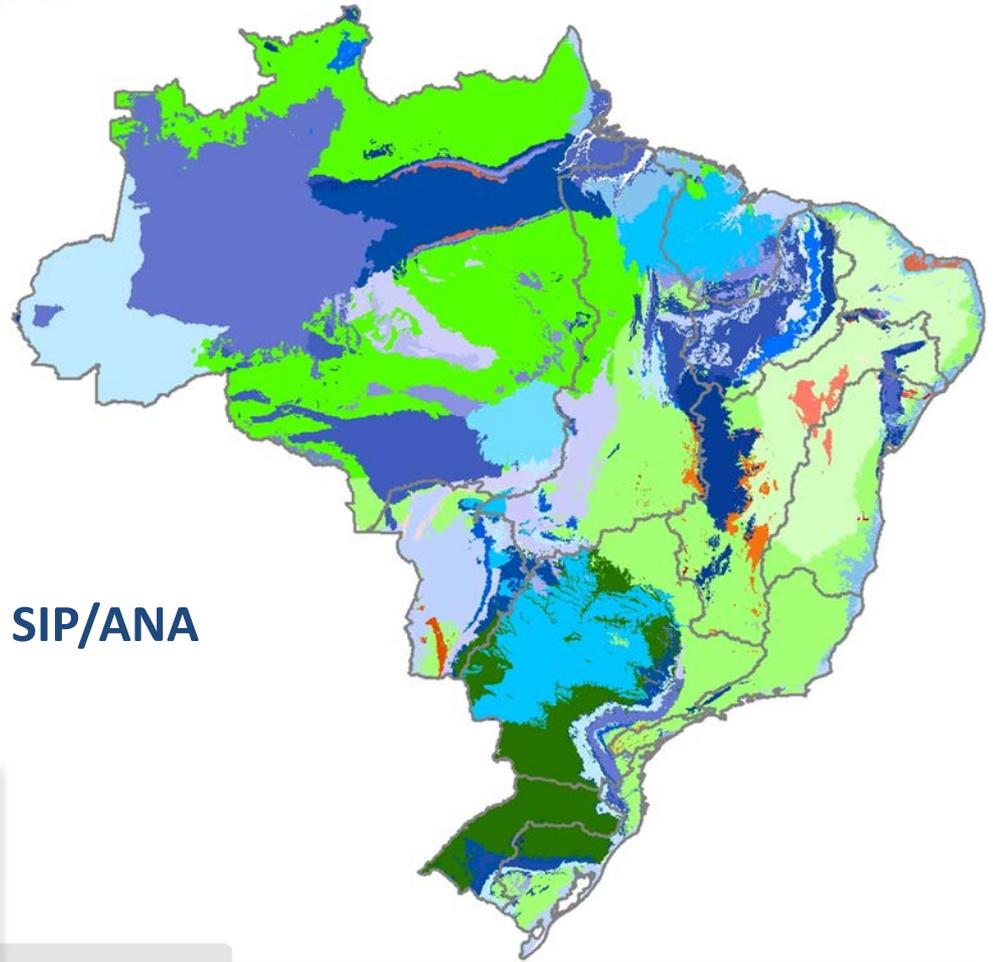


Hidrogeologia Conceitos Básicos

Leonardo de Almeida
Coordenação de Águas Subterrâneas SIP/ANA



**Oficina de Capacitação
do Progestão**

Águas Subterrâneas

Brasília 31/10/2016

Conteúdo

- + Introdução;
- + Propriedades dos aquíferos;
- + Qualidade das águas subterrâneas;
- + Poços tubulares
- + Gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

CONSTITUIÇÃO FEDERAL 1988

+ Art. 20 - São bens da União:

....

- III - os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais.

....

- IX - os recursos minerais, inclusive os do subsolo.

+ Art. 26 - Incluem-se entre os bens dos Estados:

- I - as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União.

Distribuição da água no planeta

✚ Considerando toda a água do planeta, 1 bilhão e 370 milhões de km^3 , representada por 1 litro;



1.000 mL

✚ A Água Doce do Planeta, 28 mL, caberia num copo de cafezinho;



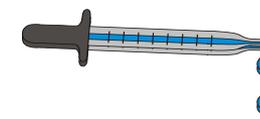
28 mL

✚ Entretanto, apenas 6,27 mL podem ser utilizados pelo homem, e representam a fase líquida da Água Doce;



6,27 mL

✚ Desta água, 0,1 mL representa a água superficial;



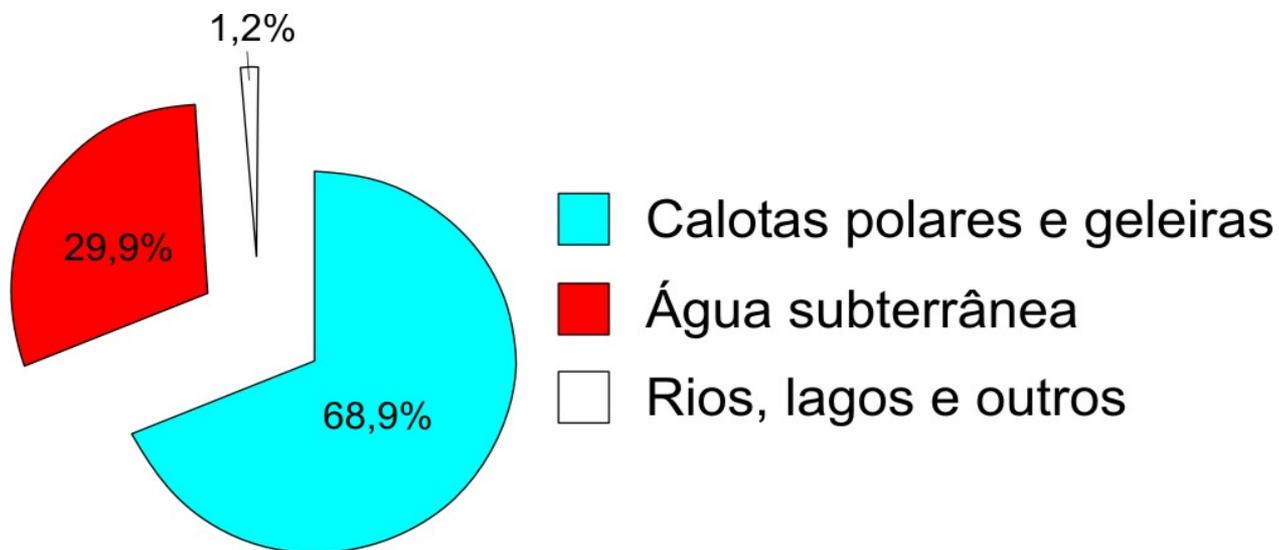
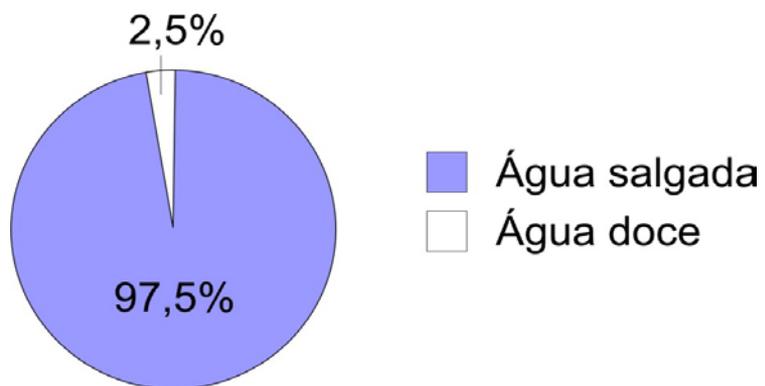
0,1 ml

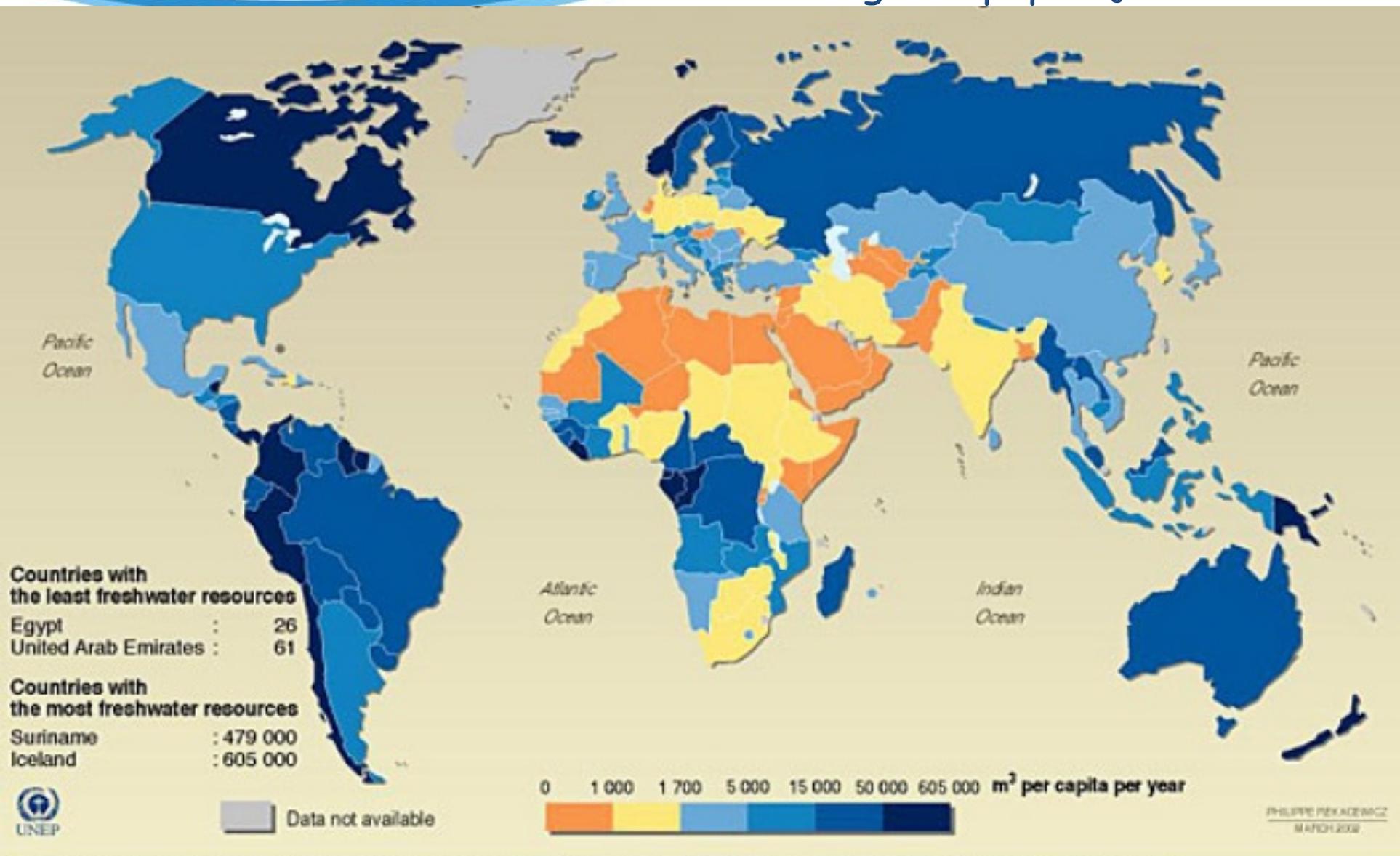
✚ 6,17 mL ou 98% é água subterrânea;



