



Rede de Remediação  
e Reabilitação de  
Ambientes Degradados

# Curso em Biogeoquímica de Sedimentos Aquáticos



*Rita Maria Ferreira da Fonseca*  
*Departamento de Geociências*



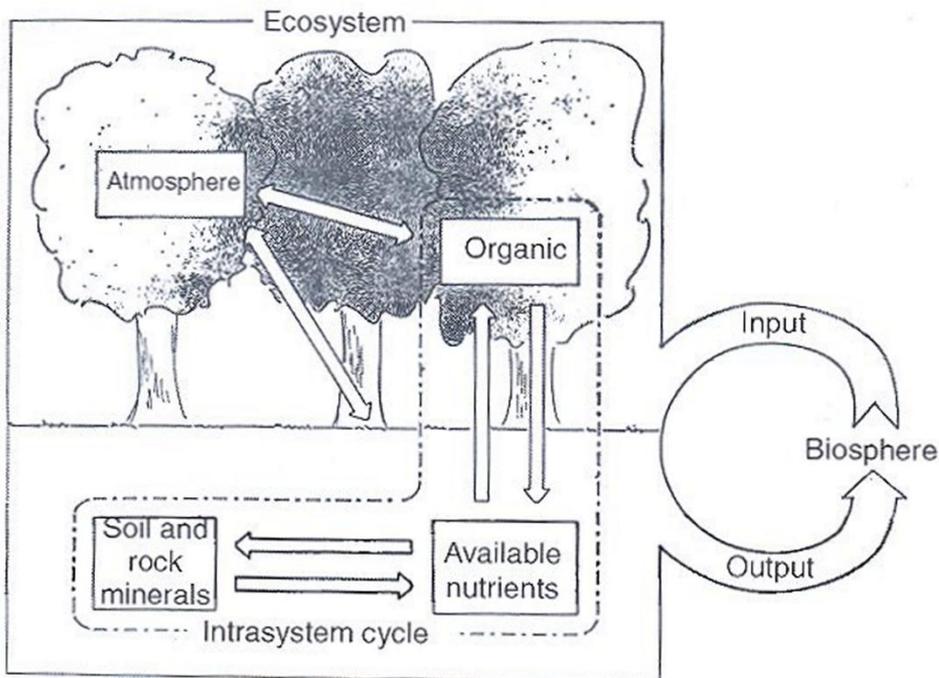
# 1. Biogeoquímica de sistemas aquáticos

Estudo multidisciplinar das transformações, fluxos, e ciclos dos compostos químicos nos ecossistemas aquáticos e terrestres.

Combinação de Biologia + Ecologia + Geologia + Química + Hidrologia + Meteorologia

Ciclo dos elementos → ocorre dentro das fronteiras de um ecossistema

Fluxo de elementos → transferência de material através das fronteiras de um ecossistema



# 1.1 Propriedades Químicas da Água

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

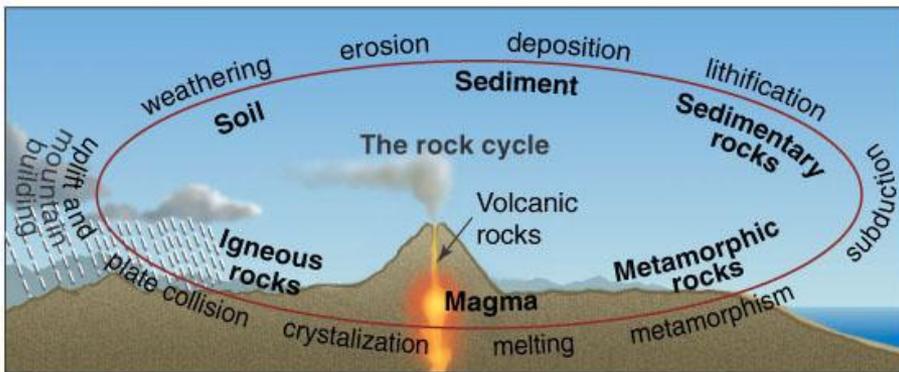
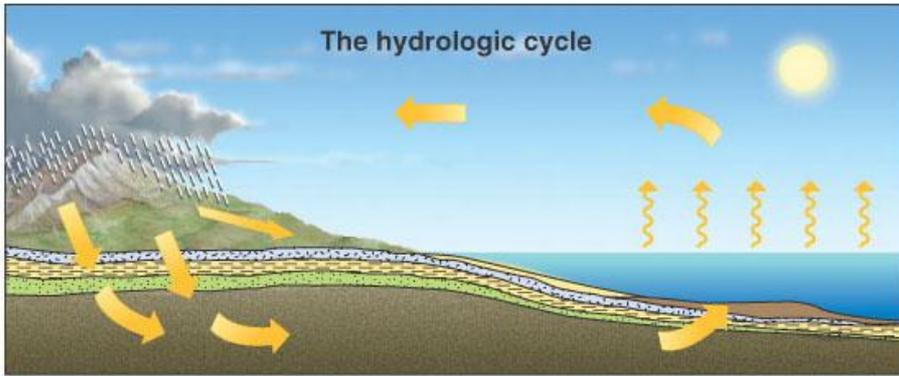
## Primary energy sources

Solar radiation

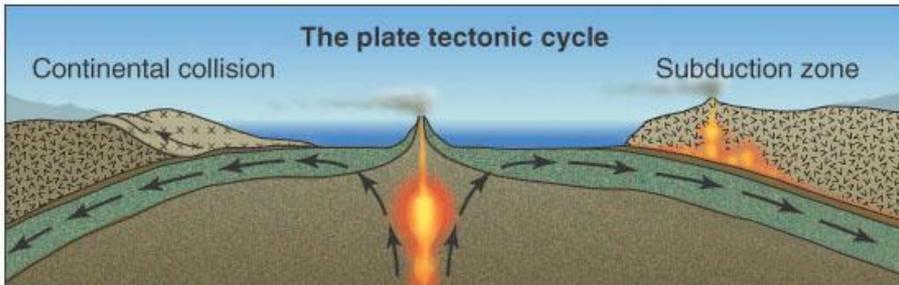


Earth momentum (rotation)

## The hydrologic cycle



## The plate tectonic cycle



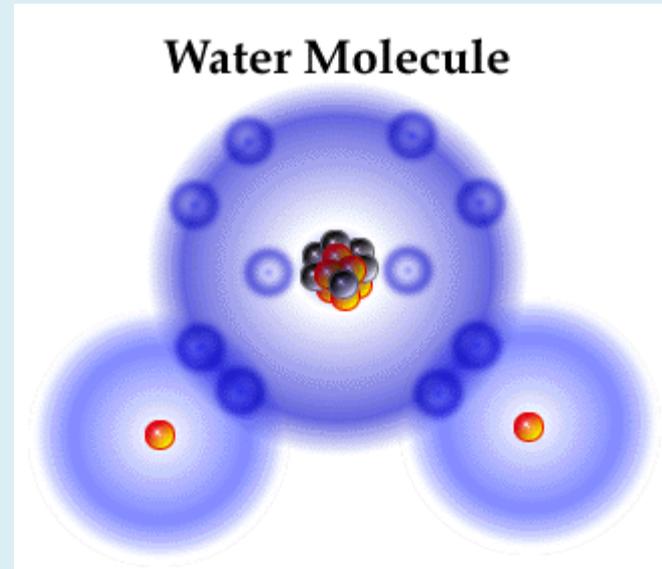
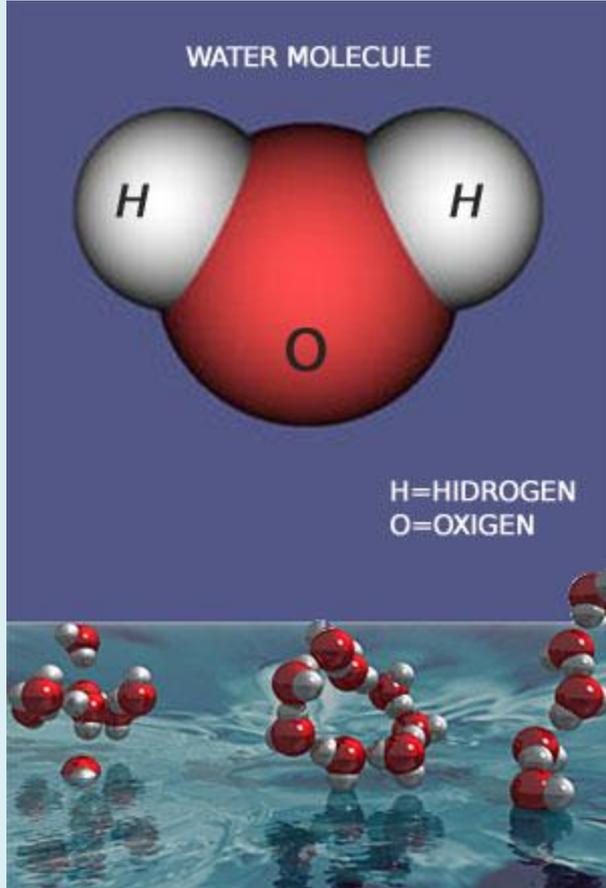
Difícilmente se poderá imaginar qualquer outro parte do sistema Terra que seja mais essencial e que tenha maior nº de diferentes funções que a água na hidrosfera. A presença de fase líquida móvel com a sua longa lista de propriedades químicas e físicas é identificada como sendo a principal causa na Terra que a separa dos outros planetas do sistema terrestre.

Água → molécula mais comum na Terra  
**MOLÉCULA COMUM**

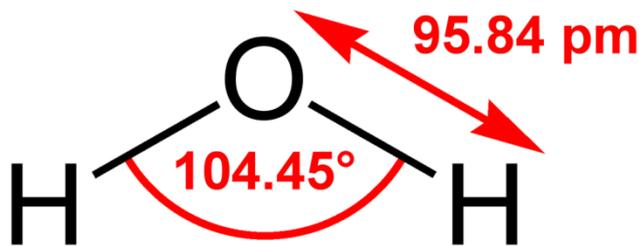


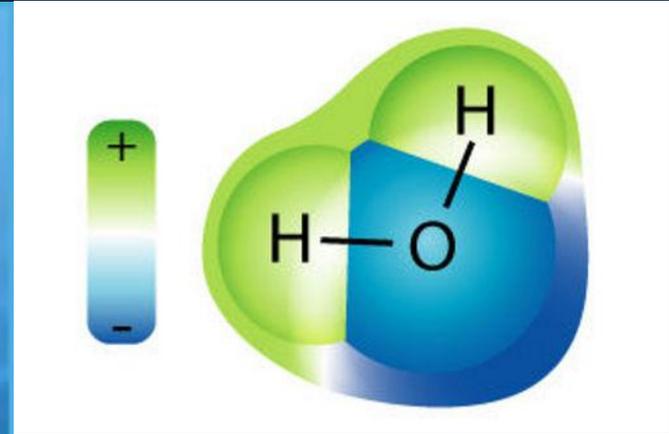
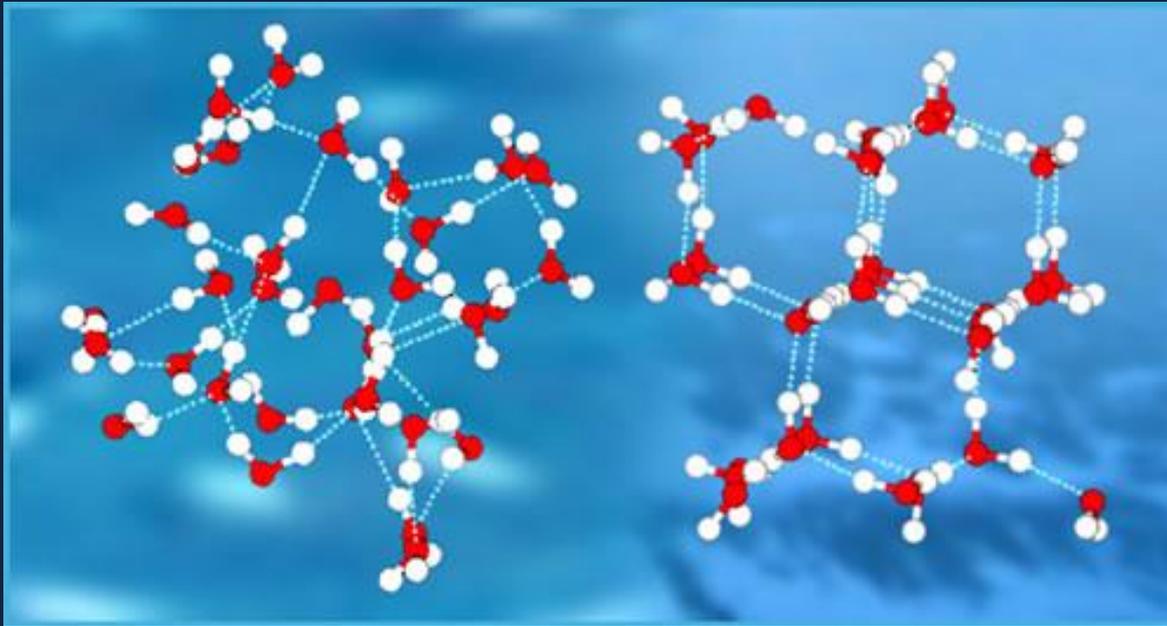
**Não comum nas sua propriedades:** altos pontos de fusão e ebulição; elevado poder de solvatação; elevada tensão superficial; líquido com maior constante dielétrica

# A Estrutura da Água

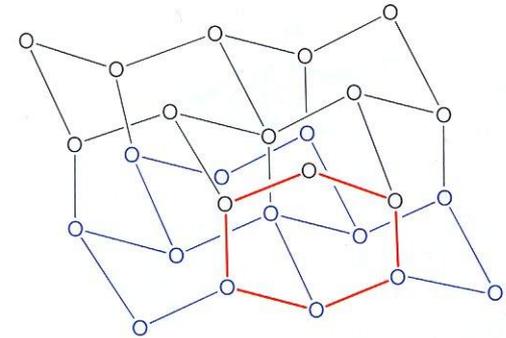
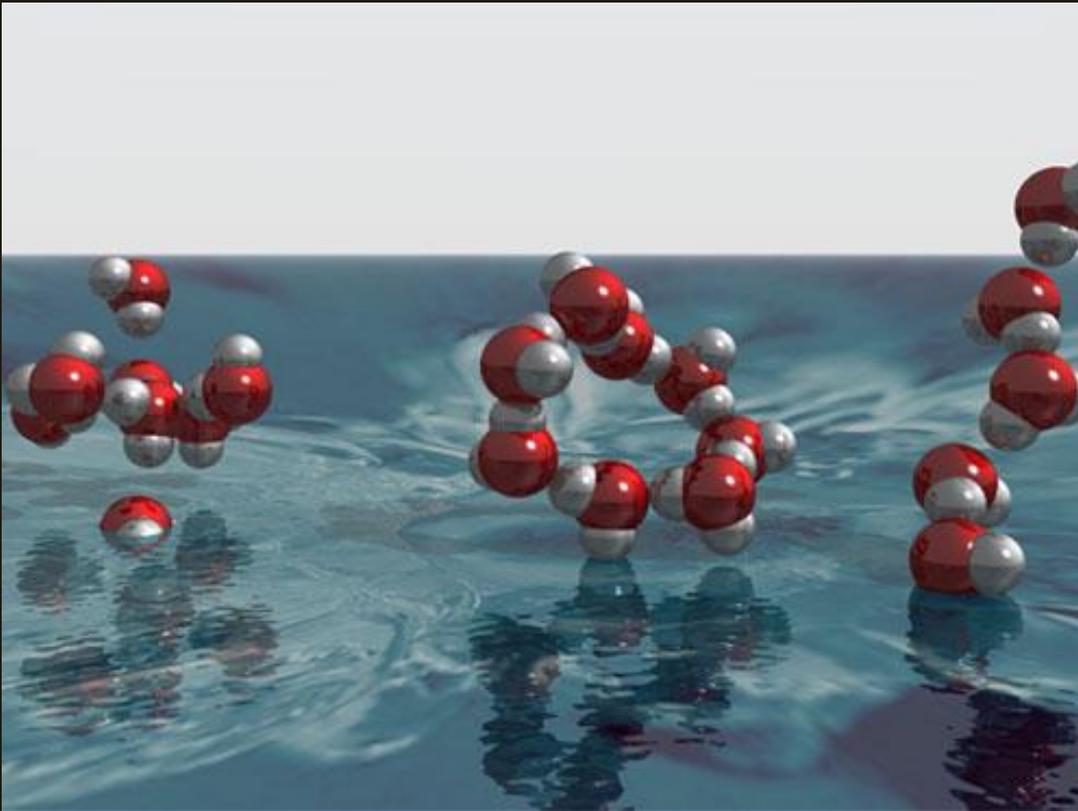


Estruturalmente a molécula de água é uma molécula fortemente dipolar. O dipolo é resultado do átomo de O negativamente carregado e dos dois H positivamente carregados, sendo o conjunto neutro. A separação das cargas resulta da quase ortogonalidade das orbitais dos electrões do átomo central de O (2 pares de  $e^-$  não ligados). O momento dipolar permanente é tão forte que permite a formação de ligações por pontes de H entre o átomo de O negativamente carregado de uma molécula e o átomo de H de uma outra molécula





São estas ligações de H que conferem à molécula de água as propriedades químicas e físicas tão características que as tornam diferentes dos restantes compostos formados por elementos da tabela periódica. Por ex., relativamente ao metano ( $\text{CH}_4$ ) que tem peso molecular equivalente, o ponto de ebulição e de fusão da água tem valores muito mais próximos de compostos com maior peso molecular. Tem igualmente elevada capacidade calorífica (absorve grandes quantidades do calor vindo do sol).



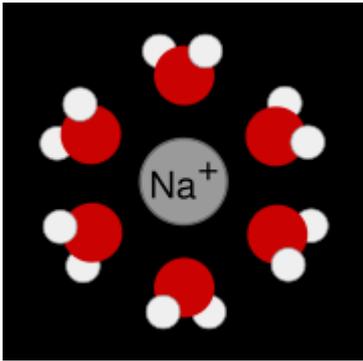
The structure of the most common form of ice (hexagonal ice), an arrangement based upon the HOH 'chair' hexamer. Each oxygen atom is at the approximate center of a tetrahedron formed by four other oxygen atoms. The sixfold axis of symmetry is shown in red for a layer of water 'chairs' (black) overlaying another layer (blue). (Hydrogen atoms are not shown for clarity.)

Gelo (moléculas + comum)  
→ 6 moléculas de água,  
ligam-se → anel hexagonal

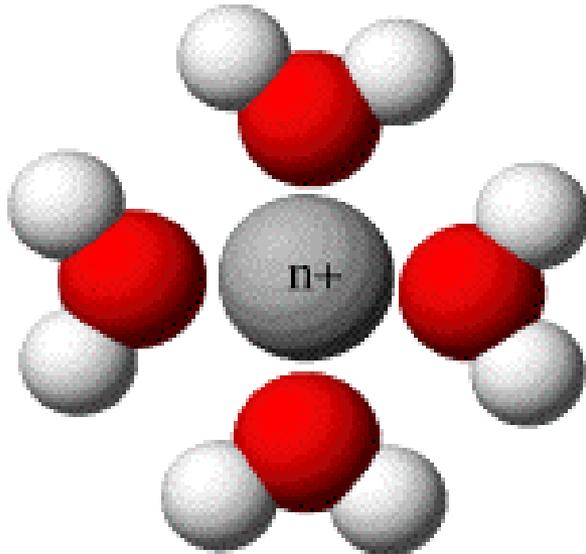
Uma propriedade da água, pouco comum nas restantes substâncias, é a sua mais elevada densidade a cerca de 4°C e a expansão por congelação, devido às ligações de H. Na água congelada existe maior nº de ligações de H do que na água líquida, criando uma estrutura cristalina relativamente aberta e que tem maior volume. Quando o gelo funde, uma parte dessas ligações é quebrada, resultando um maior empacotamento das moléculas de H<sub>2</sub>O.

# Solvatação por Água

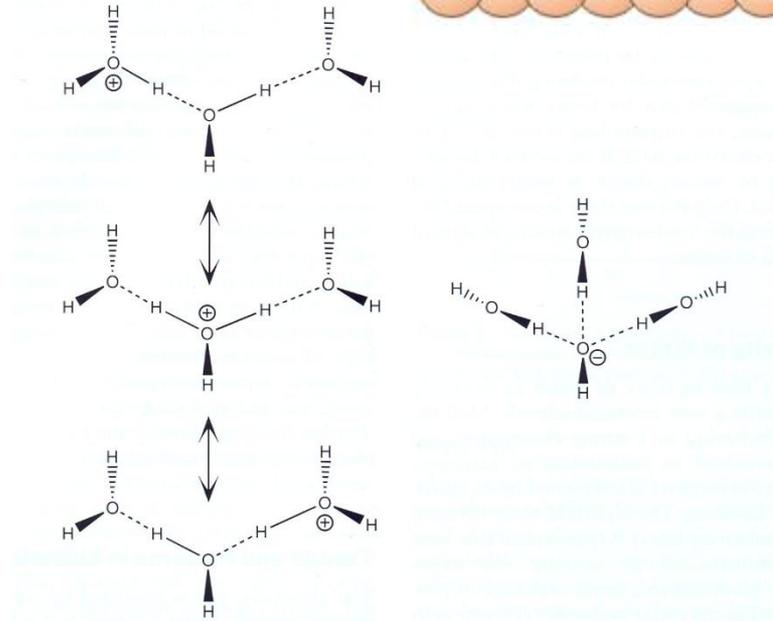
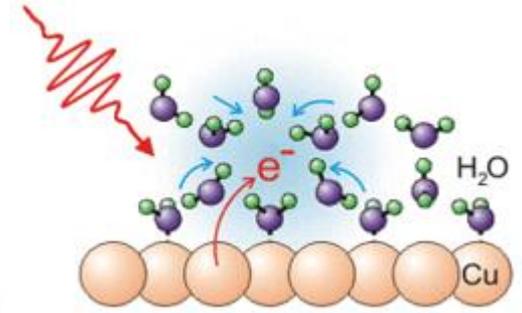
Iões em solução aquosa → interagem uns com os outros e com outros não-electrólitos



Presença dos iões no campo electrónico dipolar da água → ligações não-covalentes fortes → iões hidratados



Water molecules around a metal ion in aqueous solution.

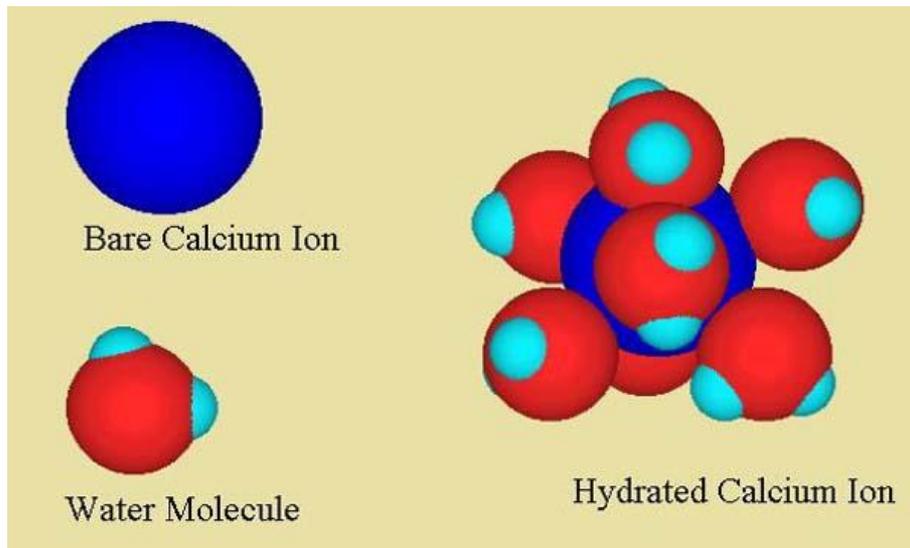


Cada molécula de água encontra-se já solvatada com elevado grau de complexidade estrutural. Devido à reacção de auto-ionização da água, os protões e iões hidróxido que se formam também são hidratados



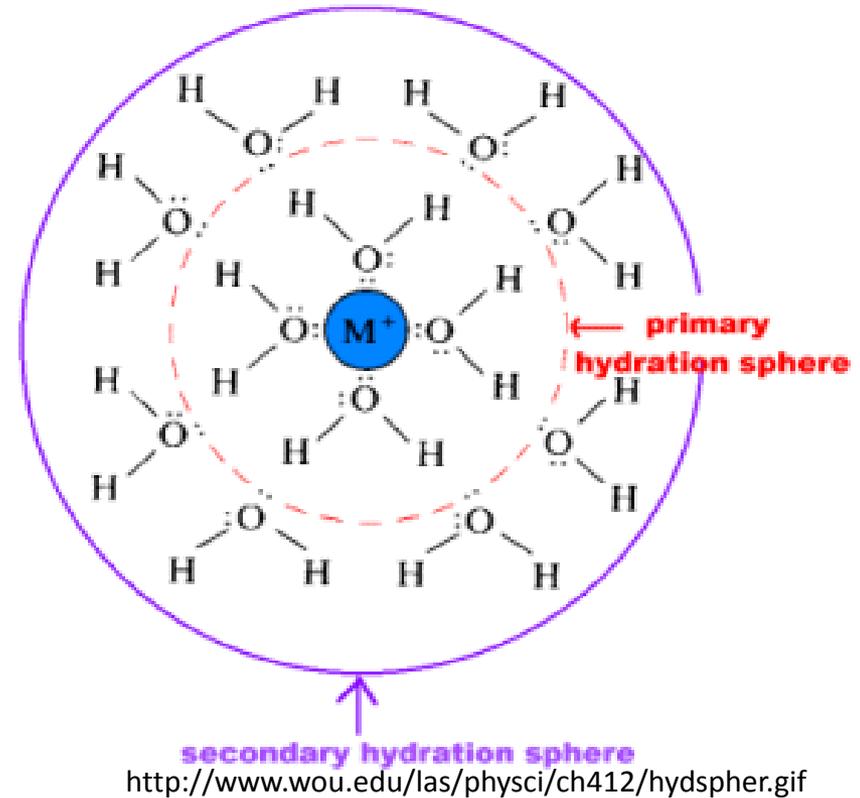
# Iões em solução: esfera de hidratação

O nº de moléculas de água q coordenam o ião como ligandos ( $n=4-9$ ) é função de: tamanho do ião, nº de orbitais vazias, grau de repulsão entre ligandos



[http://www.advancedaquarist.com/2002/3/chemistry\\_album/fig1.jpg](http://www.advancedaquarist.com/2002/3/chemistry_album/fig1.jpg)

Poluição por metais tóxicos → hidratação de **catiões**



1. Esfera de hidratação primária: muito ordenada
2. Esfera de hidratação secundária: embora ordenada, a influência do catião metálico central é menor
3. Solução: o campo de atracção do ião central não exerce efeito aparente na estrutura do fluido

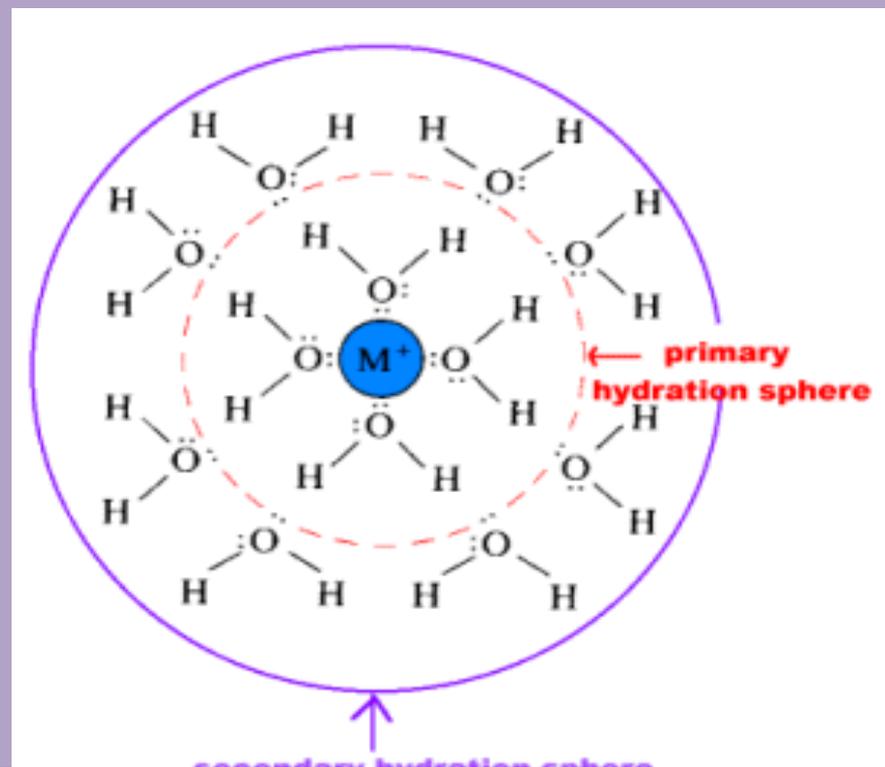
Iões hidratados → complexos → **complexos de solvatação**

Átomo ou grupo central ao qual estão ligados outros grupos ou moléculas, que o envolvem, em n° superior à carga ou n° oxidação do átomo central

