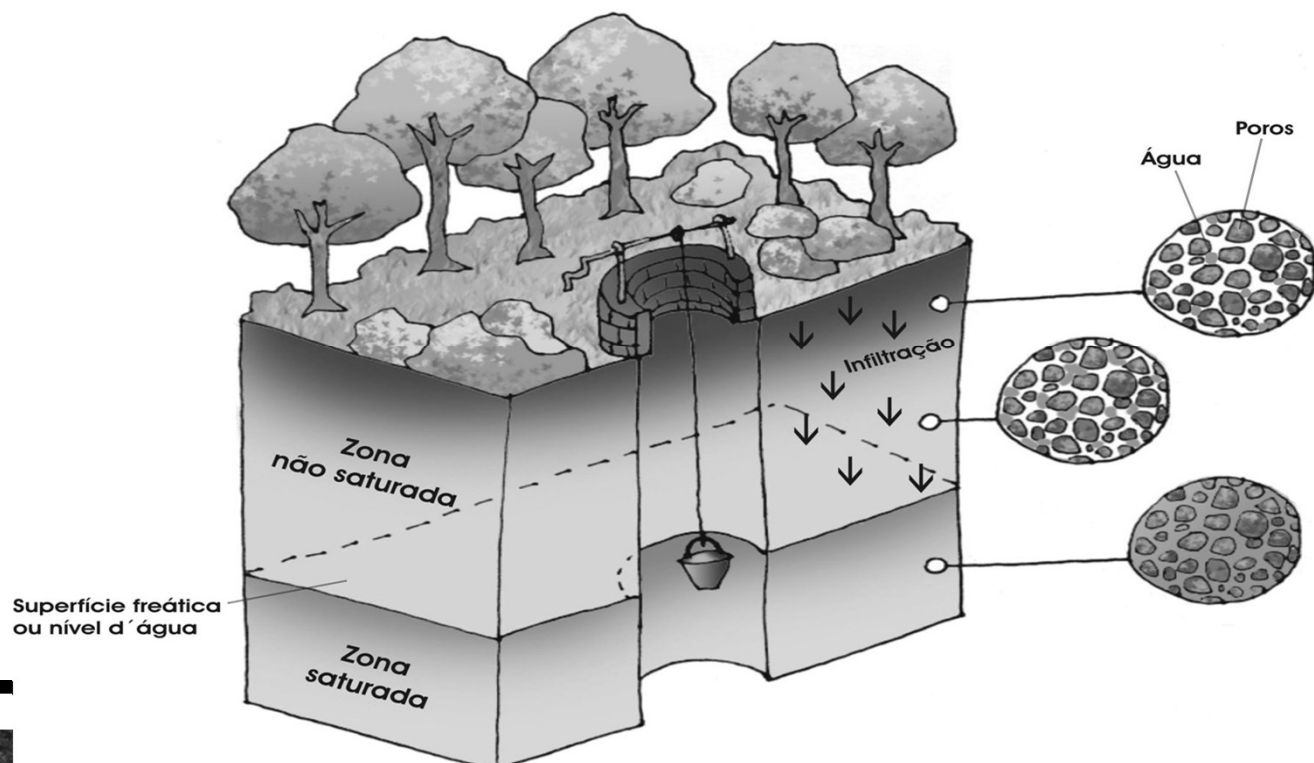
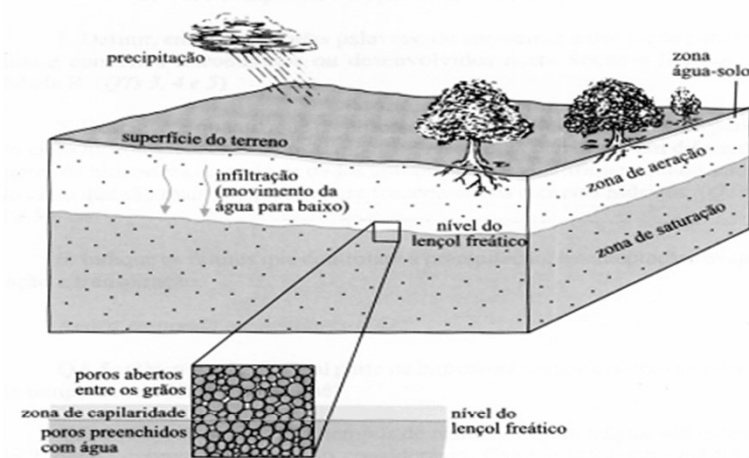
ÁREAS CONTAMINADAS E ÁGUA SUBTERRÂNEA

- [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=8ZJB_1YPXOM](https://www.youtube.com/watch?v=8ZJB_1YPXOM)
- [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=GAZNBt3YLCS](https://www.youtube.com/watch?v=GAZNBt3YLCS)

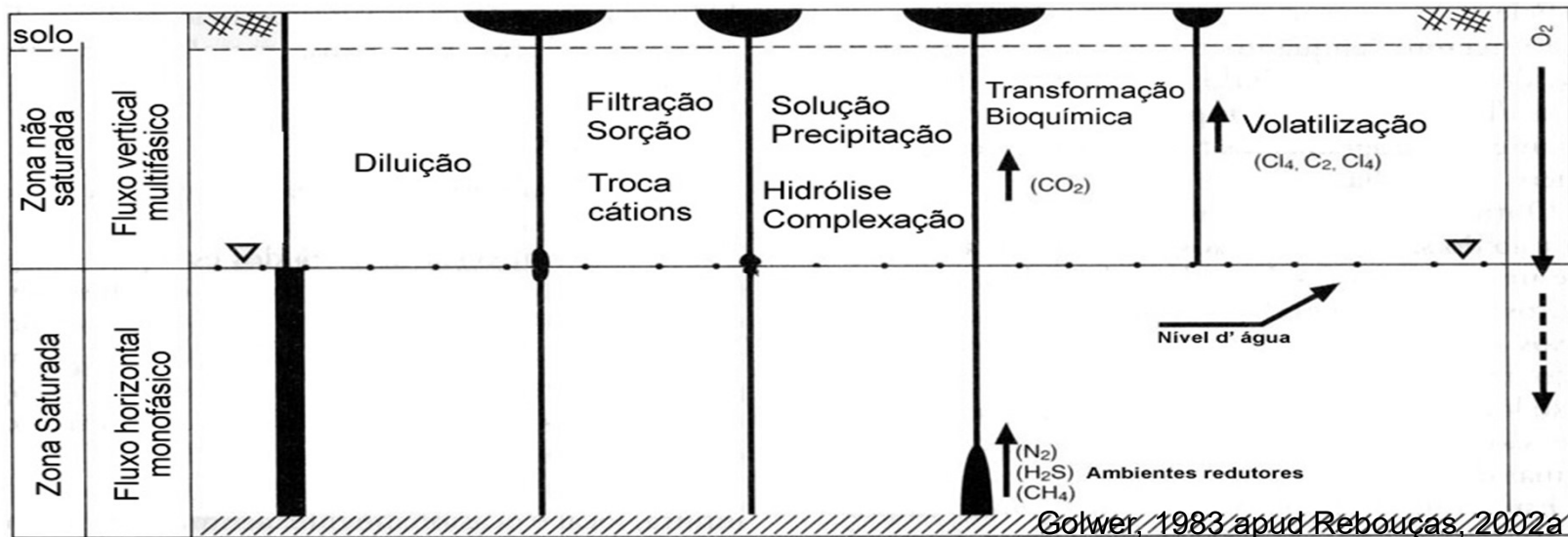
Constituição da água subterrânea

De acordo com Custodio e Llamas (1976), um dos livros clássicos de hidrologia subterrânea, na água subterrânea natural, a maioria das substâncias dissolvidas encontra-se em estado iônico.

- Os íons mais frequentes são: os ânions – clorato (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), carbonato (HCO_3^-) e bicarbonato (CO_3^{2-}) e os cátions de sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+).
- A partir da composição química da água podem-se destacar dados importantes para o estudo de contaminação desse recurso



Atenuação natural: processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo
 redução da massa ou concentração de contaminantes na água subterrânea em função do tempo e distância da fonte de contaminação devido a processos naturais.