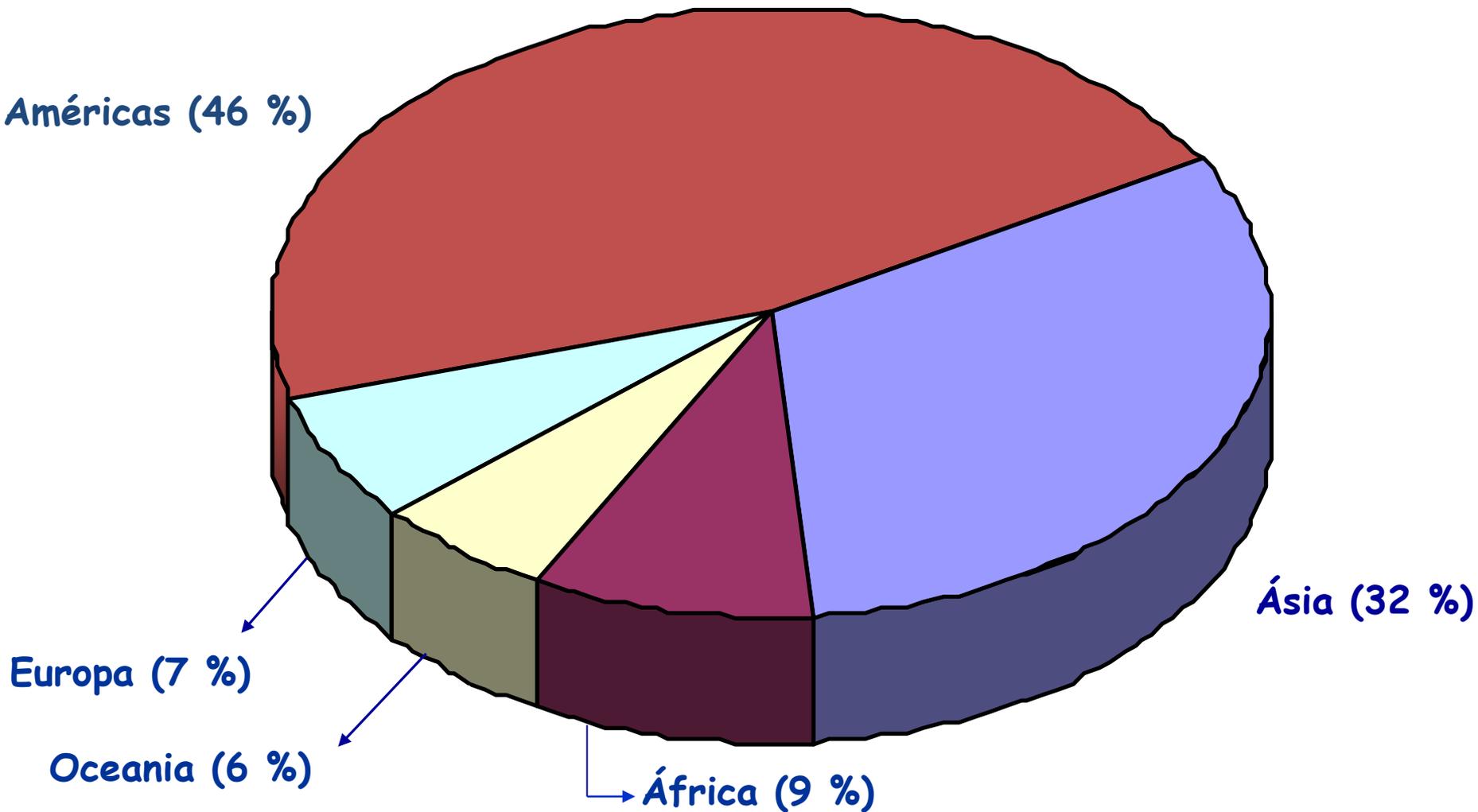
6,17 mL

Distribuição da água no planeta





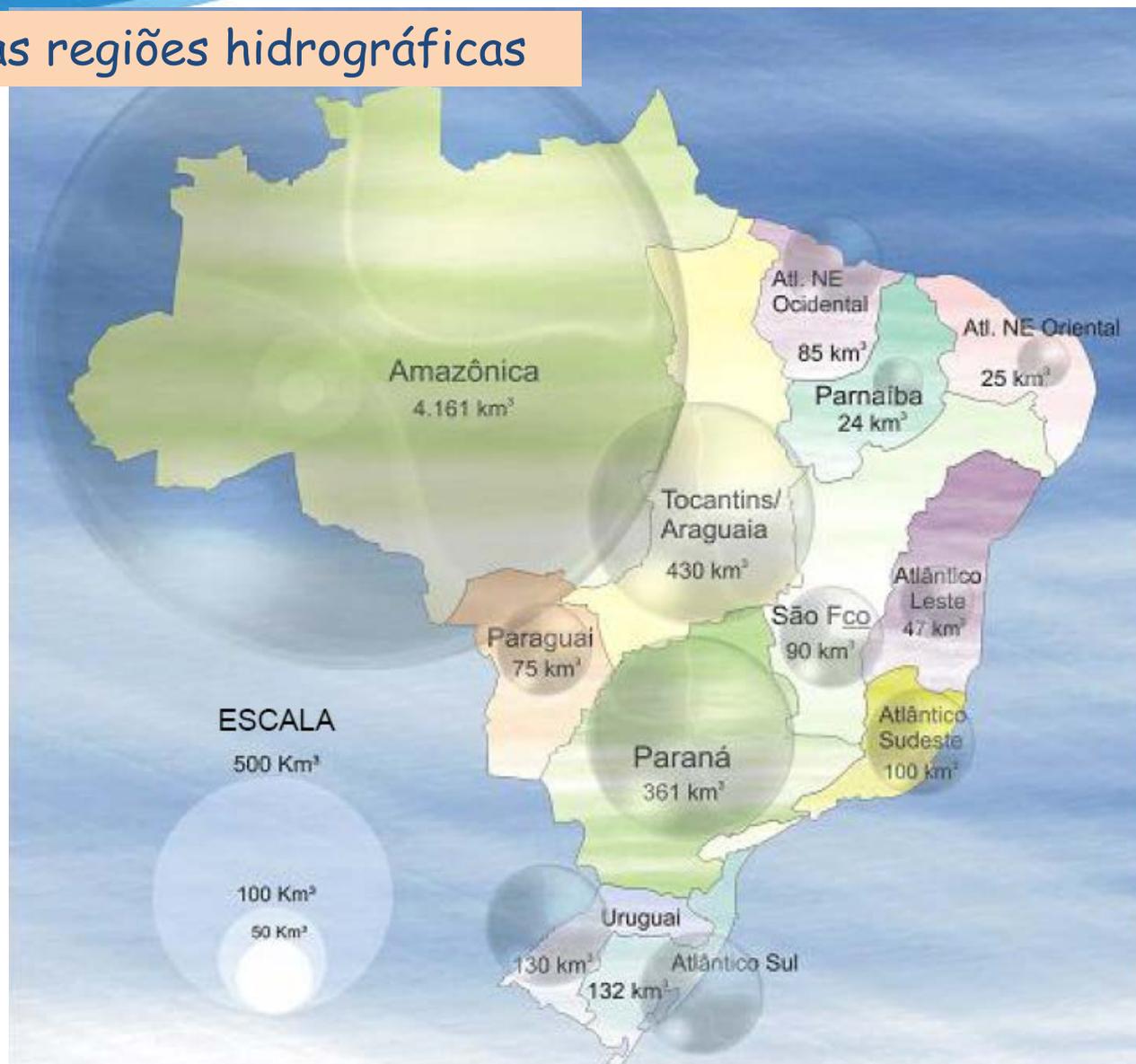
Disponibilidade mundial de água



Distribuição de água nas regiões hidrográficas

Contribuição média anual das regiões Hidrográficas em Km³

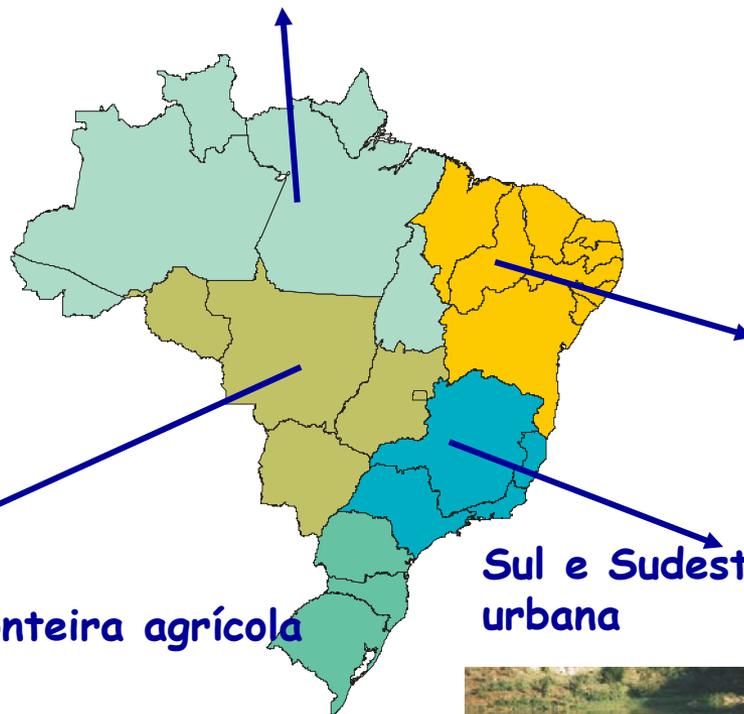
- Brasil: 5.660 km³
- Brasil e Territórios Estrangeiros: 8.427 km³
- Mundo: 46.500 km³



Brasil : País de contrastes



Norte: abundância na Bacia Amazônica

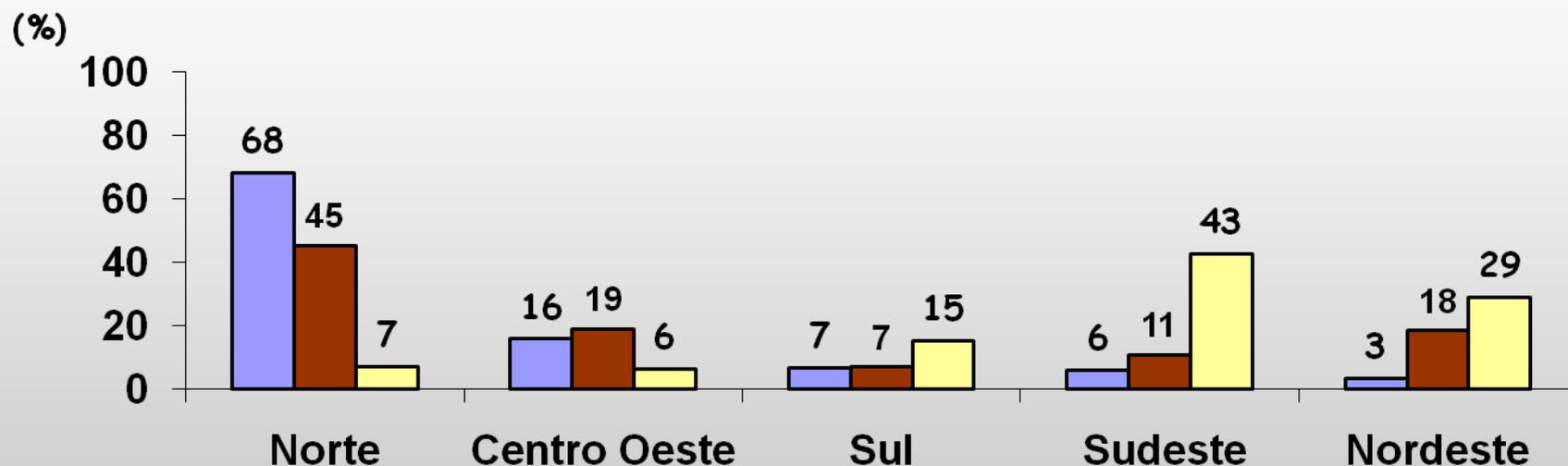


Nordeste: seca

Centro-Oeste: a nova fronteira agrícola

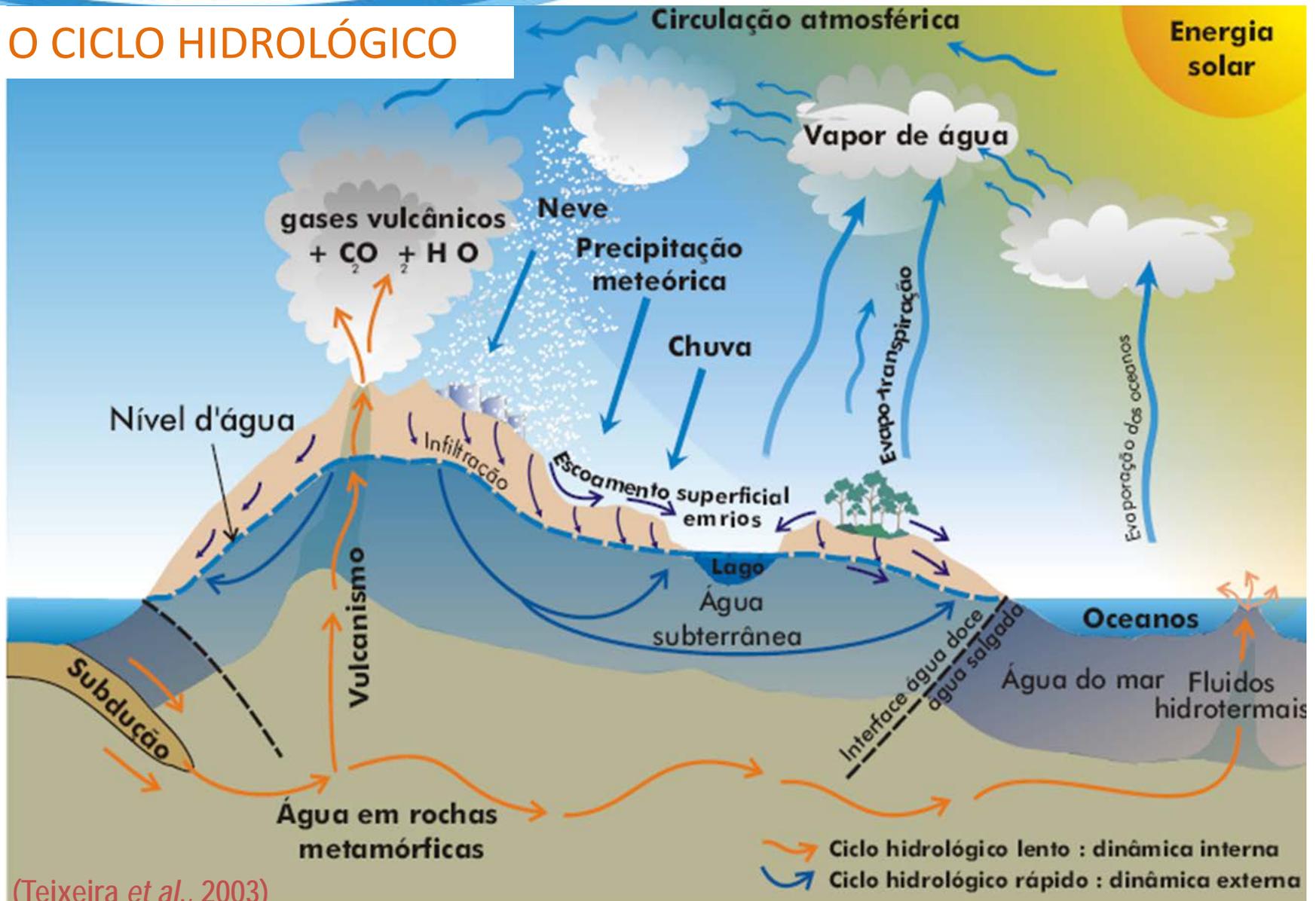


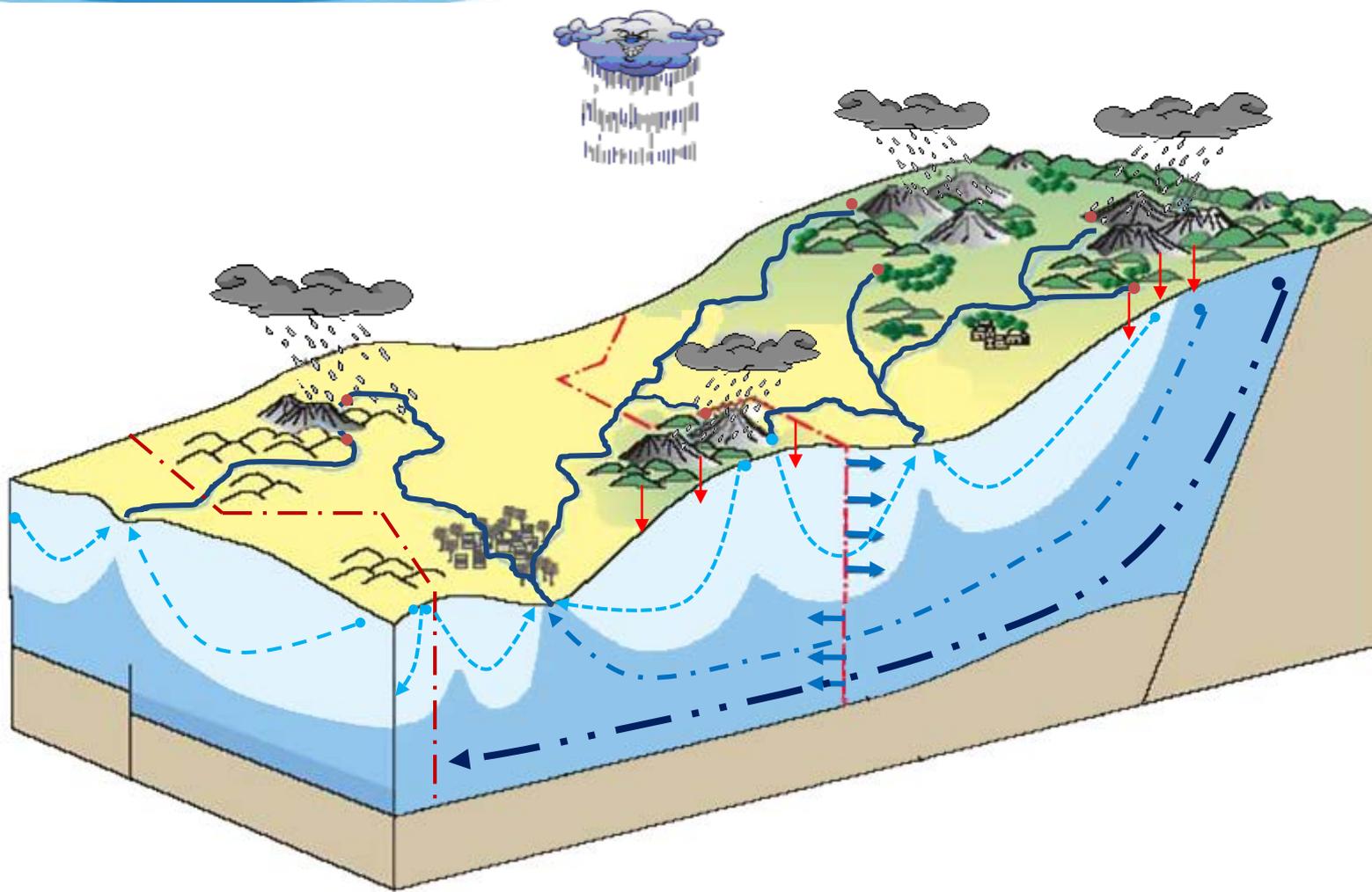
Disponibilidade recursos hídricos x área x população



■ Recursos hídricos ■ Superfície ■ População

O CICLO HIDROLÓGICO





Comparativo águas subterrâneas x superficiais

□ Águas subterrâneas:

- Armazenamento elevado
- Fluxo lento (cm/dia), longo tempo de residência
- Ampla distribuição territorial
- Caráter tridimensional
- Meio heterogêneo
- Qualidade pouco variável
- Modera vulnerabilidade à contaminação
- Difícil descontaminação, quando não inviável
- Aproveitamento modular e progressivo