*Ligandos ou grupos de coordenação*

Se os ligandos são as próprias moléculas de água

**Complexos de solvatação ou aquocomplexos**



## 1.2 Papel da Água em Lagos e Rios

Água → molécula estável → a estrutura H-O-H mantém-se independentemente do seu estado dinâmico

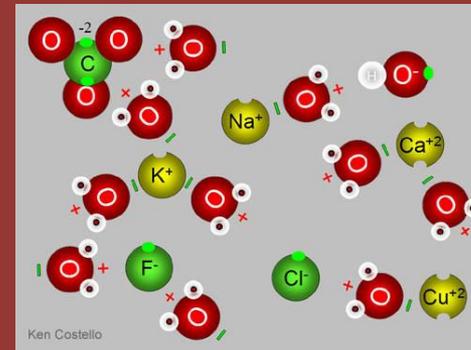
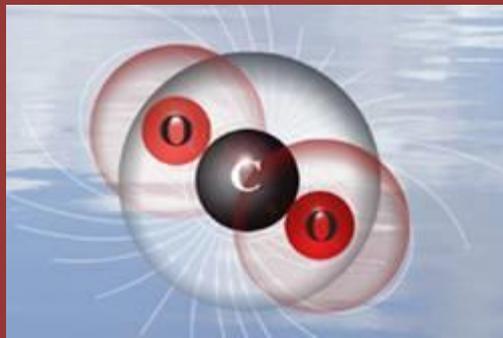


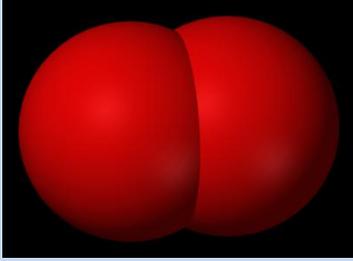
Molécula muito reactiva →  $O^{2-}$  electrófilo forte e  $H^+$  envolvidos em reacções de autoionização

Factores que controlam química da água em lagos e rios:

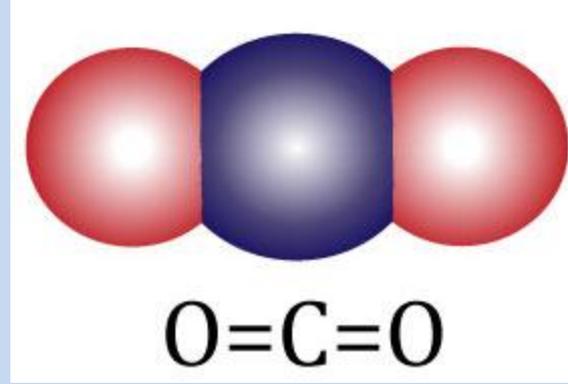
1. Processos e propriedades físicas → morfometria do lago, clima
2. Enquadramento geológico
3. Factores biológicos → composição e abundância do biota na massa de água e bacia de drenagem

3 importantes classes na massa de água: gases dissolvidos, iões maiores e nutrientes





## 1. Gases Dissolvidos



Gases de maior interesse nos sistemas aquáticos →  $O_2$  e  $CO_2$

Moléculas não polares, mínima hidratação pela água → baixa solubilidade



Importância

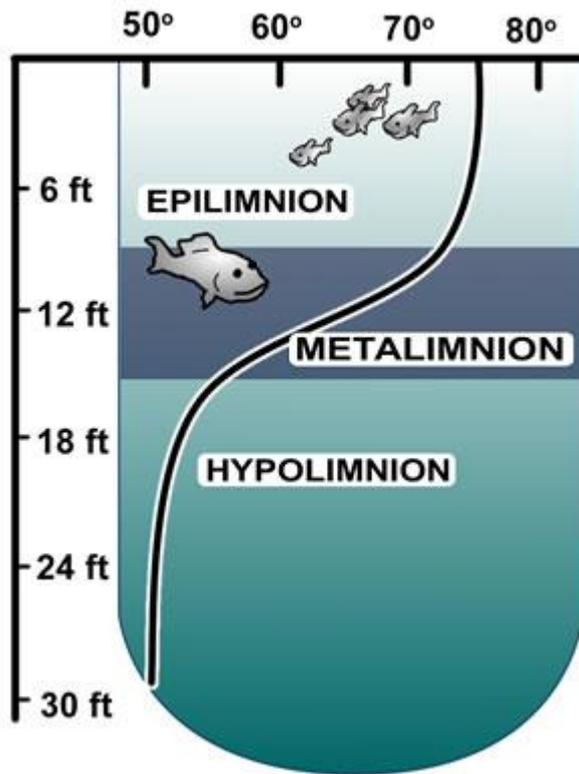
Influenciam e reflectem os processos biológicos

- traçadores de fluxos de  $e^-$  num ecossistema
- reacções (fotossíntese) que convertem energia → formas orgânicas → redução de  $CO_2$  → produção de  $O_2$
- redução do  $CO_2$  por bactérias quimioautotróficas → (dadores de  $e^-$ ) →  $NH_4^+$ ,  $CH_4$  e  $H_2S$

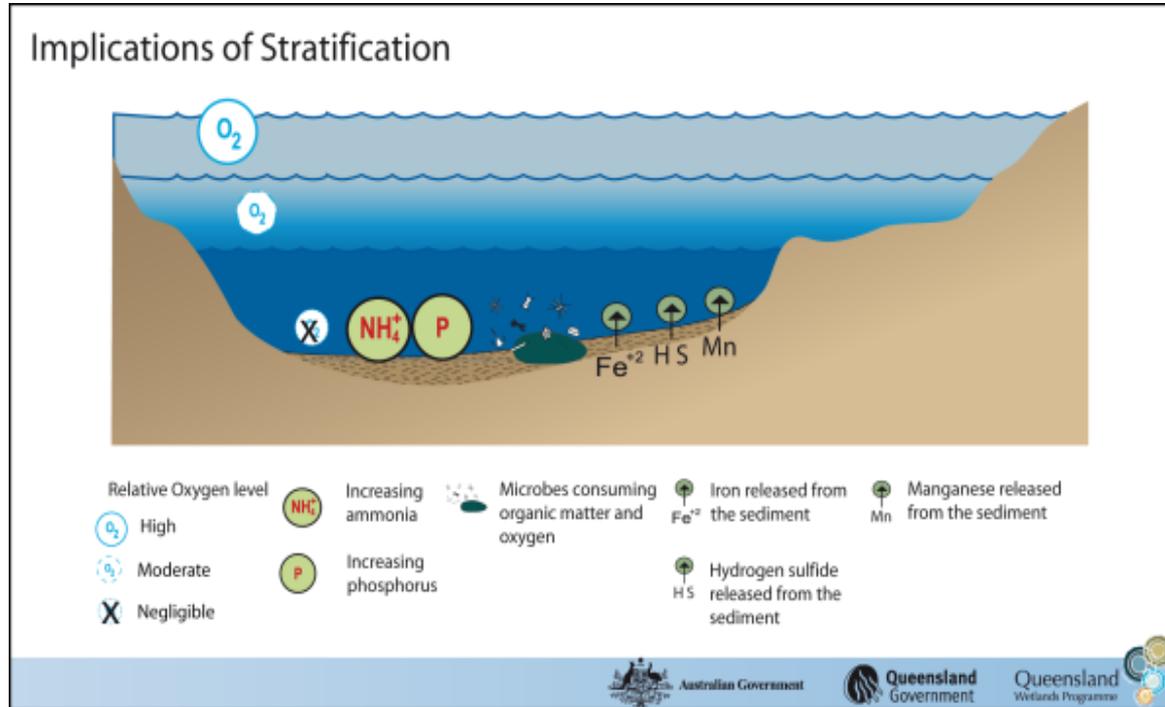
Perda de  $CO_2$  dissolvido

- decomposição de matéria orgânica → produção de  $CO_2$  e perda de  $O_2$

Balço entre oxidação e redução do carbono em lagos e rios → controlado pela luz (+ troca física de gases entre a água e a atmosfera) → águas profundas com maior concentração de  $CO_2$  e água superficiais com maiores concentrações de  $O_2$



Lagos quimicamente e termicamente estratificados → combinação de decomposição e redução c/ distribuição vertical → anóxia no hipolímnio

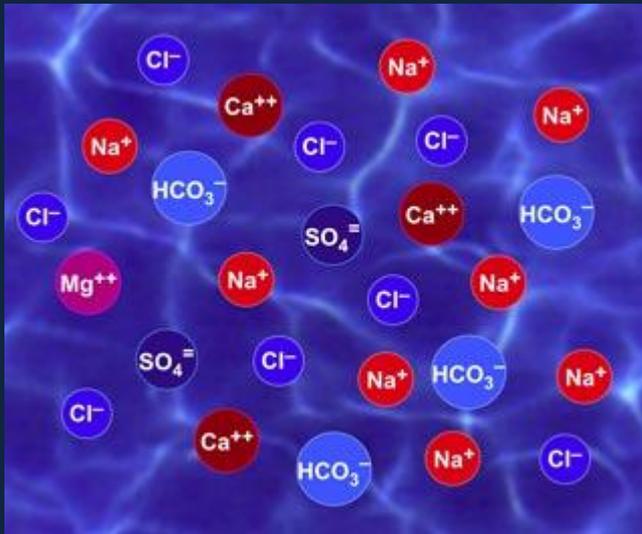


Lagos bem misturados → a anóxia ocorre nos sedimentos. As bactérias utilizam outros dadores de e<sup>-</sup> no metabolismo do carbono orgânico → criação de um gradiente redox vertical em q os receptores de e<sup>-</sup> diminuem com a profundidade

As concentrações de gases dissolvidos num lago variam de acordo com a carga de nutrientes e de C<sub>org</sub>:

- ✓ Elevada concentração de nutrientes → grandes flutuações diurnas nas concentrações de superfície de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> ← elevada taxa de fotossíntese durante o dia e de respiração durante a noite;
- ✓ Elevada carga de C<sub>org</sub> → supersaturação em CO<sub>2</sub> e sobresaturação em O<sub>2</sub>

## 2. Iões maiores

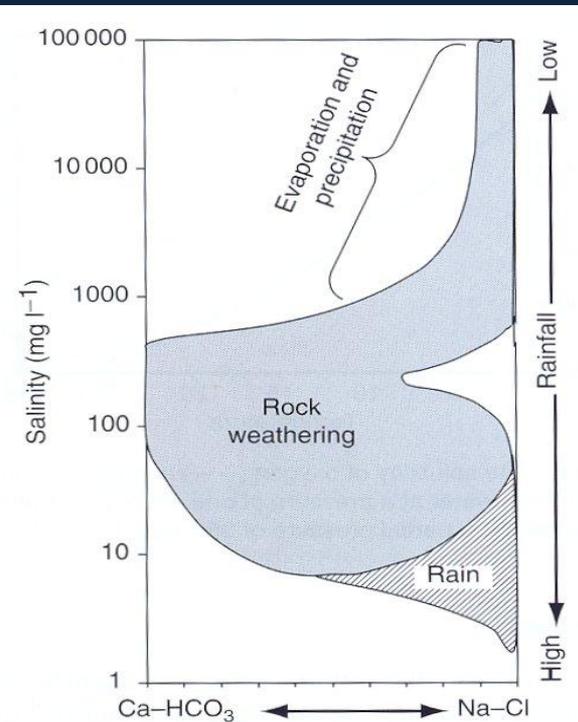


Contribuem significativamente para a salinidade da água  
São espécies solvatadas por água com grandes esferas de hidratação

A abundância destes íons hidratados em lagos e rios é controlada por 3 factores

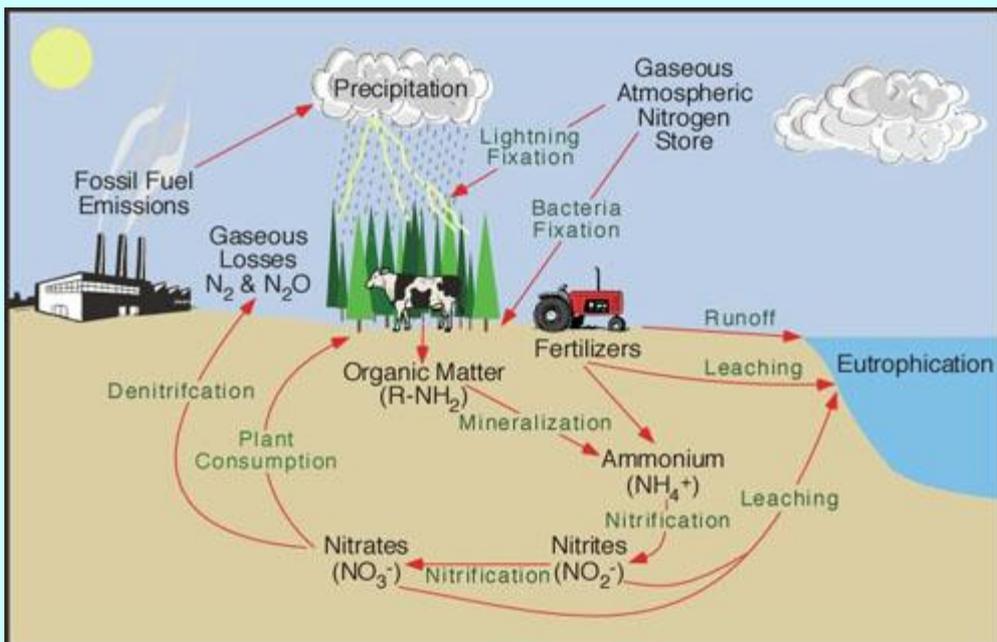
1. Geologia da bacia de drenagem
2. Precipitação
3. Processos de evaporação-cristalização

Estes 3 factores influenciam diferenciadamente os íons maiores  
→ a salinidade, abundância relativa e distribuição dos íons → informação sobre quais dos 3 processos é mais significativo num dado corpo de água



### 3. Nutrientes

Numa massa de água os nutrientes que limitam o crescimento de algas dependem da disponibilidade desses nutrientes relativamente às necessidades das algas.



Na maior parte dos corpos de água  
→ N e P → nutrientes limitantes (Fe, Mo)

Acelerada carga de nutrientes para lagos e rios ← actividades humanas  
→ eutrofização

Entrada de P em lagos e rios → controlada por composição das rochas e intensidade do intemperismo

Disponibilidade de P → influenciada pela disponibilidade de outros elementos e por processos biológicos

Várias formas de P: P-Ca, P-Fe, P-Al, P red, P org



Equilíbrio P dissolvido – P particulado → **potencial redox**



Condições de anóxia na coluna de água → > dissolução de P

Desnitrificação : nitrato biologicamente disponível → N gasoso (N assimilado por algas)

Mais comum em **lagos tropicais** (aumento da solubilidade de P e perda de N para a atmosfera)

- > Limitação do N para o crescimento das algas
- Lagos profundos → + eficiente sequestração do P pelos sedimentos → < concentração de P na coluna de água relativamente à mesma carga de P em lagos mais superficiais



## 2. Sedimentos de Rios

### 2.1 Características dos rios



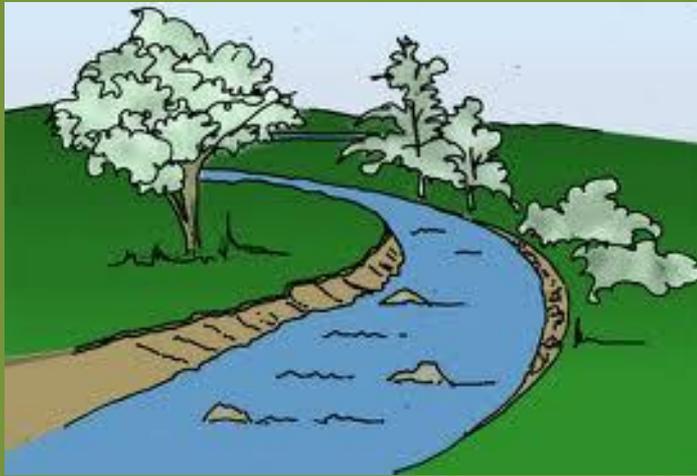
Rios → sistema lóticos → águas que circulam em variadas dimensões de canal, área de drenagem e de descarga

Principais fontes de alimentação → tributários  
Entradas atmosféricas < entradas por águas subterrâneas

Volume de massa de água depende de:  
**Precipitação / evapotranspiração**

Variações anuais nas descargas dos rios ←  
variabilidade a curto e longo prazo da precipitação e evapotranspiração na bacia de drenagem

	Rios	Estuários	Lagos
Movimento da água	Unidireccional, horizontal	Bidireccional, horizontal	Vertical
Forças na água	Gravitacional	Tidal	Induzido pelo vento
Flutuações do nível	Grande (sazonal)	Variável (diariamente)	Pequeno (sazonal)
Tempo de residência	Dias-semanas	Semanas-meses	Meses-anos
Fontes da água	Runoff	Runoff, mar, precipitação	Runoff, subterrânea, prec
Estratificação	Rara	Comum (salinidade)	Comum (térmica)
Transparência	Baixa (partículas)	Variável (partículas)	Elevada (algas)



Os rios integram águas de drenagem de pontos muito distantes ( com diferentes topografia, solos, vegetação, uso do solo) → variabilidade na química da água em particular nas sub-bacias com influências antropogénicas

Ao longo do curso dos rios a química da água vai mudando, função de:

- ✓ entradas de diversas fontes
- ✓ tempo de residência hidráulico no canal, zona hiporreica e zonas laterais



## 2.2. Fluxos de materiais através dos rios

Fluxos nos rios:

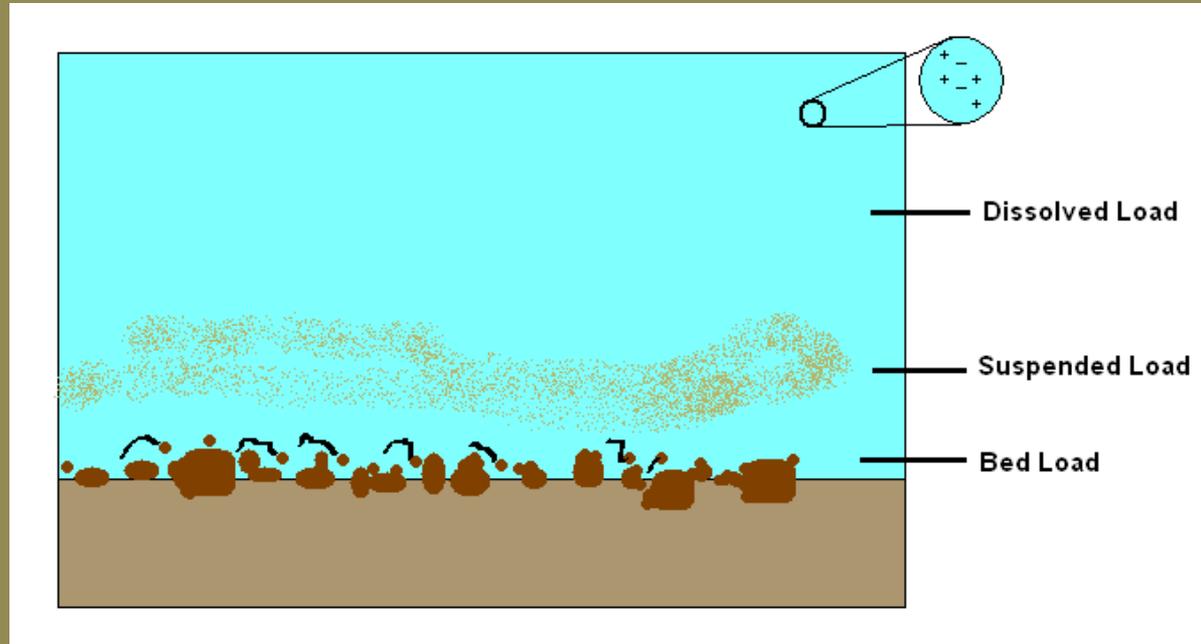
- Material particulado (sólido)

- Material dissolvido (sólidos e gases dissolvidos)

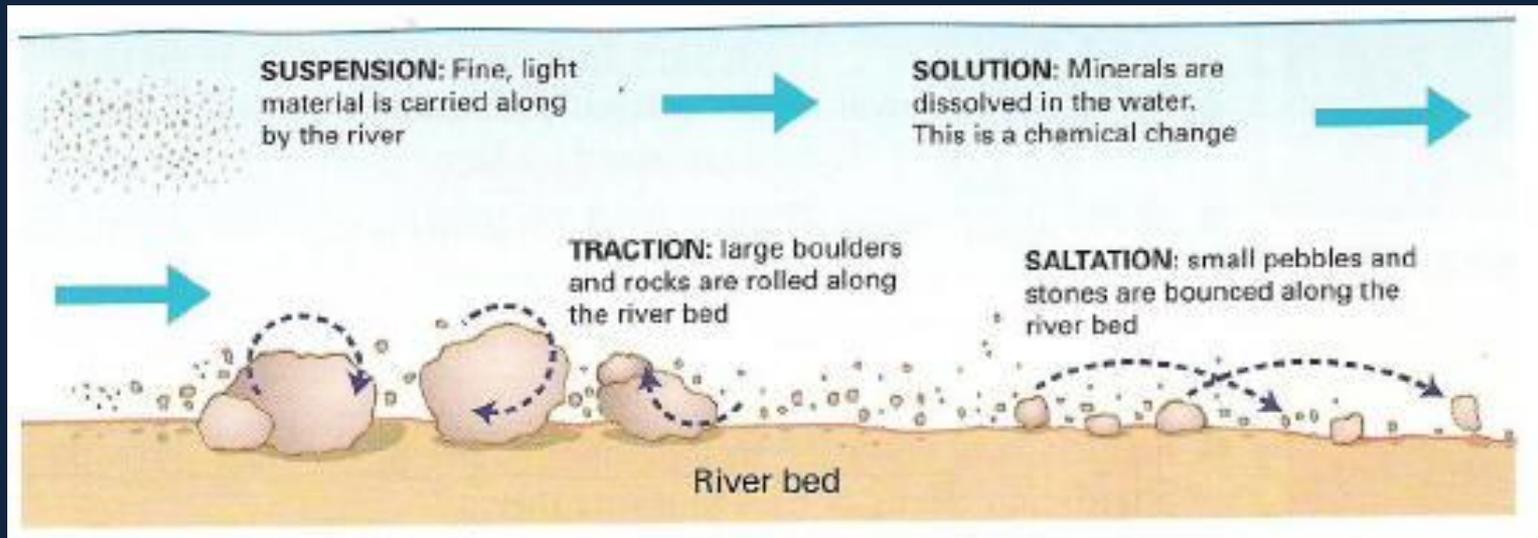
i) Sólidos suspensos totais, carbono orgânico, azoto e fósforo particulados (POC, PON, POP)

ii) Fluxos de material no fundo (carga de fundo)

iii) Fluxos de poluentes (PCBs, PAHs)

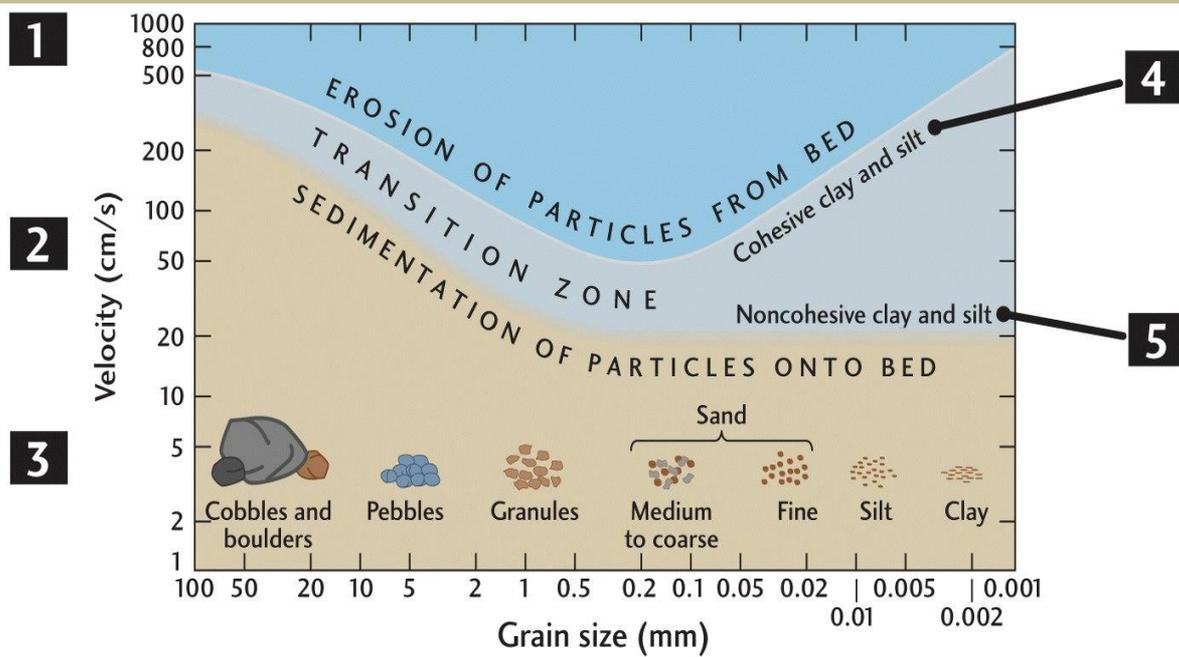


iv) Catiões maiores ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), sólidos dissolvidos totais (catiões maiores + sílica dissolvida), nutrientes (nitratos  $\text{NO}_3^-$ , amónia  $\text{NH}_4^+$ , ortofosfato  $\text{PO}_4^{3-}$ , sílica  $\text{SiO}_2$ ), carbono orgânico, azoto e fósforo dissolvidos (DOC, DON, DOP)



Transporte das partículas nos rios de acordo com a sua dimensão





4 Transporte das partículas sólidas → errática

5 Sólidos em suspensão podem precipitar durante períodos de baixo fluxo e mobilizar em períodos de maior fluxo

Partículas sólidas nos rios: 2 tipos dimensionais de sedimentos:

1. Carga proveniente da lavagem do material da bacia de drenagem (material + fino < 0.2 mm); não depende da capacidade de transporte do fluxo mas do fornecimento de material a partir das fontes da bacia e das margens → em suspensão

**Composição:** partículas minerais ( argila, silte, e, por vezes areia), matéria orgânica particulada, materiais adsorvidos (P, MO) em pequenas partículas minerais

2. Carga transportada no fundo (material + grosseiro) – composição idêntica

## I- Material em suspensão nos rios

A natureza dos fluxos de material em suspensão nos rios depende de vários factores:

- i) Dimensão da bacia
- ii) Escorrência através do rio
- iii) Relevo da bacia
- iv) Litologia
- v) Ocorrência de lagos

Fluxo de materiais em suspensão aumenta com:

- Declive da bacia
- Ocorrência de rochas mais vulneráveis à erosão  
(loess > cinzas vulcânicas > rochas sedimentares desagregadas > argilas > arenitos > rochas vulcânicas > outras rochas cristalinas)  
(Rochas não meteorizadas < rochas expostas à intemperismo)



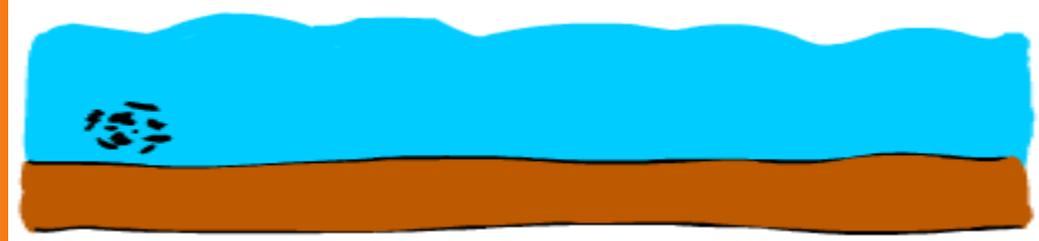
Elevadas concentrações de partículas em suspensão são características de rios, principalmente em períodos de maior descarga

Fluxo de materiais em suspensão diminui com:

- > Dimensão da bacia (> oportunidade de deposição nas margens)



Partículas transportadas em suspensão pelo movimento de turbulência da água



### Origem do material em suspensão:

1. Material particulado originado no canal, pela erosão do leito e materiais das margens;
2. Ressuspensão de material sedimentado
3. Produção biológica

4. Principal fonte → fontes externas aos rios e transportadas pelos seus tributários

O material transportado em suspensão pode sofrer modificações na sua composição química ← adsorção e desorção selectiva de substâncias dissolvidas.