Sorção: habilidade do solo, pelas suas características, em reter substâncias

Volatilização: passagem para a fase gasosa

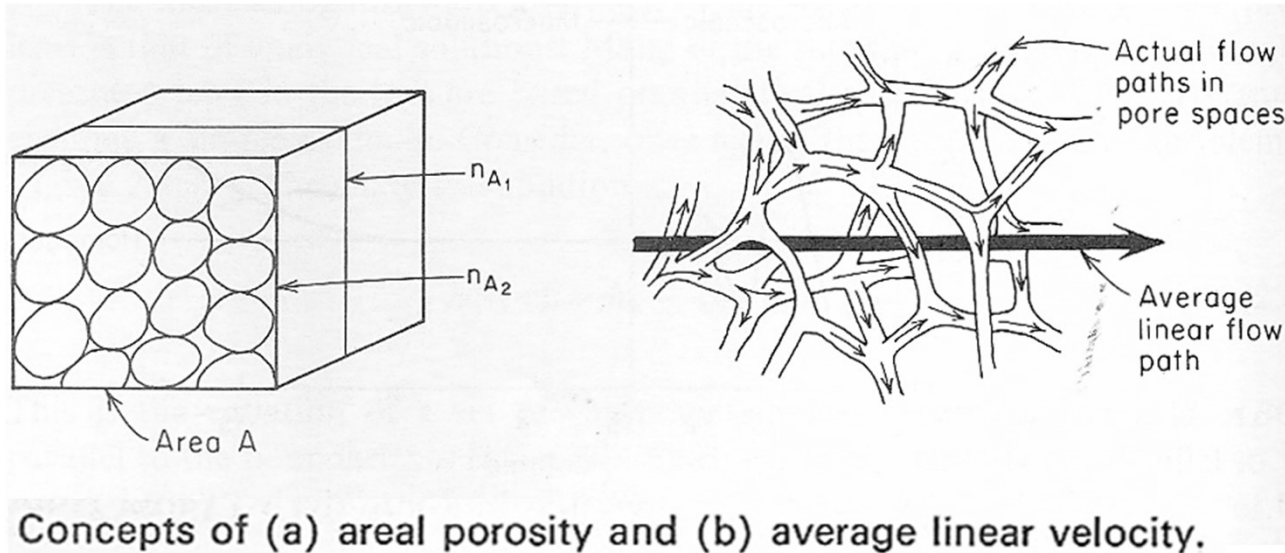
Complexação: uma reação de complexação é uma reação entre um íon metálico, M, e um ligante, L, resultando na formação de um complexo, ML

6

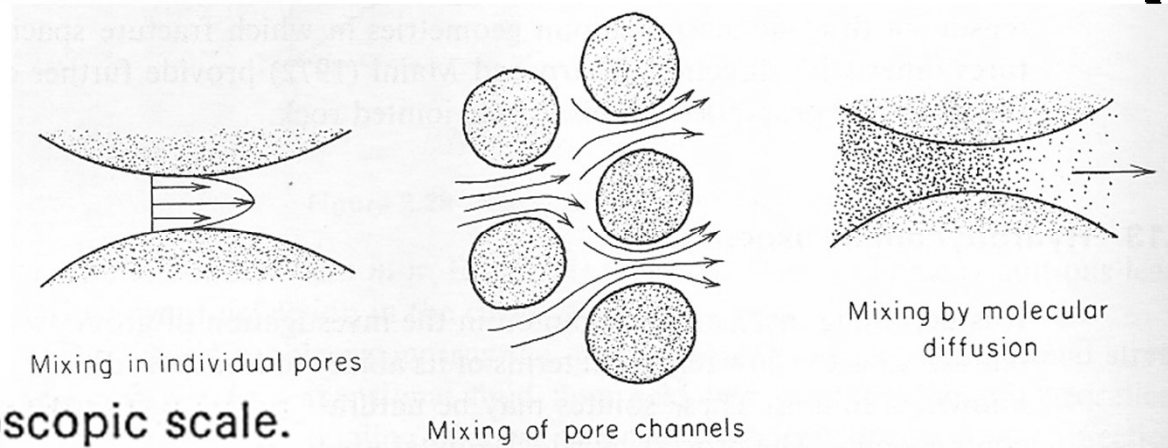
Transformação bioquímica: processos bioquímicos degradativos

Hidrólise: reação da substância com molécula de água

Mecanismos de transporte

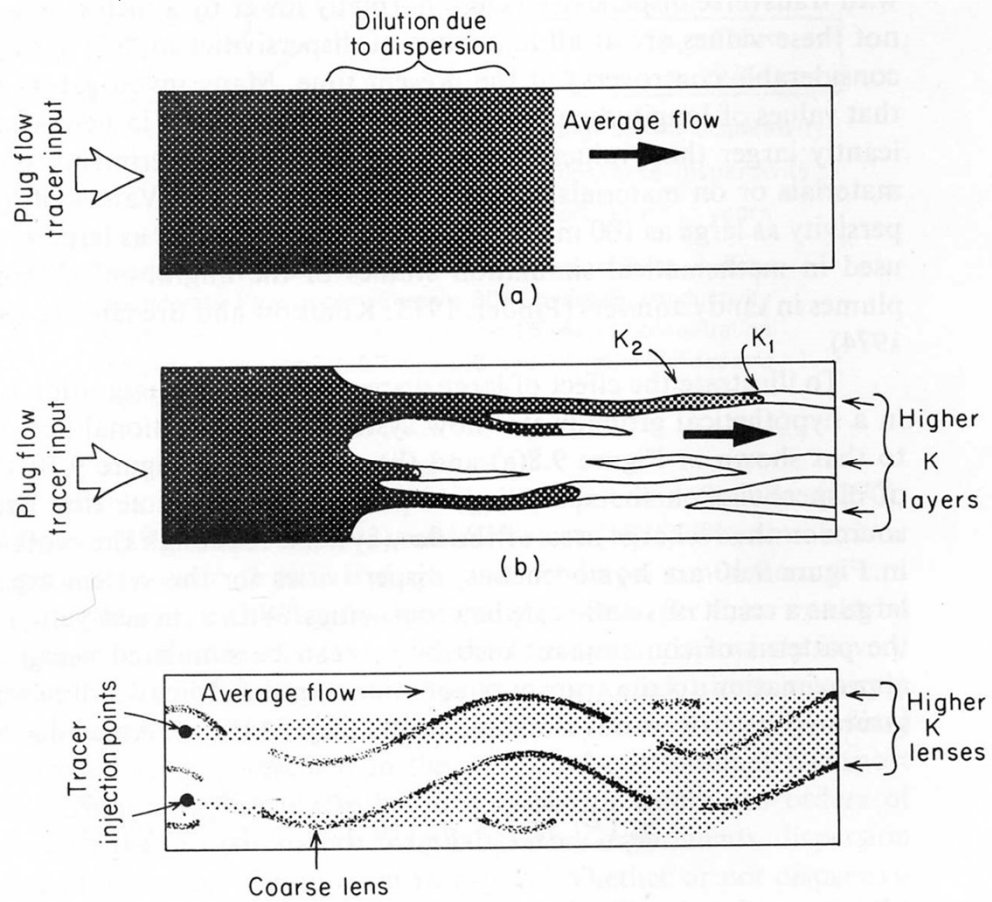


Concepts of (a) areal porosity and (b) average linear velocity.



Processes of dispersion on a microscopic scale.