□ Águas superficiais

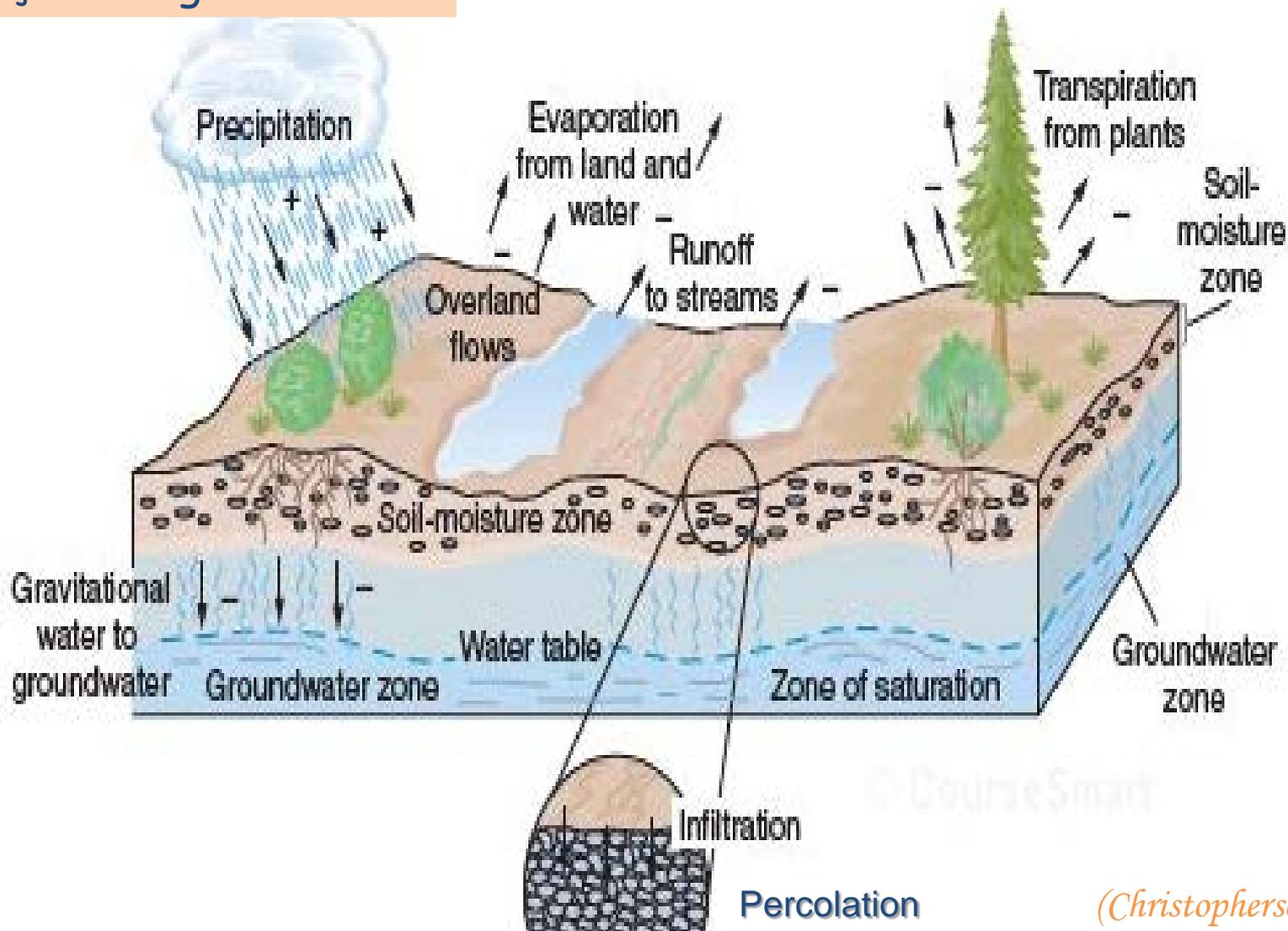
- Armazenamento pequeno
- Fluxo rápido (m/s), curto tempo de residência;
- Concentrada em territórios
- Variabilidade meteórica
- Qualidade variável
- Elevada vulnerabilidade à contaminação
- Descontaminação menos onerosa
- Aproveitamento com grandes obras



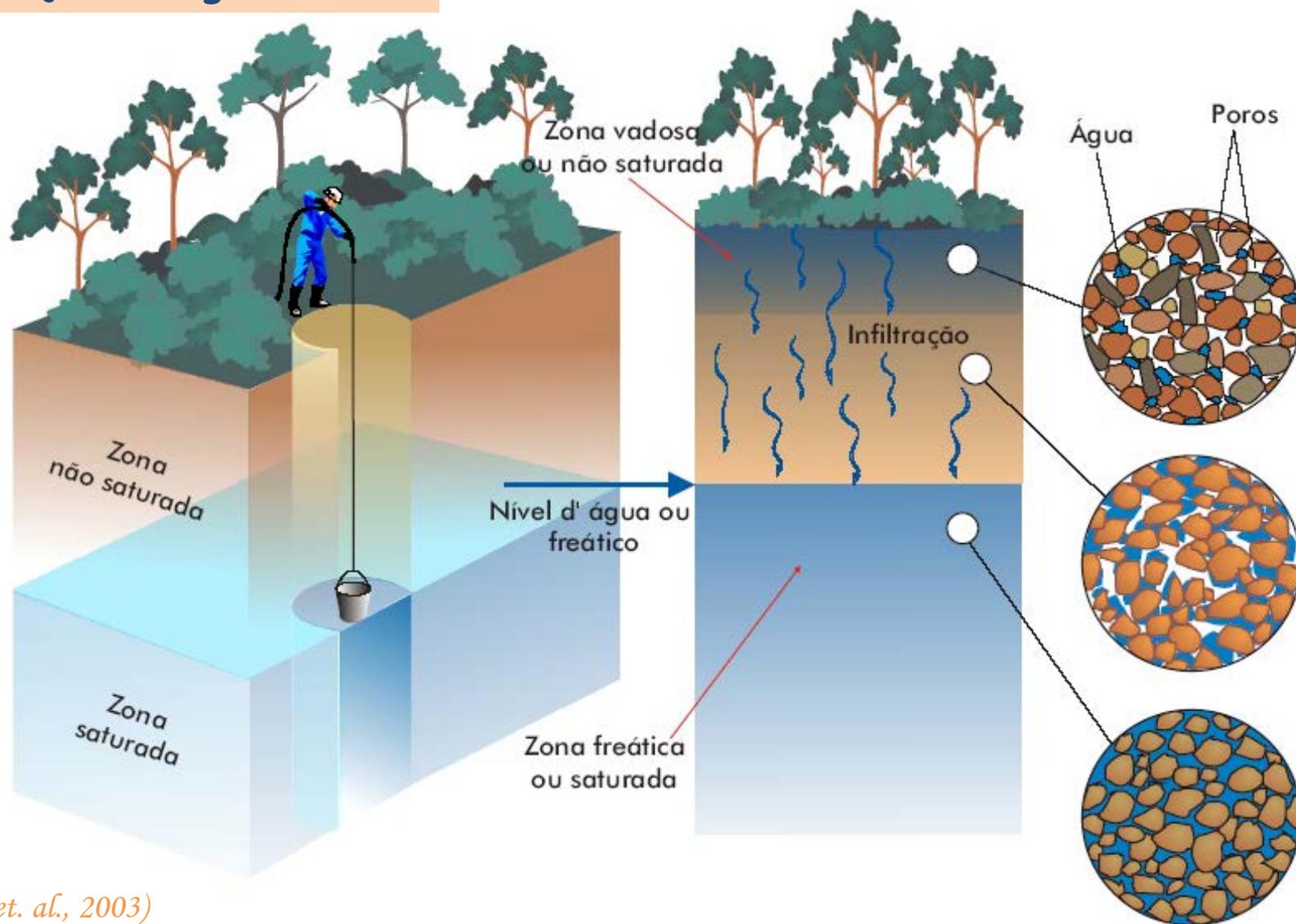
**Gestão com
focos distintos**

- **Águas subterrâneas** – as águas que ocorrem natural ou artificialmente no subsolo;
- **Aquífero** – formação geológica com capacidade de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos (ex: arenitos, calcários carstificados);
- **Aquitarde** – formação geológica que permite a acumulação da água, mas o transporte é lento (ex: argila arenosa);
- **Aquiclude** – material impermeável, com certa capacidade de armazenar água, mas sem capacidade de transmitir (ex: argilas);
- **Aquífugo** – rochas impermeáveis que não armazenam e não transmitem água (ex: granito não fraturado).

Distribuição da água no solo



Distribuição da água no solo



Classificação e atributos hidrogeológicos dos ambientes subterrâneos

Zonas /flujo(sistema acuífero)	Velocidad del flujo	Condición de aeración	Conexión con la superficie
Zona no saturada	Rápida (1 m/día)	Aeróbica	Extensa
Zona saturada / flujo local(acuífero no confinado)	Rápida (1 cm/día)	Aeróbica	Extensa
Zona saturada / flujo intermedio (acuífero semiconfinado y confinado)	Baja (0.1-1m/año)	Anaeróbica	Pequeña
Zona saturada / flujo regional(acuífero confinado en cuencas profundas)	Muy lenta (<<0.1 m/año)	Anaeróbica	Virtualmente no existente

Porosidade - conceitos

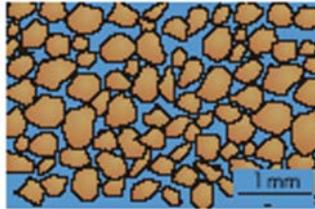
- ❑ **Porosidade (η)** - Razão entre o volume de vazios e o volume de solo.
- ❑ **Porosidade eficaz (η_e)** - É a quantidade de água efetivamente liberado por unidade de volume de material, ou seja, é a quantidade de água que drena de uma amostra saturada pela ação da gravidade.

Classificação dos aquíferos quanto ao tipo de porosidade

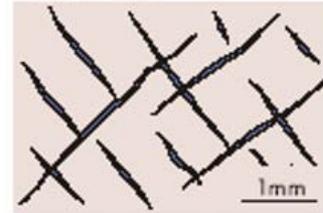
1- Aquífero Poroso ou granular – porosidade primária

Água armazenada nos espaços entre os grãos da rocha ou solo

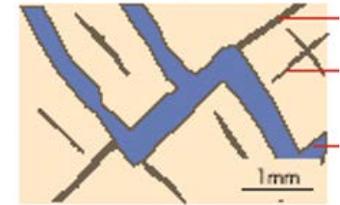
①



②



③

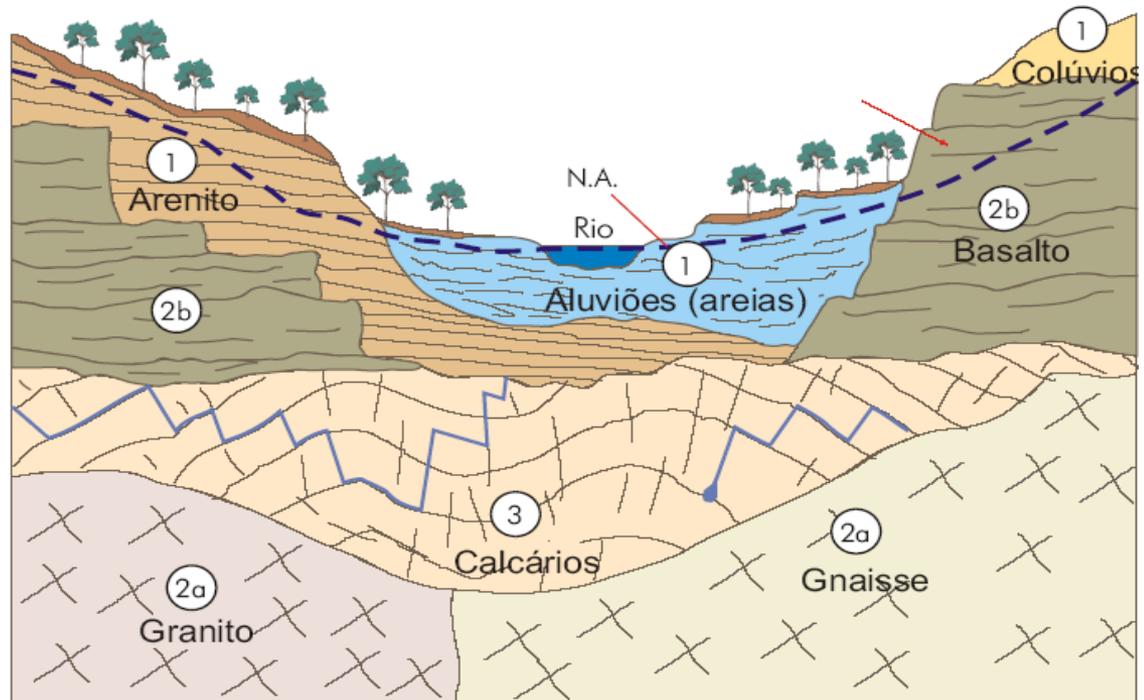


2 - Aquífero Fissural ou Fraturado – porosidade secundária

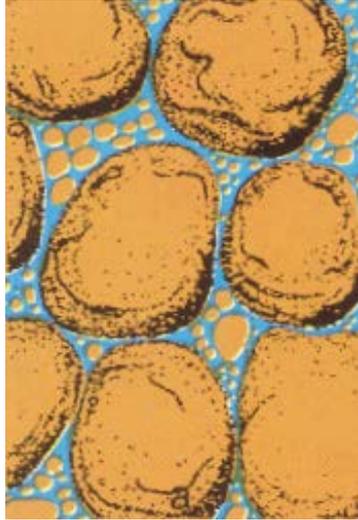
Água armazenada nas fraturas interconectadas da rocha

3 - Aquífero Cárstico - porosidade secundária

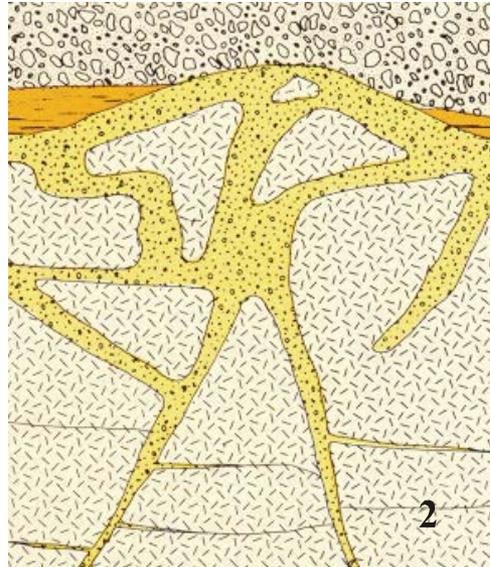
Água armazenada nos condutos e canais da rochas carbonáticas



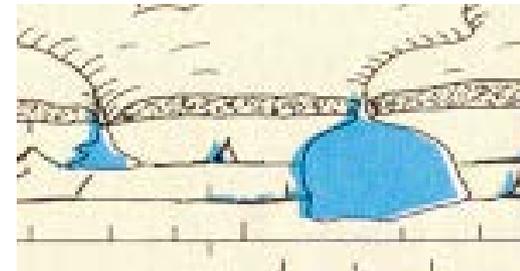
TIPOS DE AQUÍFEROS



1



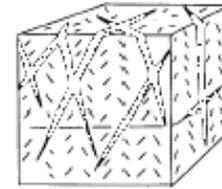
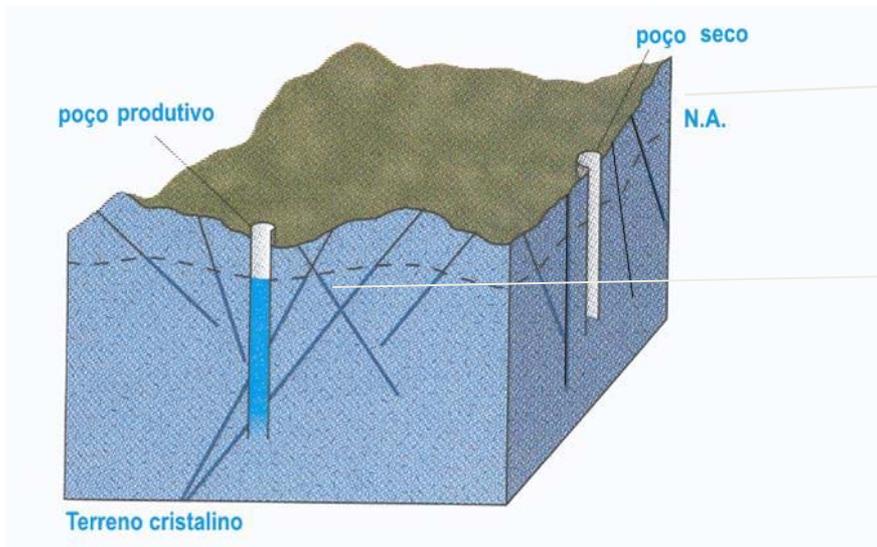
2



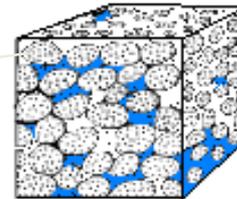
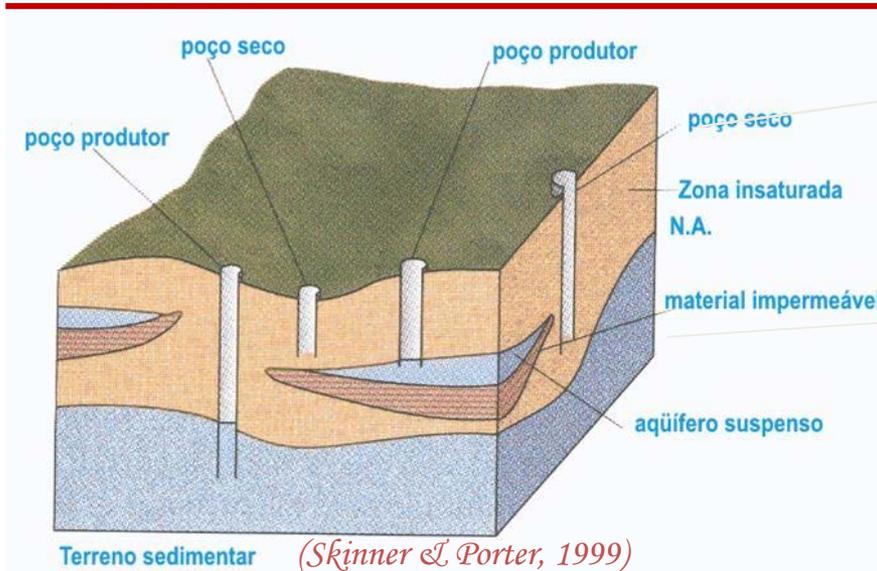
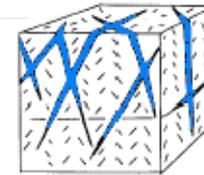
3

- 1 Aquífero Poroso: rochas sedimentares/solos.
- 2 Aquífero Fraturado/Fissural: rochas ígneas e metamórficas.
- 3 Aquífero Cárstico/Físsuro Cárstico: rochas carbonáticas.