A capacidade de adsorção da matéria particulada depende → nº de locais de ligação disponíveis na superfície das partículas e sua área superficial (f → densidade, forma e dimensão)

Ex: os fosfatos têm elevado potencial de adsorção e são principalmente transportados com a fracção particulada



Partículas em suspensão → transparência da água

Elevadas concentrações de partículas em suspensão → efeito prejudicial em organismos filtrantes + diminui assimilação da fracção orgânica mais nutritiva (bactérias e fitoplâncton)



Elevada produção de sedimentos é atribuída a factores naturais que afectam a erosão da superfície (composição do solo, declive, precipitação)

Os fluxos de sedimentos através dos rios tem alterado muito ao longo do tempo →

### **Impacto do Homem**

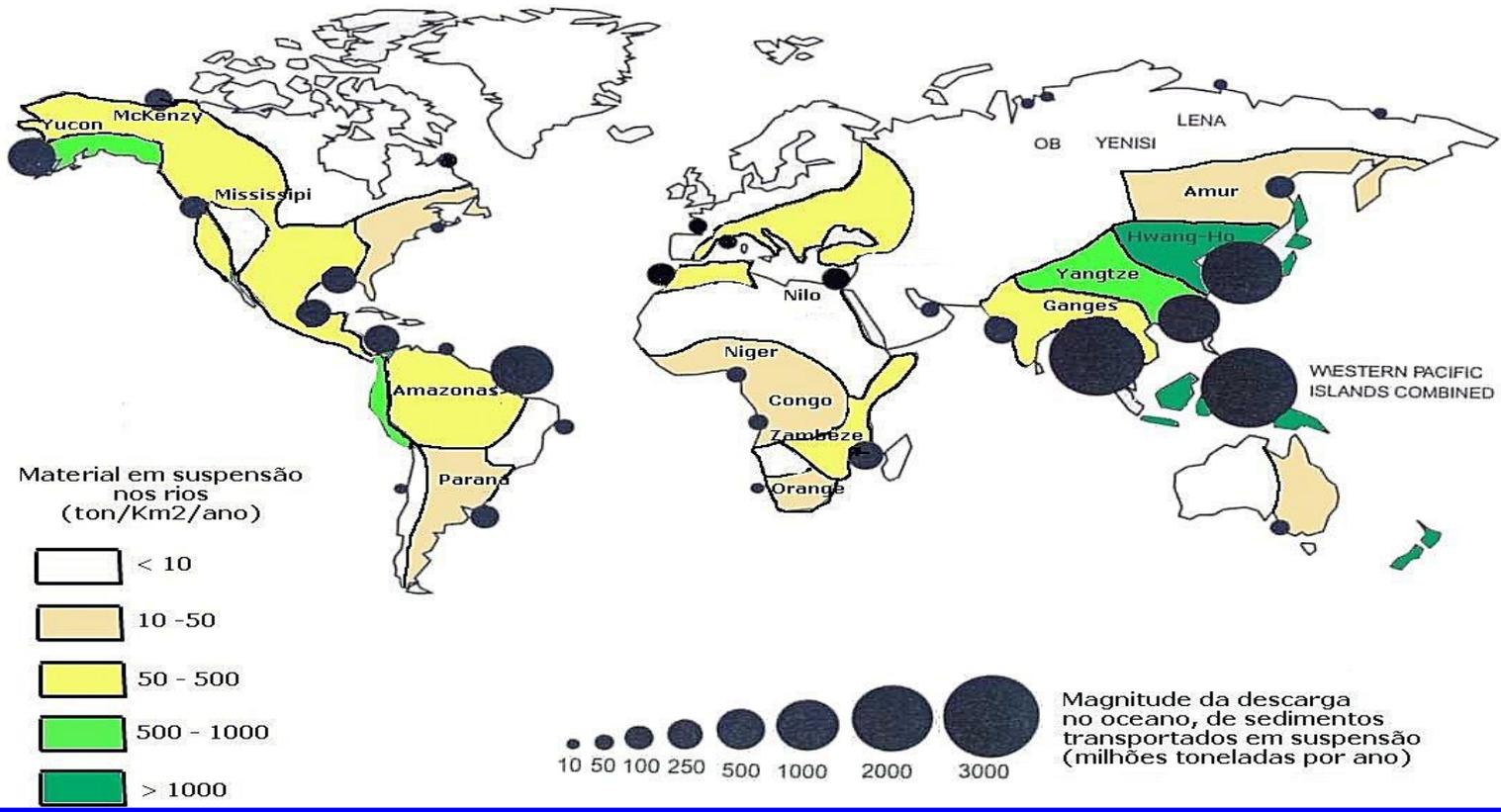
- Desflorestação, perturbações da superfície terrestre, agricultura intensiva → aumento da carga em suspensão



- Interrupção por barragens → armadilha para o sedimentos → retêm mais de 30% dos sedimentos transportados pelos rios e gerados por erosão mecânica



# Diferença de magnitude entre a descarga do material em suspensão nas bacias de drenagem dos rios de todo o globo e a quantidade de sedimentos descarregados no mar.



Em termos mundiais devido à construção de barragens, há uma redução de 3-13% da carga total transportada pelos rios. Existem rios (Colorado, Nilo, Amarelo) em que a retenção de sedimentos é quase total. Da carga em suspensão aproximadamente 1/3 vem do Sul da Ásia (elevadas taxas de erosão). Atendendo à magnitude do material descarregado no oceano → **Excessivo assoreamento das albufeiras**

**Table 2** Ranked major riverine fluxes to oceans: water discharge (Q), annual runoff (q), sediment fluxes ( $F_{TSS}$ ), dissolved fluxes ( $F_{TDS}$ ) and river length (L)

River	River flow			Basin area		Sediment flux			Dissolved flux		Length		
	$Q_{nat}$ (km <sup>3</sup> /y)	#	q (mm/y)	$Q_p$ (km <sup>3</sup> /y)	A (Mkm <sup>2</sup> )	#	$F_{TSS}$ (Mt/y)	#	$F_{TSSp}$ (Mt/y)	$F_{TDS}$ (Mt/y)	#	L (km)	#
Amazon	6590	1	1078		6.1	1	1200	1		287	1	6280	2
Congo (Zaire)	1200	2	324		3.7	2	22.8	50		42.5	17	4370	8
Orinoco	1135	3	1032		1.1	15	150	13		28.2	21	2780	24
Chang Jiang (Yang Tse)	928	4	513		1.8	10	480	7	**	192.9	2	5520	4
Yenisey	620	5	239		2.59	7	5.9			65.8	7	3490	14
Parana	568	6	204		2.78	6	79	22	**	48.7	15	4700	5
Mississippi <sup>a</sup>	580	7	195	529	2.98	4	500	6	**305	146.1	3	5985	3
Lena	525	8	211		2.49	8	17.6			58.8	12	4400	6
Brahmaputra	510	9	879		0.58	32	540	4		51.4	14	3000	18
Ganges (Ganga)	493	10	470		1.05	17	520	5		91.5	5	2525	29
Irrawaddy (Ayeeyarwady)	486	11	1180		0.41	39	260	8		97.7	4	2300	31
Mekong	467	12	587		0.79	24	150	12		46.1	16	4350	9
Ob	404	13	135		2.99	3	16.5		*	40.8	18	3650	12
Tocantins	372	14	491		0.76	25	75	23	*	15.2	39	2700	26
Zhu Jiang (Pearl)	363	15	831		0.44	37	69			58.4	13	2100	35
Amur	344	16	185		1.85	9	24.9	45		18.9	29	2820	20
Saint Lawrence	337	17	330		1.02	18	4.0			61.7	10	3060	17
Mackenzie	308	18	172		1.79	11	42	31		64.3	9	4240	10
Magdalena	237	19	1079		0.235	56	220	10		28	22	1530	
Columbia	236	20	353		0.67	28	15		**10	27.1	23	1995	
Salween (Thanlwin)	211	21	649		0.325	44	?			64.6	8	2820	21
Danube	207	22	250		0.817	23	68	26	*48	88.7	6	2800	22
Yukon	200	23	236		0.849	22	60	29		36.6	19	3186	15
Essequibo	178	24	1085		0.164	67	4.5			4.9		970	
Niger	154	25	128		1.2	13	40	34	**	9.1		4160	11
Ogooue	150	26	732		0.205	61	?			?		850	
Uruguay	145	27	604		0.24	53			11	10.9		1610	
Fly	141	28	2189		0.064	150	115	18		16.3	49	620	
Kolyma	132	29	200		0.66	29	16.1			9.7		2130	34
Pechora	131	30	404		0.324	46	6.5			9.8		1810	
Mamberano	130	31	1675		0.078	124	?			?		?	
Hong	123	32	1025		0.12	82	130	14	**	18	33	1200	
Sepik	120	33	1525		0.079	120	8.1?			13.7		700	
Fraser	114	34	510		0.22	58	20	50		10.4		1110	
Meghna	111	35	1388		0.08	115	?			?		950	
Northern Dvina	110	36	316		0.348	43	4.5		**	19.6	28	740	
Zambezi	106	37	80		1.33	12	20			8.5		2660	27
Godavari	105	38	335		0.31	47	170	11	**	20.3	27	1500	
Kapuas	101	39	1310		0.077	125	?		***	?		1010	
Sao Francisco	90	40	143		0.63	31			***6	[5.9]		2800	22
Indus	90	41	62	57	0.916	20	250	9	***59	[10.3]		3180	16

<sup>a</sup> Mississippi River proper and Red River are considered separately.

$Q_{nat}$ ,  $Q_p$ : natural and present discharges after damming, irrigation, and/or diversion.

$F_{TSS}$  and  $F_{TSSp}$ : natural and present sediment fluxes.

$F_{TDS}$  and L: from Meybeck and Ragu (1996).

River names according to Time Atlas of the World.

\*, \*\*, \*\*\* Relative impacts of damming on river fluxes.

Source

Meybeck M and Ragu A (1996) River discharges to the oceans. An assessment of suspended solids, major ions and nutrients. Environment Information and assessment Rpt. UNEP, Nairobi, 250 pp.

Milliman JD, Rutkowski C, and Meybeck M (1995) River discharge to the sea. A global river index (GLORI), LOICZ reports and studies, Texel ND, pp. 125.

River names according to Time Atlas of the World.

\*, \*\*, \*\*\* Relative impacts of damming on river fluxes.

Source

Meybeck M and Ragu A (1996) River discharges to the oceans. An assessment of suspended solids, major ions and nutrients. Environment Information and assessment Rpt. UNEP, Nairobi, 250 pp.

Milliman JD, Rutkowski C, and Meybeck M (1995) River discharge to the sea. A global river index (GLORI), LOICZ reports and studies, Texel ND, pp. 125.

## II- Material Dissolvido nos rios



Sólidos dissolvidos → mais facilmente quantificáveis

Materiais orgânicos e inorgânicos dissolvidos derivados do intemperismo de minerais e de processos de decomposição

Factores que controlam natureza do material dissolvido nos rios: ( $TZ^+$  - soma dos catiões solúveis)  
-Litologia da bacia, tipo de solos e de vegetação, escorrência, história geológica

Granitos, gneisses, micaxistos →  $0.1 < TZ^+ < 1 \text{ meq l}^{-1}$

Rochas sedimentares → (variável) → arenitos quártzicos  $< 0.5 \text{ meq l}^{-1}$  - formações de gesso ou halite  $> 5 \text{ meq l}^{-1}$

Argilas e margas → depende do teor em  $\text{CaCO}_3$  →  $0.1 < TZ^+ < 3 \text{ meq l}^{-1}$

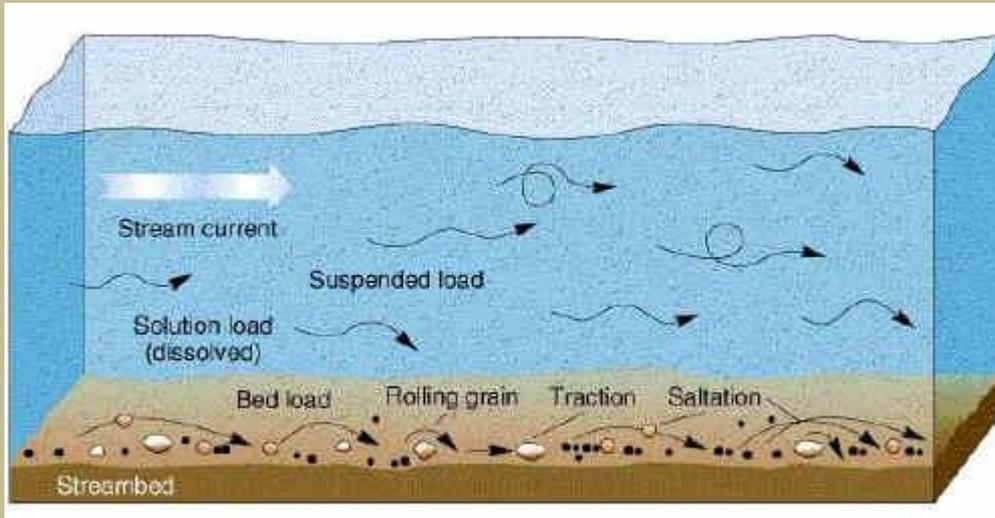
Calcários →  $3 < TZ^+ < 5 \text{ meq l}^{-1}$

Baixas concentrações de substâncias dissolvidas ← bacias de drenagem com baixos declives e solos pouco espessos constituídos por materiais insolúveis (quartzo, rochas ígneas)



Composição da coluna de água ~ água da chuva

Declives mais acentuados + solos mais profundos → maiores fluxos e maiores interações água-solo → maior influência de processos biogeoquímicos sobre a química das águas de escorrência, em especial em solos dominados por materiais facilmente intemperizados (r. sedimentares)



Proporções semelhantes dos cátions na coluna de água:  
**Ca<sup>2+</sup> - Mg<sup>2+</sup> - K<sup>+</sup> - Na<sup>+</sup>**

Se: aumento de TZ<sup>+</sup> → Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > Na<sup>+</sup>

Zona de calcários → Ca<sup>2+</sup>/ TZ<sup>+</sup> > 80%

Se: TZ<sup>+</sup> > 10 meq l<sup>-1</sup> → precipita calcite, Ca<sup>2+</sup> diminui e Na<sup>+</sup> domina

**Aniões:** Bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) costuma ser o mais comum

Excepção: águas com TZ<sup>+</sup> < 0.2 meq l<sup>-1</sup> → Domina SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e Cl<sup>-</sup>

Varição temporal da [ ] iões  
dissolvidos → CHUVA

Elevadas descargas → < [ ] iões  
dissolvidos

Elementos e compostos em solução  
→ podem ser modificados em  
trânsito por processos abióticos  
(floculação, quelatização) mas os  
processos bióticos são dominantes  
(Ex: assimilação de P e N dissolvidos  
por algas,  $C_{org}$  dissolvido assimilado  
e convertido em  $CO_2$  por respiração  
bacteriológica)



**Substâncias conservativas** → baixa taxa de transformação durante o transporte  
(Ex: não existem elementos perfeita/ conservativos; Ca, Mg, Cl → transformações  
muito lentas; controladas pelos processos de transporte )

**Substâncias lábeis** → elevada taxa de transformação durante o transporte  
(Ex: C, P, N (elevada demanda biológica → elevadas taxas de transformação sob  
influência biótica)

As concentrações dos elementos dissolvidos nos rios são afectadas pelas transformações  
ocorridas durante o seu transporte

# Elementos biogeoquimicamente importantes na coluna de água

**Table 4** Nutrients and organic carbon concentrations ( $\text{mg l}^{-1}$ ) in world rivers; DOP, DON and DOC: dissolved organic phosphorous, nitrogen and carbon, respectively

River	Period	$\text{SiO}_2$	$\text{N-NO}_3^-$	$\text{N-NH}_4^+$	$\text{P-PO}_4^{3-}$	DOP	DON	DOC
Amazon	1990s	6.9	0.14	0.02	0.022	0.015	0.16	5.7
Amur		2.15	0.02		0.021			
Arno	1977-1983		1	1.19	0.5	0.08	1.2	
Chang Jiang	1980-1992	6.5	0.32	0.32	0.02			2.07
Churchill (Hudson)	1979-1992	1.4	0.01	0.1	0.006			
Citarum	1985-1994	30	0.43	0.53	0.032			
Columbia	1979-1993	9	0.2	0.01	0.014			
Congo	1980s	9.4	0.9	0.007	0.24		0.18	9.35
Danube	1979-1983	4.14	1.5		0.02			
Delaware	1979-1993	3.5	1	0.03	0.04			
Elbe	1979-1990		3.6	1.3	0.39			
Evros	<1984		1.4	0.33	0.285			
Huang He	1980-1992	7.7	2.2	0.01	0.02			
Khatanga	1980s	3.2	0.03	0.04	0.006	0.006	0.41	
Kiso	1979-1992	10	0.38	0.06	0.016			
Lena	1980-1990	4.2	0.03	0.08	0.204	0.022	0.46	6.6
Mackenzie		3.7	0.53		0.004		0.1	5.2
Mississippi	1980-1993	6.7	1.4	0.04	0.07			8
Murray	1979-1987	5	0.11	0.036	0.024			
Neva	1980-1991	0.1	0.23	0.03	0.03			
Ob	1980-1992	2.85	0.06		0.065			9.1
Olenek	1980s	2.7	0.03	0.05	0.003	0.006	0.41	
Orinoco	1980s	6.3	0.08	0.035	0.01	0.01	0.16	4.4
Parana	1979-1992	17.1	0.165	0.05	0.045			6.1
Po	<1985	4	1.43	0.27	0.075	0.001	0.32	2.4
Rhine	1975-1984	5.2	3.9	0.9	0.4			5.36
Rio Grande	1979-1993	14	0.15	0.03	0.03			
Sakarya	1980-1987	11.8	1.1	0.35	0.16			
Scheldt	1978-1991		4.6	7.7	0.81			7.9
Seine	1980-1986, 1990-1991	6.3	4.28	2.41	0.7		0.5	3.65
Shinano	1956/1957	15	0.27	0.07				
Shinano	1979-1992	17	0.78	0.08	0.047			
St. Lawrence	1979-1988	2.4	0.16	0.08			0.03	3.7
Susquehanna	1979-1993	3.8	1	0.03	0.01			
Thames	1980-1992	12.3	7	0.21	0.35			
Tone	1979-1992	21.5	1.56	0.2	0.033			
Trent	1980-1992	7.5	8.6	0.24	0.49			
Waikato	1979-1993	28.2	0.3	0.006	0.022			
Weser	1979-1990	4	5.08	0.125	0.37			
Yenisey	1980-1990	3	0.02		0.008			7.4
Zambezi	<1977	16.8	0.13	0.04	0.01			
Zhu Jiang	?	8.5	0.62	0.01	0.003			

Source

Kimstach V, Meybeck M, and Baroudy E (eds.) (1998) A Water Quality Assessment for the Soviet Union, pp. 611. E & FN Spon, London.

Meybeck M and Ragu A (1996) River discharges to the oceans. An assessment of suspended solids, major ions and nutrients. Environment Information and Assessment Rpt. UNEP, Nairobi, 250 pp.

### III- Nutrientes nos rios



Os rios não são apenas agentes transportadores de materiais provenientes da bacia; processos fluviais podem exercer influência na química da água, particularmente para os elementos cujo teor é baixo em relação à carência biológica

#### Transporte do Nitrogénio nos rios

1. Forma inorgânica dissolvida ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ )
2. Formas orgânicas dissolvida e particulada → Células vivas, MO detrítica

↓  
Compostos orgânicos dissolvidos que são libertados por exsudação, excreção e decomposição

**Nitratos** → são muito móveis com baixo potencial de adsorção transportado através dos solos  
forma de N dominante nos rios (agricultura, urbanização)

**Amónia** → geralmente associado a pontos de descarga de águas residuais

**N orgânico dissolvido** → maior importância em rios sem influência humana

## Transporte do Fósforo nos rios

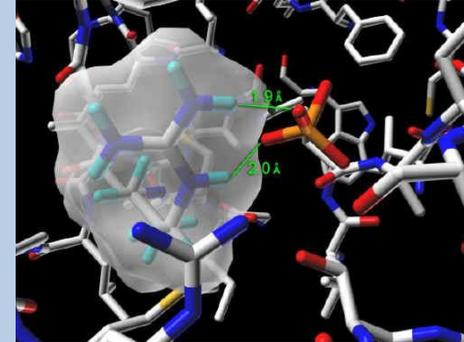


A adsorção de P é reversível → o P adsorvido em partículas pode ser desorvido e tornar-se biodisponível

**Impacto antropogénico** → aumento do P total e na proporção da fracção dissolvida

Nos rios, **formas inorgânicas** de N, P e Si podem **ser transformadas** em **formas orgânicas** particuladas (em algas e células de bactérias)

Principalmente transportado sob forma particulada



Baixas concentrações de P dissolvido ( $\text{PO}_4$  e outras formas reactivas)



Assimilação biótica e elevada afinidade de adsorção com partículas minerais (argilas)

## Transporte de Sílica nos rios



Sílica dissolvida → convertida em formas biogénicas por diatomáceas

Sílica biogénica → difícil de remineralizar

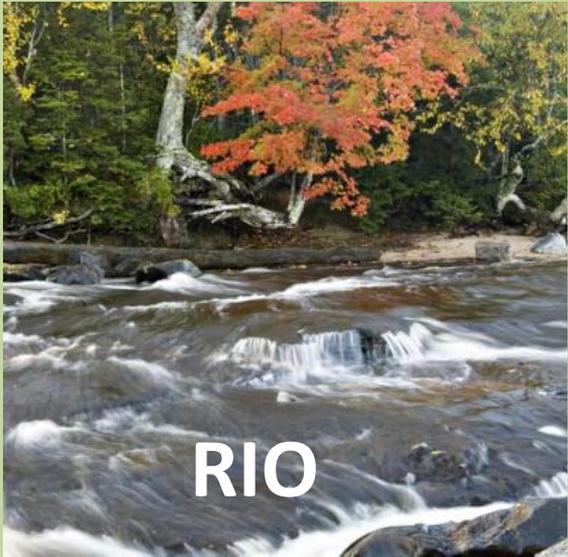


Assimilação autotrófica



Diminuição progressiva da sílica dissolvida ao longo do curso do rio

## 2.3. Fluxos químicos e dinâmica dos rios



≠



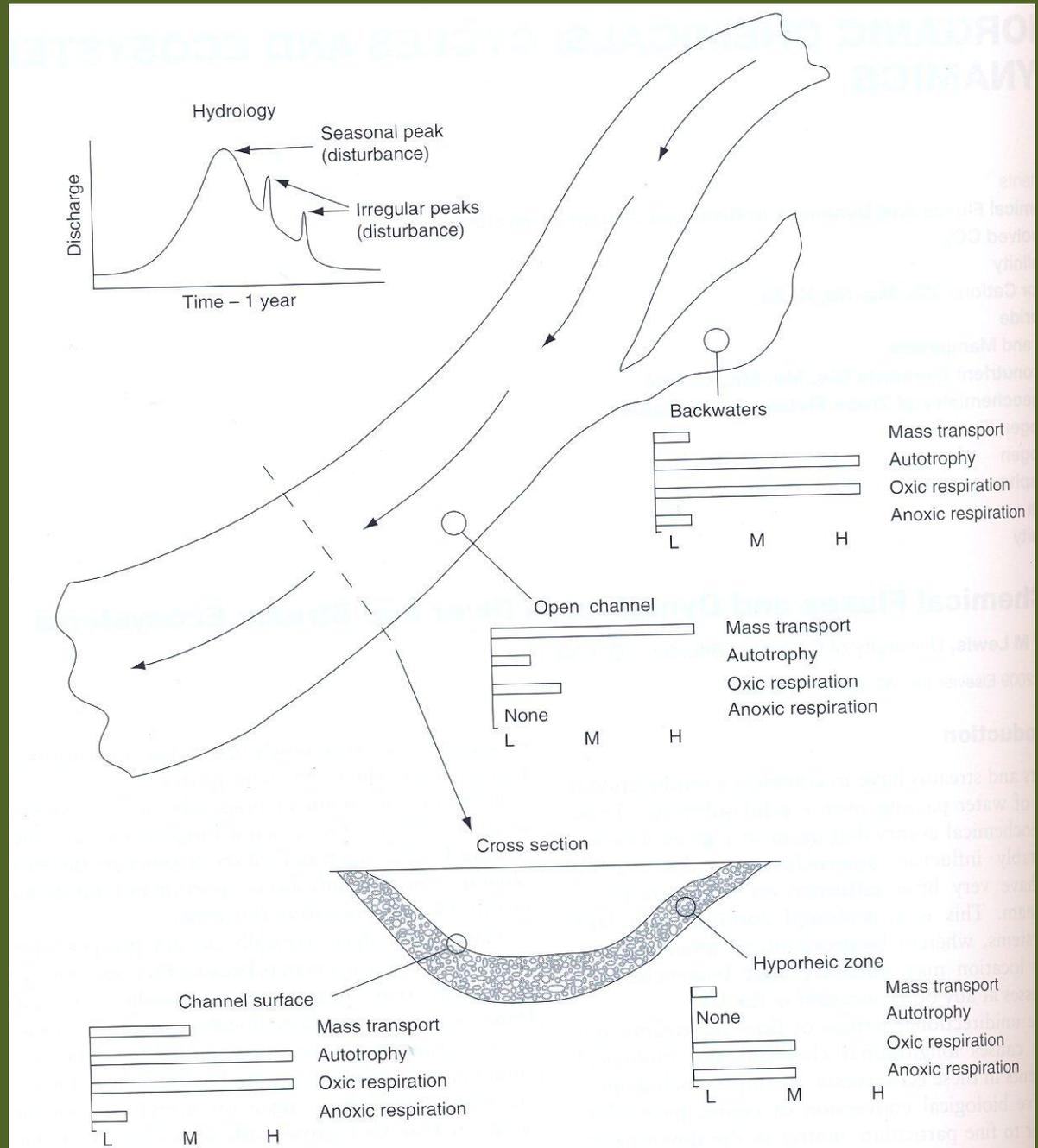
Fluxo de água unidireccional sobre um substrato sólido. Processos biogeoquímicos que ocorram num determinado local influenciam a biogeoquímica a jusante mas têm pouca influência na biogeoquímica a montante

Qualquer processo biogeoquímico num certo local influencia os processos em todos os pontos do lago

Natureza unidireccional do fluxo → gradientes longitudinais químicos e biológicos

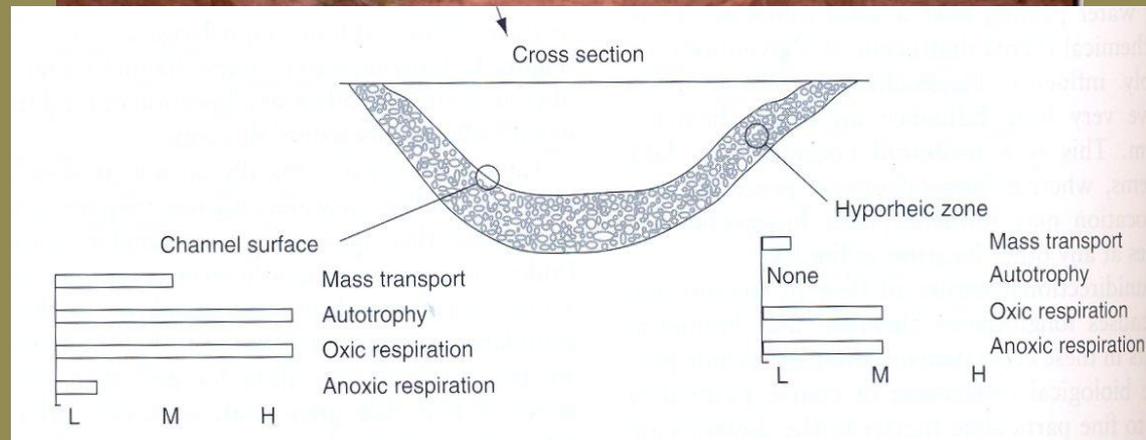
Ex: Para jusante → progressiva conversão das partículas grosseiras em partículas finas; progressiva acumulação de sólidos dissolvidos e nutrientes

# Rio → 4 principais zonas biogeoquímicas



## 1. Canal Aberto

- Maior fluxo de água
- Maior transporte de massa sedimentar
- Pouco metabolismo: algas não prosperam e não acumulam biomassa quando suspensas em águas correntes; acção microbiológica apenas ocorre nas superfícies sólidas e não na água corrente

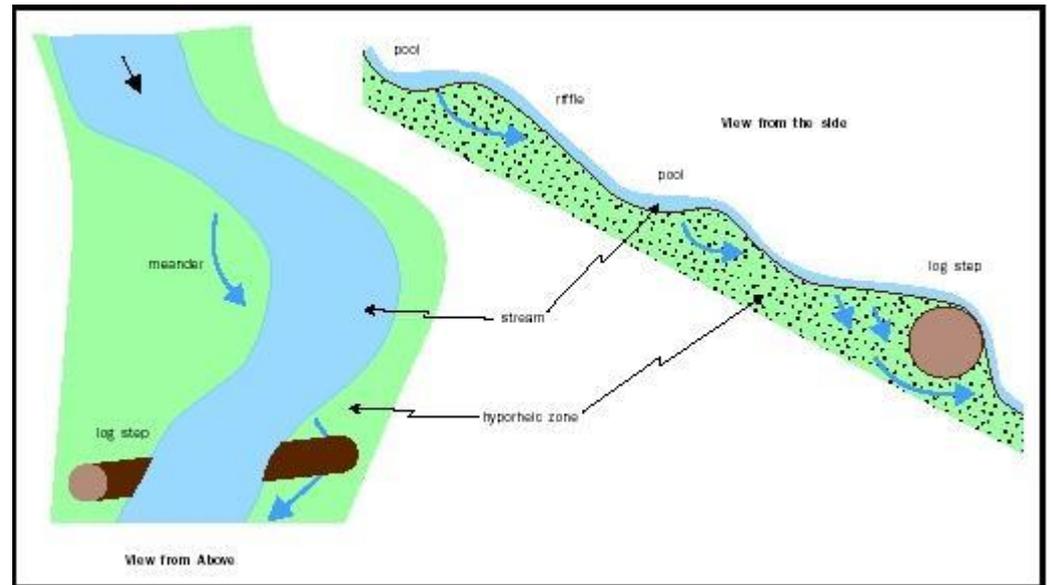


## 2. Superfície do canal (rocha, areia, argila, resíduos orgânicos – folhas, troncos)

- As superfícies sólidas são revestidas por bactérias, fungos, protozoários, algas
- Biofilme → pequenos organismos (autotróficos (algas) e heterotróficos (bactérias, protozoários)) + matéria orgânica não viva + partículas minerais depositadas nas superfícies)
- Biofilme → óxico (contacto directo com a água corrente + produção de  $O_2$  através de fotossíntese)