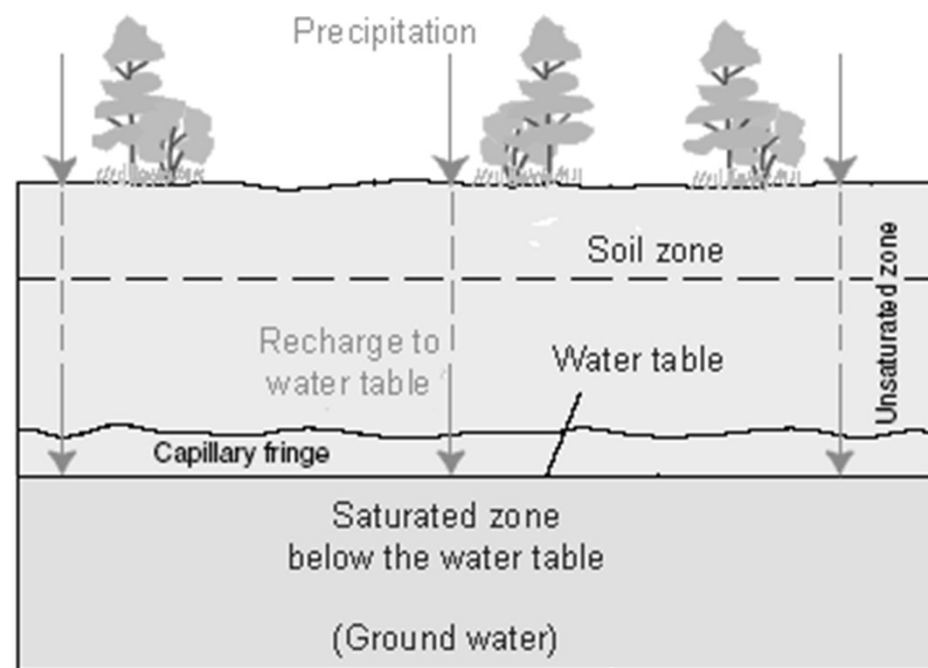
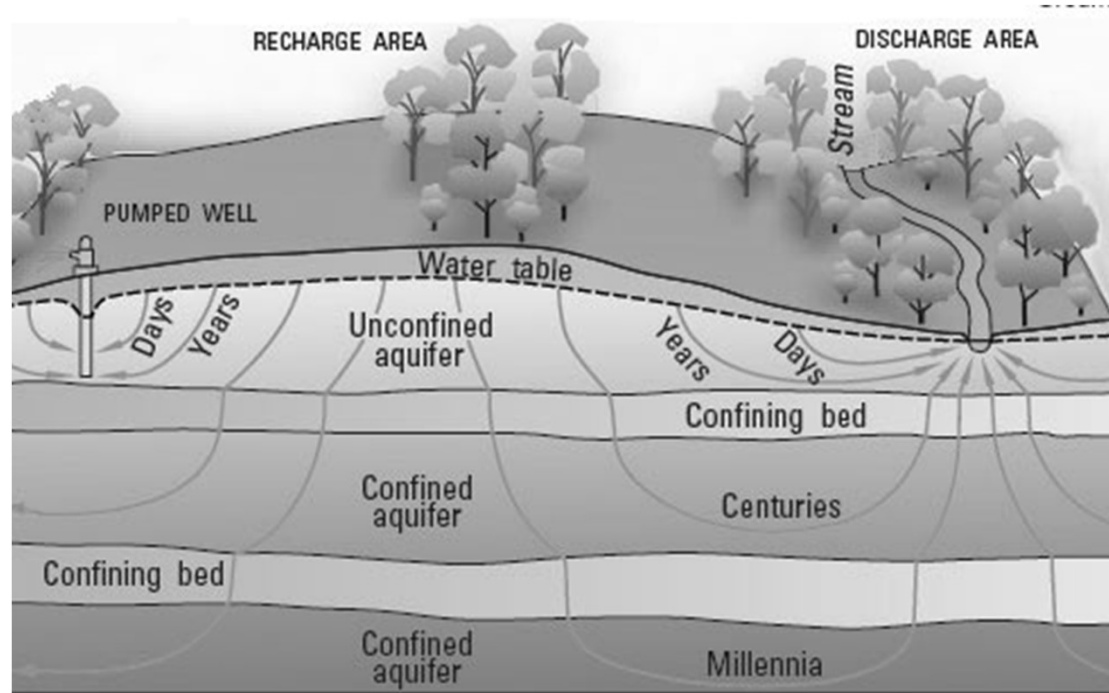
Dispersão em escala macroscópica



Aquifero homogêneo

Aquifero heterogêneo

Fonte: Freeze and Cherry (1979)



Conceitos importantes

Porosidade consiste nos espaços ou poros vazios no interior de solos e rochas. A porosidade, então, é uma propriedade física cuja expressão matemática é definida pela razão entre o volume de poros e o volume total de rocha ou solo.

Permeabilidade: nada mais é do que sua capacidade em permitir o fluxo de água por meio dos poros. A permeabilidade depende então do tamanho dos poros e sua interligação.

Transmissividade: Quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero.

Coefficiente de armazenamento: A capacidade de um aquífero armazenar e transmitir água depende das propriedades da água (densidade, viscosidade e compressibilidade) e das propriedades do meio poroso (porosidade, permeabilidade intrínseca e compressibilidade).

Tabela 2 – Valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para sedimentos inconsolidados (Fonte: Fetter, 2001).

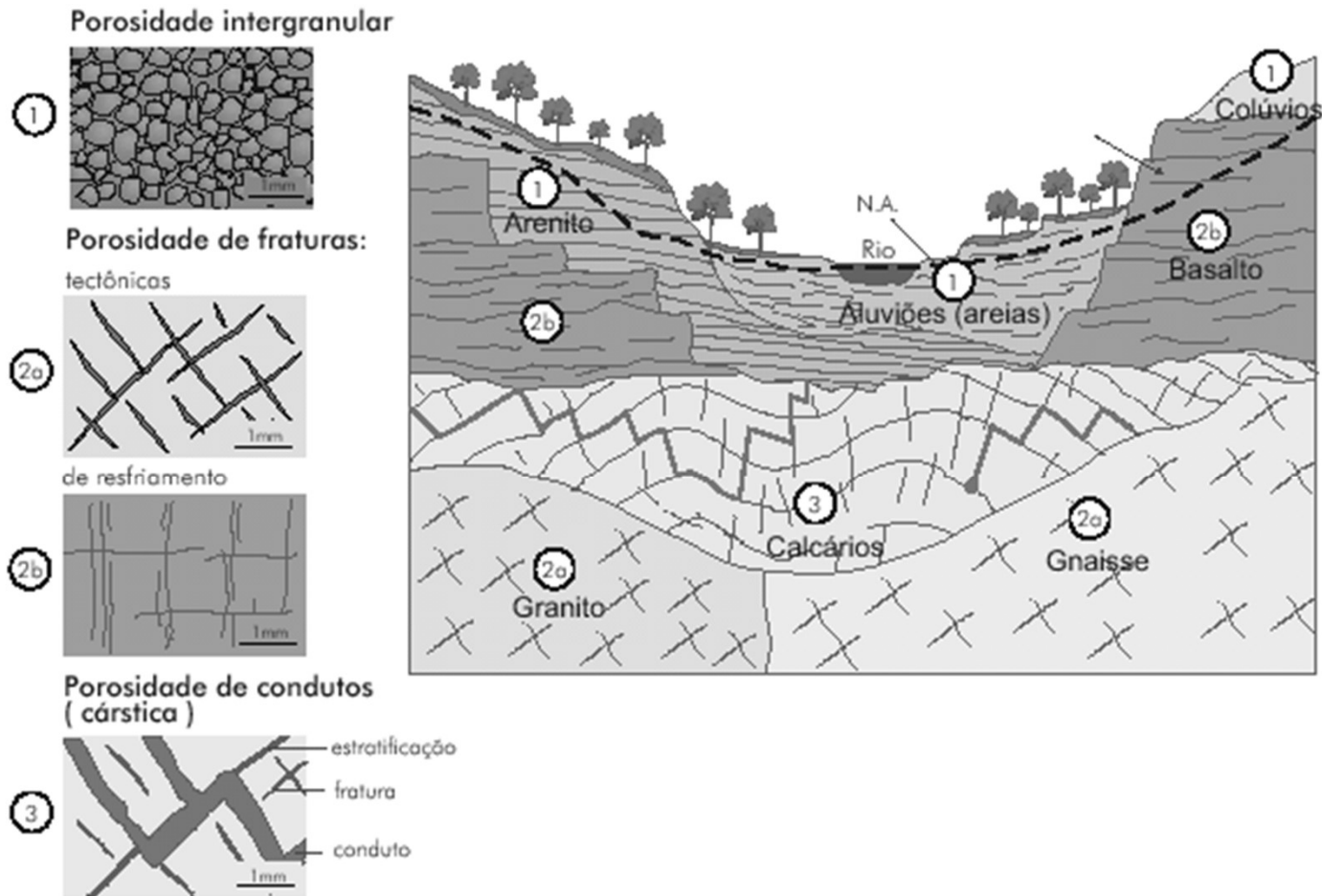
Sedimentos*	Condutividade hidráulica (cm/s)	Permeabilidade intrínseca (<u>darcys</u>)
cascalho bem selecionado	$10^{-2} - 1$	$10 - 10^3$
areia bem selecionada	$10^{-3} - 10^{-1}$	$1 - 10^2$
areia siltosa e areia fina	$10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 1$
<u>silte</u> , <u>silte</u> arenoso, areia argilosa	$10^{-6} - 10^{-4}$	$10^{-3} - 10^{-1}$
argila	$10^{-9} - 10^{-6}$	$10^{-6} - 10^{-3}$