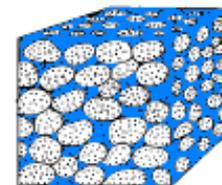
Tipos de aquíferos quanto à porosidade



-Fraturado
(fluxo local)



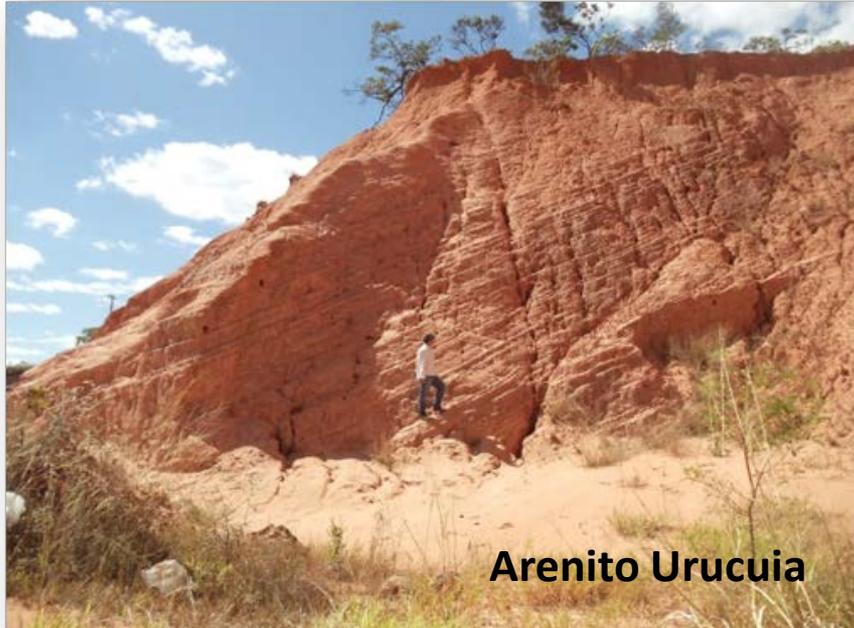
-Granular
(fluxo pode ser extenso)



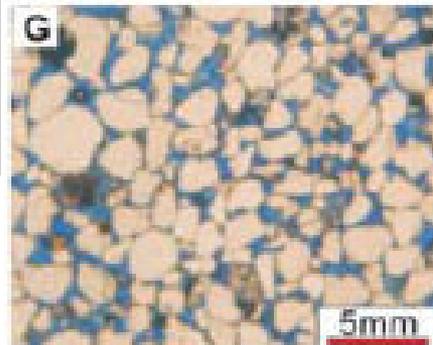
Faixa de valores de porosidade

Material	Porosidade (%)	Porosidade efetiva (%)
Argila	45	3
Areia	35	25
Pedregulho	25	22
Pedregulho e areia	20	16
Arenito	15	8
Calcáreo e folhelho	5	2
Quartzito e granito	1	0.5

AQUÍFEROS POROSOS



Arenito Urucuia



Rochas sedimentares e sedimentos não consolidados - arenitos, siltitos, areias, cascalho



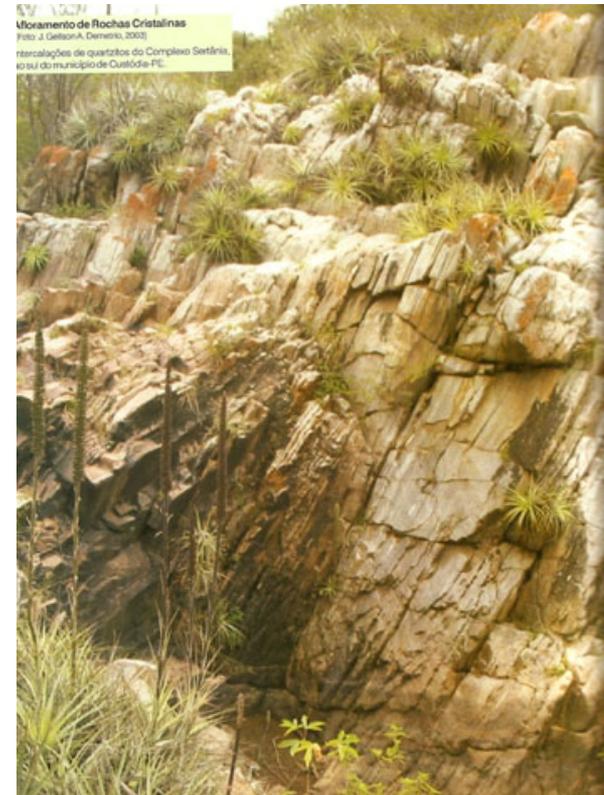
Arenito Botucatu (Aquífero Guarani)

AQUÍFEROS FISSURAIS

Granito

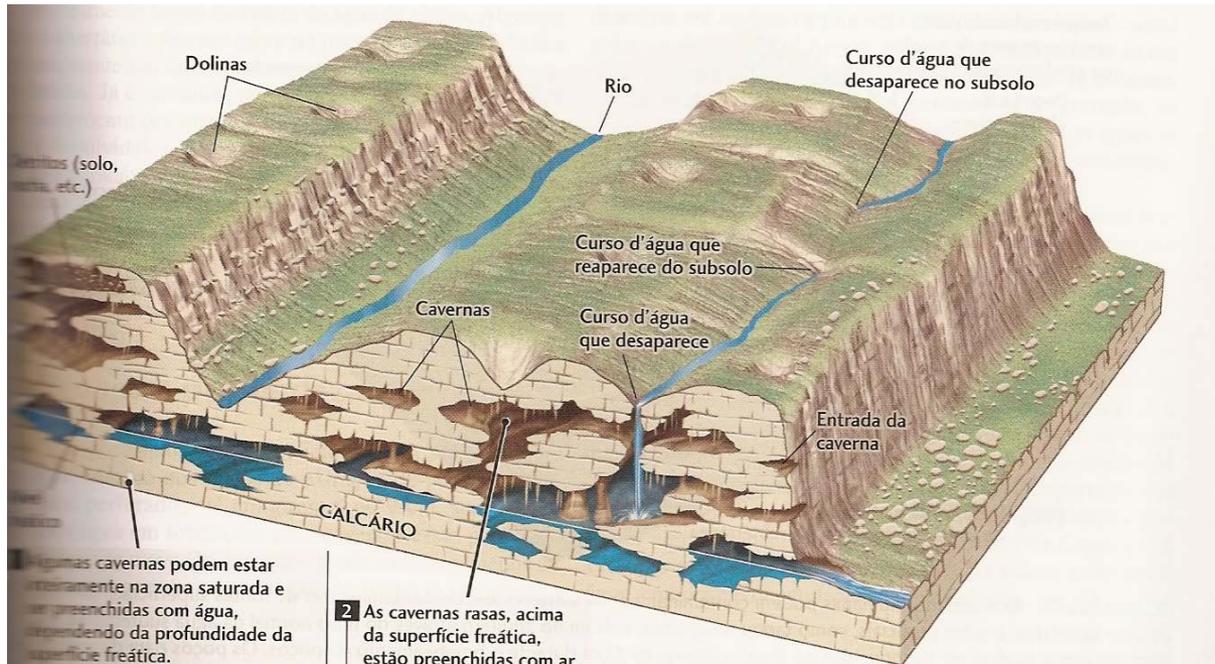


Rochas maciças e compactas -
ígneas e metamórficas



Quartzito

ROCHAS CARBONÁTICAS





Calcários Bambuí-BA

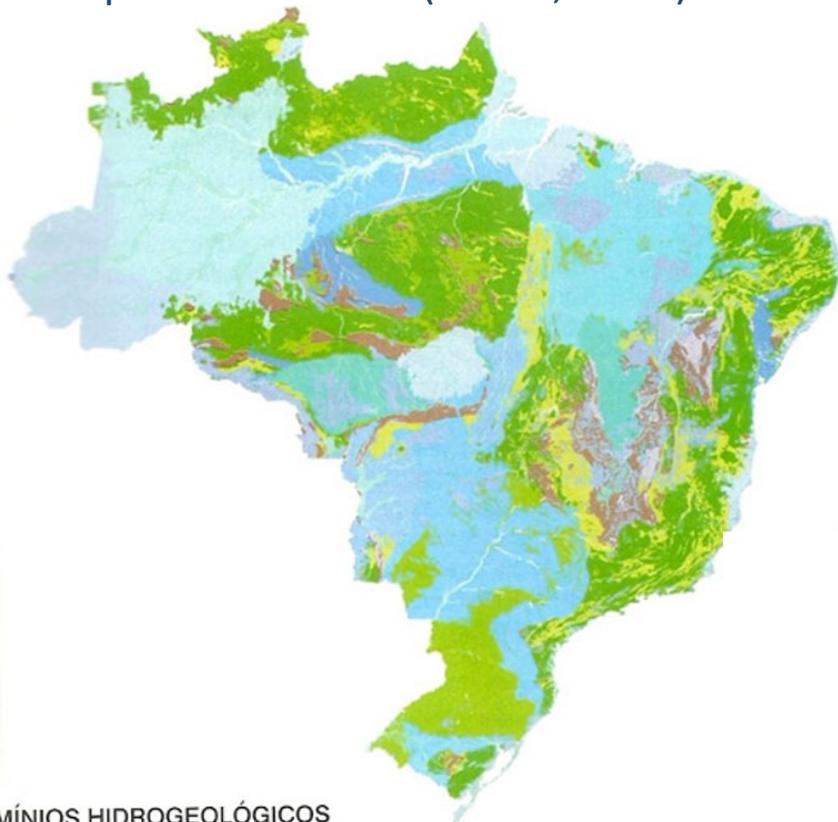
OCORRÊNCIA NO BRASIL

Mapa de aquíferos aflorantes (ANA, 2010)

-  Aquíferos Porosos
-  Aquíferos Fissurais
-  Aquíferos Cársticos

Aquíferos	Área aflorante (Km ²)
Porosos	4.553.615,1
Fraturados	3.918.267,0
Fraturado Semiárido	702.739,2
Fraturado Norte	1.536.762,8
Fraturado Centro-Sul	1.130.077,8
Serra Geral	420.575,6
Cársticos	128.111,4

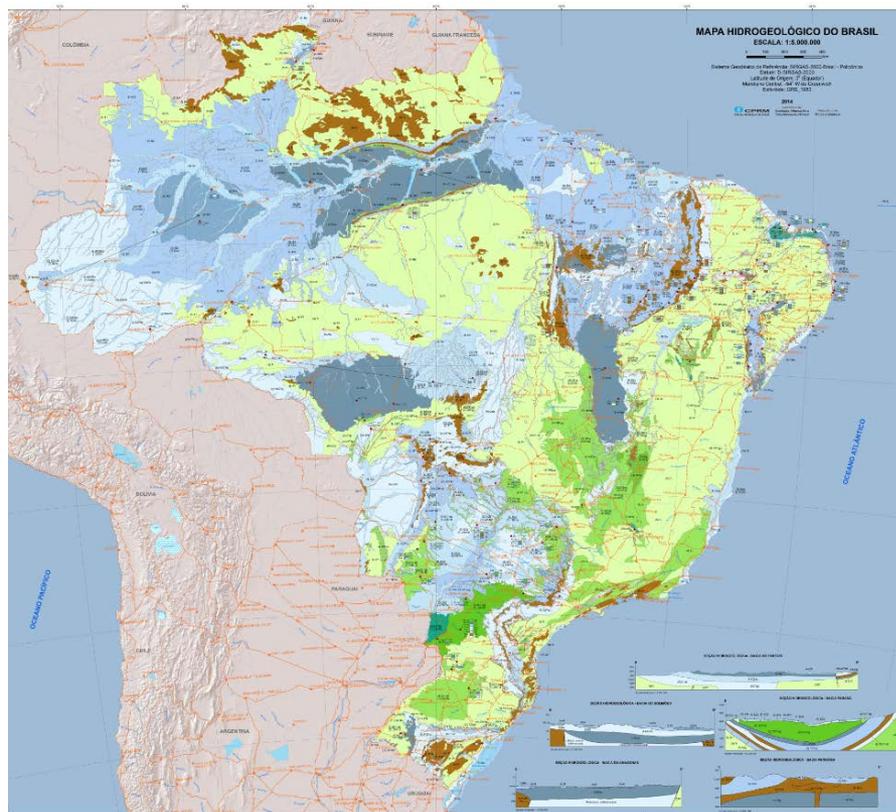
Mapa de Domínios (CPRM, 2007)



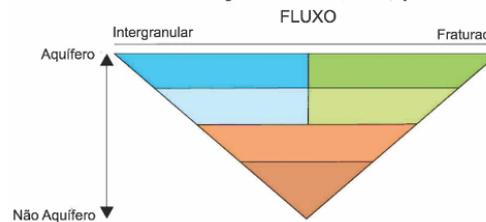
DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS

- Formação Cenozoicas } **Poroso**
- Bacias Sedimentares } **Poroso**
- Poroso/Fissural } **Poroso/Fissural**
- Metassedimentos/Metavulcânicas } **Fissural**
- Vulcânicas } **Fissural**
- Cristalino } **Fissural**
- Carbonatos/Metacarbonatos } **Cárstico**

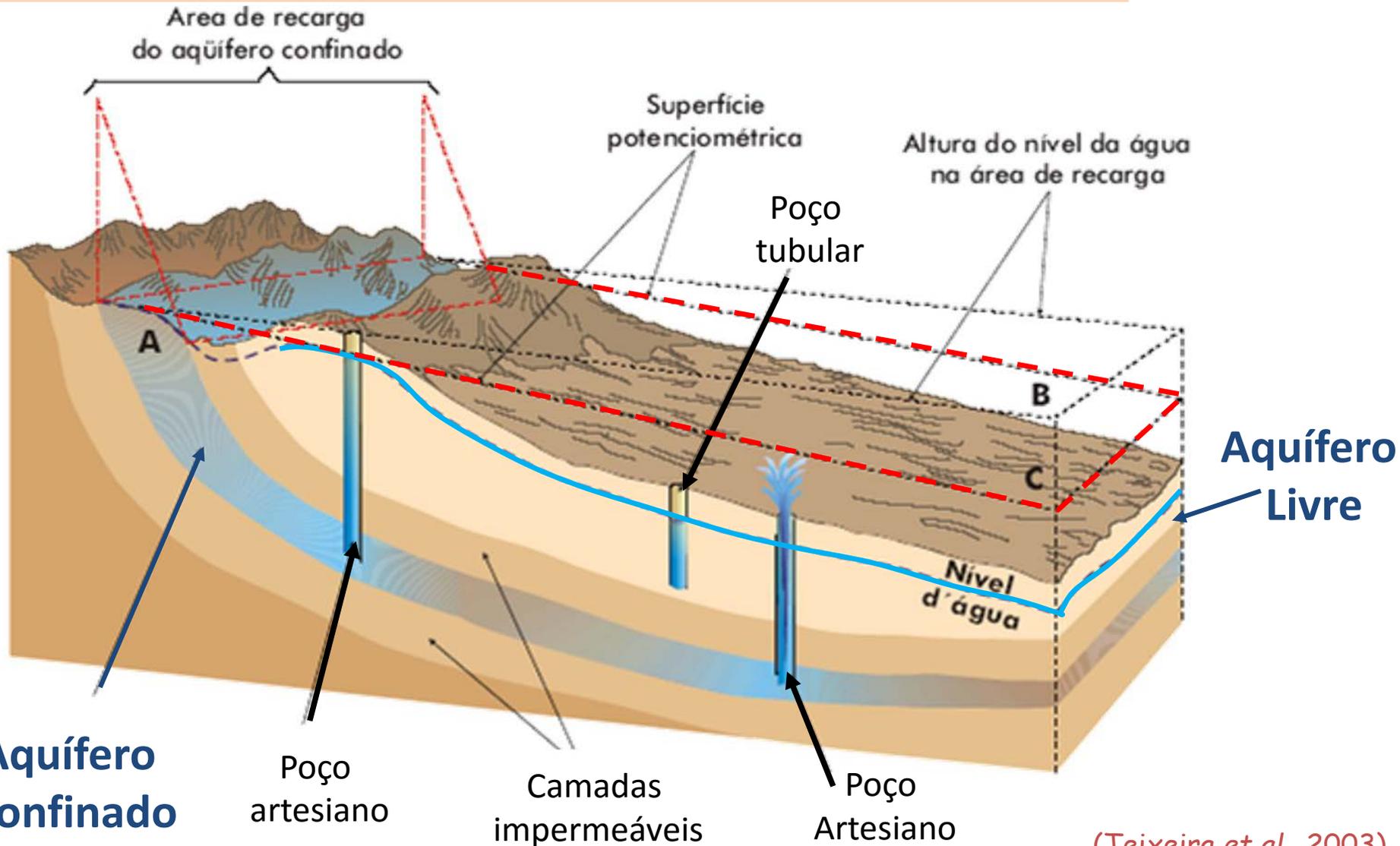
Mapa Hidrogeológico (CPRM, 2014)



Determinação dos Sistemas Aquíferos



Classificação dos aquíferos quanto à pressão hidrostática



Classificação dos aquíferos quando à pressão hidrostática

- ✚ **Livre ou freáticos:** pressão da água na superfície freática é igual a pressão atmosférica;
 - Maior vulnerabilidade natural;
 - Recarga mais rápida e maior;
 - Águas mais jovens;
 - Interação com as águas superficiais;
 - Poços mais rasos e de menor custo;
- ✚ **Semi-confinado (ou confinado drenante):** Tem como limite superior um extrato semipermeável (aquitarde)
- ✚ **Confinado:** Tem como limite superior um extrato impermeável. A pressão no nível d' água é maior que a pressão atmosférica.
 - Menor vulnerabilidade natural;
 - Recarga mais lenta;
 - Águas mais “velhas”
 - Poços mais profundos e de maior custo;
 - Poços artesianos (jorrantes ou não)

Movimento da água subterrânea.