### 3. Zona hiporreica

- Substrato por baixo do canal → troca de água contínua com o canal
- Bem definida quando substrato é grosseiro
- Mal definida ou inexistente quando o canal tem como substrato rocha ou argila fina
- Pode ser hipóxico ou anóxico (mesmo quando a água do canal está saturada de com oxigénio dissolvido);



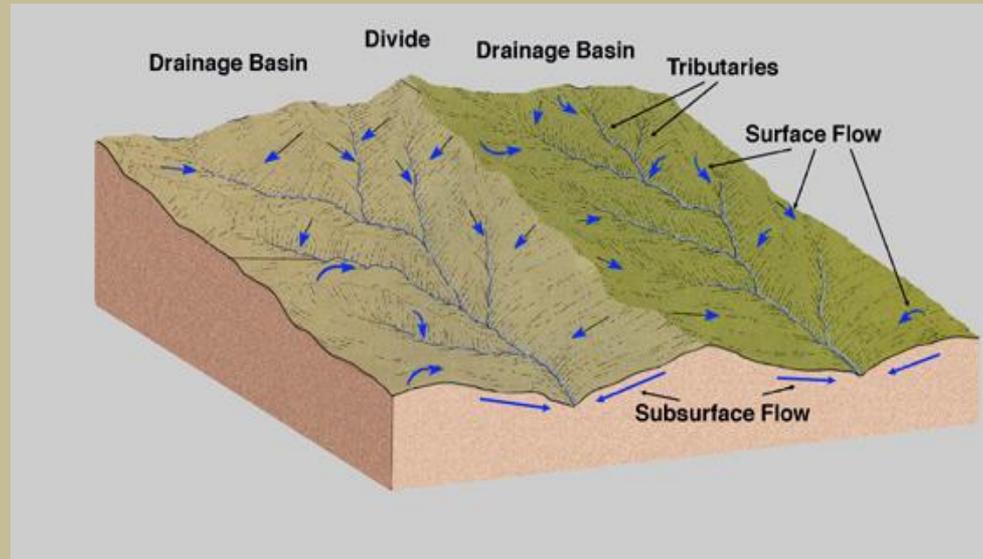
- Partículas → impedem o fluxo → movimento de água através da z. hiporreica muito lento;
- Não existe fotossíntese → escuro

### 4. Braços do rio “Backwaters”

- Zonas húmidas com mudança de volume consoante a estação ou
- Zonas inundadas sazonalmente
- Baixo movimento de água → acumulação de biomassa
- Blooms de fitoplancton / densa população macrófita → desenvolvimento de população de crustáceos e zooplancton

## Fluxos químicos e dinâmica dos rios: Características

Linearidade de fluxo + condições biogeoquímicas diversas + influência directa da vegetação ripícola (influência na MO – folhas, ramos; adição de superfícies sólidas) nos processos biogeoquímicos + influência directa da bacia de drenagem nos processos biogeoquímicos (alimentação do fluxo de água com materiais particulados e dissolvidos + alimentação de água com matéria orgânica e sólidos inorgânicos através do solo)



## Fluxos químicos e dinâmica dos rios: Influência do Homem

- Poluição da água
- Manipulação da bacia drenagem
- Alteração da química atmosfera
- Produtos da actividade humana:

Aumento da concentração de nutrientes, introdução de toxinas, aumento/diminuição da MO, aumento da carga sólida sedimentar, alteração da zona ripícola, modificações físicas de canais, **construção de barragens**



**Ruptura da continuidade longitudinal dos rios**

### 3. Sedimentação em sistemas lacustres artificiais

*As albufeiras de barragem como últimas etapas da sedimentação de materiais provenientes da sobre-erosão dos solos*



### 3.1 – A erosão natural e a erosão acelerada dos solos das bacias de drenagem das albufeiras



Actualmente um dos principais problemas do planeta Terra é a progressiva degradação dos solos. Esta progressiva degradação resulta não só de processos geológicos naturais mas, principalmente, da excessiva actuação do Homem nas bacias de drenagem



**declínio da produtividade do solo**

# Erosão natural dos solos – causas e efeitos

A erosão é uma das formas de degradação dos solos

- ❖ Compactação
- ❖ Perda de matéria orgânica
- ❖ Perda da estrutura
- ❖ Deficiente drenagem interna
- ❖ Salinização
- ❖ Problemas de acidez



**A erosão é um processo geológico que ocorre naturalmente em todo o tipo de solo. Com causas naturais é um processo geralmente lento, imperceptível ao olho humano. A erosão dita natural ou geológica poderá ter consequências benéficas.**



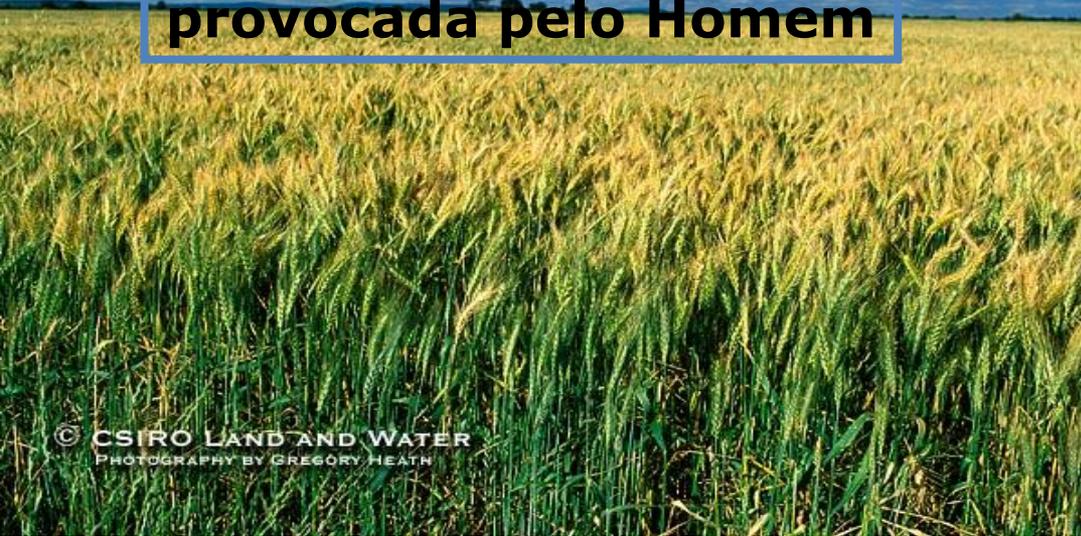


Por acção do Homem poderá atingir taxas alarmantes, causando seríssimos problemas de perda da parte superficial do solo, o que se irá repercutir numa redução drástica da produtividade agrícola

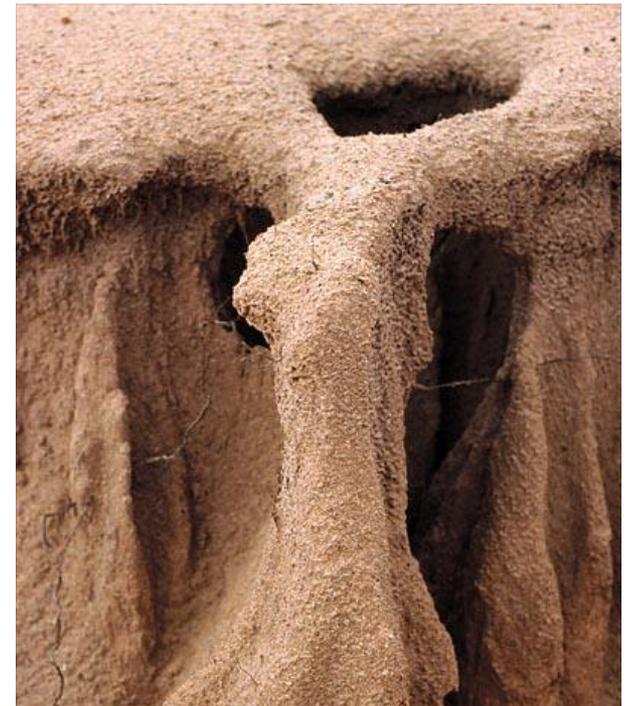
Esta erosão, designada por “**erosão acelerada**” tem consequências, não só na diminuição da produtividade agrícola devido à perda de matéria orgânica na camada superficial do solo, mas também poderá levantar sérios problemas quando o material erodido se deposita em locais onde não é desejado



## A erosão progressiva provocada pelo Homem

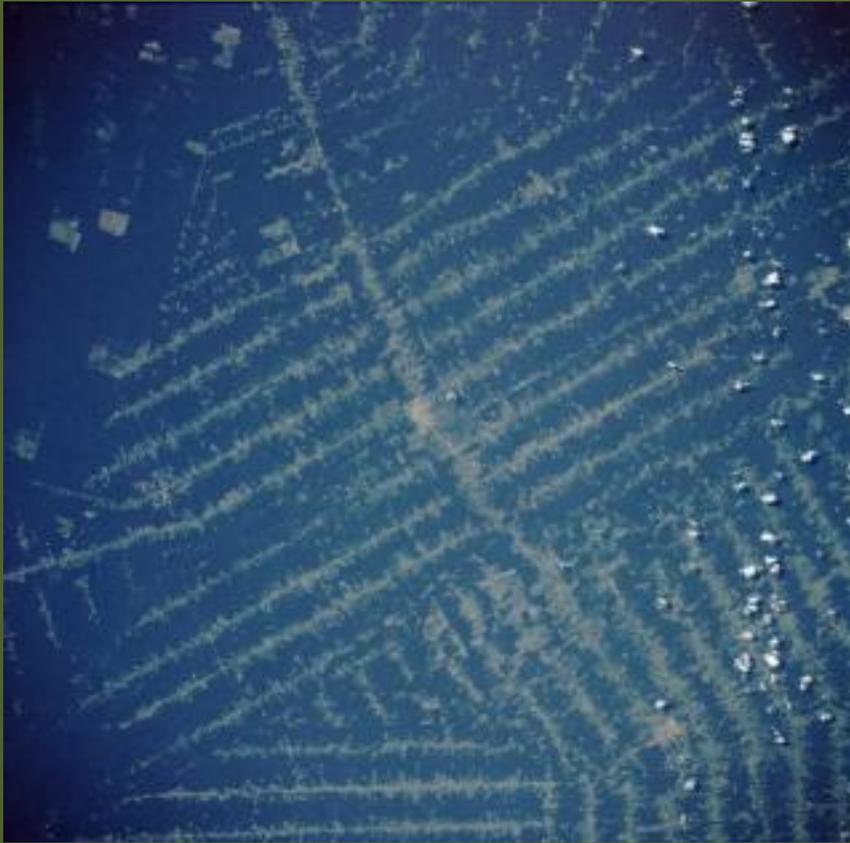


A agricultura intensiva é uma das principais causas para a sobre-erosão da maioria dos solos: quando as práticas agrícolas se desenvolvem em zonas inclinadas, ocorre importante perda de solo que se desloca para zonas mais baixas, formando no local, canais mais ou menos profundos



A erosão antrópica do solo é considerada como um dos mais destrutivos fenómenos à escala mundial. Contudo, a remoção da camada superficial do solo é apenas parte da história!

Qualquer que sejam as práticas que conduzam a um distúrbio na vegetação natural, a erosão acelerada do solo constitui um grave problema. Este problema é ainda maior quando a vegetação envolvida faz parte de florestas costeiras ou de zonas húmidas



Desflorestações em massa na floresta Amazónica

As partículas mais finas encontram o seu percurso através de ribeiras, rios e lagos, onde provocam frequentemente excessivo assoreamento



↓

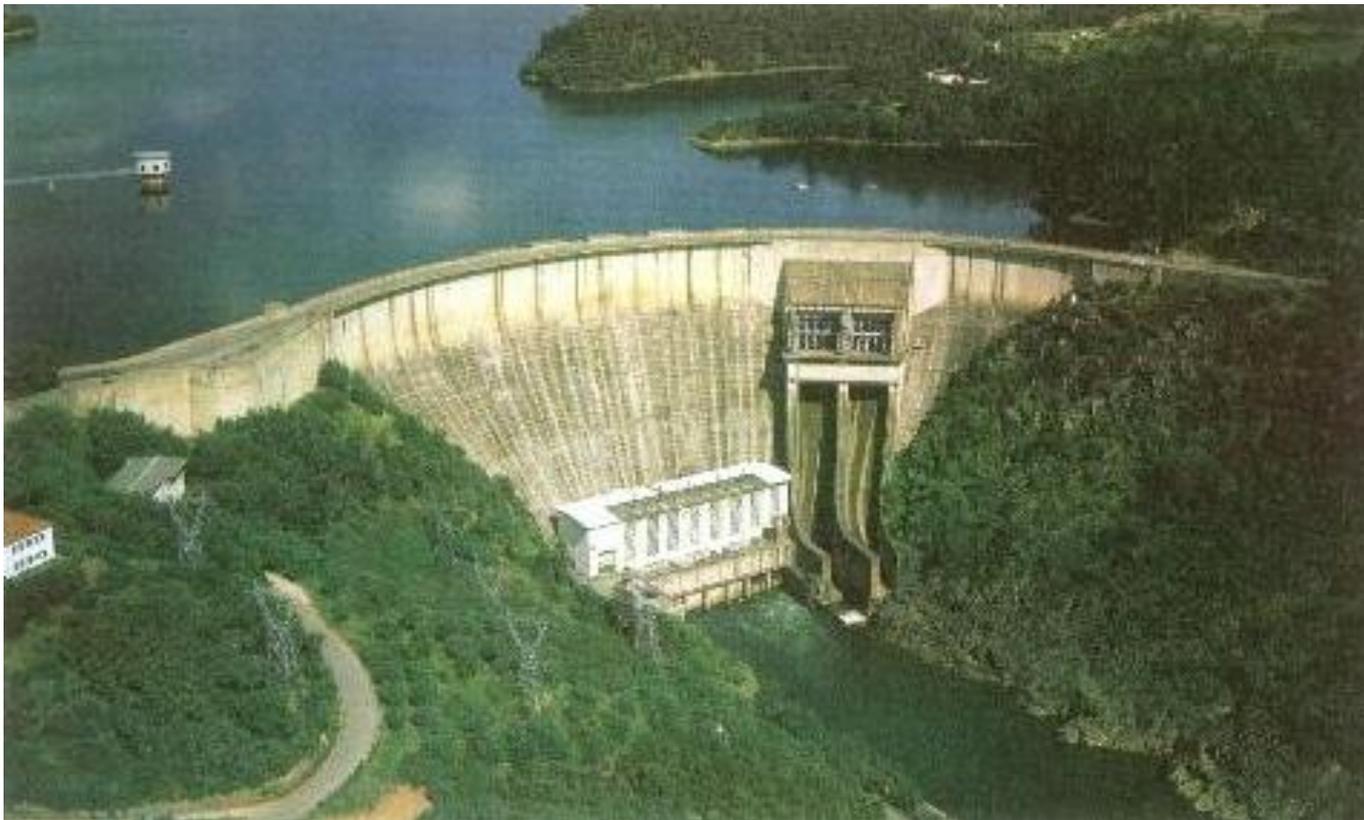
**Absorvem a radiação solar aumentando a temperatura destes meios, contribuindo para uma drástica modificação de todo o ecossistema**

Para além disso retêm poluentes pesticidas, excesso de nutrientes e metais pesados diversos, contaminando todos os locais do nosso ambiente.



## 3.2 – Processos físico-químicos em sistemas lacustres

Na maior parte do Globo, particularmente nas regiões áridas e sub-áridas onde os recursos hídricos naturais são escassos, uma grande parte da água utilizada para uso doméstico, na agricultura, indústria, pesca e fins recreativos provem de lagos artificiais



Embora exista uma grande controvérsia relativamente à sua importância, tem-se assistido a um crescimento exponencial destes empreendimentos nos últimos anos.

É reconhecida a existência em todo o mundo de mais de 60.000 barragens com altura superior a 15 metros, situando-se mais de 40.000 na China





Em todo o mundo, o volume de água armazenado em albufeiras de barragem corresponde a  $8.400 \text{ Km}^3$ , relativamente a  $1.200 \text{ Km}^3$  existentes em cursos de água naturais



Retenção de cerca de 700% da água dos rios

EX: No SE Ásia, as albufeiras de barragem correspondem à maior parte das águas interiores

As barragens representam uma barreira ao ciclo natural de transporte dos sedimentos até às zonas costeiras. Grande parte dos materiais continentais erodidos que deveria prosseguir naturalmente o curso dos rios até ao mar fica retido nas albufeiras, sendo por este motivo as barragens consideradas como um dos mais destrutivos empreendimentos humanos da actualidade

#### BARRAGEM DE ALQUEVA

- 1 Barragem
- 2 Ensecadeira
- 3 Descarregador de fundo
- 4 Descarregadores de meio fundo
- 5 Descarregadores de superfície
- 6 Central hidroeléctrica
- 7 Tomadas de água c. hidroeléctrica



Grandes impactos negativos e irreversíveis nos recursos hidrológicos e ecossistemas aquáticos

- degradação das linhas de costa
- modificações irreversíveis no rio a jusante

O aumento da erosão provocado por actividades antrópicas é contrabalançada pela retenção de grande parte desse material nas albufeiras das barragens

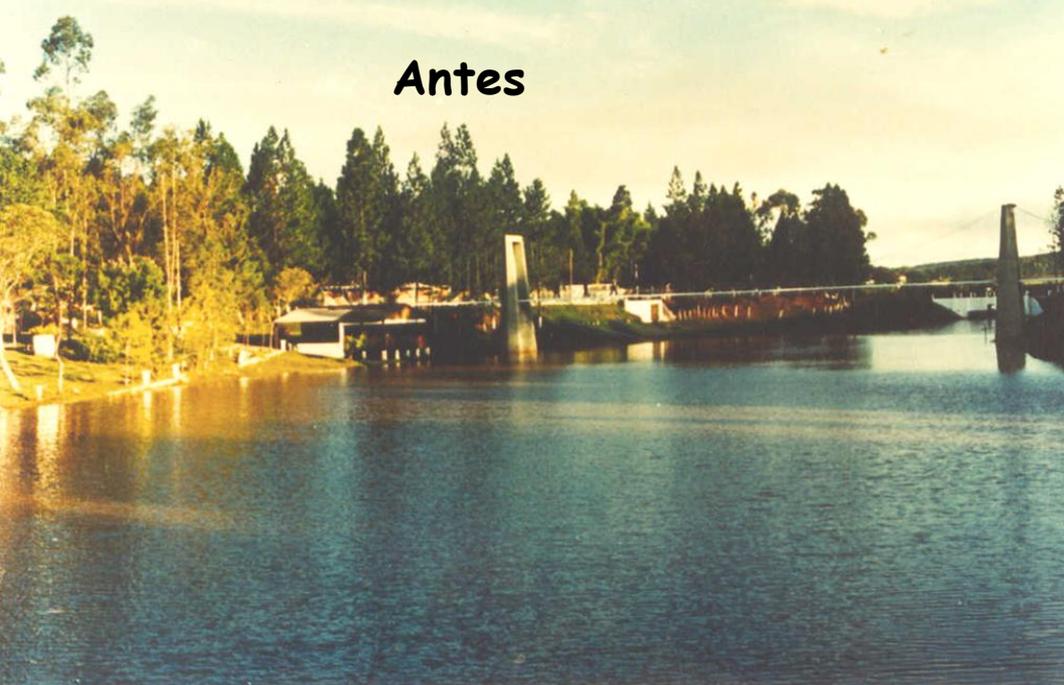


As barragens são responsáveis pela retenção de >85% do volume sedimentar que era transportado pelos rios antes da sua construção



**Grande diminuição dos volumes sedimentares transportados por via fluvial**

## Antes

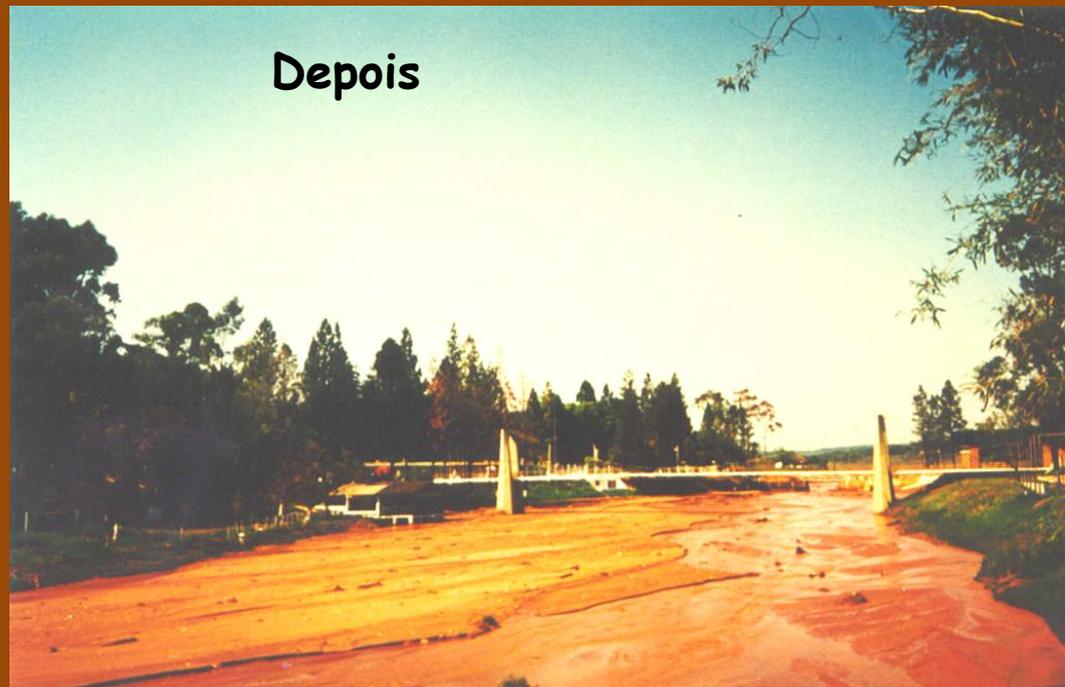


As albufeiras estão sujeitas a uma sedimentação acelerada e o excesso de sedimentos depositados tem vários efeitos negativos que se repercutem na barragem e respectiva albufeira

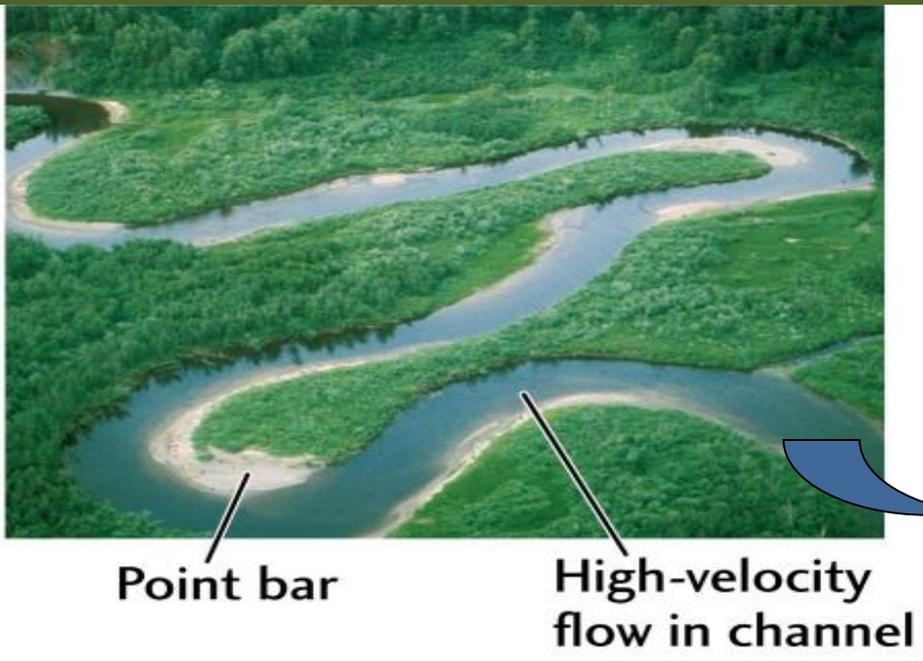
Córrego Água Limpa, Bauru, SP, Brasil  
Campagnoli, 2004

Diminuição do período de vida útil do empreendimento (diminuição do volume de armazenamento de água e do potencial de geração de electricidade)

## Depois



# Transformações Rio → Lago artificial

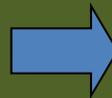


Diminuição do fluxo hídrico

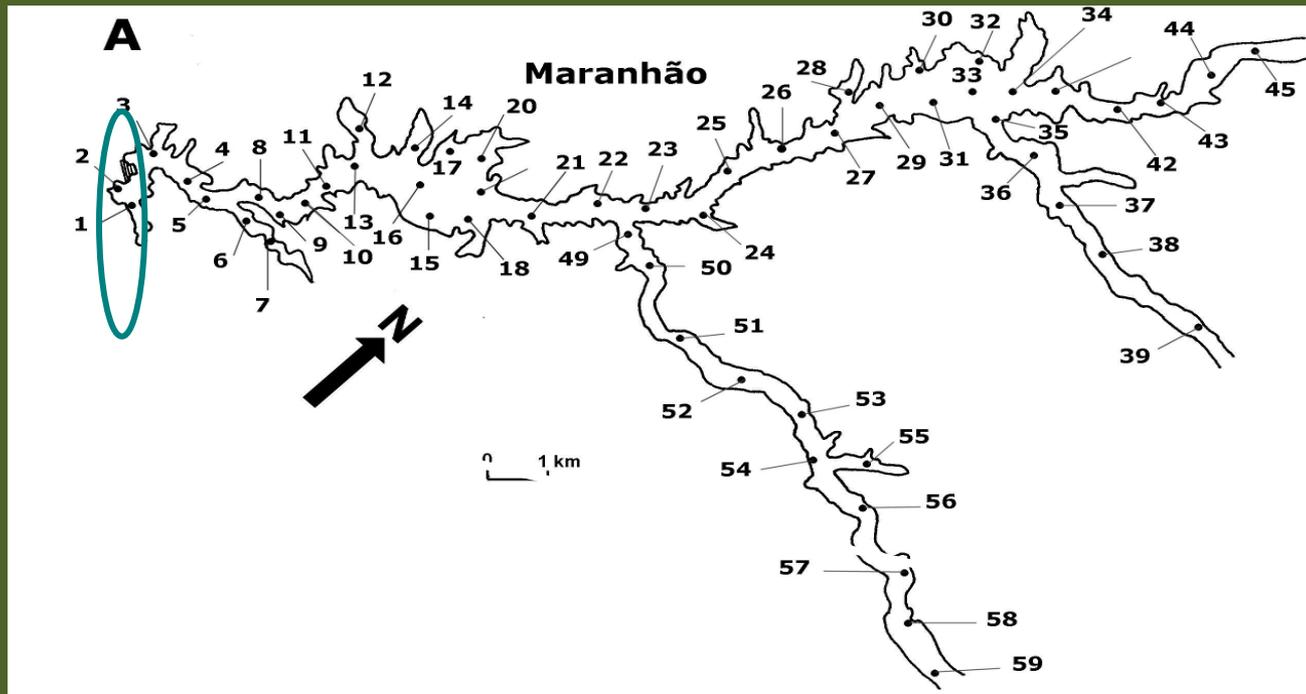
> sedimentação de partículas

< turbidez

> transmissão de luz



> Produção primária "in situ"



Desde o limite da albufeira com o rio “livre” até ao muro da barragem, o rio transforma-se gradualmente desde um sistema predominantemente alóctone até um sistema lacustre onde domina a produção autóctone de matéria orgânica

**Regime alóctone → Regime autóctone**

Alteração dos ciclos biogeoquímicos do carbono (C), fósforo (P), azoto (N) e sílica (Si)

Como cada ciclo de nutrientes responde de maneira diferente, a razão entre os vários elementos também se modifica



Numa escala global, a retenção de um rio por uma albufeira aumenta o tempo de residência médio da sua água de um factor 3 X superior (16 dias → 47 dias)

O aumento do tempo de residência afecta:

- concentração de sais devido à evaporação
- temperatura
- concentração de oxigénio

Aumento do tempo de residência + Aumento da produção autóctone de biomassa (→ < oxigénio)