Tipos de Porosidade

Porosidade primária - intergranular

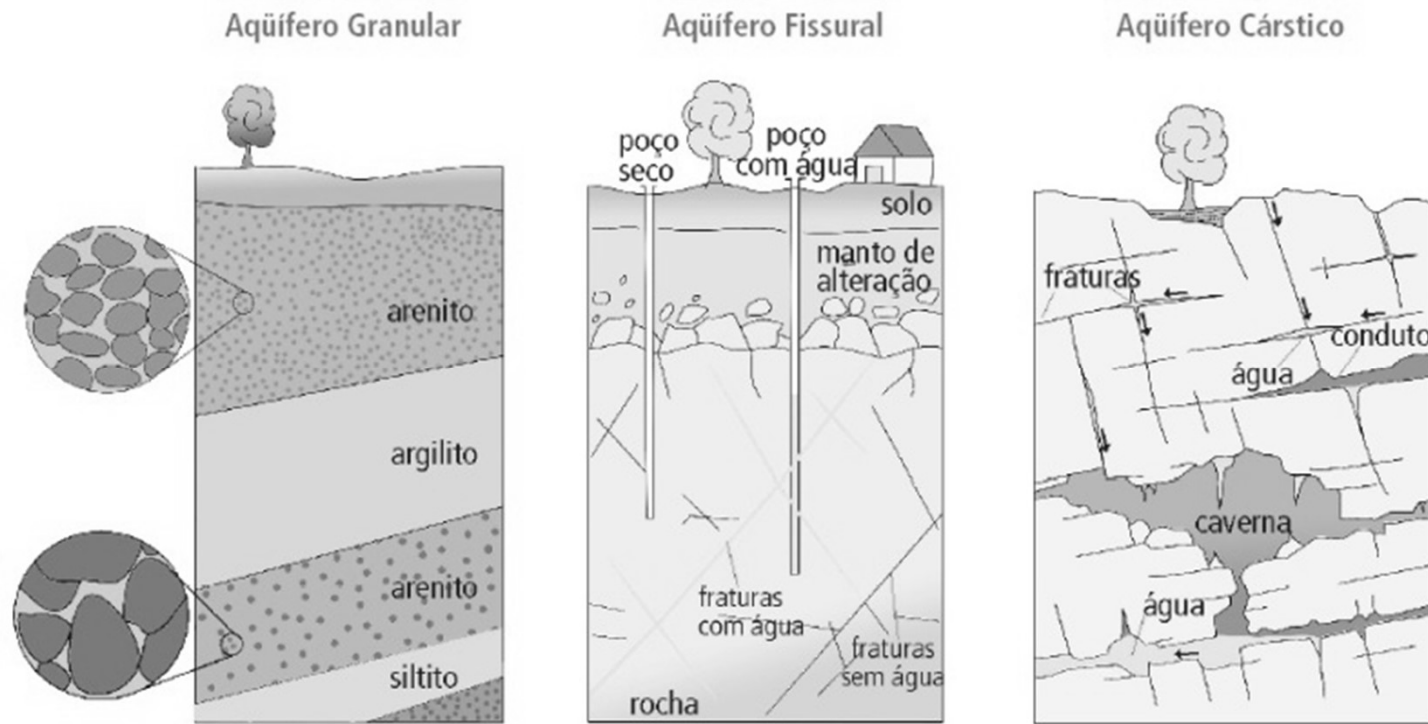
**Porosidade secundária – fraturas
resfriamento
condutos**

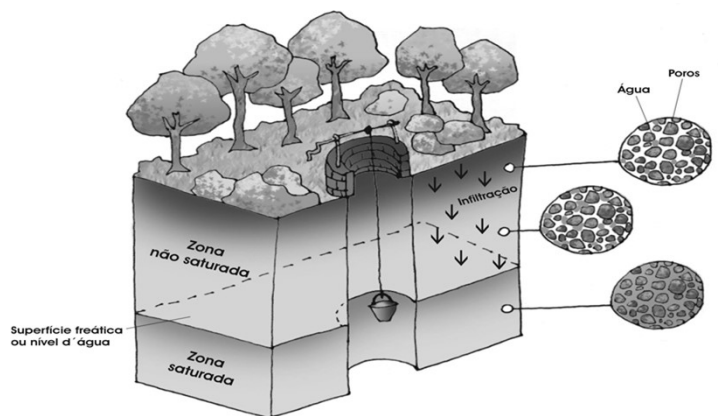
Tipos de Porosidade



Fonte: Decifrando a Terra / TEIXEIRA, TOLEDO, FAIRCHILD e TAIOLI - São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

Classificação segundo o tipo de Porosidade





• Zona de aeração ou não saturada

	Diâmetro efetivo (cm)	Altura de	ascensão capilar (cm)
		(1)	(2)
Cascalho fino	1	1	0,3
Areia grossa	0,2	5	1,5
Areia média	0,05	21	6
Areia fina	0,025	42	12
Areia muito fina	0,010	105	31
Silte	0,005	210	31

- Forças de retenção de água no solo: atração elétrica, capilar e gravitacional;