Lei de Darcy

$$Q = k.A.(h_1-h_2)/L$$

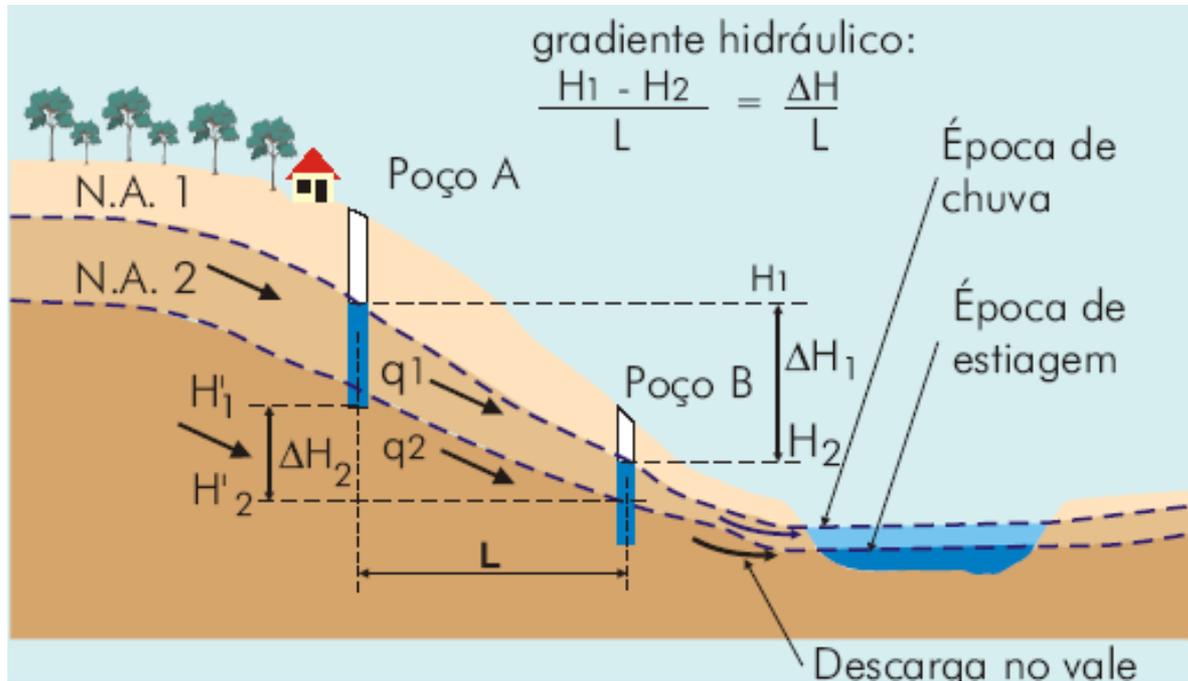
K= condutividade hidráulica (m/s)

A= área secção transversal (m²)

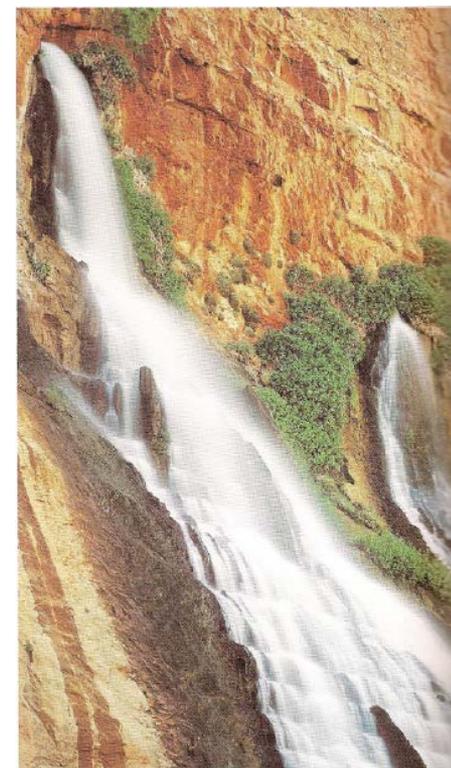
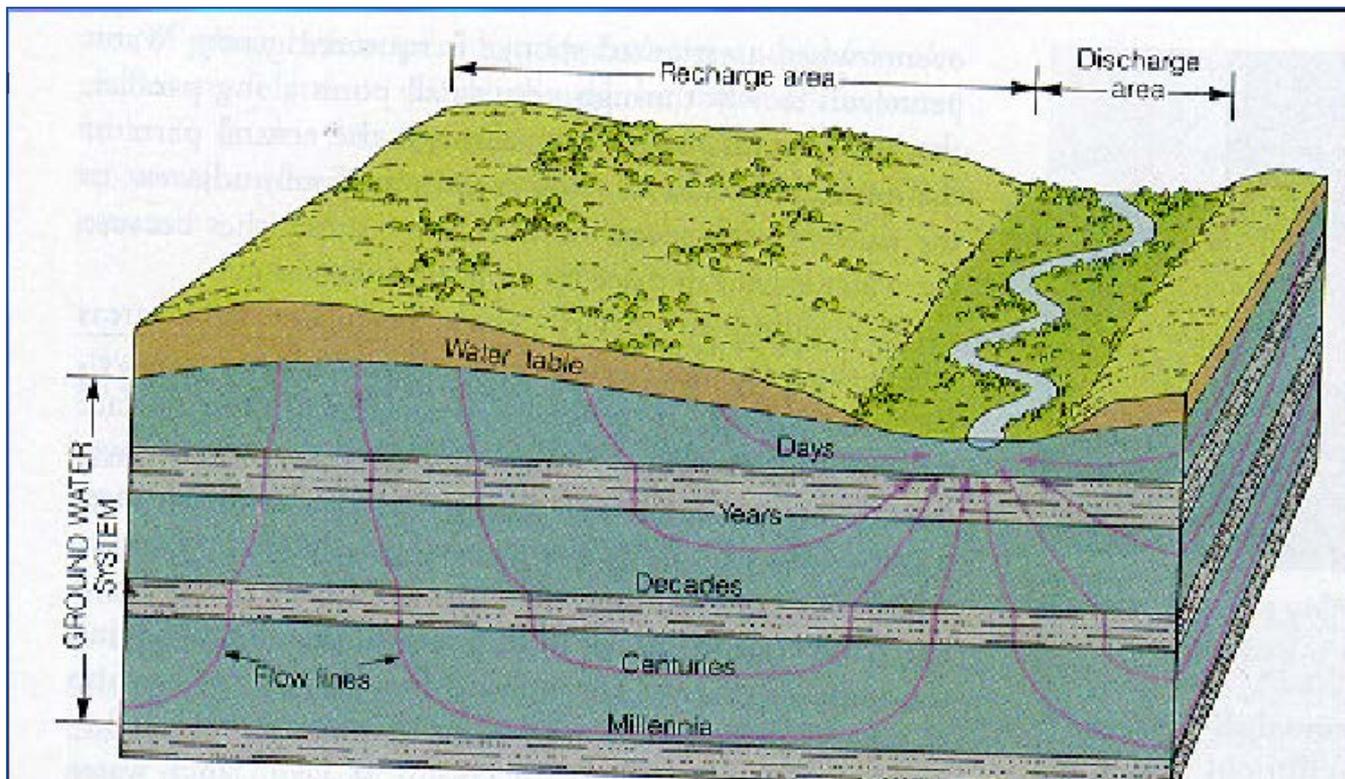
h₂,h₁= cargas hidráulicas (m)

L=distancia entre pontos (m)

Q=Vazão (m³/s)



RECARGA E DESCARGA DE AQUÍFEROS

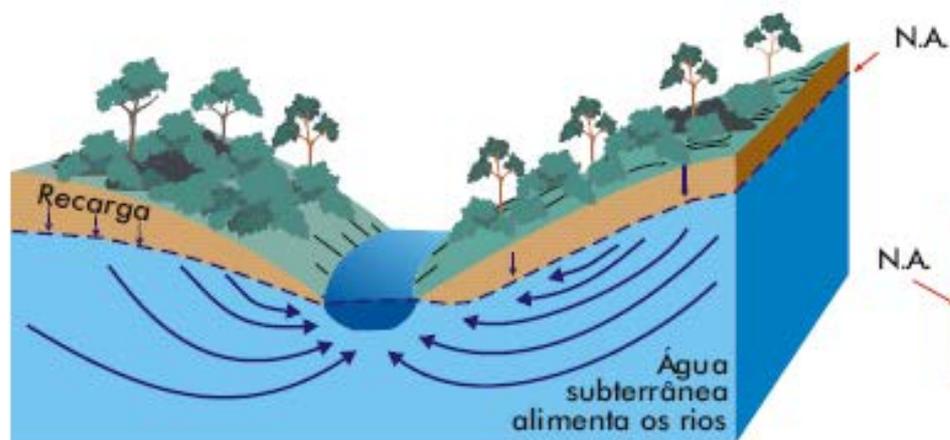


Recarga: O processo por meio do qual um aquífero recebe água. Pode ser natural ou artificial.

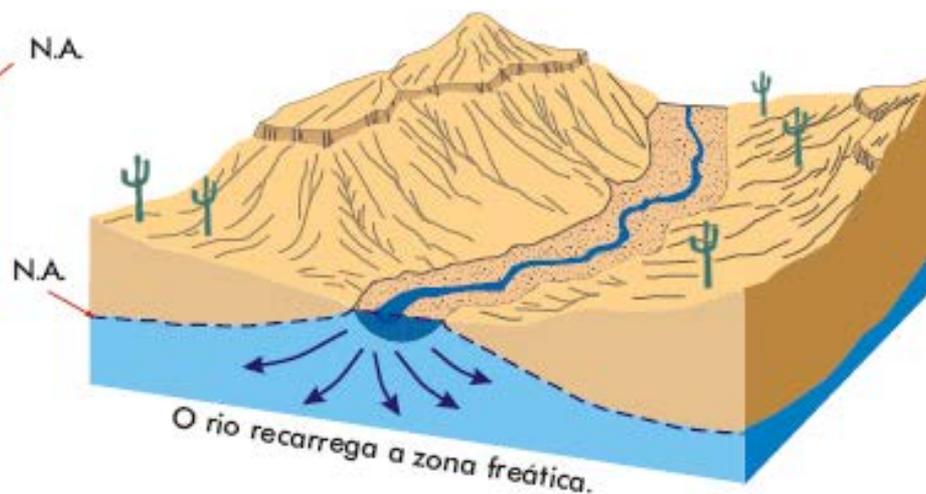
Descarga: ocorre quando o lençol freático intercepta a superfície do terreno – nascentes, rios, lagos – ou artificialmente pelo bombeamento de poços.

INTERAÇÃO ENTRE ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA

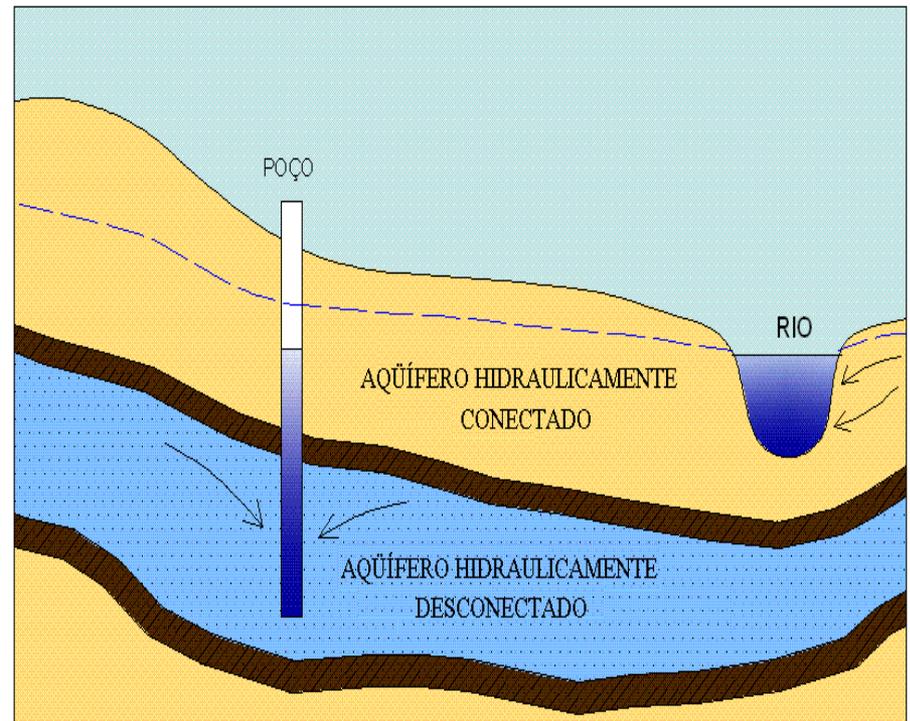
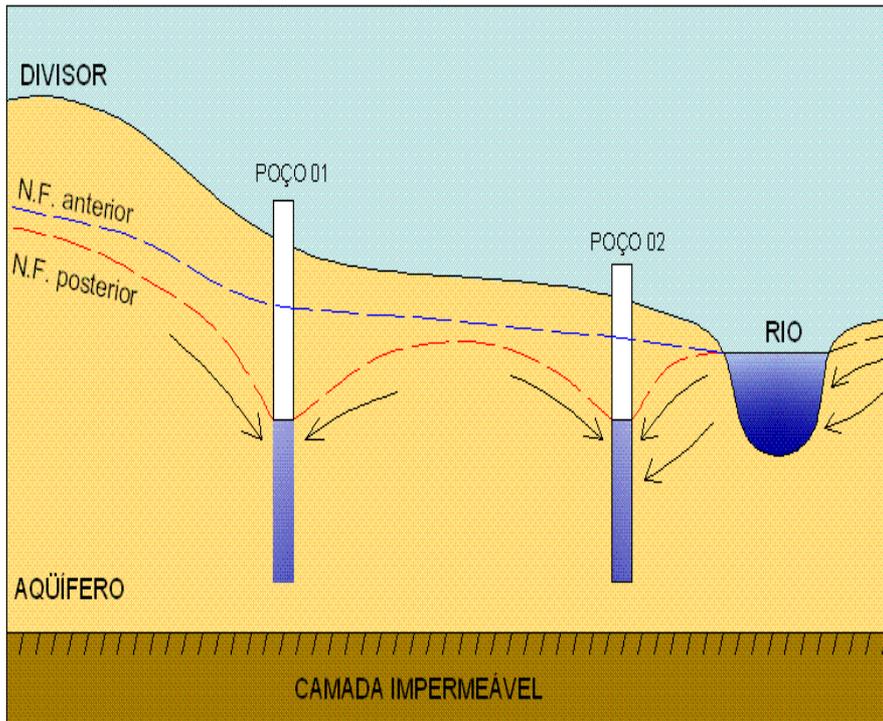
Rio efluente



Rio influente



INTERAÇÃO ENTRE ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA



Parâmetros Hidrodinâmicos

CONDUTIVIDADE HIDRAÚLICA - K

É a facilidade com que a água se move através dos interstícios da rocha. É usualmente expressa em m/dia, **m/s**, m/min, cm/s.