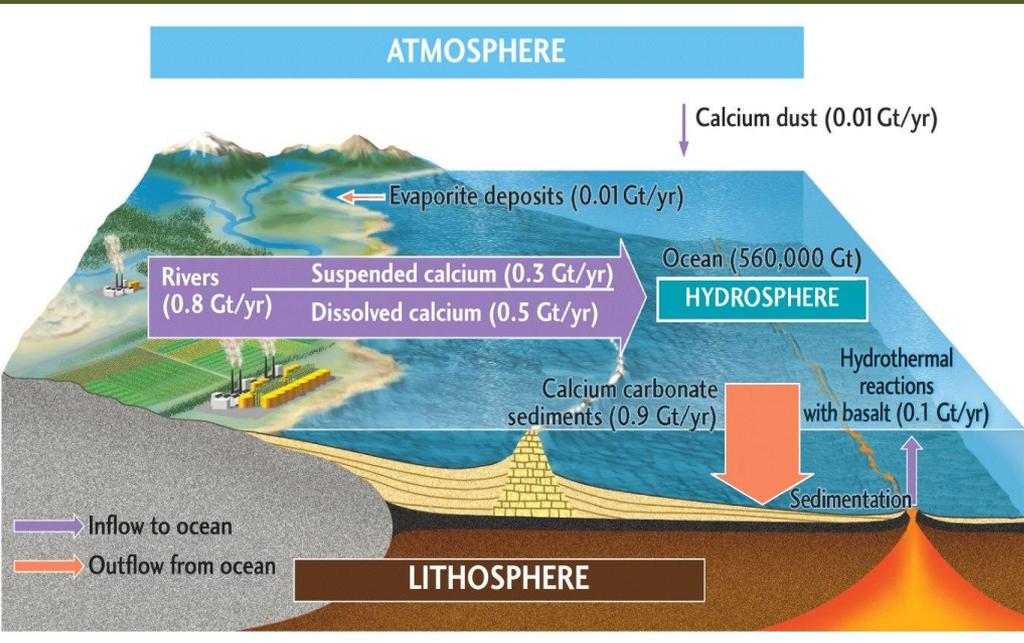


Alteração das condições redox → Alteração do ciclo de nutrientes e libertação de metais a partir dos sedimentos

# 3.3 - As barragens e represas e os ciclos de nutrientes

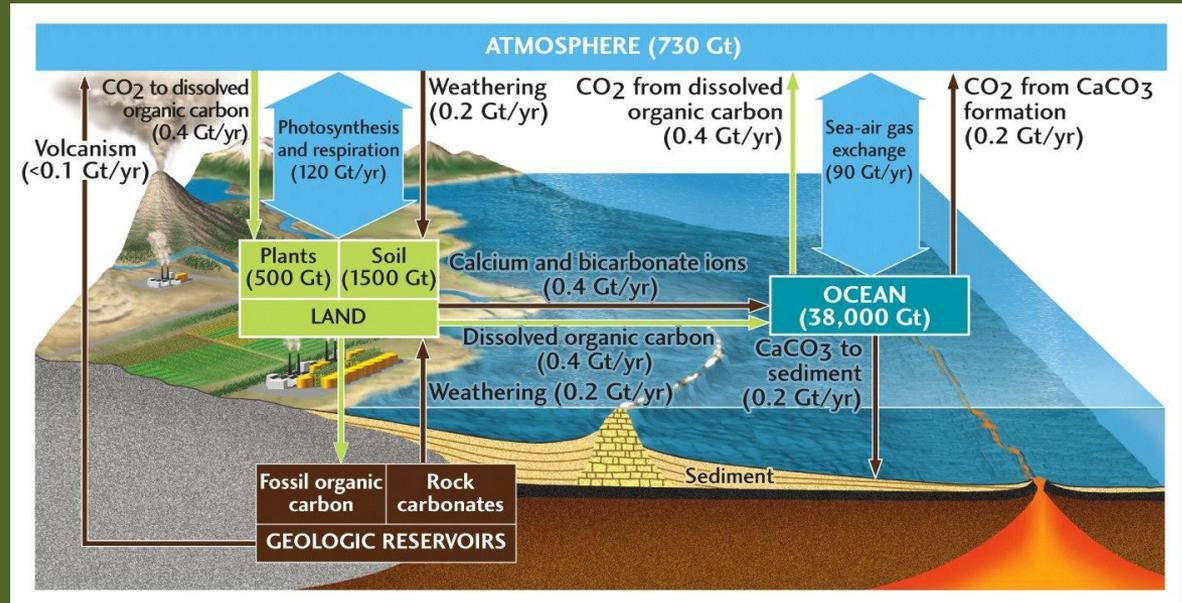
## Ciclo do cálcio

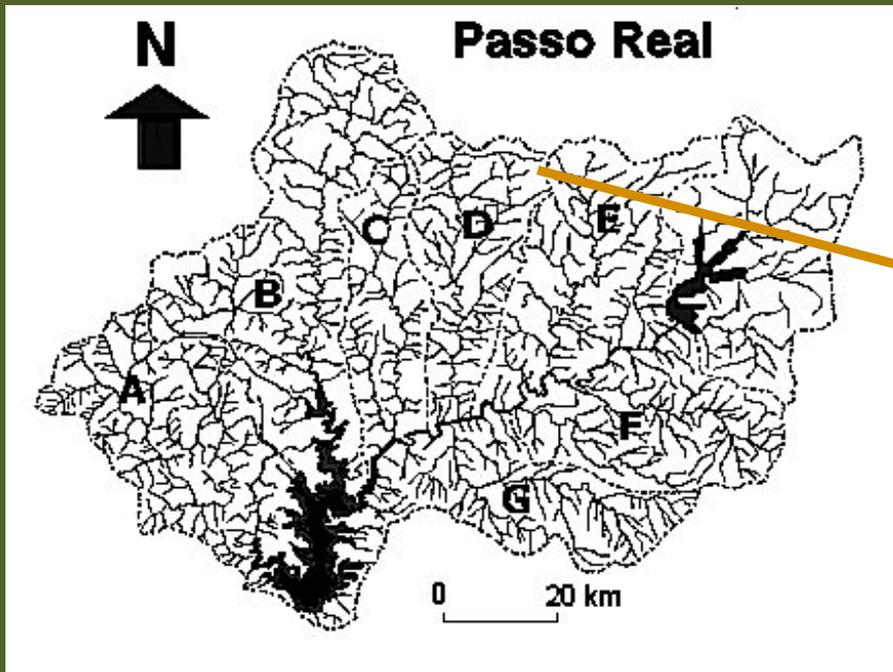
A existência de barragens interrompe os ciclos biogeoquímicos do carbono, nutrientes e metais



A modificação nos ciclos dos elementos afecta toda a área de drenagem, incluindo ecossistemas a jusante: zonas húmidas, estuários, deltas e zonas marinhas

## Ciclo do carbono





A maior consequência da transição rio → albufeira, é a diminuição do teor de oxigénio

A partir das bacias de drenagem a albufeira recebe M.O. origem fluvial, facilmente degradável



Essa M.O. deposita-se nos sedimentos e mineraliza-se

+

Nas zonas mais profundas da albufeira há produção de partículas orgânicas “in situ” (e.g. algas) que também se deposita nos sedimentos

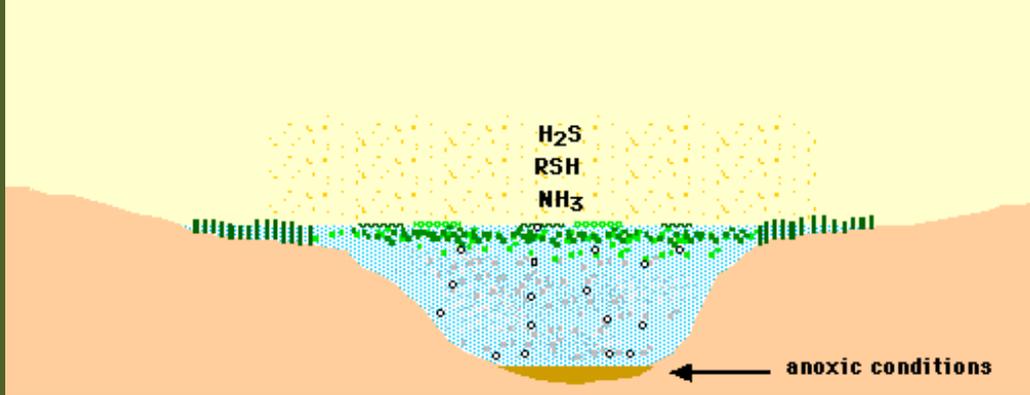
**Consumo de oxigénio**

Baixos teores de oxigénio na água



**problemas**

- ❖ Interior do reservatório
- ❖ Águas de descarga



A deficiência de Oxigênio no interior da albufeira



Redução dos nitratos - NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,  
óx/hidr. manganês - Mn(II),  
ox/hidr. Ferro - Fe(II) e  
sulfatos - H<sub>2</sub>S



Acumulação nas zonas mais profundas

➤ Elementos tóxicos para peixes e organismos superiores

➤ Mantêm anóxica a interface sedimento-água

➤ Impedem formação de leitos de hid. Fe



Metanogénese microbiológica + desnitrificação → emissão para a atmosfera de metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)

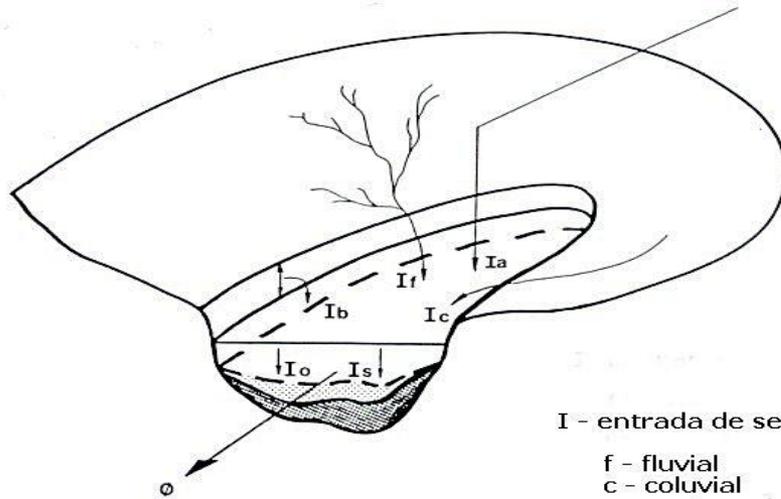


< capacidade de retenção de P

> Produtividade do sistema

Diminuição de Fe nos sedimentos





 Sedimento no lago  
 Modificação nos sedimentos no tempo t

I - entrada de sedimentos no lago

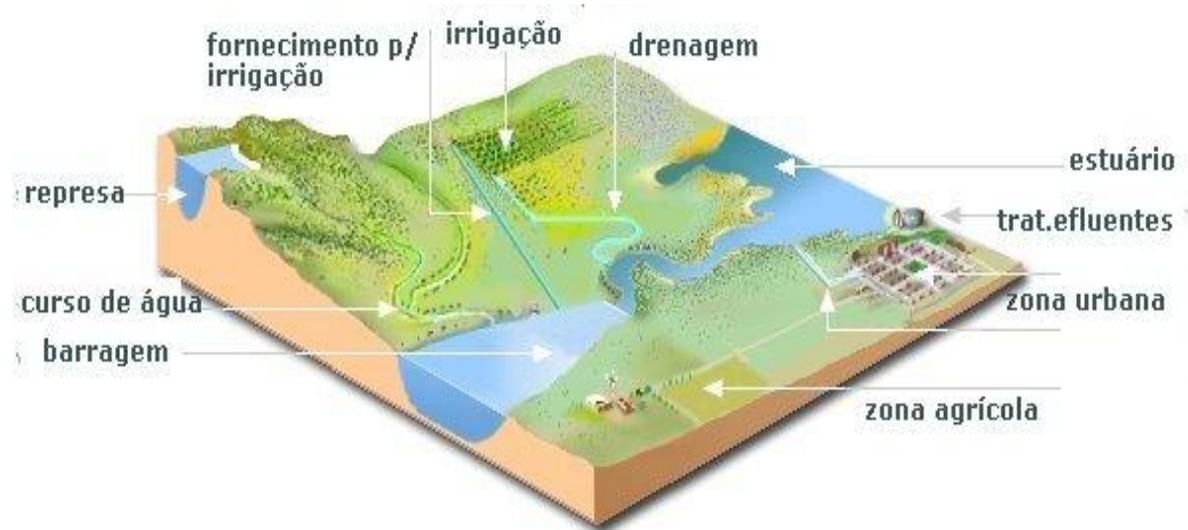
f - fluvial  
 c - coluvial  
 o - mat. orgânica  
 s - sílica biogénica  
 b - erosão no leito do lago  
 a - pó eólico

φ - saída dos sedimentos do lago

As albufeiras recebem as águas de escorrência carregadas de nutrientes, metais e substâncias orgânicas a partir das bacias hidrográficas, substâncias que provêm:

- da excessiva erosão a montante
- de actividades agrícolas, industriais e descargas de efluentes.

Este excesso de acumulação de materiais conduz a uma deterioração da qualidade da água devido à libertação de metais pesados e nutrientes acumulados nos sedimentos de fundo.



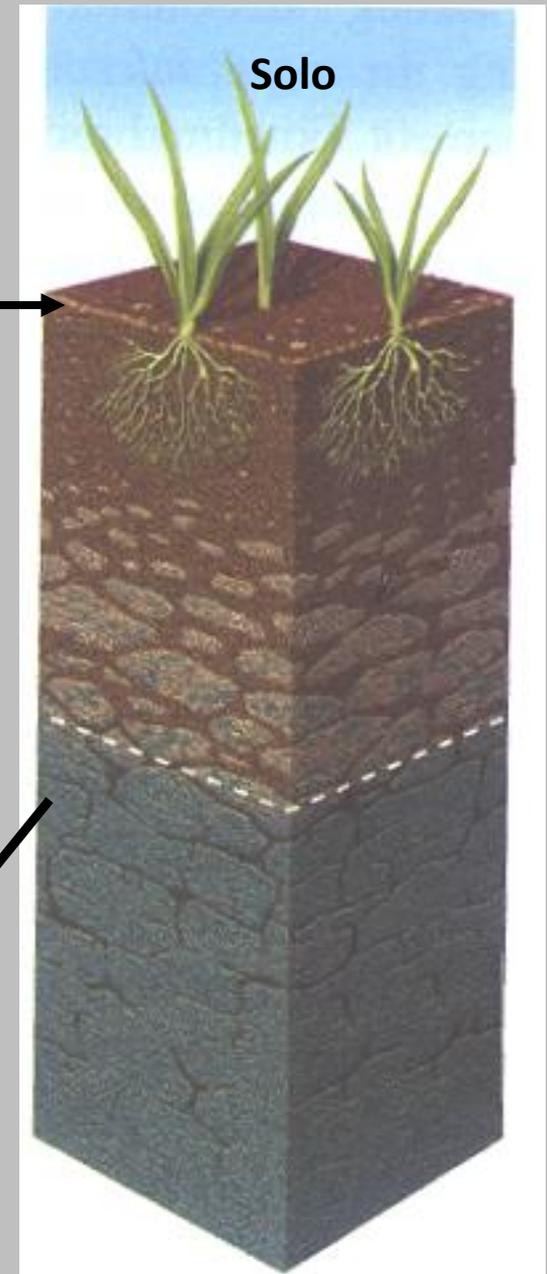
### 3.4 - De onde vêm a maioria dos materiais depositados nas albufeiras?

As partículas sólidas que se depositam nas albufeiras são transportadas pelas linhas de água a partir



Existentes nas redes de drenagem que estão actualmente sob acção de erosão acelerada

As partículas dos solos, podem ser transportados e depositados nas albufeiras, sem sofrerem quaisquer transformações, uma vez que são maioritariamente constituídos por minerais secundários em equilíbrio com as condições atmosféricas de superfície e por minerais primários muito resistentes ao intemperismo.



Os sedimentos acumulados nos sistemas hídricos, que tenham proveniência directa das rochas

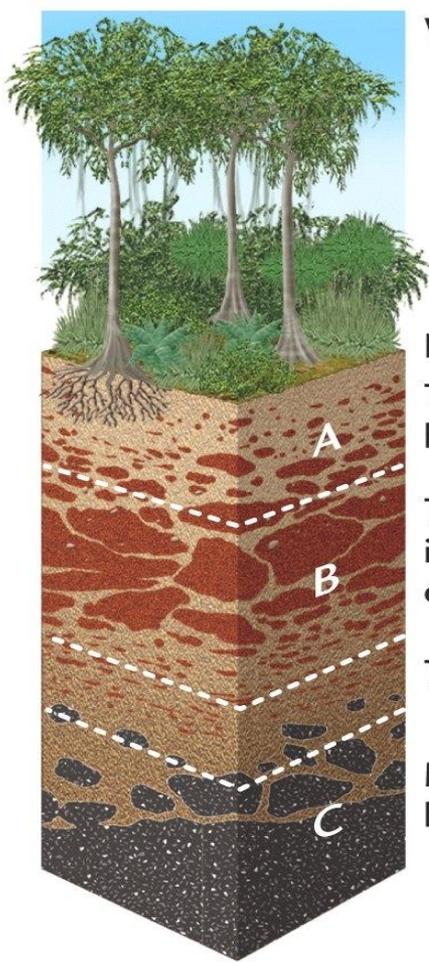


**depósitos sedimentares pouco consolidados**



**no caso de litologias consolidadas, são provenientes das suas capas de alteração, após as primeiras fases de actuação dos agentes meteóricos.**

## Wet climate



### LATERITE

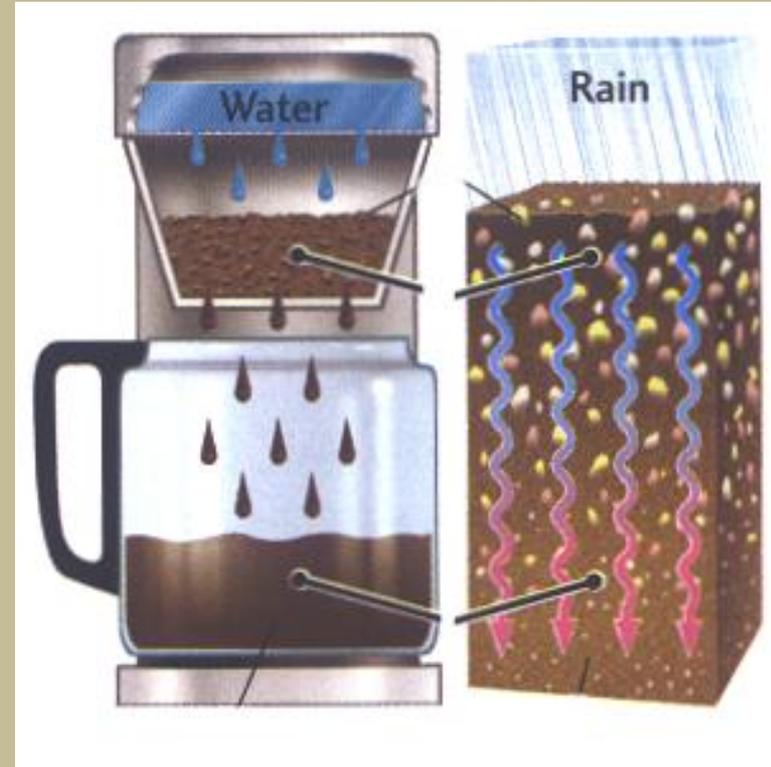
Thin or absent humus

Thick masses of insoluble iron and aluminum oxides; occasional quartz

Thin leached zone

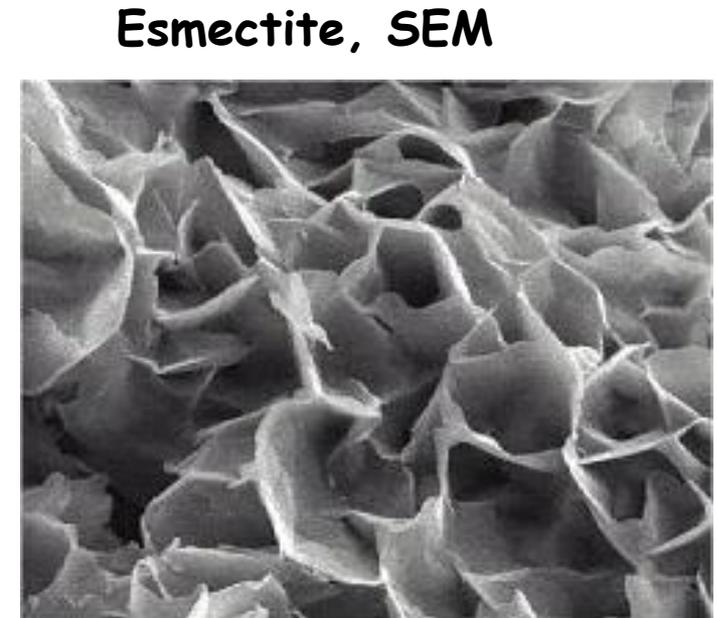
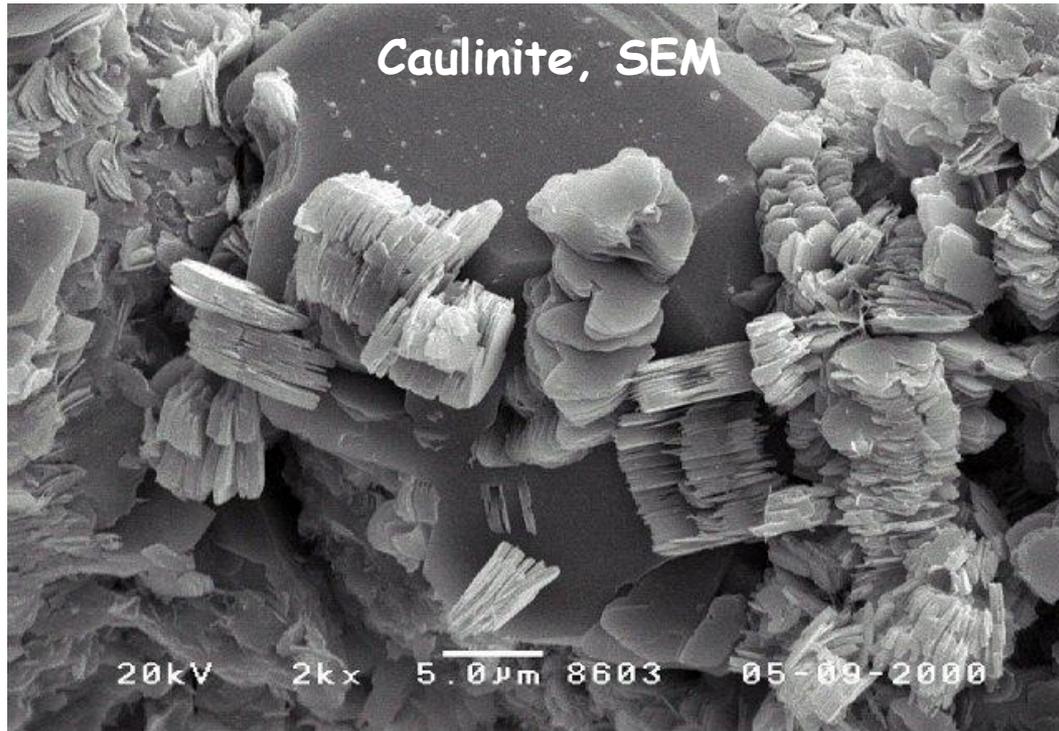
Mafic igneous bedrock

As rochas consolidadas e são apenas contribuem com elementos solúveis, por dissolução em águas meteóricas de alguns dos seus componentes mais instáveis.



Qualquer formação superficial pouco consolidada, mesmo transformada em solo e colonizada por vegetação, se exposta e trabalhada sem os cuidados devidos, irá sofrer um transporte intenso pelas águas de escoamento superficial (erosão hídrica) e/ou por erosão eólica

**Minerais argilosos** → prioritariamente lixiviados pelas águas de escorrência, transportados pelos rios e depositados no fundo das albufeiras, dada a sua pequena dimensão e baixa densidade



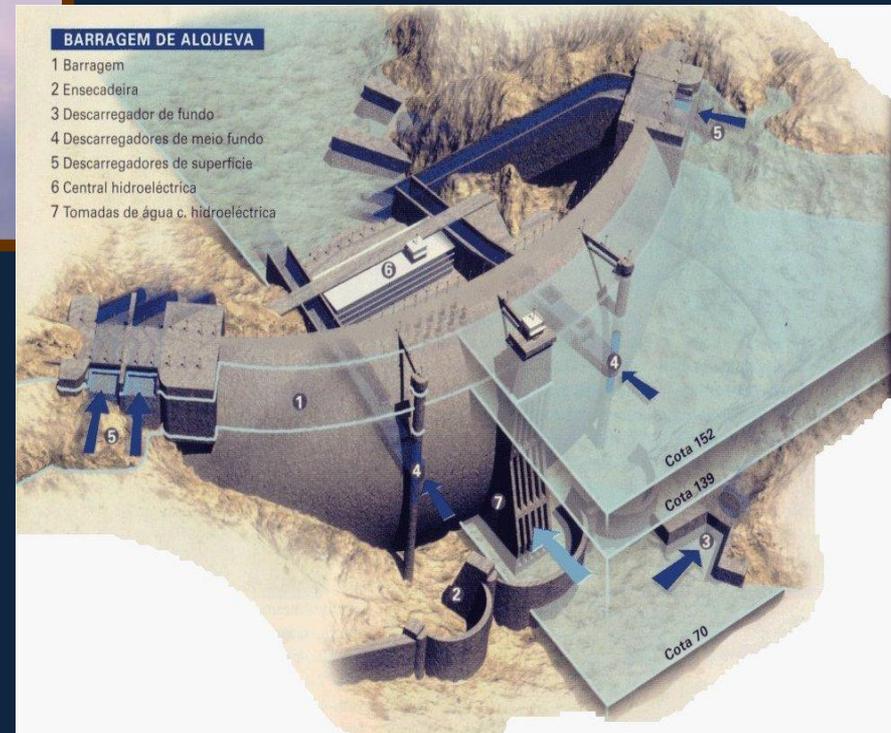
**Material argiloso em suspensão na albufeira de Passo Real, RS, Brasil**

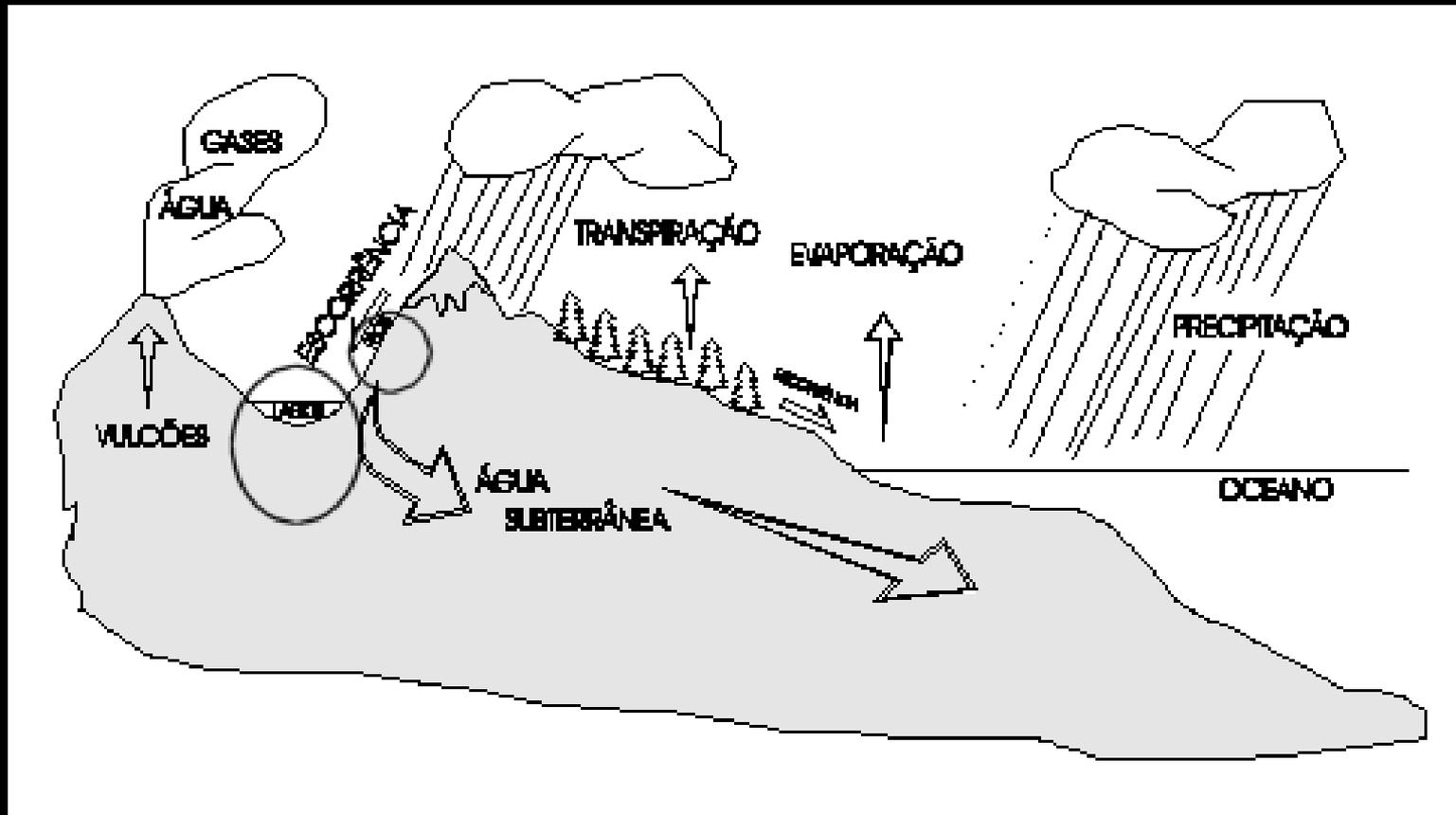


Rio Piracicaba, SP, Brasil – Campagnoli, 2004

Os rios desempenham um papel fundamental no transporte da água juntamente com sólidos dissolvidos e em suspensão, funcionando como as principais vias através das quais os materiais continentais provenientes do intemperismo das rochas alcançam os oceanos

Quando o seu percurso é interrompido por lagos (naturais ou artificiais), parte da água é temporariamente armazenada, podendo-se considerar estes sistemas como locais de passagem alimentados por cursos hídricos, com renovação mais ou menos constante da coluna de água.