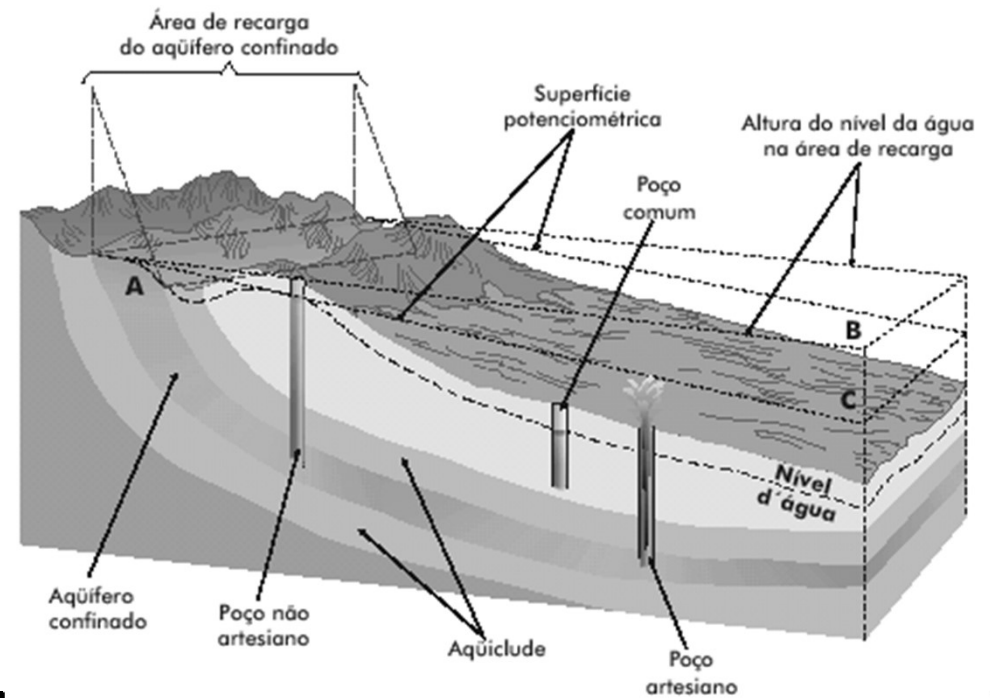
- **Zona saturada**

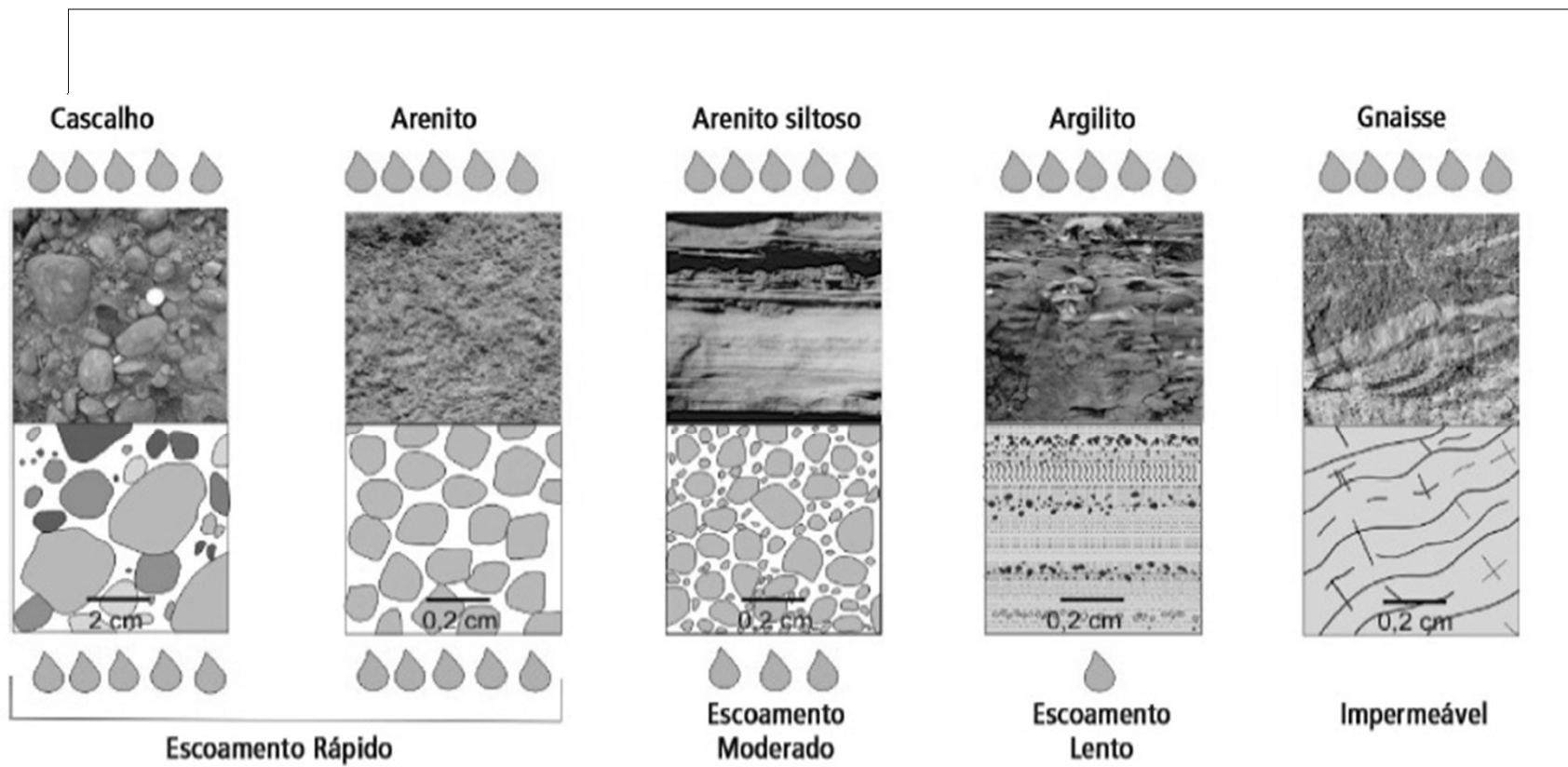
- **AQÜÍFERO** – formação geológica que contém água e que permite que quantidades significativas dessa água se movimentem no seu interior em condições naturais

- **AQÜICLUDE** – formação que pode conter água, mas não transmite em condições naturais;

- **AQÜITARDO** – formação semi-permeável, delimitada no topo e na base por camadas de permeabilidade muito maior. Ocorre filtração vertical ou drenança.

- **AQÜÍFUGO** – formação impermeável que não armazena e não transmite água.





Fontes: (*) Domenico & Schwartz (1998); (**) Fetter (1994).

• Classificação de aquíferos

- Classificação de acordo com a pressão nas superfícies limítrofes:

superior (topo) e inferior (base) e pela capacidade de transmissão de água nas respectivas camadas de topo e base.

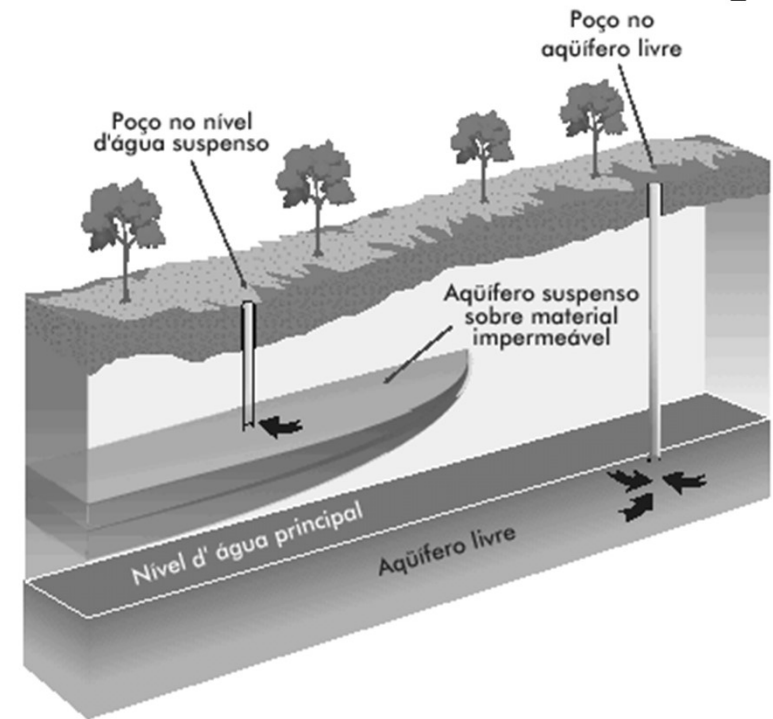
- **LIVRE** (*freático* ou *não confinado*) – é aquele cujo limite superior é uma superfície freática, todos os pontos se encontram sob a pressão atmosférica. Também podem ser *drenante* e *não drenante*.

- **CONFINADO** – a pressão da água no topo é maior do que a pressão atmosférica. Pode ser *confinado drenante* e *confinado não drenante*.

✓ *Confinado não drenante* – aquífero cujas camadas de topo e base são impermeáveis.

✓ *Confinado drenante* – aquífero em que pelo menos uma das camadas é semipermeável, permitindo a entrada ou saída de fluxos pelo topo e/ou base, por drenança ascendente ou descendente.