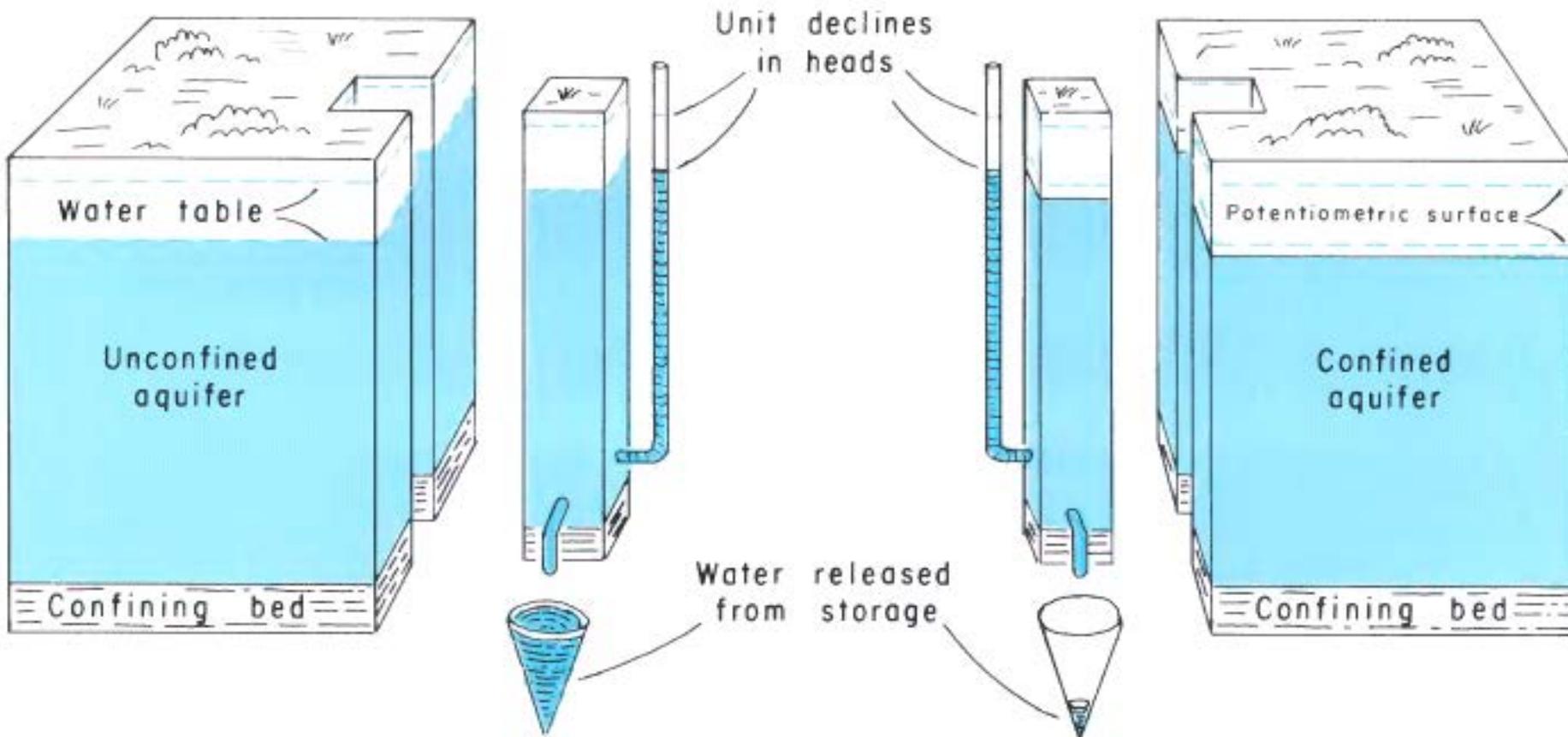
TRANSMISSIVIDADE - T

É a capacidade de transmissão de água através de toda a espessura saturada do aquífero. É usualmente expressa em **m²/s**, m²/min, m²/dia. Corresponde à condutividade vezes a espessura saturada.

COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO - S

É conceituada como a quantidade de água que pode ser liberada do aquífero de toda a espessura saturada do aquífero. É um valor adimensional.

Coeficiente de armazenamento (S)



Aquíferos livres: $S = 0,01$ a $0,35$

Aquíferos confinados: $S = 1 \times 10^{-3}$ a 1×10^{-5} .

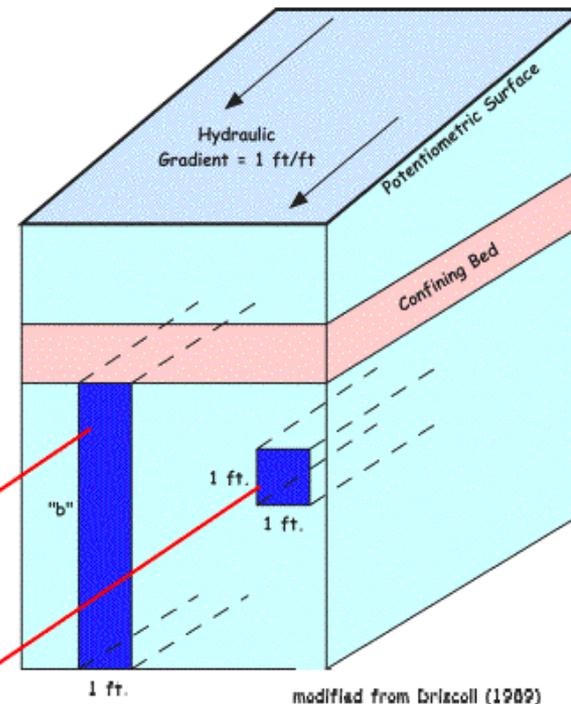
Transmissividade (T)

- É uma medida da taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a gradiente hidráulico unitário.
- Unidade m^2/s .

$$T = K \cdot b$$

"T" Transmissivity = the volume of water flowing through a cross-sectional area of an aquifer that is 1 ft. x the aquifer thickness (b), under a hydraulic gradient of 1 ft./1 ft. in a given amount of time (usually a day).

"K" hydraulic conductivity = the volume of water flowing through a 1 ft. x 1 ft. cross-sectional area of an aquifer under a hydraulic gradient of 1 ft./1 ft. in a given amount of time (usually a day).



Q/s (m ³ /h/m)*	T (m ² /s)	K (m/s)	VAZÃO (m ³ /h)	PRODUTIVIDADE (**)	CLASSE
≥ 4,0	≥10 ⁻⁰²	≥10 ⁻⁰⁴	≥100	Muito Alta: Fornecimentos de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destaquem em âmbito nacional.	(1)
2,0 ≤ Q/s < 4,0	10 ⁻⁰³ ≤ T < 10 ⁻⁰²	10 ⁻⁰⁵ ≤ K < 10 ⁻⁰⁴	50 ≤ Q < 100	Alta: Características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos.	(2)
1,0 < Q/s < 2,0	10 ⁻⁰⁴ ≤ T < 10 ⁻⁰³	10 ⁻⁰⁶ ≤ K < 10 ⁻⁰⁵	25 ≤ Q < 50	Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas.	(3)
0,4 ≤ Q/s < 1,0	10 ⁻⁰⁵ ≤ T < 10 ⁻⁰⁴	10 ⁻⁰⁷ ≤ K < 10 ⁻⁰⁶	10 ≤ Q < 25	Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.	(4)
0,04 ≤ Q/s < 0,4	10 ⁻⁰⁶ ≤ T < 10 ⁻⁰⁵	10 ⁻⁰⁸ ≤ K < 10 ⁻⁰⁷	1 ≤ Q < 10	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos.	(5)
<0,04	<10 ⁻⁰⁶	<10 ⁻⁰⁸	< 1,0	Pouco Produtiva ou Não Aquífera: Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais	(6)

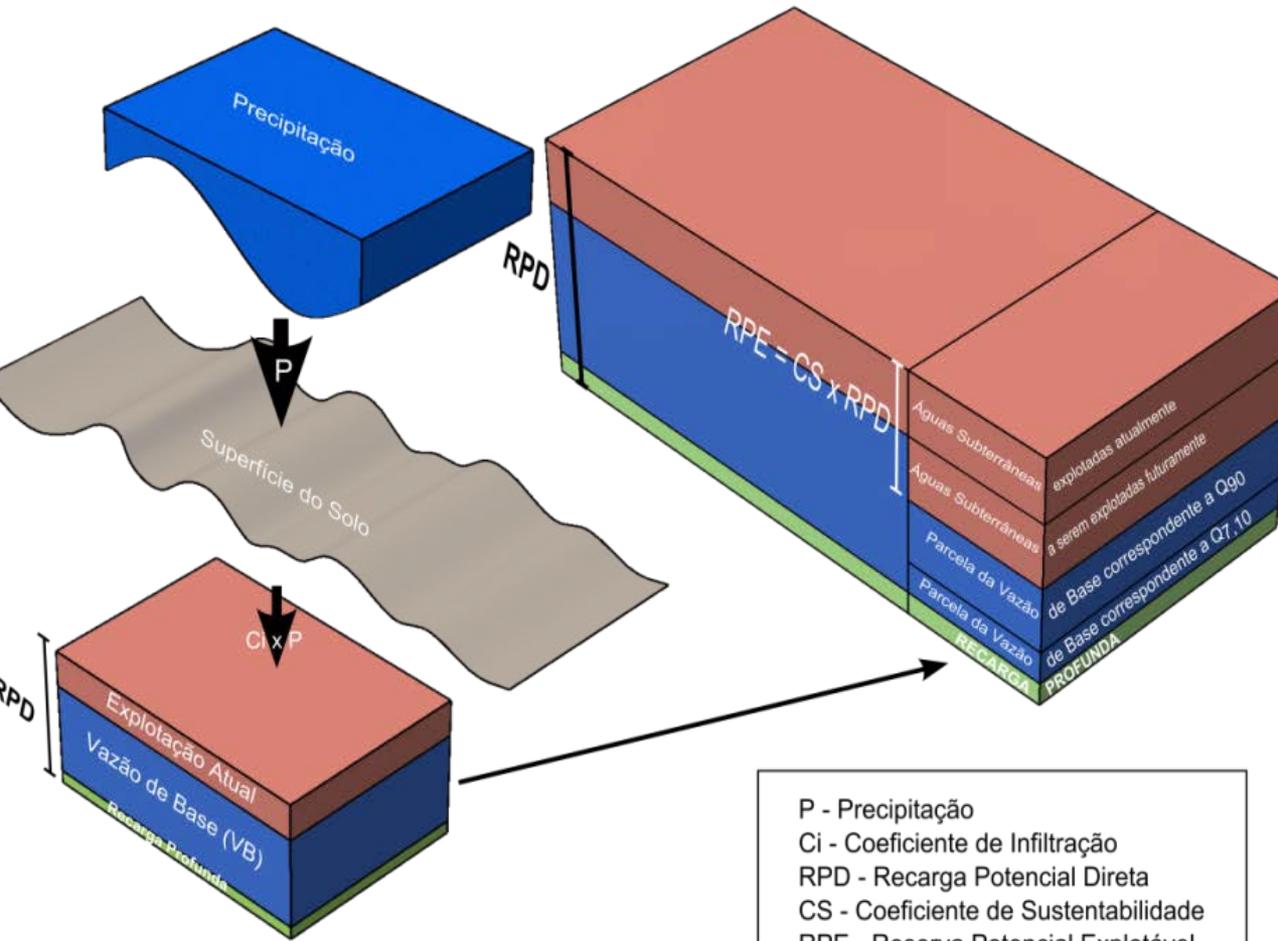
Parâmetros hidrodinâmicos utilizados no mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo (CPRM)

Reservas de águas subterrâneas

- **Reservas reguladoras (ativa)** – representam a quantidade de água livre armazenada pelo aquífero ao curso de uma recarga importante por alimentação natural. Elas são, assim submetidas ao ritmo sazonal das precipitações.
- **Reservas permanentes** – constituem as águas acumuladas que não variam em função das precipitações anuais. Permitem uma exploração em períodos de vários anos.
- **Reservas exploráveis** – representam as parcelas de recursos que podem ser extraídos dos aquíferos de forma sustentável. Há várias discussões em torno das reservas de exploração. O conceito é muito controvertido.
- **Reservas totais** – conjunto das reservas permanentes com as reservas reguladoras. Representam a totalidade de água existente em um aquífero.

Reserva Explotável

(Conceito utilizado pela ANA)



P - Precipitação
 Ci - Coeficiente de Infiltração
 RPD - Recarga Potencial Direta
 CS - Coeficiente de Sustentabilidade
 RPE - Reserva Potencial Explotável

$$RPD = \text{Pluv (mm)} \times C_i \times \text{Área}$$

$$RPE = RPD \times CS$$

Reserva Potencial Direta - RPD - Parcela da chuva média anual que infiltra e efetivamente chega aos aquíferos livres. Equivalente às reservas reguladoras.

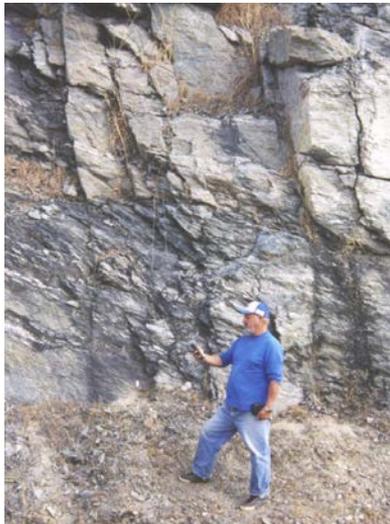
Coeficiente de Sustentabilidade - CS - Percentual da RPD que pode ser explorada, sendo variável por aquífero.

Reserva Potencial Explotável - RPE: Parcela da RPD que pode ser explorada de forma sustentável, de forma a não interferir nas vazões superficiais mínimas referenciais para outorga, como a $Q_{7,10}$ e Q_{95} .

Controles da Distribuição de Água Subterrânea

- Rochas / Estruturas Geológicas
- Solos - Tipos e espessura
- Geomorfologia - padrão de relevo
- Clima
- Uso

TIPOS DE ROCHAS



TIPOS DE SOLOS



TIPOS DE SOLOS



Latossolo Vermelho-Amarelo



Latossolo Vermelho

TIPOS DE SOLOS

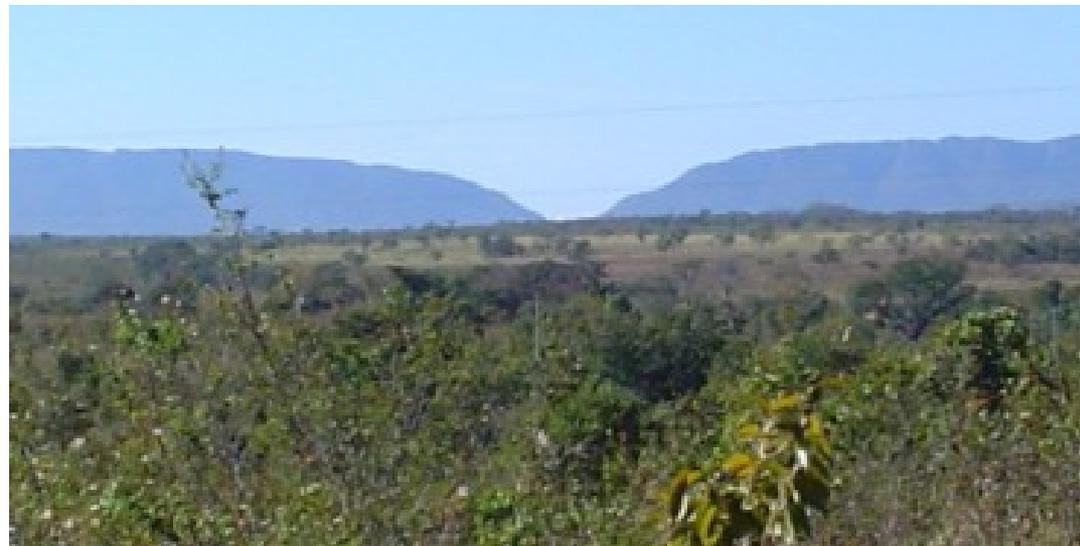


Cambissolo



Plintossolo

GEOMORFOLOGIA



USO E OCUPAÇÃO





Qualidade da água subterrânea

Origens dos constituintes nas águas subterrâneas

- ✚ Constituintes inorgânicos : águas de infiltração, intemperismo químico, fenômenos magmáticos e atividades vulcânicas.
- ✚ CO₂ : atmosférica, biológica (oxidação química da MO recente), sedimentar (carbonatos, calcários, dolomitos), metamórfica e magmática.
- ✚ Elementos radioativos : radônio, tório e actínio. O ²²²Rn (U em granitos e sedimentos marinhos) é o mais abundante nas águas minerais.

Condições que influem na hidroquímica das águas subterrâneas

- ✚ Condições físicas e geológicas do intemperismo e reações (temperatura; profundidade / tempo de trânsito);
- ✚ Fatores naturais relacionadas ao clima, T, ambiente de circulação, aporte de gases, troca iônica ou mistura de águas de diferentes origens;
- ✚ Influência antrópica (recarga, T, contaminação).