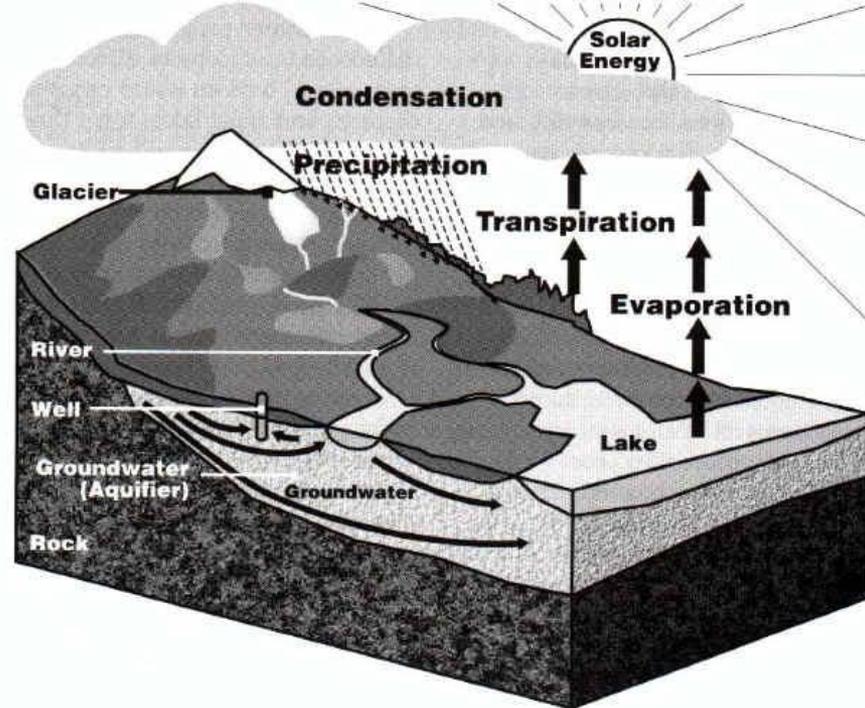
A água é o principal agente na circulação dos materiais para o interior destes reservatórios. De entre as principais entradas de água nas albufeiras, contam-se a precipitação (alguma da qual já tinha sido evaporada a partir do continente), as águas de escoamento superficial e as águas subterrâneas e de entre as principais saídas, as descargas (superficiais e subsuperficiais), a evaporação e a infiltração.

Principal fonte da água armazenada:

2/3 perdem-se: infiltração e evaporação

Precipitação

1/3 → Albufeiras

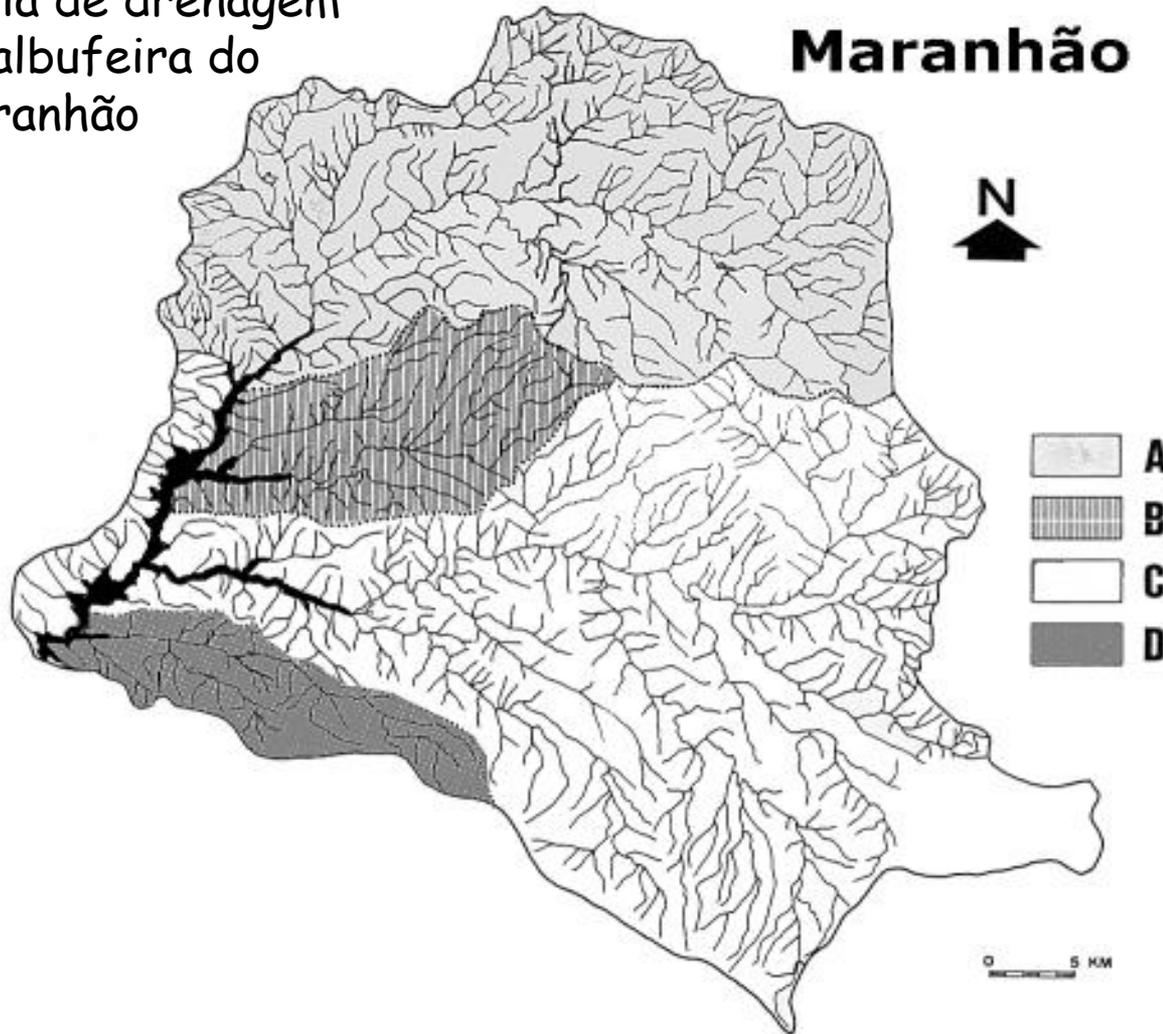


CONSERVAÇÃO

As barragens têm tido uma contribuição significativa na gestão dos cursos de água finitos, limitados, heterogeneamente distribuídos e sujeitos a grandes flutuações sazonais; asseguram um adequado fornecimento de água → armazenamento na época das chuvas e sua libertação em épocas de escassez

## Bacia de drenagem da albufeira do Maranhão

# Maranhão



Relativamente às entradas de material, as albufeiras comportam-se como “pequenos oceanos”: os mecanismos de entrada de água são idênticos, exibem estratificação vertical e no seu interior processam-se ciclos biológicos e sedimentação

Apenas nas saídas, os 2 sistemas são perfeitamente distintos, dado que nos oceanos a água apenas se perde por evaporação. Nas albufeiras o volume de água depende do balanço entre as entradas e saídas, o qual depende do sistema considerado e, principalmente, das condições climáticas

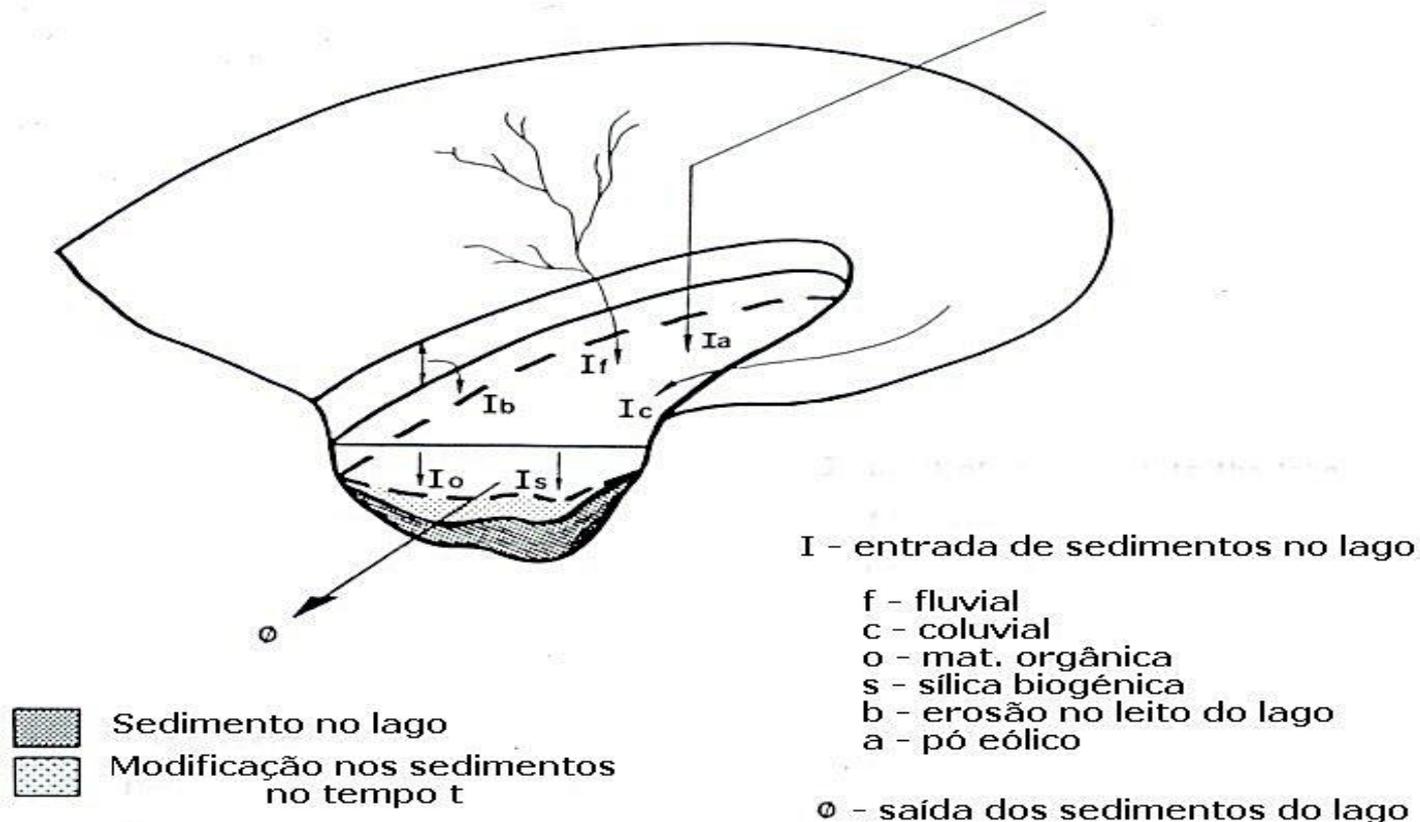


Alb. Passo Real,  
RS, Brasil

Desde a sua entrada até à saída, a qualidade da água altera-se devido a vários mecanismos importantes relacionados com interações com o solo, rochas e vegetação, as quais provocam reacções químicas principalmente nos constituintes dissolvidos. Estas modificações iniciam-se logo durante o movimento da água pelas bacias hidrográficas. Estando os processos que controlam a qualidade da água num equilíbrio delicado, qualquer modificação do sistema, tal como uma mudança no uso do solo, pode gerar mudanças significativas na sua qualidade.

Nos sistemas lacustres naturais e artificiais são consideradas 4 fontes de material que contribuem para a massa total de sedimentos e que não são derivados de processos erosivos na bacia de drenagem (a principal fonte):

- (a) produção aquática de material orgânico,
- (b) produção aquática de sílica biogénica,
- (c) erosão das margens e do leito do sistema e
- d) entrada de pós atmosféricos por transporte eólico.



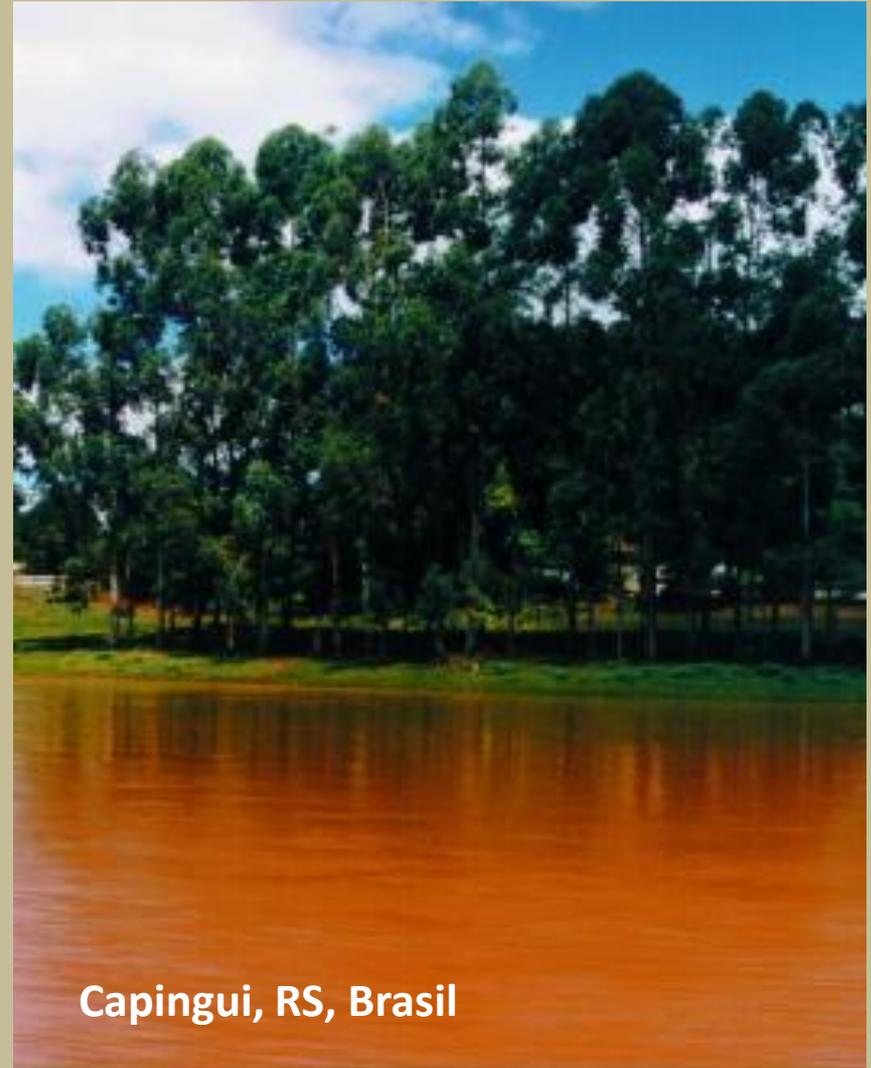
As duas maiores perdas de material incluem:

**(1) deposição dos sedimentos no fundo dos sistemas**



**Maranhão, Portugal**

**(2) transporte em suspensão nas águas de descarga e de infiltração**

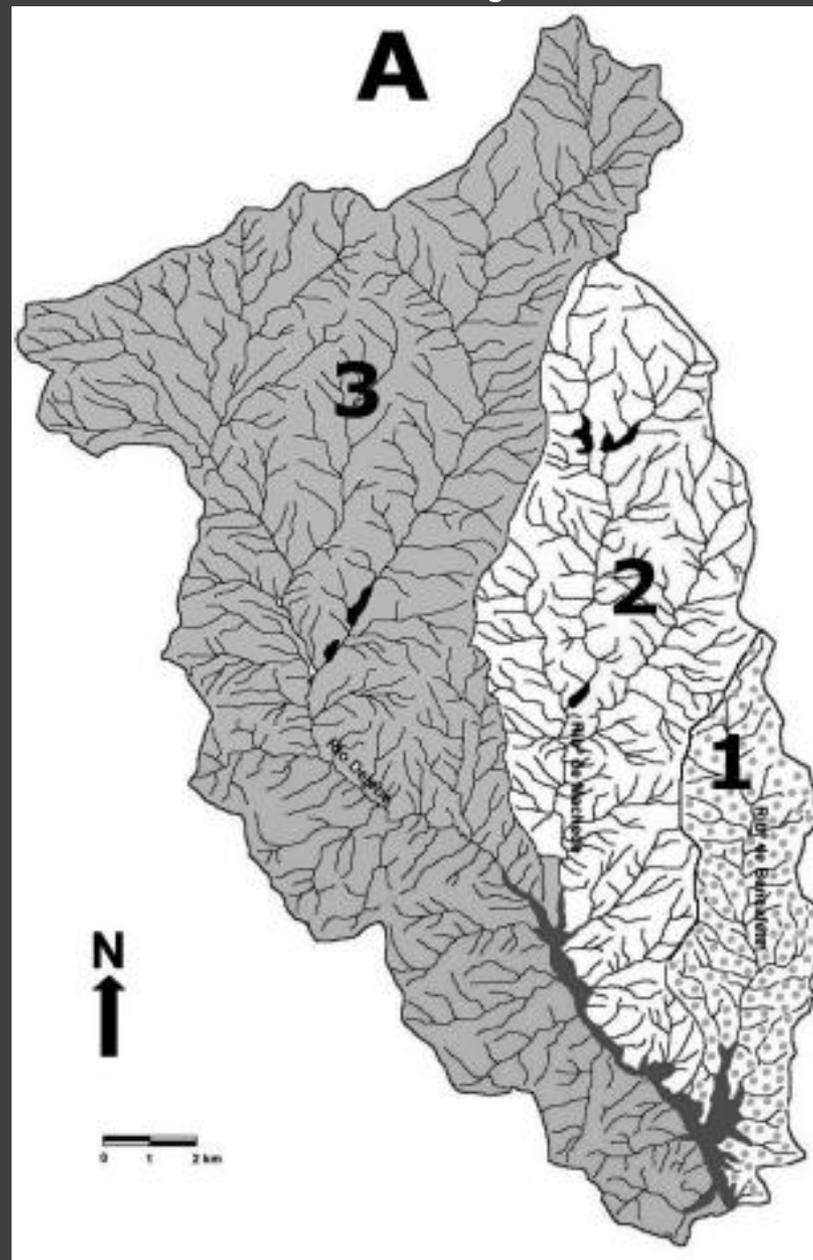


**Capingui, RS, Brasil**

## 3.5 – Factores que controlam o transporte e a sedimentação dos materiais nas albufeiras

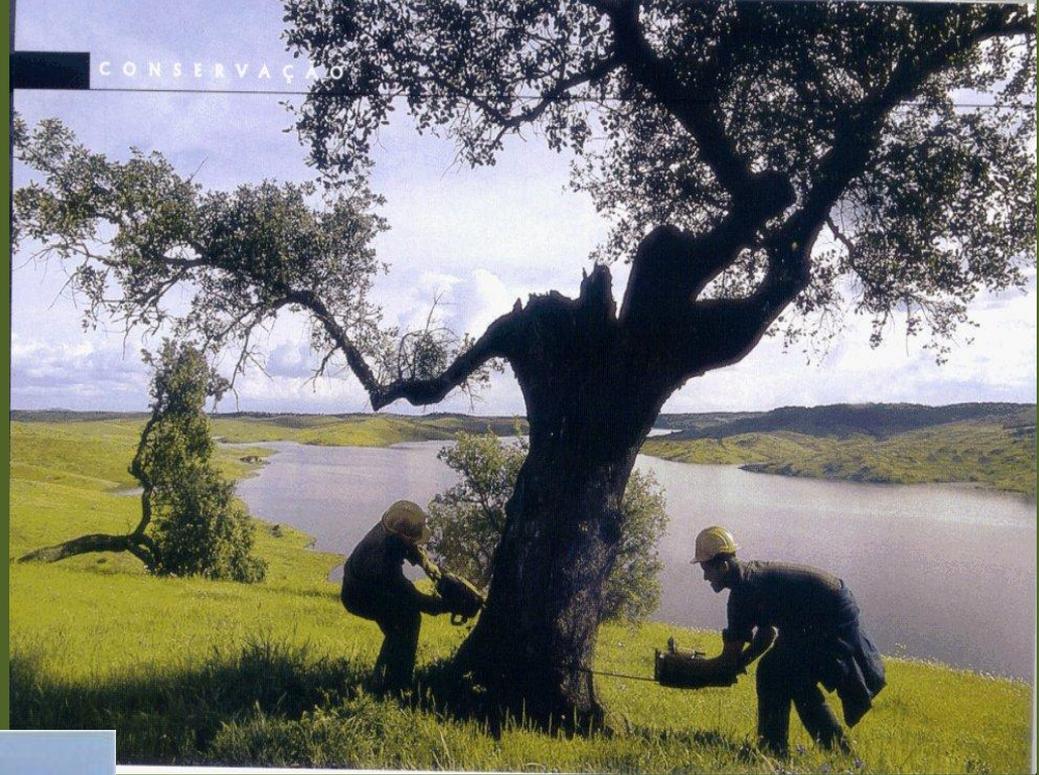
Os principais parâmetros que controlam a sedimentação em rios, lagos e albufeiras podem ser divididos em três categorias: **físicos, químicos e biológicos**. Enquanto que nos rios predominam os processos físicos, em lagos e albufeiras os **processos químicos e/ou biológicos** podem ter igual ou mesmo maior importância que a actividade física

Os processos físicos que operam nas albufeiras são mais diversificados que nos rios e incluem: (1) a forma da bacia, a sua orientação e dimensão, (2) a área de drenagem, (3) as condições climáticas, (4) o relevo e (5) o tipo de cobertura vegetal.



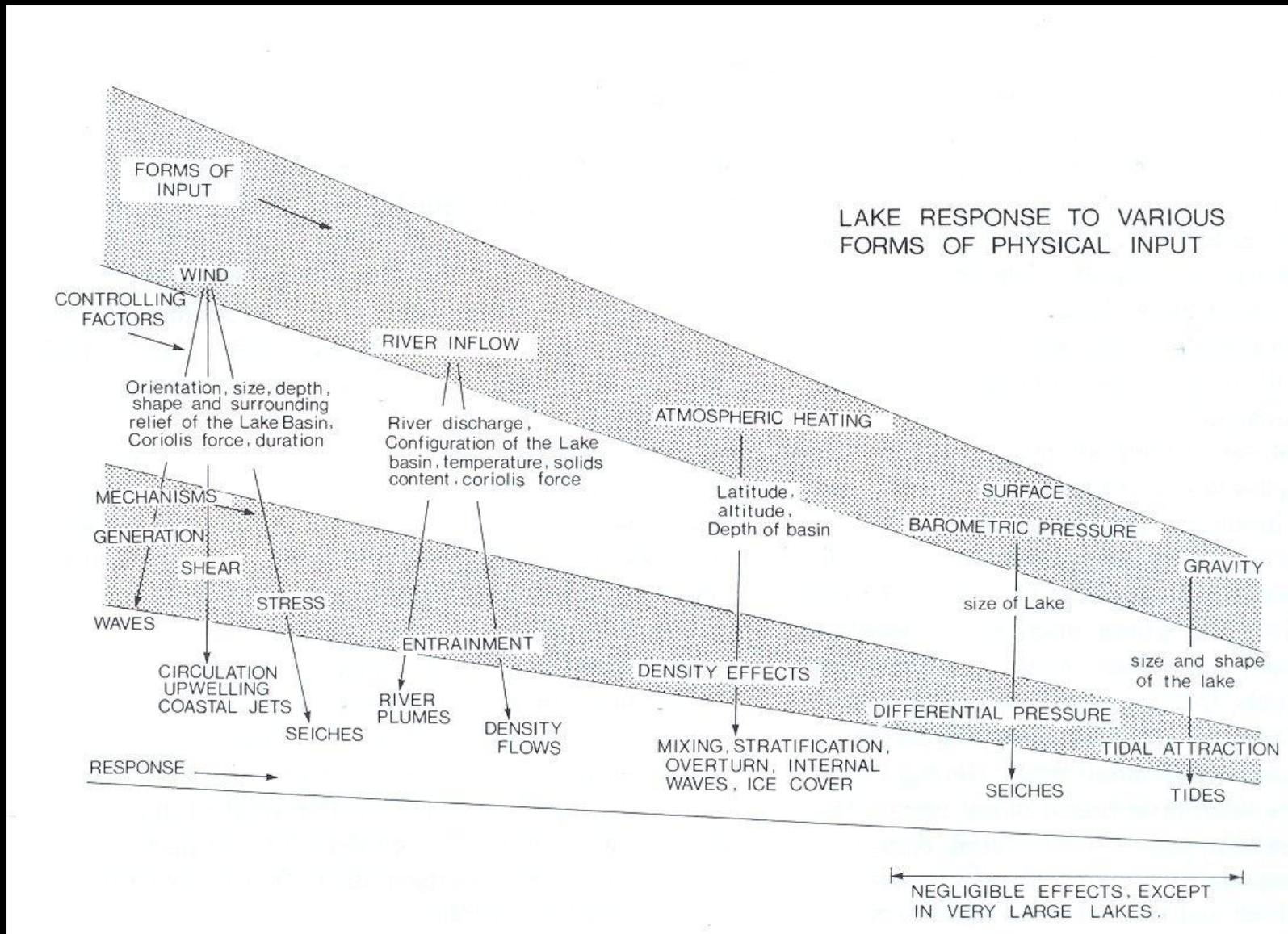
Bacia de drenagem de Monte Novo

De entre os processos químicos são de referir, a natureza da geologia enquadrante e a intervenção do Homem, particularmente a relacionada com o uso do solo (desflorestação, agricultura).



É estimada uma taxa de sedimentação média anual de aproximadamente  $50 \text{ t km}^{-2}$  em albufeiras de  $10 \text{ km}^2$ , decrescendo ligeiramente este valor à medida que a área do sistema aumenta.

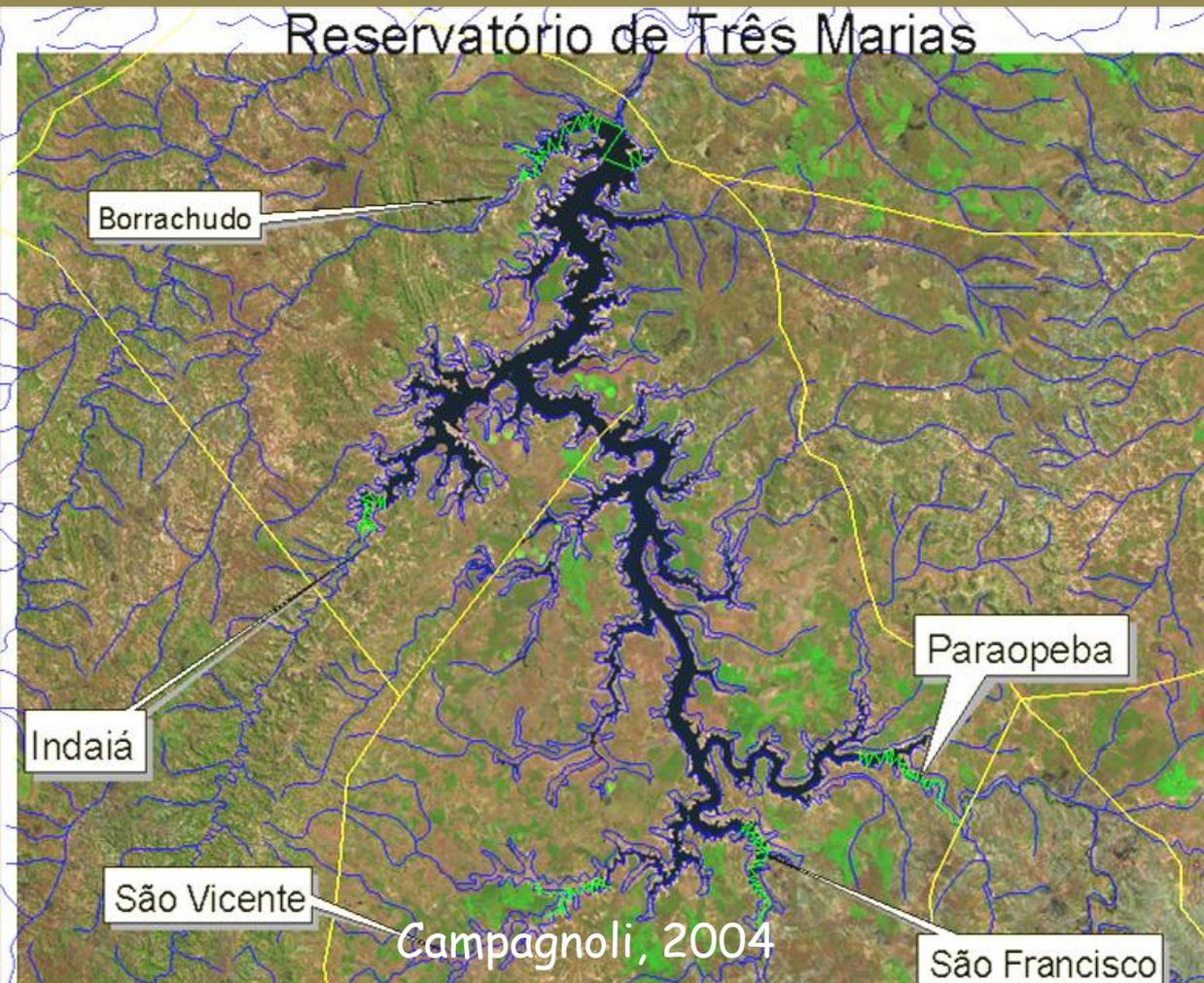
# Factores que influenciam a resposta da sedimentação nos lagos



A figura mostra como os vários factores influenciam os efeitos do vento, do fluxo dos rios, do aquecimento atmosférico. A pressão barométrica e a densidade são de menor importância

## 1. *Fisiografia das bacias de drenagem e das albufeiras*

A pequena dimensão da maioria das albufeiras **limita a geração de ondas de vento de longo-período** e, portanto, mantém os níveis de energia muito abaixo dos sistemas marinhos → a ocorrência de areia grosseira e cascalho está confinada a áreas muito pouco profundas



As albufeiras são sistemas fechados nos quais, a entrada de materiais provenientes da bacia de drenagem exerce uma forte influência sobre a acumulação.