- **SUSPENSO** – caso especial de aquífero livre, formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável, de extensão limitada e situada entre a superfície freática regional e o nível do terreno.



Porosidade de sedimentos e rochas

Sedimentos(*)	Diâmetro da partícula (mm)	Porosidade total dos sedimentos (%)	Rochas Sedimentares (**)	Porosidade total das rochas (%)
Cascalho	> 2,0	24 – 38	Arenito	5 – 30
Areia grossa	0,2 – 2,0	31 – 46	Siltito	21 – 41
Areia fina	0,02 – 0,2	26 – 53	Calcário/Dolomito	0 – 40
Silte	0,002 – 0,02	34 – 61	Calcário cárstico	0 – 40
Argila	< 0,002	34 – 60	Folhelho	0 – 10

Fontes: (*) Domenico & Schwartz (1998); (**) Fetter (1994).

Porosidade total

Porosidade efetiva + retenção específica

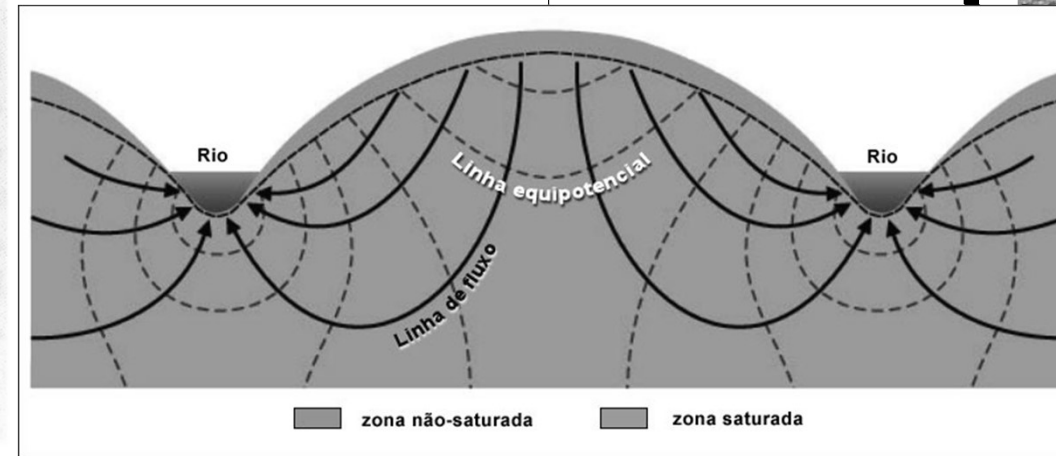
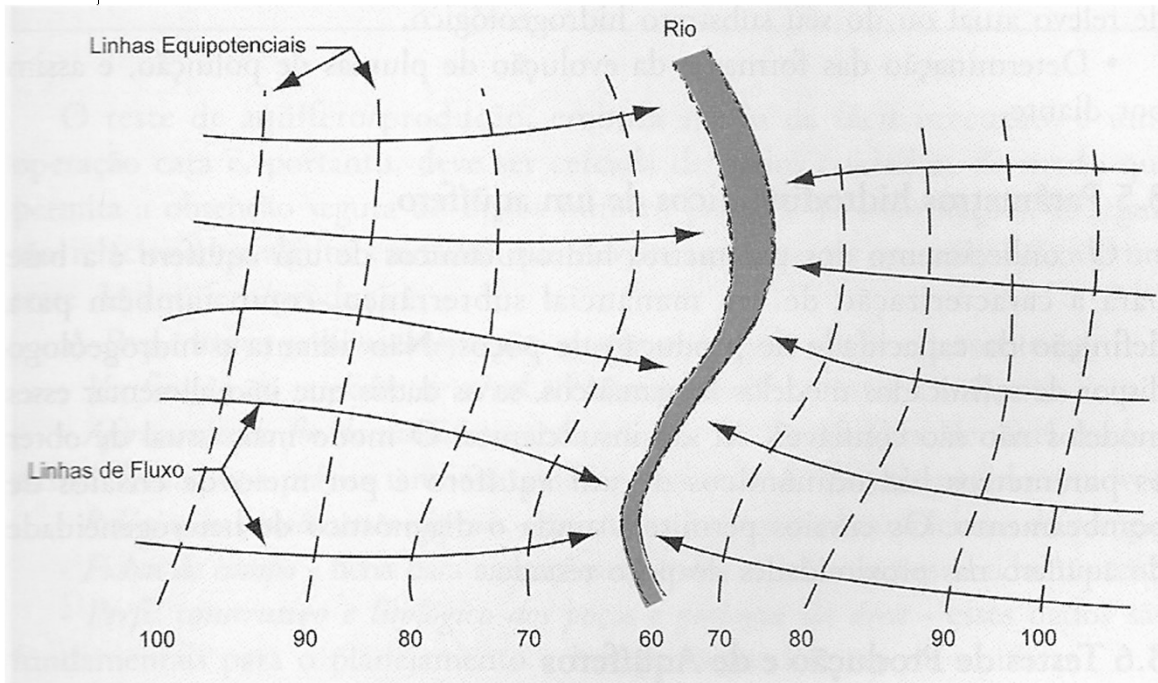
Retenção específica – quantidade de água retida por unidade de volume do material

Movimentação da água subterrânea

Material	Porosidade (%)	Permeabilidade (cm/s)
Solos	50-60	
Argila	45-55	10^{-9} - 10^{-6}
Silte	40-50	10^{-6} - 10^{-4}
Mistura de areia média e grossa	35-40	
Areia uniforme	30-40	
Mistura de areia fina e média	30-35	10^{-5} - 10^{-3}
Pedregulho	30-40	10^{-3} - 10^{-1}
Pedregulho e areia	20-35	10^{-2} - 1
Arenito	10-20	
Folhelho	1-10	
Calcário	1-10	