Classificação dos componentes inorgânicos dissolvidos na água subterrânea

Constituintes principais (> 5 mg/L)

- Bicarbonato
- Cálcio
- Cloreto
- Magnésio
- Sílica
- Sódio
- Sulfato
- Acido carbônico

Constituintes menores (0,01-10,0 mg/L)

- Boro
- Potássio
- Ferro
- ...

Constituintes traços (<0,1 mg/L)

- Alumínio
- Manganês
- ...

(Davis & De Wiest, 1966)

Valores comuns de alguns parâmetros das águas subterrâneas

Parâmetros	Unidade	Variação comum na água de irrigação ⁽¹⁾	Valores águas subterrâneas ⁽²⁾
Condutividade elétrica (CE)	dS/m	0-3	---
Sólidos totais dissolvidos (STD)	mg/L	0-2000	100-1000
Cálcio	mg/L	0-400	10-200
Magnésio	mg/L	0-60	1-100
Sódio	mg/L	0-900	1-300
Ferro	mg/L	----	0-5
Potássio	mg/L	0-2	1-20
Carbonato	mg/L	0-30	---
Bicarbonato	mg/L	0-610	80-400
Cloreto	mg/L	0-1000	1-150
Sulfato	mg/L	0-700	10-100
Boro	mg/L	0-2	< 2
RAS	mg/L	0-15	----
Ph	1-14	6-8,5	5,5-8,5

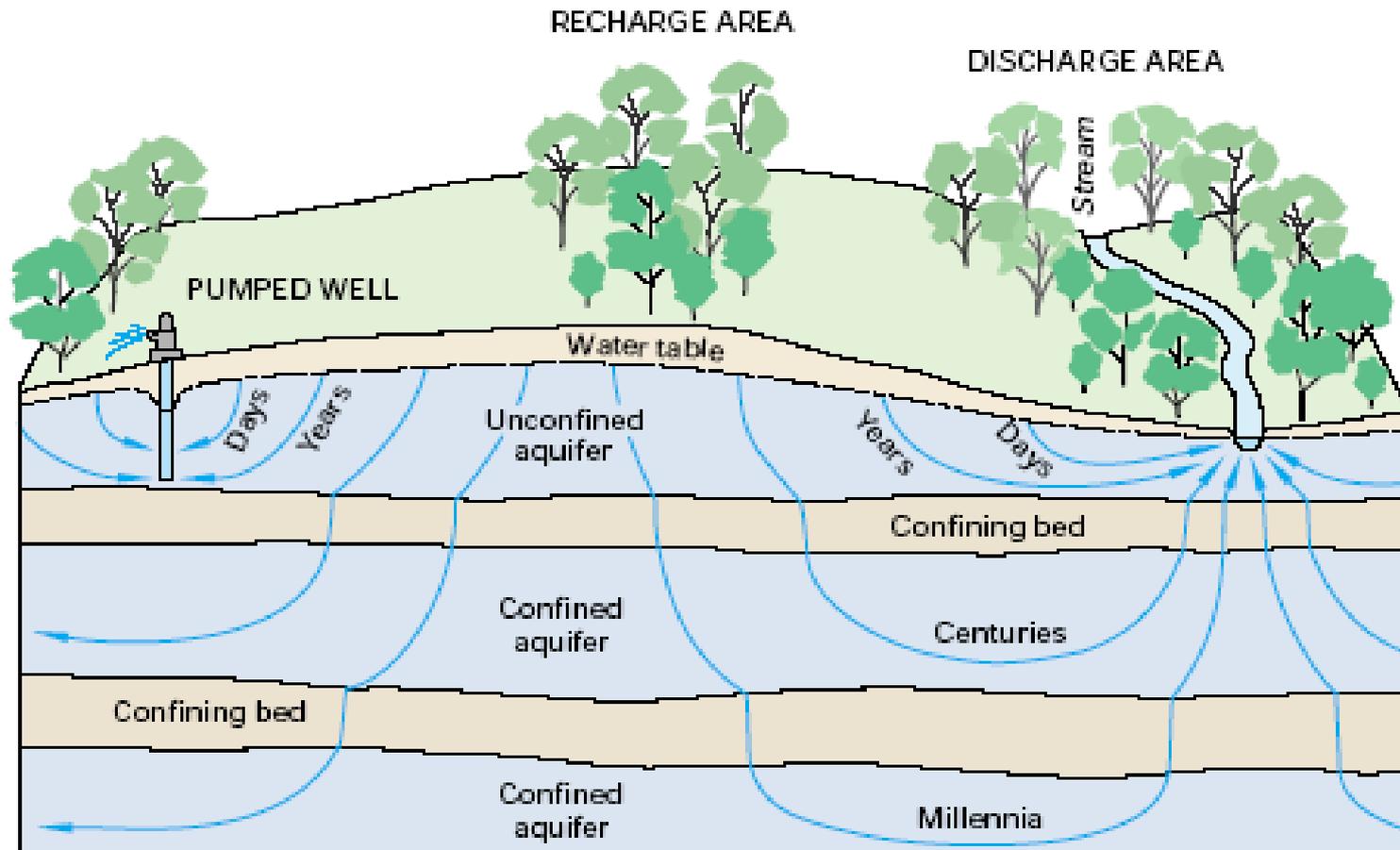
Qualidade x regime hidráulico

Regime hidráulico	Condições	Evolução química
Área recarga	Água de chuva, baixo STD, elevado CO ₂ , fluxo vertical para baixo.	Aumento STD, HCO ₃ , SO ₄ , Ca e Mg são espécies dominantes. Variabilidade espacial com litologias.
Área intermediária	Moderada mudanças água de recarga, baixo CO ₂ , fluxo lateral.	STD aumenta com extensão fluxo e tempo de residência; Na, Ca, Mg, HCO ₃ , SO ₄ e Cl são espécies dominantes.
Área de descarga	Água mineralizada, fluxo verticais para baixo e cima, mistura com água doce infiltrada.	Alto STD na superfície, SO ₄ , Cl e alto CO ₂ . Na é a espécie dominante. Precipitação de minerais.

Sistemas de fluxos subterrâneos

- ✚ Fluxo Local : zona de fluxo ativo, fortemente influenciado pela precipitação local (cm-m/dia).
- ✚ Intermediário : zona de fluxo mais profundo, moderadamente afetado por eventos de precipitação local (cm-m/ano).
- ✚ Regional : zona mais inferior, de água relativamente estagnante não afetada pela precipitação local.

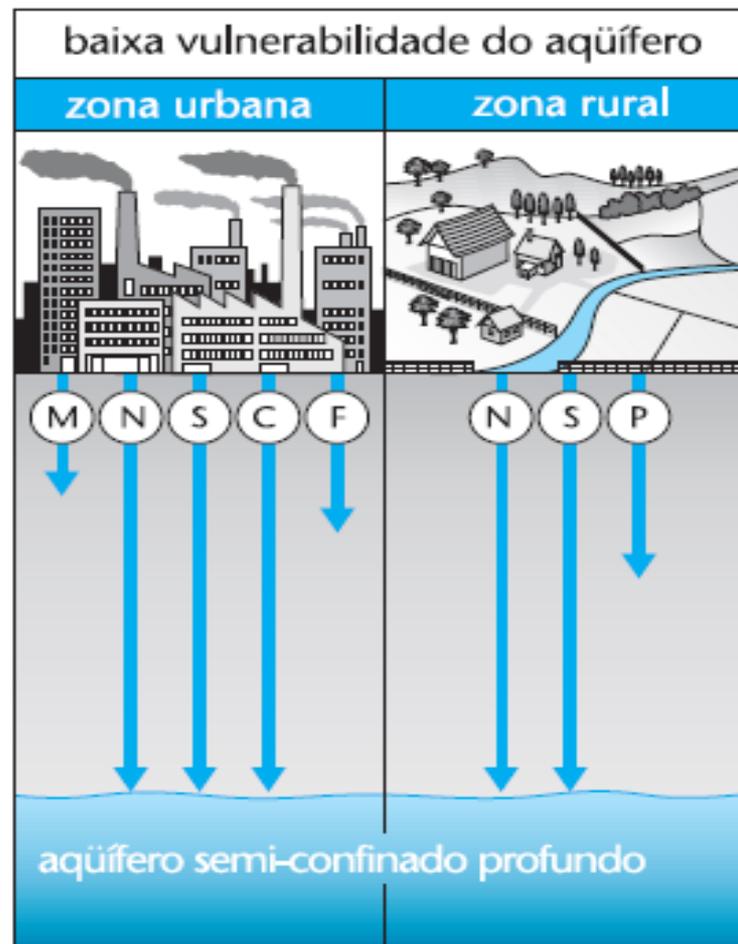
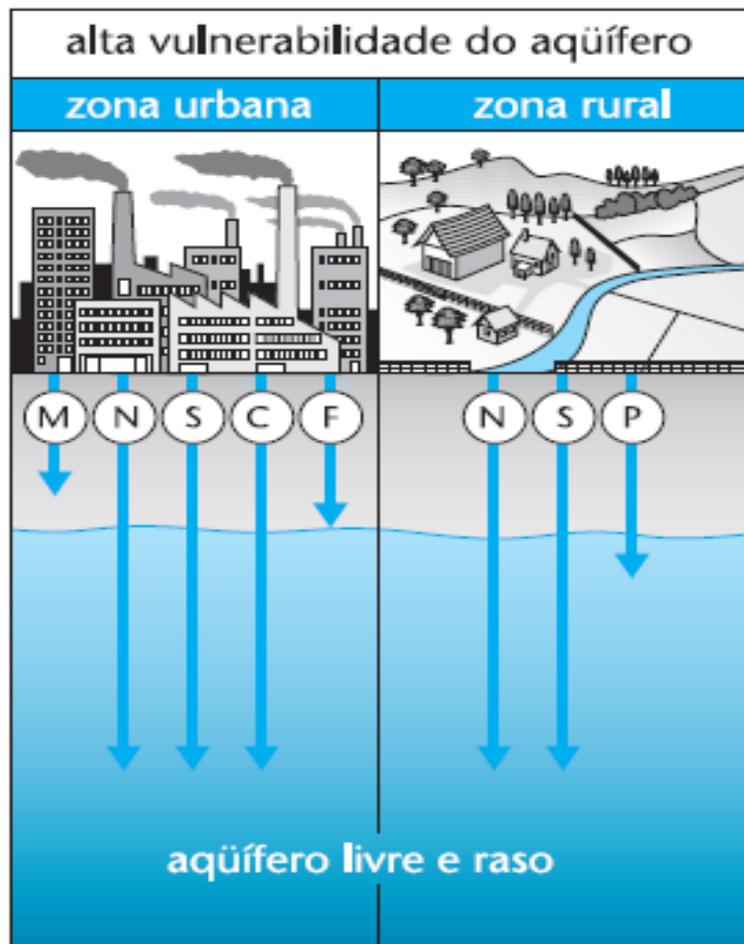
Circulação de águas subterrâneas



Processos comuns de poluição das águas subterrâneas



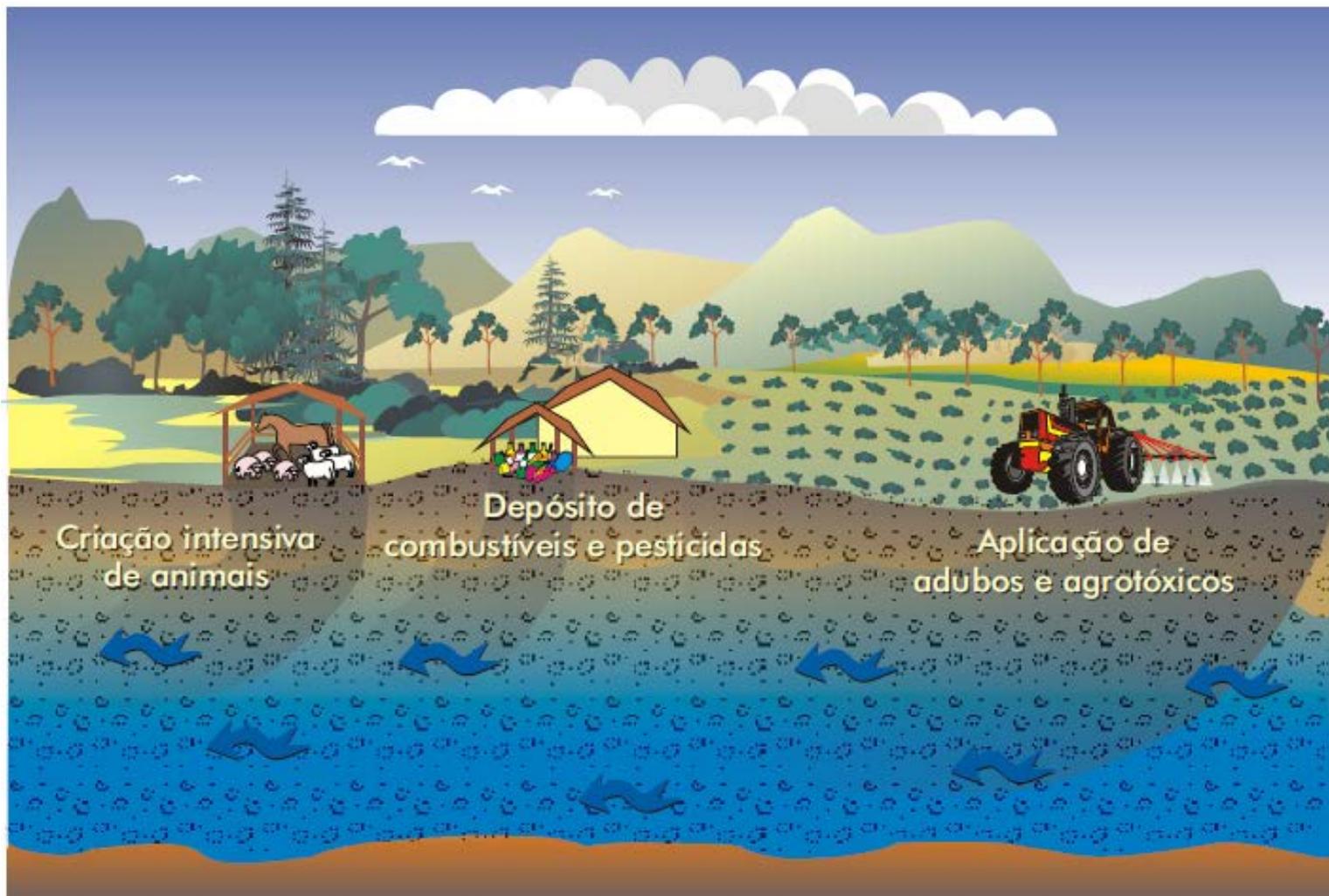
Vulnerabilidade x tipo aquífero



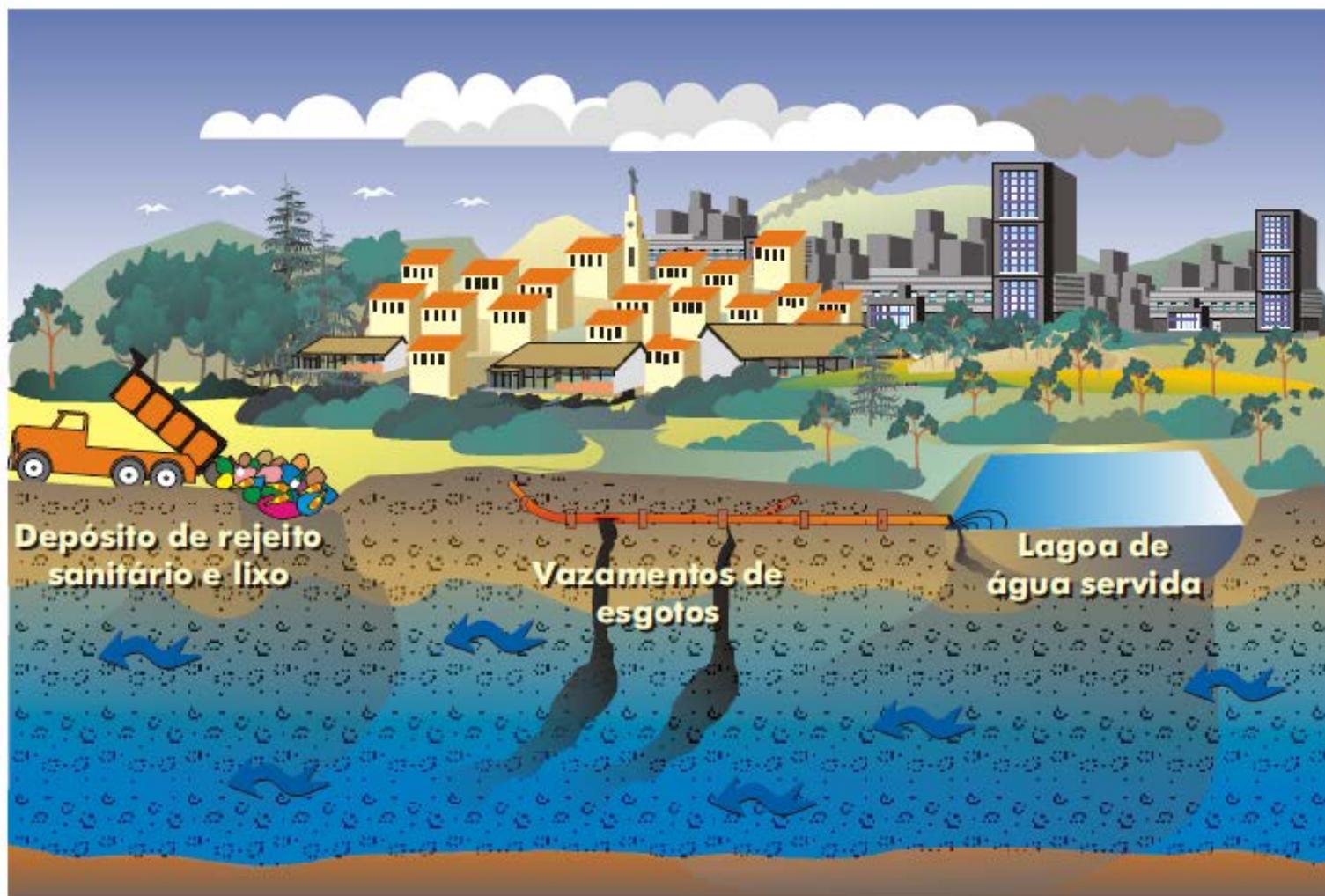
- | | |
|----------------------|----------------|
| (M) metais pesados | (N) nitrato |
| (F) patógenos fecais | (P) pesticidas |