- A forma e profundidade dos lagos afectam a circulação da água → influenciam a distribuição e deposição das partículas mais finas (argila e silte). A maior profundidade dos lagos contribui para o transporte de sedimentos longo da margem (devido a empolamento e refacção das ondas)
- Pequenos lagos comportam-se como sistemas simples; grandes lagos respondem como sub-bacias complexas
- **Pequenos lagos** → Acção das ondas é mínima; níveis energéticos apenas suficientes para provocar transporte parcial e selectivo do material.
- **Grandes lagos** → a energia das ondas é grande, representando uma parte significativa da energia dinâmica total do sistema.

**≠ tipos e taxas de acumulação de sedimentos**

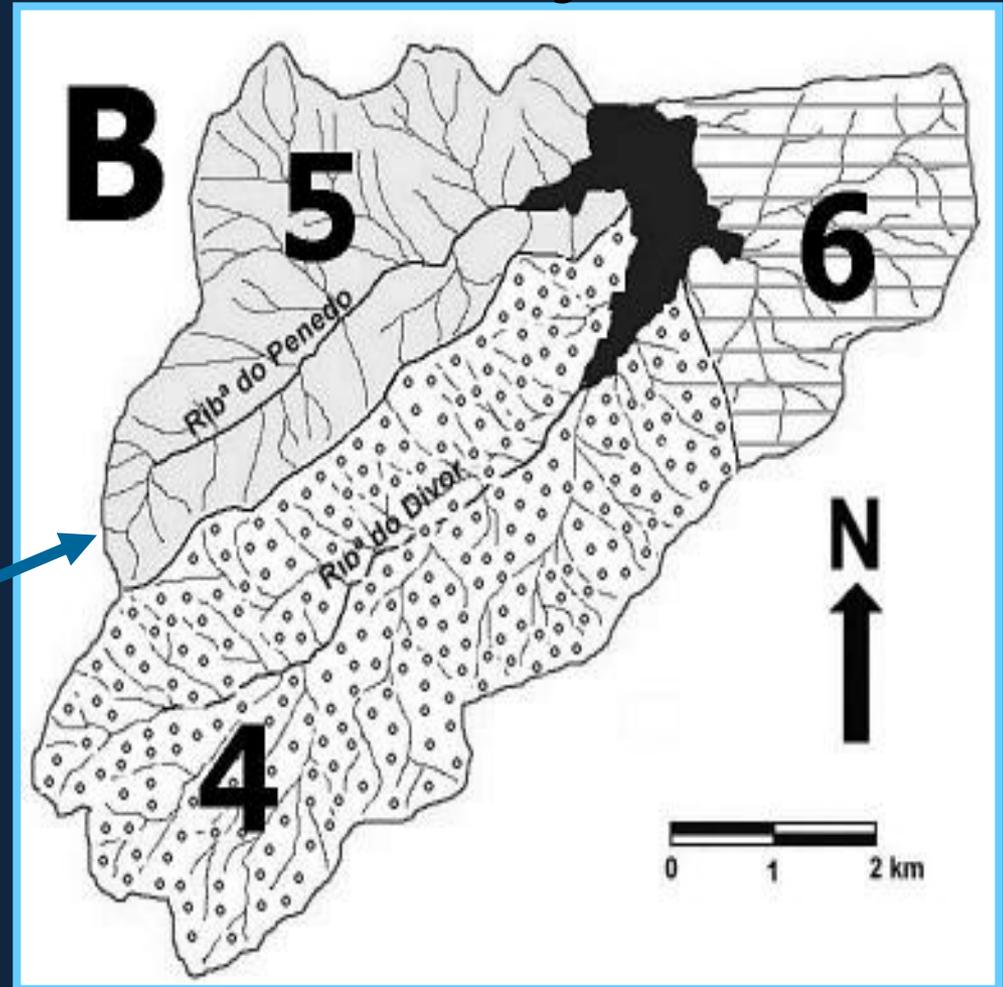


## 2 . Área da Bacia de Drenagem

A carga dos materiais transportados pelos cursos de água para o interior das albufeiras é proporcional ao aumento da área da bacia de drenagem, no caso dos sistemas se situarem em regiões de idêntica topografia e litologia enquadrante.

Em bacias de muito pequena dimensão, as linhas de água têm dificuldade em depositar os materiais durante o percurso até às albufeiras → ausência de zonas aplanadas de inundação.

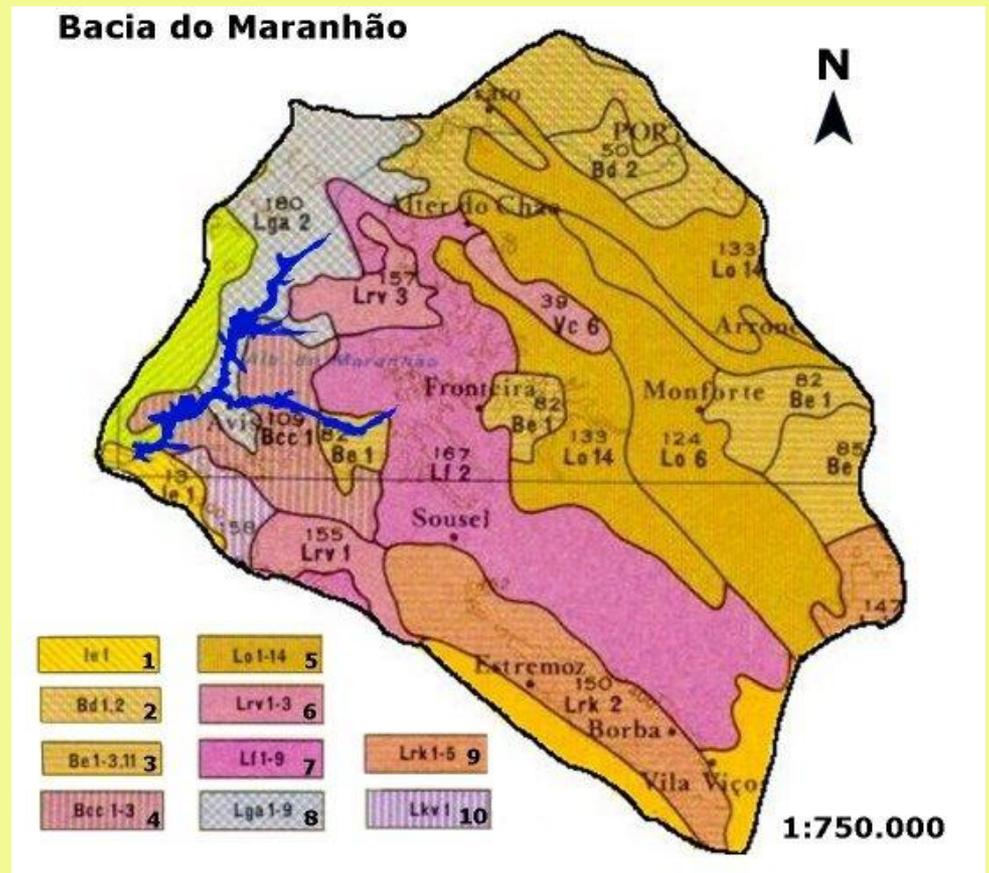
Bacia de drenagem da alb. Divor

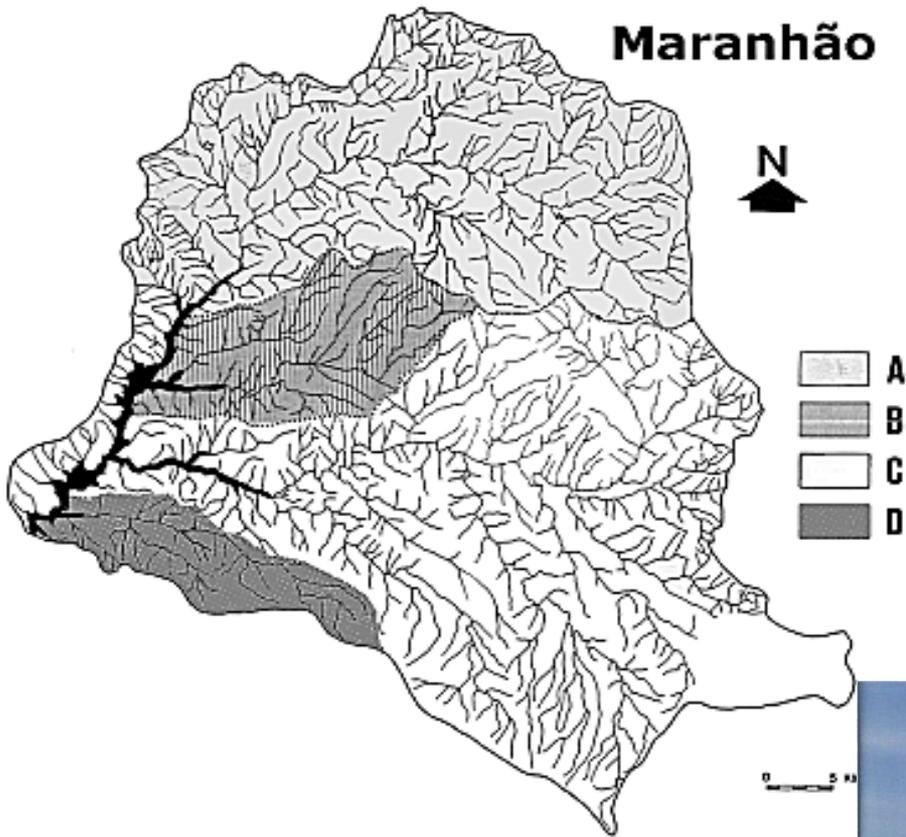


Elevada razão carga transportada/área de drenagem, grande parte do material apenas se deposita nas albufeiras → elevadas taxas de sedimentação

Dimensão da bacia de drenagem → influência na entrada de materiais sedimentares no lago, no seu transporte e deposição.

Quando nos sistemas a razão entre a área das bacias de drenagem e a área das albufeiras é alta → a carga de sedimentos transportados e acumulados deverá ser muito elevada.





Na albufeira do Maranhão (Portugal) – razão área da bacia de drenagem/área da albufeira → valor muito elevado (116,4)

A acumulação de sedimento nas zonas mais profundas é muito elevada, chegando a atingir 13 cm/ano em anos de condições hidrológicas excepcionais relativamente à quantidade de precipitação





Lago

≠

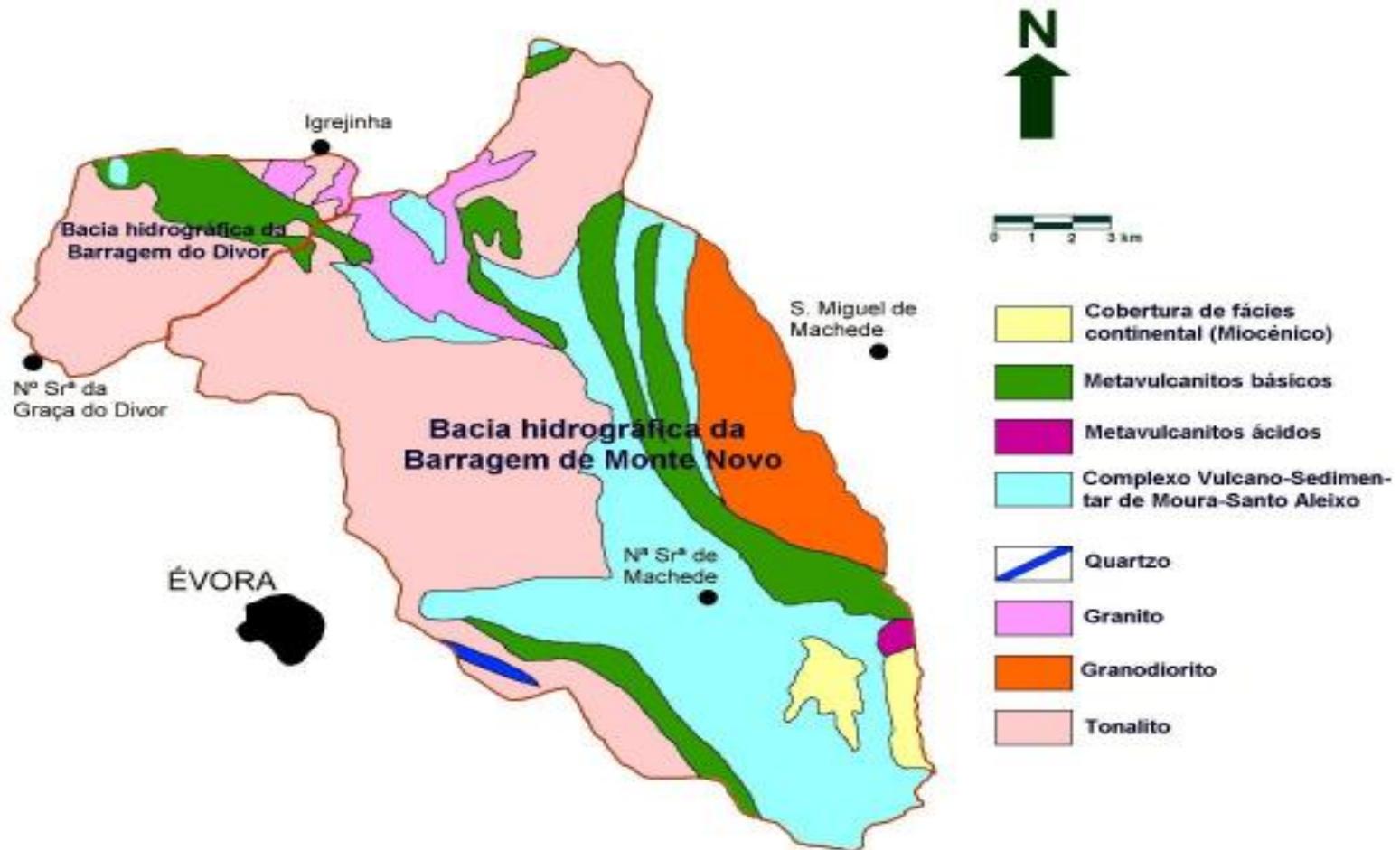


Oceano

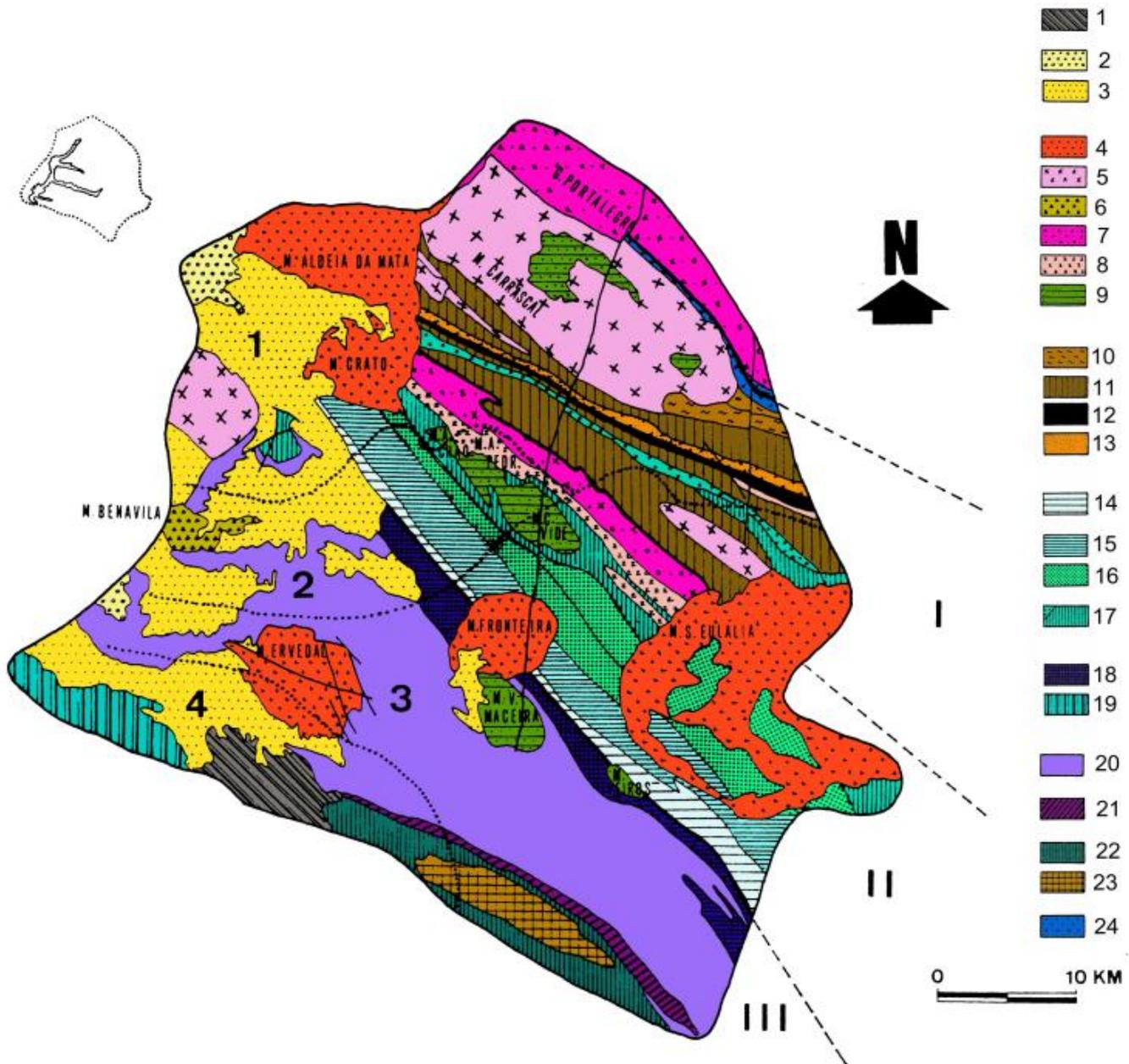
Lagos → sistemas fechados com elevada razão área da bacia de drenagem / área do lago → transporte de sedimentos e taxa de sedimentação muito mais elevadas que nos sistemas marinhos (cerca de 10 vezes superior)

### 3. Litologia

A natureza litológica das formações enquadrantes condiciona a maior ou menor desagregação e dissolução dos materiais constituintes, face à actuação dos agentes erosivos. O grau de erodibilidade dos materiais é directamente proporcional à carga dos sedimentos em suspensão nas linhas de água



# Enquadramento Geológico da alb. Maranhão



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24

A grande variedade geológica de algumas bacias de drenagem de albufeiras, com litologias entre a baixa e elevada vulnerabilidade à erosão, faz com que dentro do mesmo sistema a taxa de sedimentação varie espacialmente

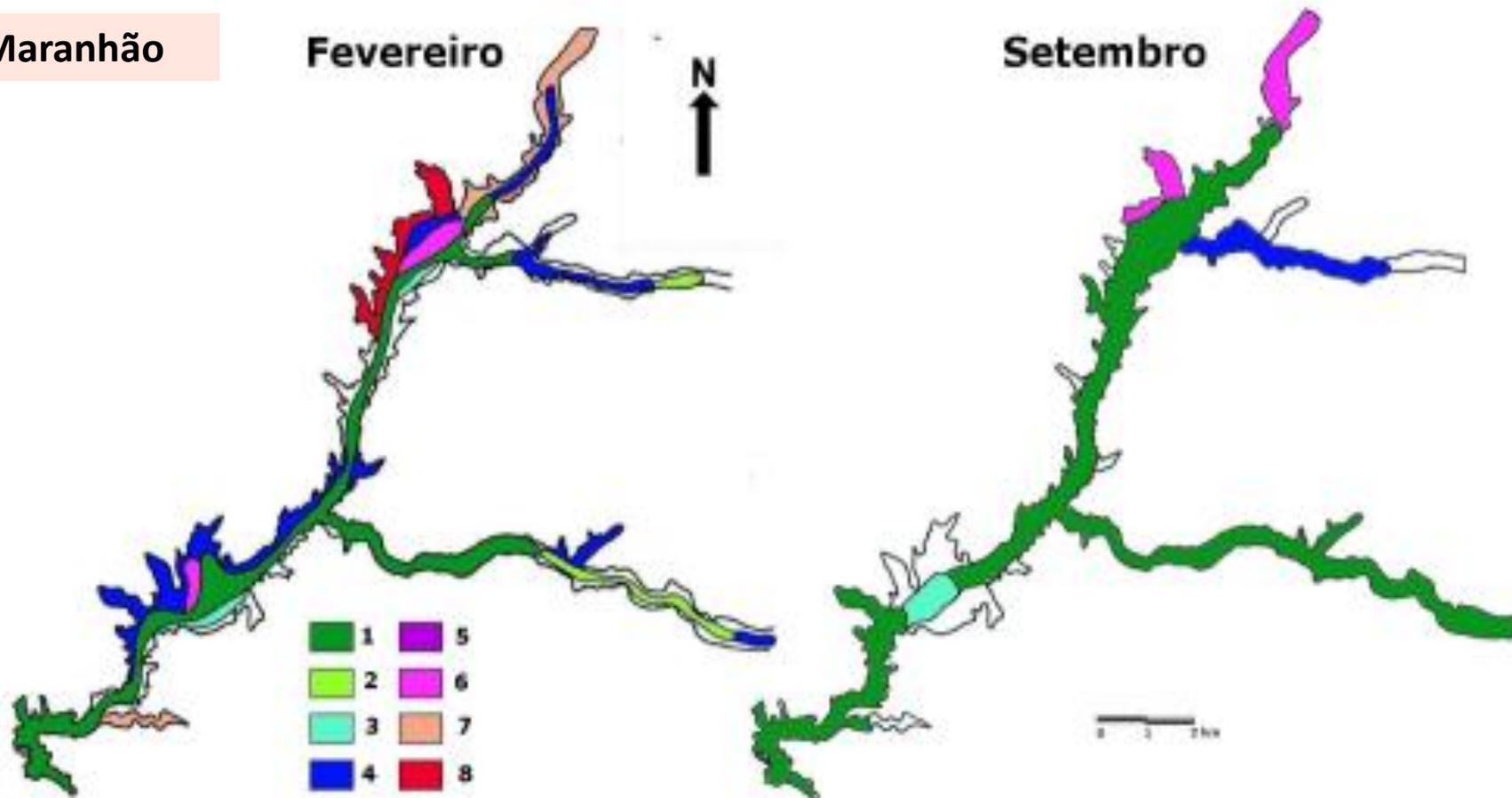
A natureza do material originário é o factor preponderante na distribuição granulométrica dos materiais. Durante um ciclo anual, as variações dos regimes hidráulicos do meio favorecem a remoção, mistura e/ou remeximento das populações granulométricas.

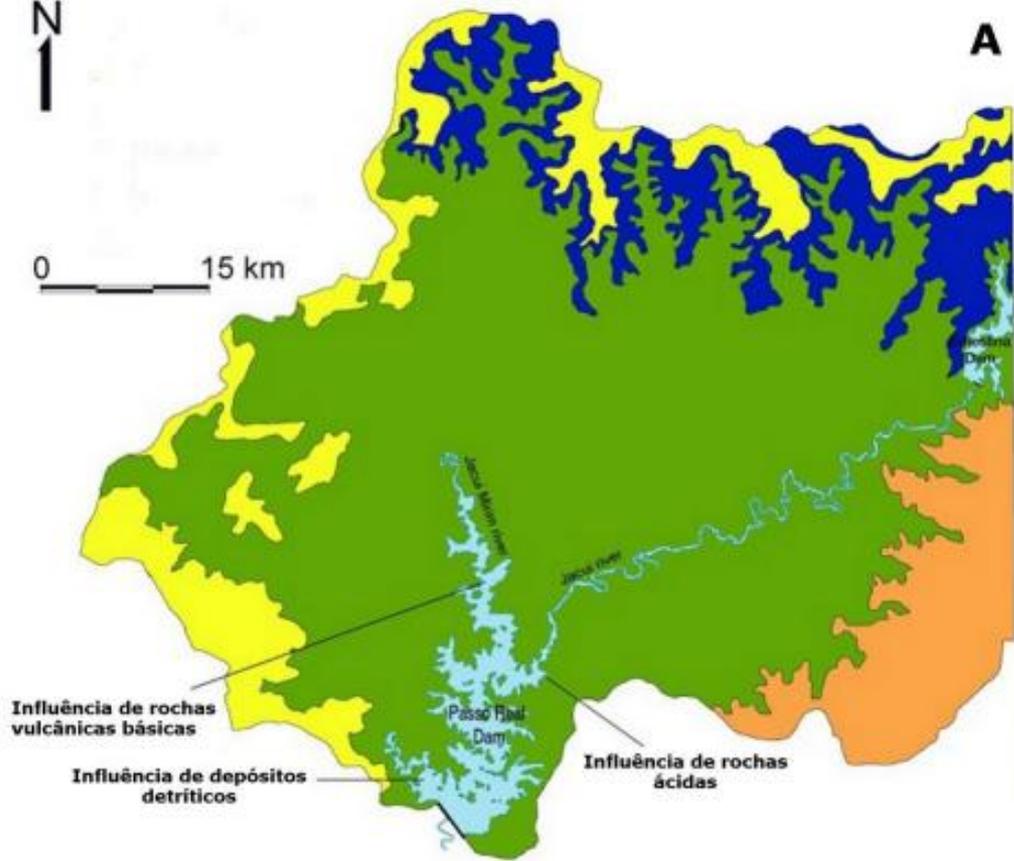
## Maranhão

Fevereiro

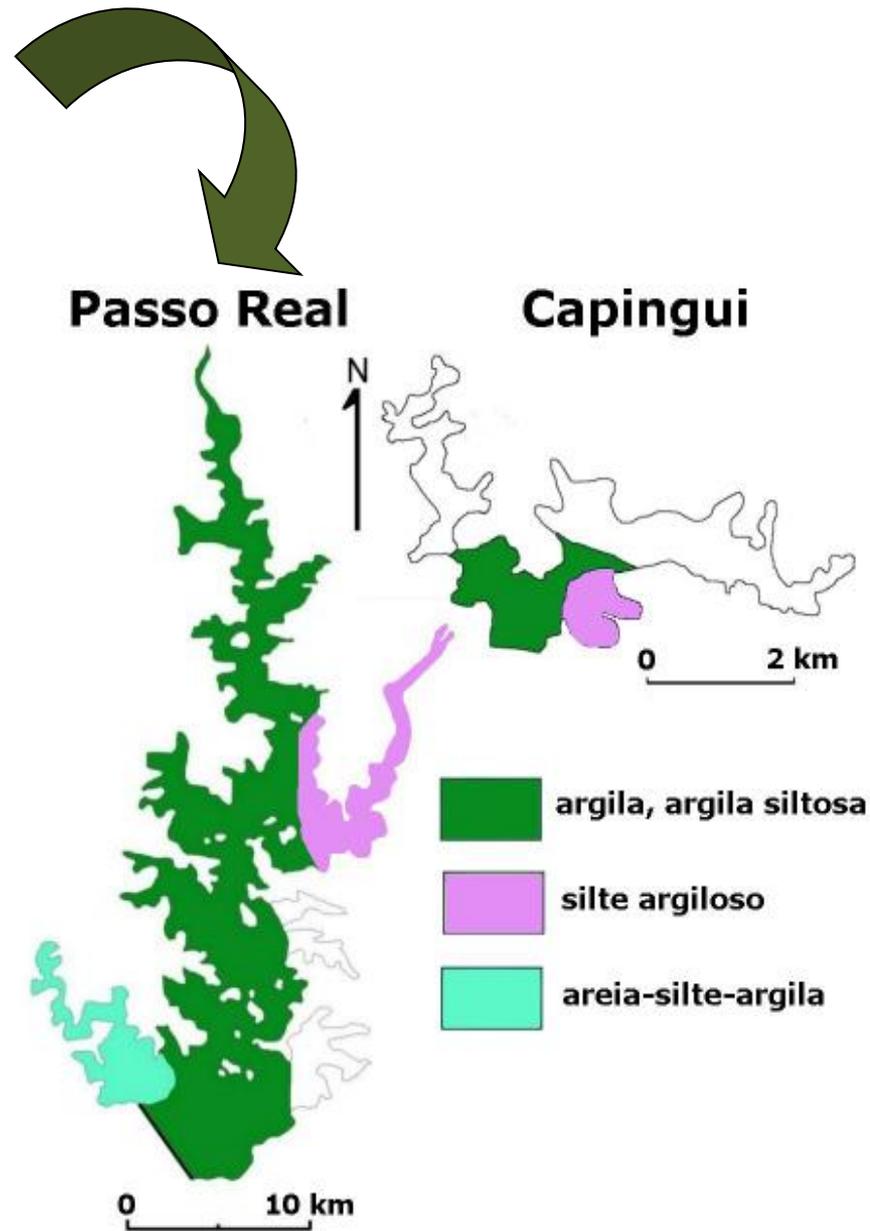
N  
↑

Setembro





Em alguns sistemas, a existência de poucas classes texturais, reflecte a grande homogeneidade litológica das formações encaixantes.