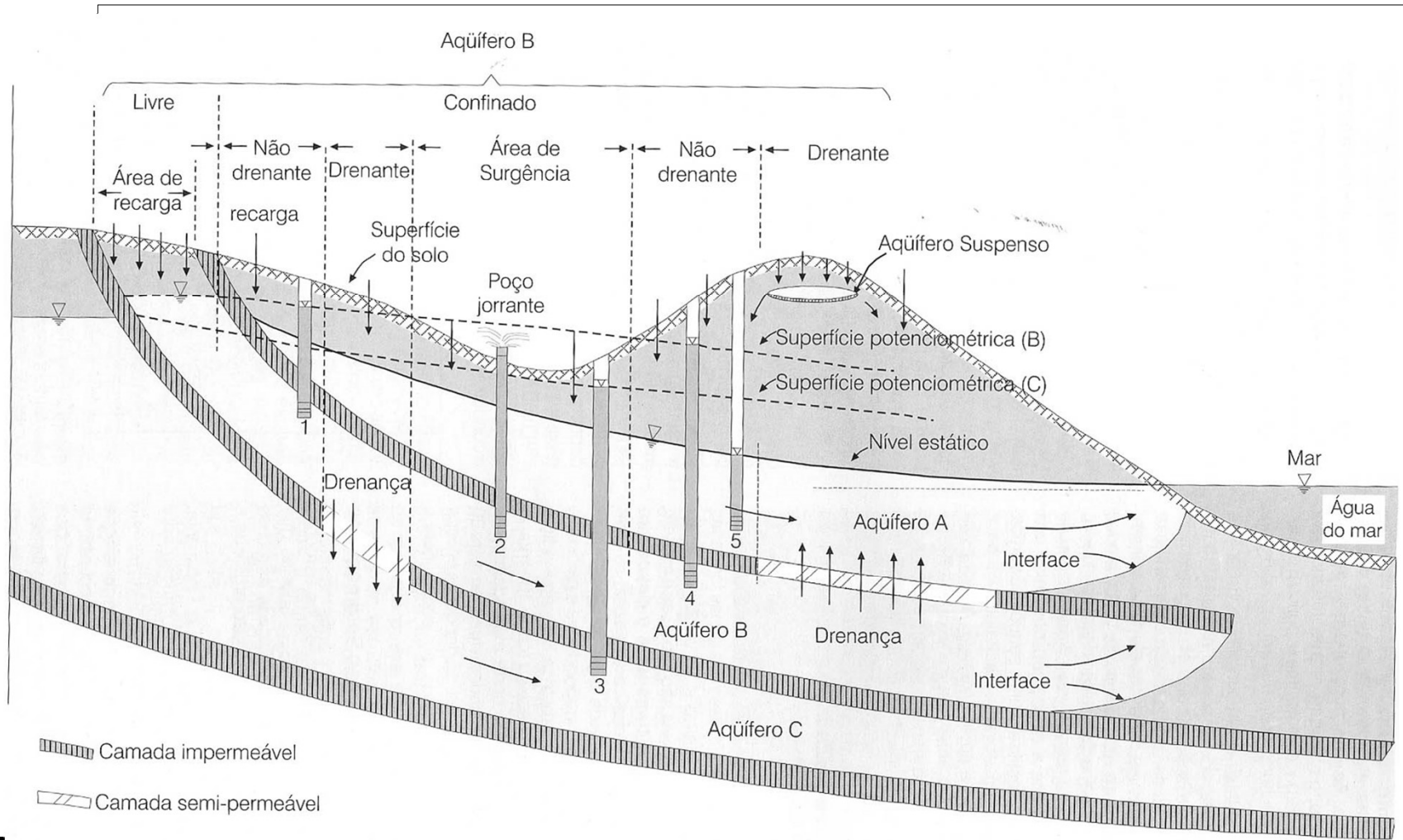
Material	Permeabilidade intrínseca (cm²)	Condutividade hidráulica (cm/s)
Argila	10⁻¹⁴ – 10⁻¹¹	10⁻⁹ – 10⁻⁶
Silte	10⁻¹¹ – 10⁻⁹	10⁻⁶ – 10⁻⁴
Areia argilosa	10⁻¹¹ – 10⁻⁹	10⁻⁶ – 10⁻⁴
Areia siltosa; areia fina	10⁻¹⁰ – 10⁻⁸	10⁻⁵ – 10⁻³
Areia bem distribuída	10⁻⁸ – 10⁻⁶	10⁻³ – 10⁻¹
Cascalho bem distribuído	10⁻⁷ – 10⁻⁵	10⁻² – 10⁰

Movimentação da água subterrânea



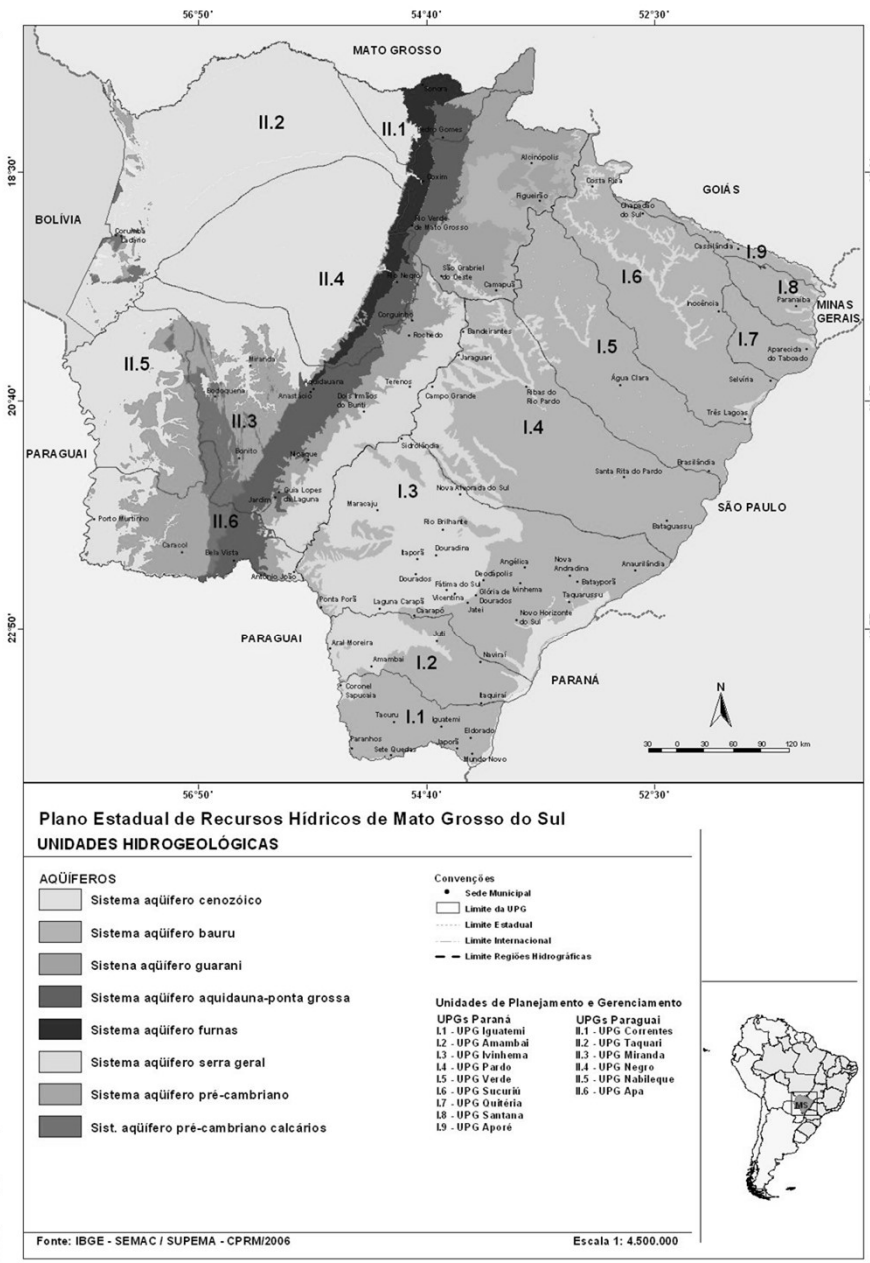
a direção e o sentido do fluxo de água: o fluxo de água, partindo de um potencial maior para outro menor, determina uma **linha de fluxo**, que segue o caminho mais curto entre dois potenciais diferentes, em um traçado perpendicular às **linhas equipotenciais**.

Fonte: Karmann (2009)



Fonte: Feitosa et al.(2008)