- | | |
|----------------|----------------------|
| (S) salinidade | (C) carbono orgânico |
|----------------|----------------------|

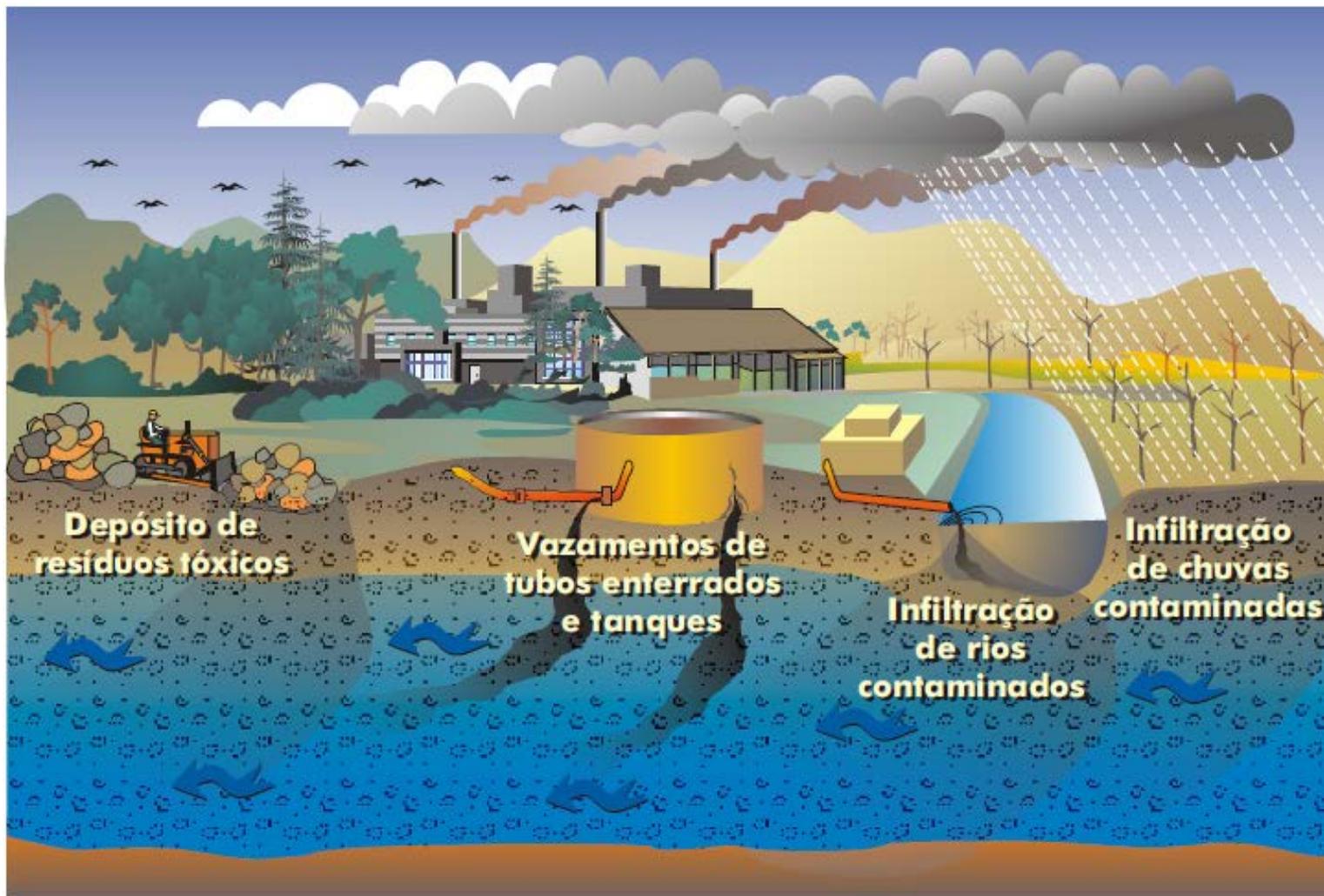
Contaminantes comuns das águas subterrâneas e fontes comuns de poluição



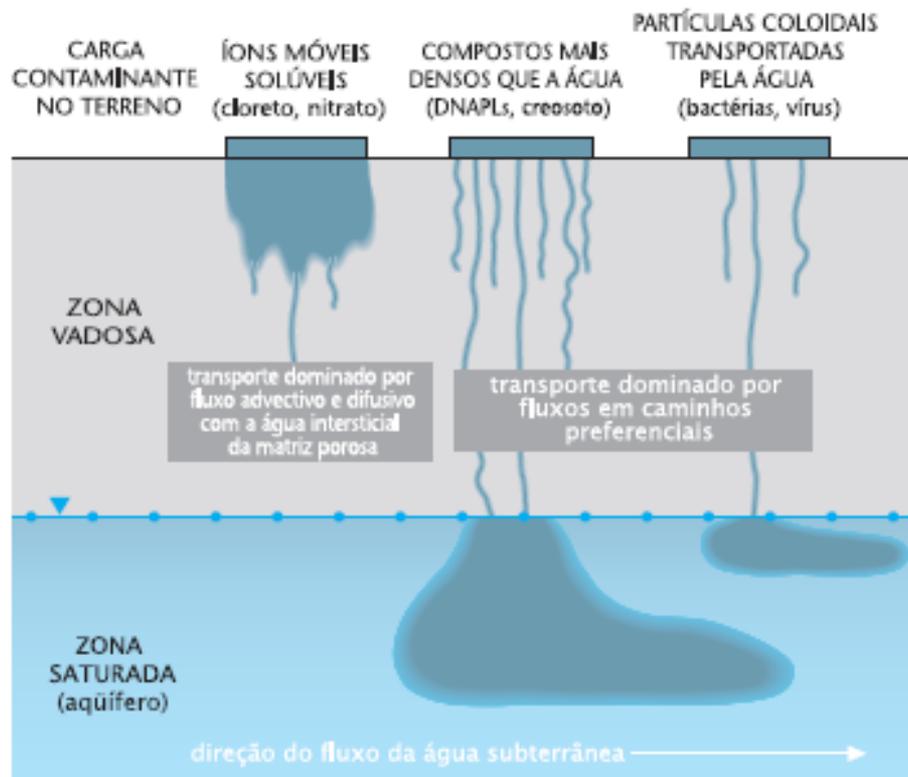
Contaminantes comuns das águas subterrâneas e fontes comuns de poluição



Contaminantes comuns das águas subterrâneas e fontes comuns de poluição



Fluxo de contaminantes



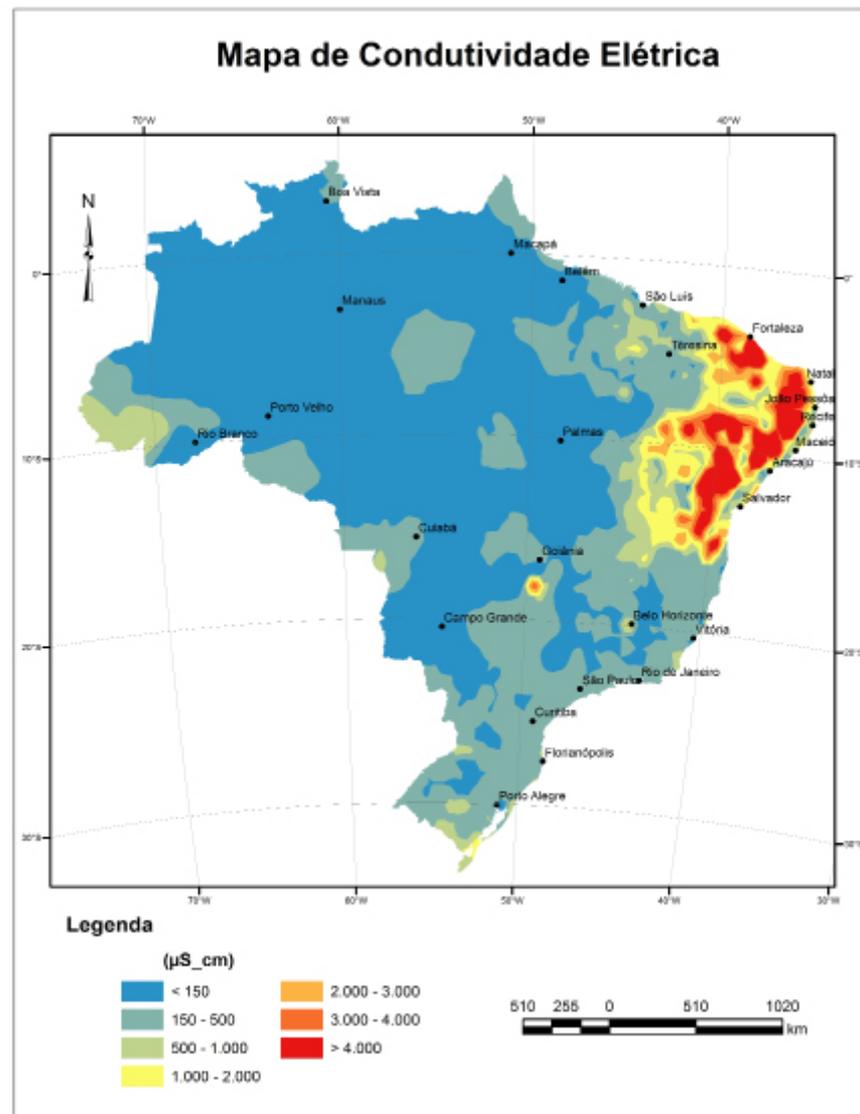
Contaminantes comuns das águas subterrâneas e fontes comuns de poluição

ORIGEM DA POLUIÇÃO	TIPO DE CONTAMINANTE
Atividade agrícola	nitrato; amônio; pesticidas; organismos fecais
Saneamento <i>in situ</i>	nitrato; hidrocarbonetos halogenados; microorganismos
Garagens e postos de serviço	hidrocarbonetos aromáticos e halogenados; benzeno; fenóis
Disposição de resíduos sólidos	amônio; salinidade; hidrocarbonetos halogenados; metais pesados
Indústrias metalúrgicas	tricloroetileno; tetracloretileno; hidrocarbonetos halogenados; fenóis; metais pesados; cianureto
Pintura e esmaltação	alquilbenzeno; hidrocarbonetos halogenados; metais; hidrocarbonetos aromáticos; tetracloretileno
Indústrias de madeira	pentaclorofenol; hidrocarbonetos aromáticos; hidrocarbonetos halogenados
Limpeza a seco	tricloroetileno; tetracloretileno
Indústria de pesticida	hidrocarbonetos halogenados; fenóis; arsênico
Despejo de lodo do esgoto	nitrato amônio; hidrocarbonetos halogenados; chumbo; zinco
Curtumes	chromo; hidrocarbonetos halogenados; fenóis
Extração/exploração de gás e petróleo	salinidade (cloreto de sódio); hidrocarbonetos aromáticos
Mineração de carvão e metalíferos	acidez; metais pesados; ferro; sulfatos

Qualidade das águas subterrânea nos principais sistemas aquíferos

- ✚ Nos terrenos sedimentares, em geral, a qualidade é boa. Localmente, nas bacias sedimentares muito profundas, nas porções mais espessas, devido à baixa renovação, contato prolongado com meio rochoso, pode ocorrer restrições;
- ✚ Aquíferos carbonáticos (Bambuí, Jandaíra, etc) podem apresentar limitação devida à elevada dureza e localmente de cloretos;
- ✚ Terrenos cristalinos, no semi-árido, apresentam, em geral, elevado teor de sais, enquanto no restante do País são de boa qualidade.

QUALIDADE DA ÁGUA



Principais íons e Classificação das águas subterrâneas

Diagramas são frequentemente utilizados para classificação e comparação de distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes.

Ânions

- Bicarbonato (HCO_3^-)
- Carbonato (CO_3^{2-})
- Sulfato (SO_4^{2-})
- Cloreto (Cl)

Cátions

- Sódio (Na^+)
- Potássio (K^+)
- Cálcio (Ca^{2+})
- Magnésio (Mg^{2+})

Exemplos

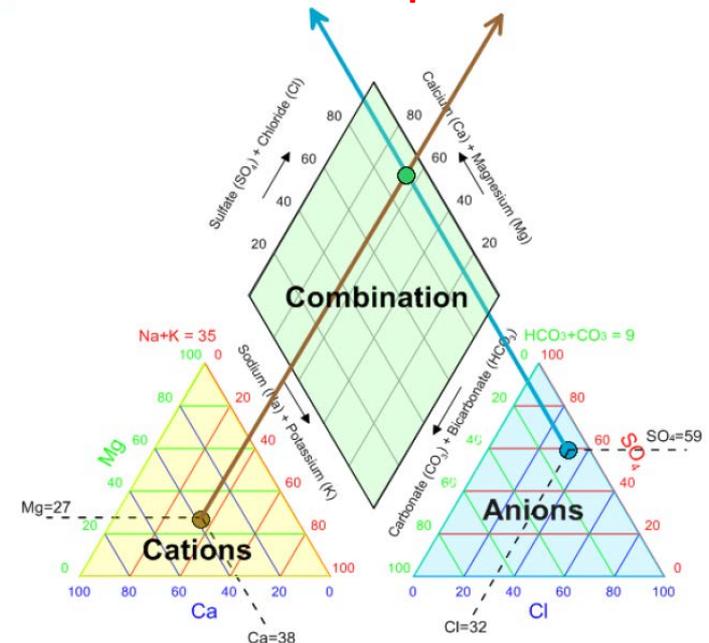


Diagrama de Piper

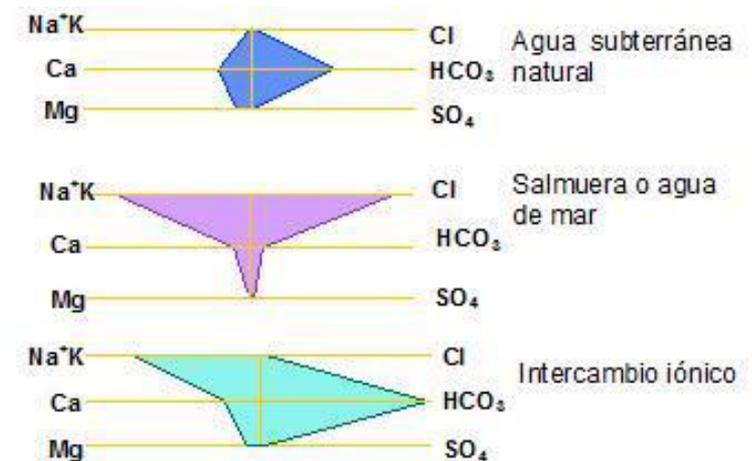


Diagrama de Stiff

Padrões qualidade das águas para os diversos usos

+ Portaria MS 2914/2011.

Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para **consumo humano** e seu padrão de potabilidade.

+ Resoluções CONAMA 357/2005 e 397/2008 - Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

+ Resolução CONAMA 396/2008 - Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.

+ Resolução CNRH 91/2008 - Estabelece procedimentos gerais para enquadramento dos corpos d'água superficiais e subterrâneos.

Obrigado!

Leonardo de Almeida

leonardo.almeida@ana.gov.br | (+55) (61) 2109 –5537

www.ana.gov.br