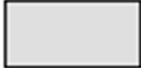





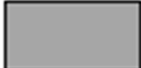

Mapa hidrogeológico



Fonte: SEMAC, 2010

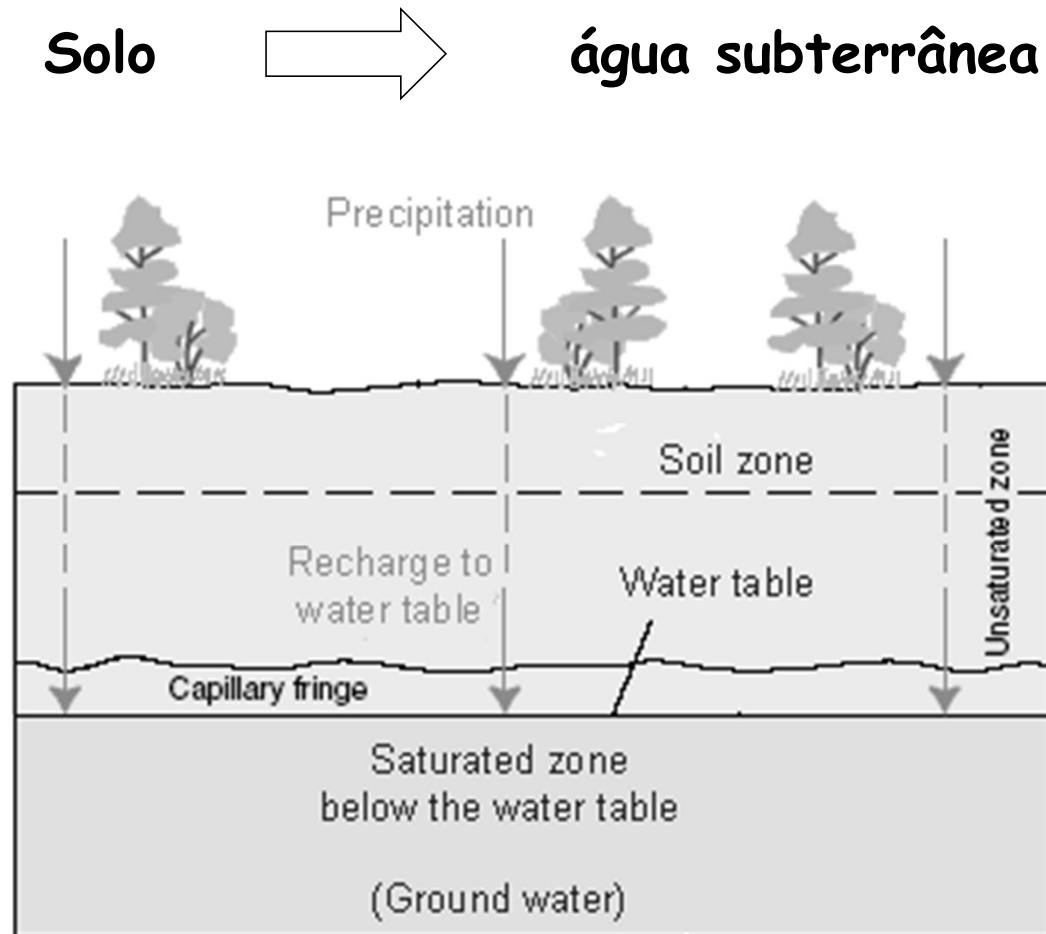
Aquíferos de MS

AQUÍFEROS

-  Sistema aquífero cenozóico
-  Sistema aquífero bauru
-  Sistema aquífero guarani
-  Sistema aquífero aquidauna-ponta grossa
-  Sistema aquífero furnas
-  Sistema aquífero serra geral
-  Sistema aquífero pré-cambriano
-  Sist. aquífero pré-cambriano calcários

Fonte: SEMAC, 2010

Contaminação do solo e da água subterrânea

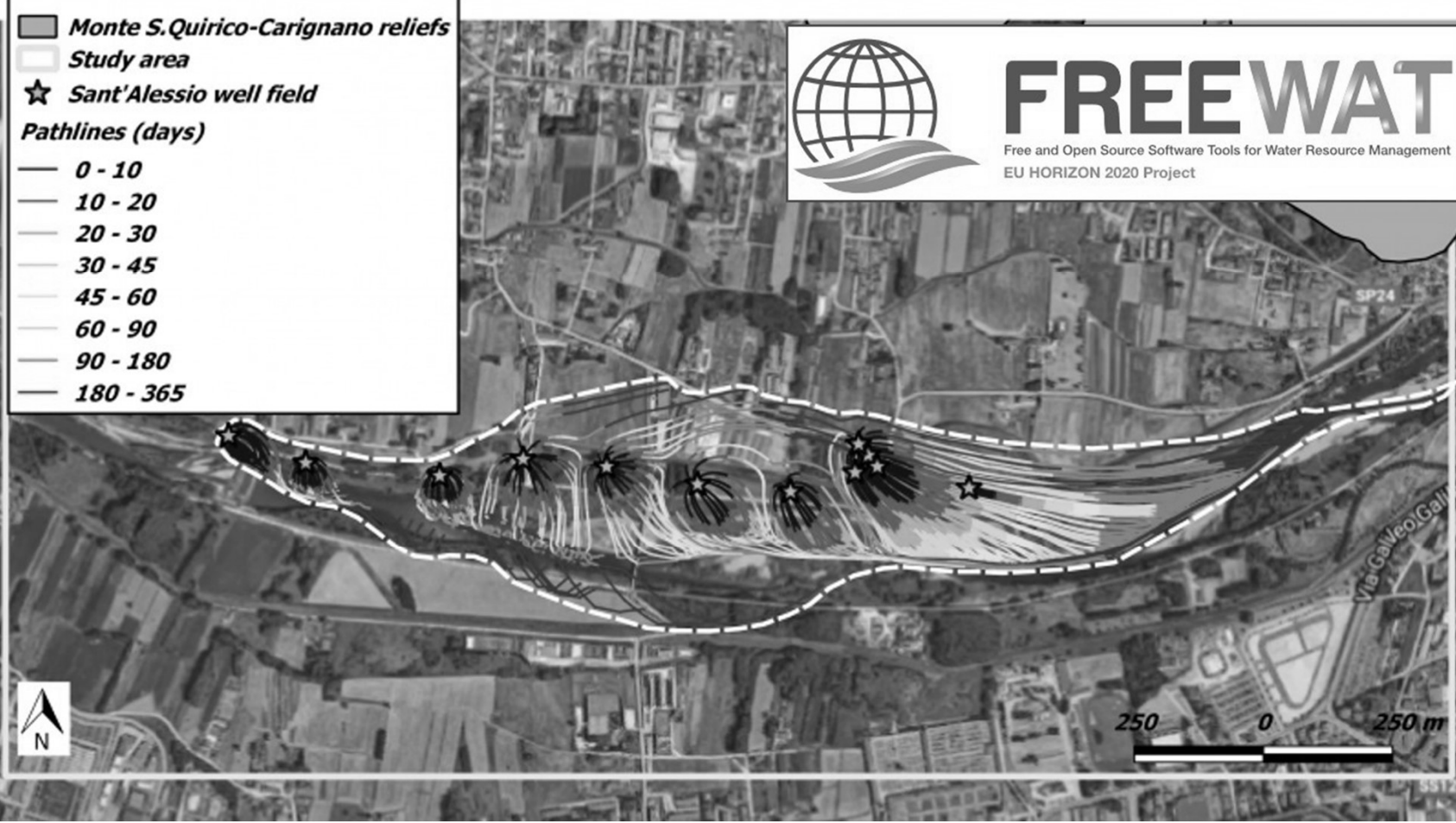


Fonte: USGS (2012)

Como o conhecimento acerca do comportamento das águas subterrâneas pode ser empregado para avaliar a degradação ambiental?

O entendimento integrado do comportamento das águas subterrâneas e do solo, discutido no capítulo 2, é fundamental para o estudo de ambientes degradados, sobretudo por contaminação. No estudo de remediação de solos e aquíferos contaminados consideram-se como propriedades relevantes:

- tipo de aquífero (livre, suspenso ou confinado) – vai determinar a intensidade da contaminação;
- distribuição espacial do aquífero e suas relações com os materiais circundantes e outras unidades geológicas (aquíclude, aquítarde e aquífügos) – condiciona como podem se propagar os contaminantes;
- composição química das águas subterrâneas – auxilia na determinação do tipo de contaminante;
- constituição dos materiais na zona não-saturada – condiciona os processos que podem contribuir para a atenuação da contaminação;
- nível do lençol freático e direção do fluxo de água subterrânea – contribuem para o planejamento das atividades de remediação;
- áreas de recarga – a determinação dessas áreas contribui a esse estudo, pois nas mesmas os efeitos da contaminação pelo processo de infiltração são mais intensos;
- condutividade hidráulica – permite deduzir a velocidade com que o fluxo contaminado permeia por um aquífero;
- constituição dos diferentes materiais do perfil de alteração e suas propriedades intrínsecas – condiciona os processos no solo e na zona não-saturada.



<https://www.linkedin.com/pulse/freewat-modelagem-hidrogeol%C3%B3gica-em-software-livre-colombo-pimenta/>

Contaminação do solo e da água subterrânea

Para reflexão: como as características dos aquíferos interferem na contaminação do solo e água subterrânea?

**Vejam o que discutimos na aula passada!
Vamos falar mais na palestra!**



amarilisgallardo@usp.br

**Agradeço à amiga Professora Sandra Gabas que compartilhou boa parte do conteúdo
dessa aula**