#### 4. *Clima*

Os materiais que entram num sistema como o das albufeiras, podem ser transportados sob forma particulada pelos ventos e pelos cursos de água, dissolvida na água de entrada e na água da chuva ou sob a forma gasosa.



Campos de Jordão, SP, Brasil 2000



Campagnoli, 2004

A influência do clima no tipo e distribuição dos sedimentos pode ser expressa por variados parâmetros: energia de precipitação, precipitação efectiva, descarga média anual e tipos de massa de ar.

De entre estes factores, há ainda a considerar as entradas de energia através da radiação solar



Bauru, SP, Brasil

Campagnoli, 2004

**Precipitação** → fonte directa de nutrientes para os sistemas aquáticos e condiciona a erosão hídrica nos solos, ao provocar a desagregação das partículas superficiais pelo impacto das gotas de água.

A eficácia dos processos erosivos provocados pela precipitação depende:

- Intensidade

- Resistência do solo à desagregação. Este último factor é função da composição litológica do solo, do coberto vegetal e do relevo.

O balanço entre a precipitação e a evaporação mantém o nível da água e as flutuações nas bacias dos lagos é maior quando a razão área da zona emersa versus área do lago é maior



*Represa do Poilão (ilha de Santiago, Cabo Verde) em período de seca e período de chuva*

## Alterações sazonais

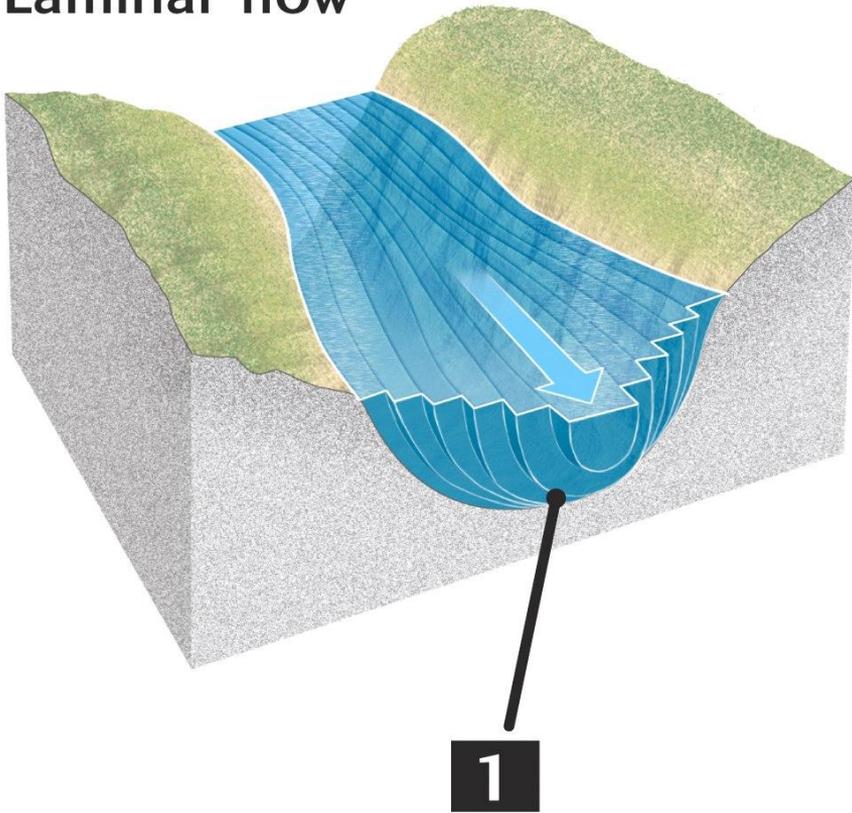


As alterações sazonais que geralmente se observam em todos os sistemas não são apenas consequência da entrada e deposição de material detrítico ocorridos durante esse período

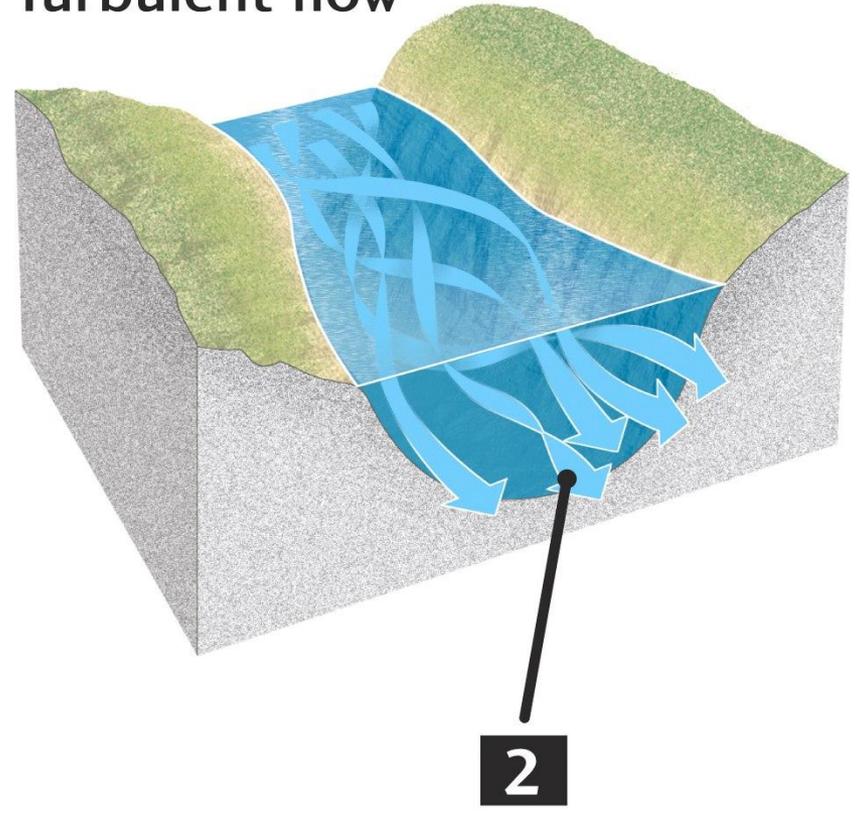


Fortemente relacionadas com modificações de energia das correntes internas que promovem o arrastamento de fracções mais grosseiras ou mais finas previamente depositadas em outros sectores das albufeiras

## Laminar flow



## Turbulent flow

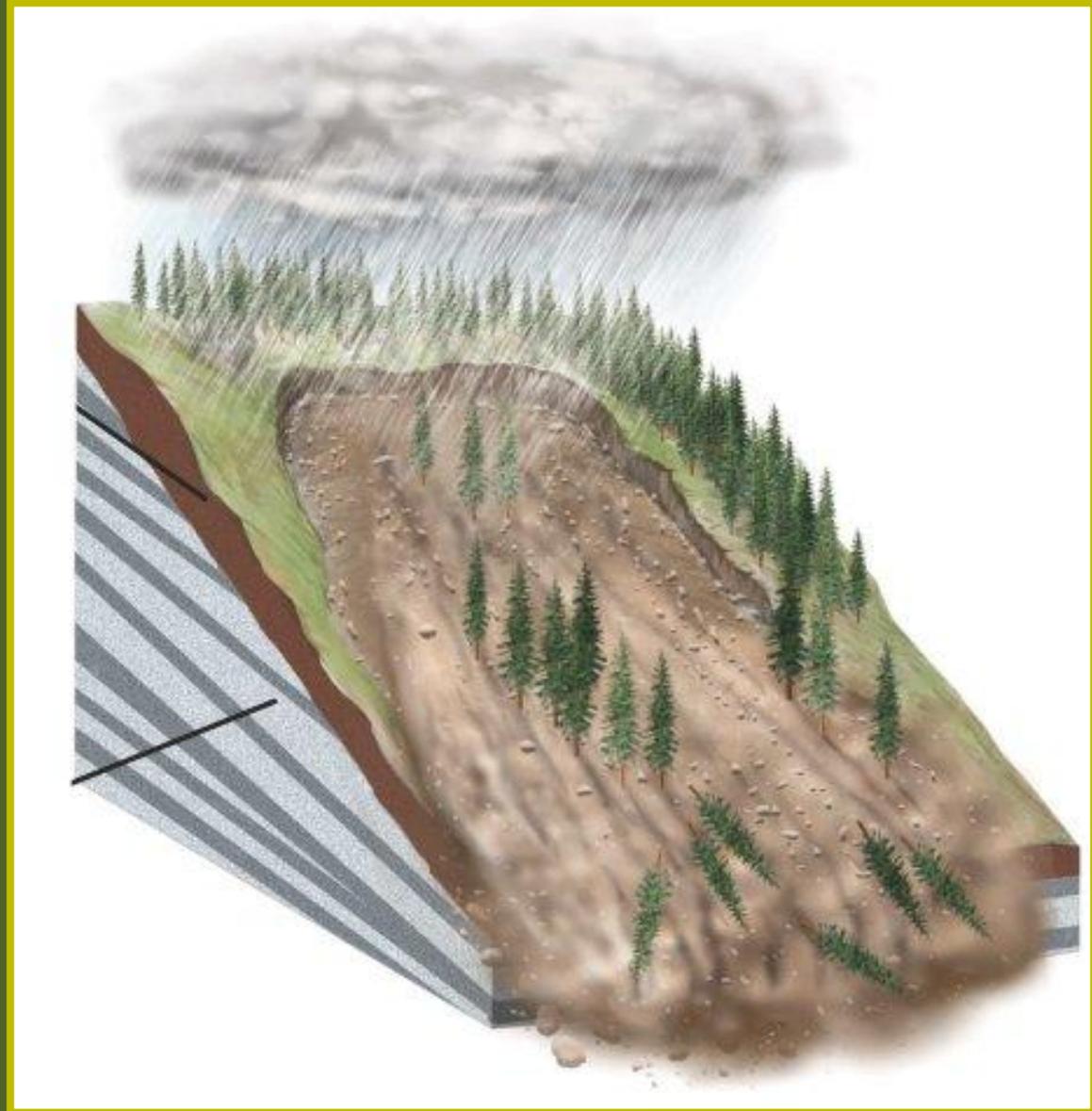


**Nas épocas de estio**, para além de se verificar uma baixa actuação das correntes internas na remoção, mistura e/ou calibração das populações granulométricas, poder-se-à considerar:

1. A ausência de acarreo de material detrítico de maiores dimensões;
2. Precipitação de material argiloso existente em suspensão ← diminuição do hidrodinamismo do meio e por modificações na composição química da coluna de água.

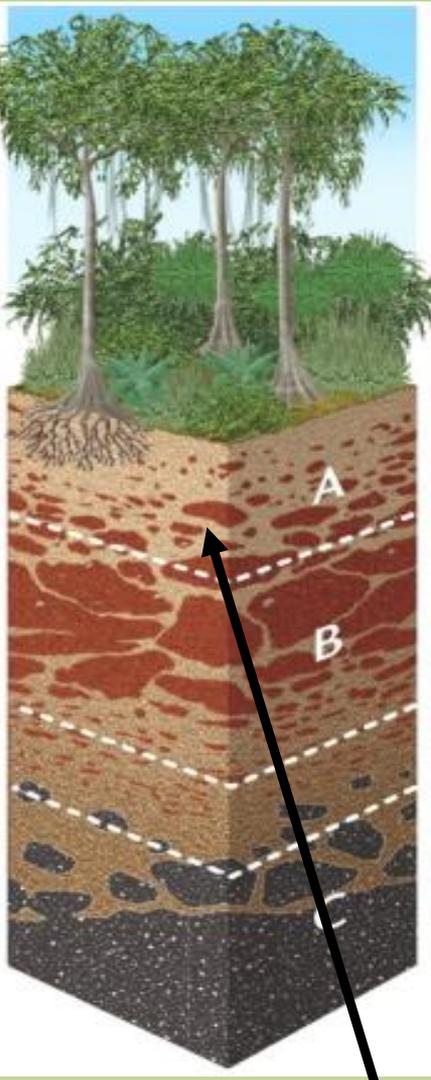
## 5. Relevo

A topografia das bacias hidrográficas condiciona a actuação dos agentes erosivos, o grau de intemperismo dos materiais e o seu transporte até às bacias de deposição. Quanto maior o relevo, maior é a velocidade dos cursos de água e maior a sua competência para o transporte de materiais mais grosseiros



- Regiões com elevado relevo → fluxo dos rios muito variáveis → variáveis cargas de sedimentos (compostos maioritariamente por partículas grosseiras)
- Bacias de drenagem mais planas → menores flutuações no fluxo dos rios → ausência de partículas grosseiras





## 6. Vegetação

A vegetação das bacias de drenagem → quantidade de sedimentos produzidos e natureza química dos mesmos, uma vez que controla a actuação dos agentes erosivos e, conseqüentemente, as perdas de solo. Para além disso, a partir da sua decomposição, fornece maior ou menor quantidade de nutrientes sob forma orgânica. Estes poderão ser transportados para o interior das albufeiras, como partículas orgânicas ou sob a forma iónica, retidos em partículas minerais.

Em áreas florestadas, a química da água que transporta os materiais em suspensão é influenciada pela recolha, armazenamento e libertação de nutrientes pela vegetação

## 7. Influência das Actividades Humanas

As actividades do Homem podem contribuir para o aumento da carga do material transportado em suspensão pelas linhas de água. A quantidade de partículas em suspensão de todos os rios do mundo, com excepção dos do Ártico, tem sofrido influências antrópicas progressivamente mais acentuadas.



De entre as actividades que mais têm contribuído para o aumento da carga suspensa, destacam-se a desflorestação, as práticas agrícolas, o pastoreio e a construção



## 3.6 – Transporte e sedimentação dos materiais

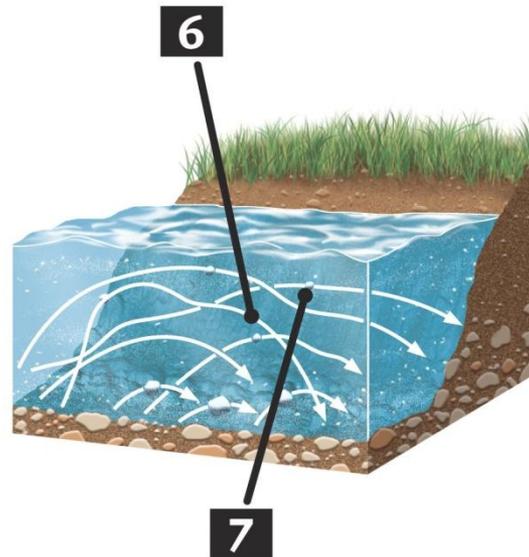
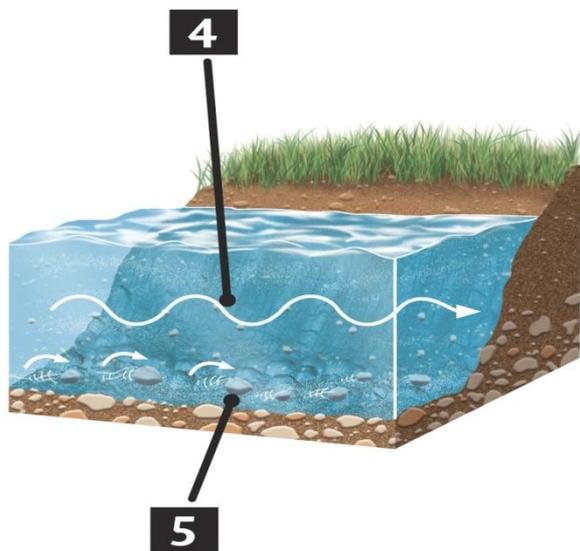
### A. Transporte



As linhas de drenagem natural e águas de escoamento superficial → principais agentes de transporte dos materiais erodidos e provenientes das rochas ou dos solos enquadrantes. O transporte em suspensão é particularmente notório nos sistemas com clima caracterizado por intensa precipitação durante todo o ciclo anual, consequência de um maior fluxo de entrada de água e de uma mais intensa lixiviação do material aflorante nas bacias de drenagem



Em qualquer sistema hídrico as partículas iniciam o seu transporte como grãos minerais individuais, com predomínio de minerais argilosos no material transportado em suspensão. Apenas em águas poluídas formam-se agregados, como resultado da presença de sais antropogénicos e de poluentes orgânicos



Nas albufeiras, o transporte dos materiais sob forma particulada é o mecanismo de transporte mais importante de elementos químicos para o seu interior

## ***B. Deposição***

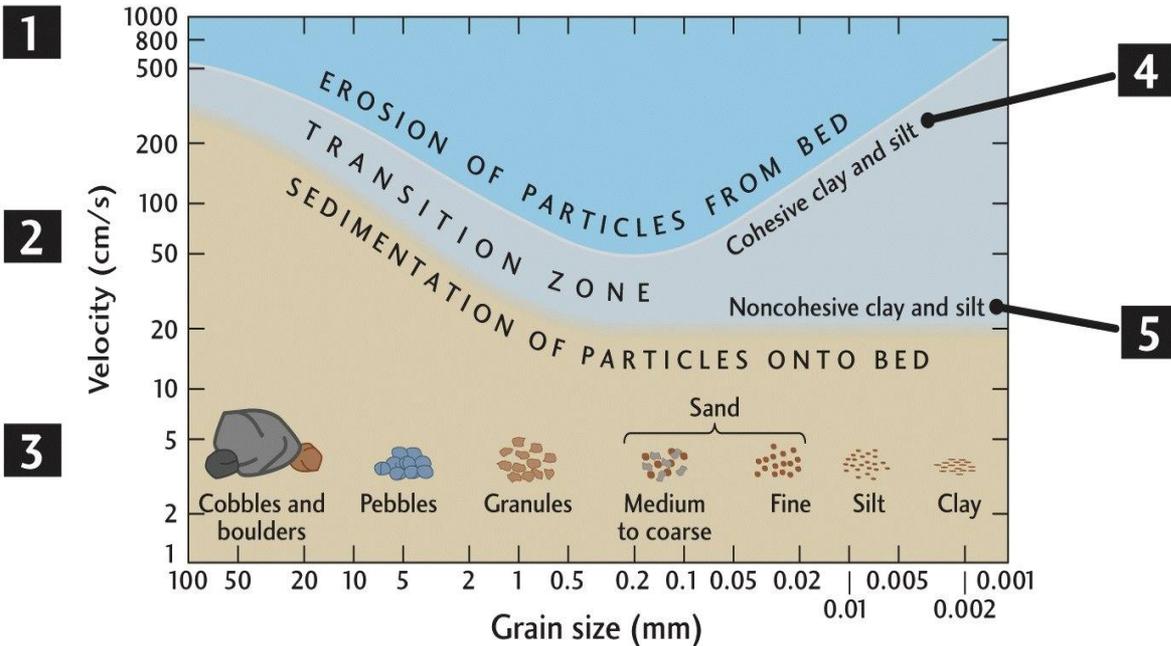
Os sedimentos transportados pelos cursos de água, quando atingem o baixo hidrodinamismo característico das albufeiras, depositam-se. Considerando que a taxa do material transportado numa bacia de drenagem é distinta da taxa de erosão existente no seu interior, os sedimentos depositados numa albufeira apenas representam uma pequena fracção de todo o material mobilizado.



A deposição das partículas (preponderantemente argilosas) transportadas pelos diversos meios hídricos, ocorre principalmente por precipitação a partir das suspensões

Em água estática – albufeiras - a taxa de precipitação é controlada principalmente pela dimensão das partículas e assumindo que estas têm forma esférica, esta precipitação faz-se de acordo com a lei de Stokes.

Ao longo das linhas de água, a água onde as partículas estão suspensas não está estática mas fluindo, o que determina que as partículas se mantenham em suspensão e que não se depositem



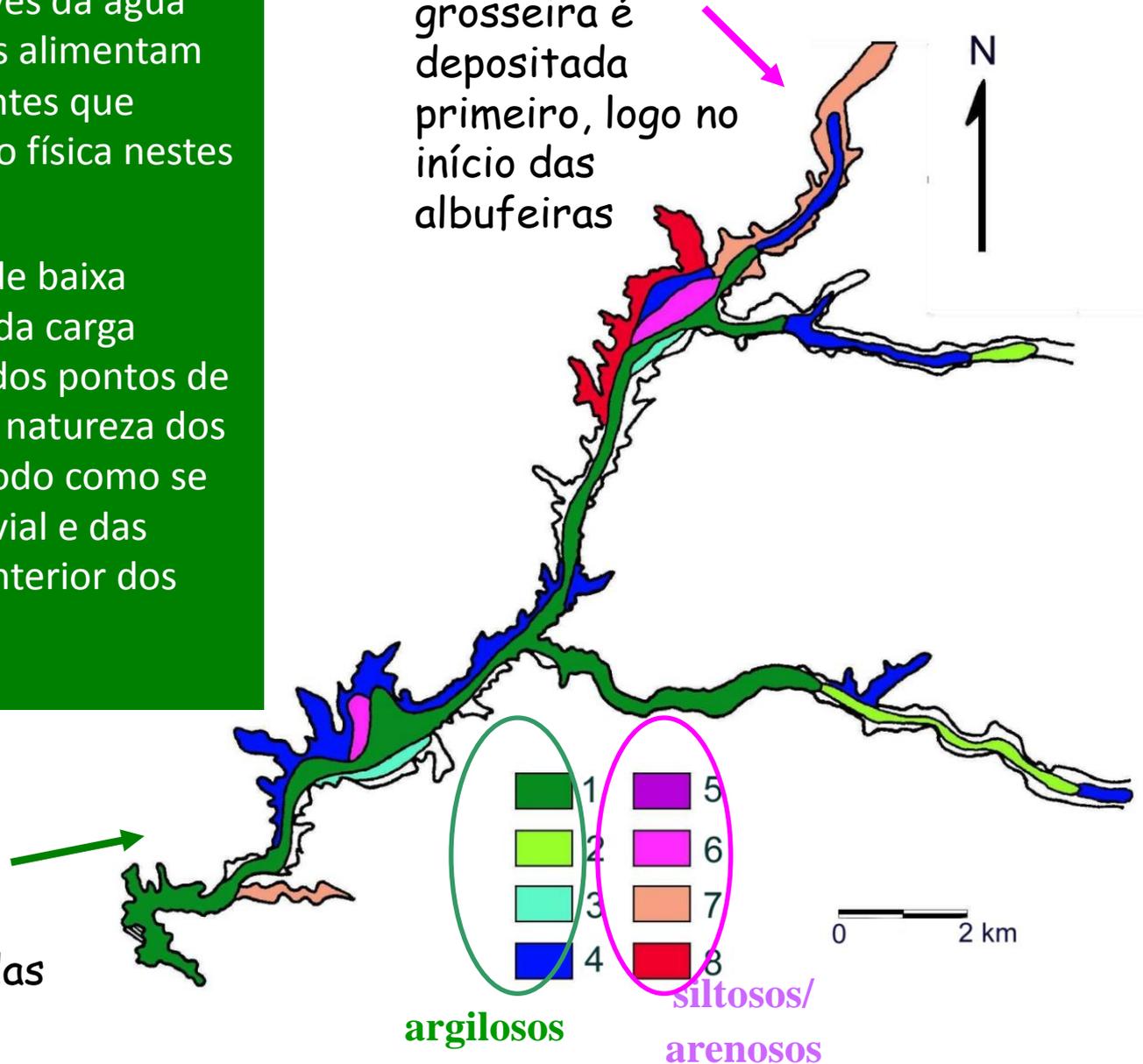
A deposição ocorre principalmente nas zonas mais alargadas das albufeiras, onde a coluna de água é mais estática, em particular ao longo dos antigos cursos de água que correspondem às maiores profundidades.

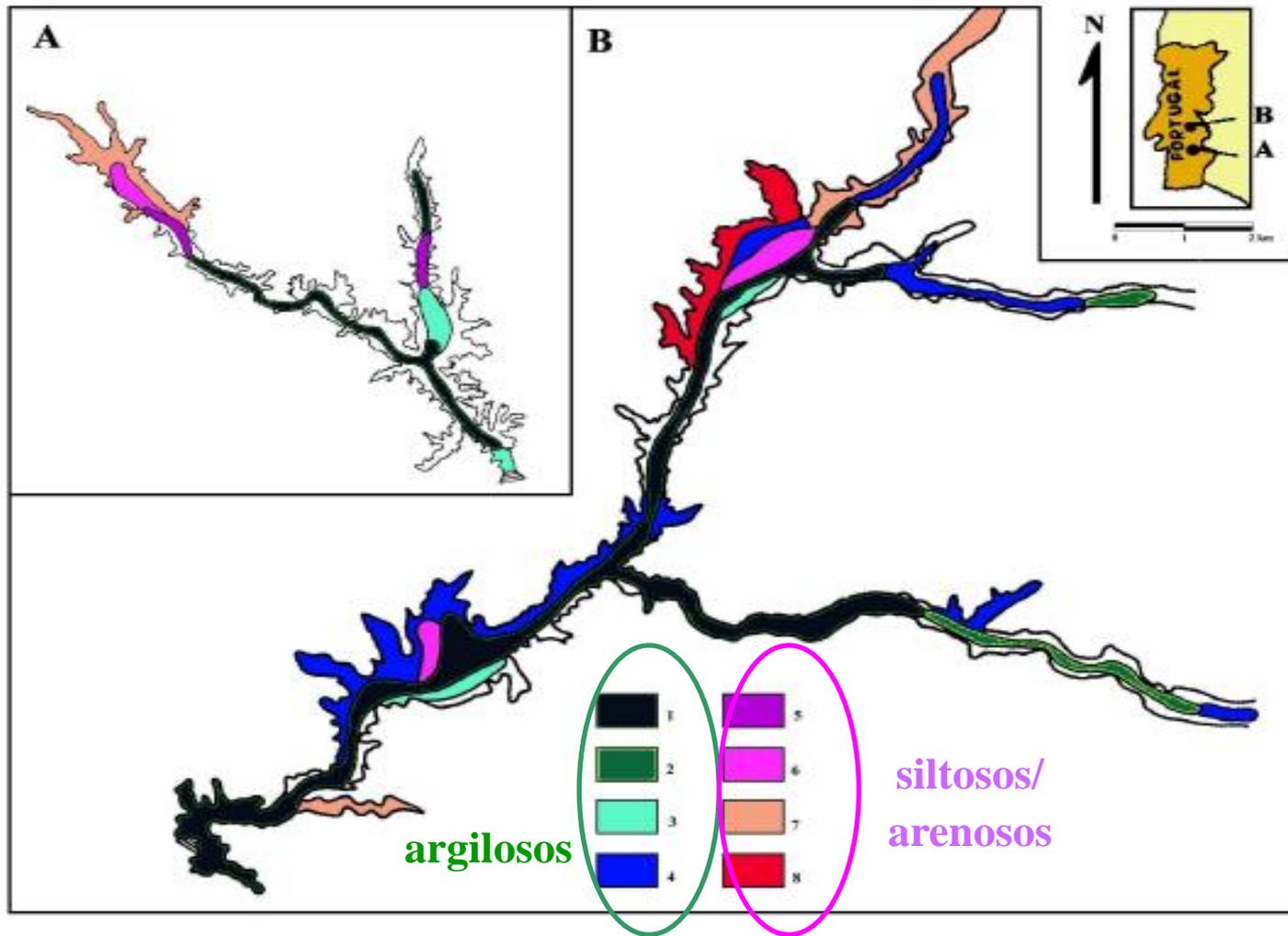
A entrada de materiais nas albufeiras é principalmente feita através da água dos rios ou ribeiras que as alimentam → factores mais importantes que controlam a sedimentação física nestes sistemas.

Albufeiras → ambientes de baixa energia → a maior parte da carga fluvial deposita-se perto dos pontos de entrada. A localização e a natureza dos depósitos depende do modo como se processa o transporte fluvial e das condições existentes no interior dos sistemas.

A carga mais grosseira é depositada primeiro, logo no início das albufeiras

A carga mais fina é transportada em suspensão para variadas distâncias no interior

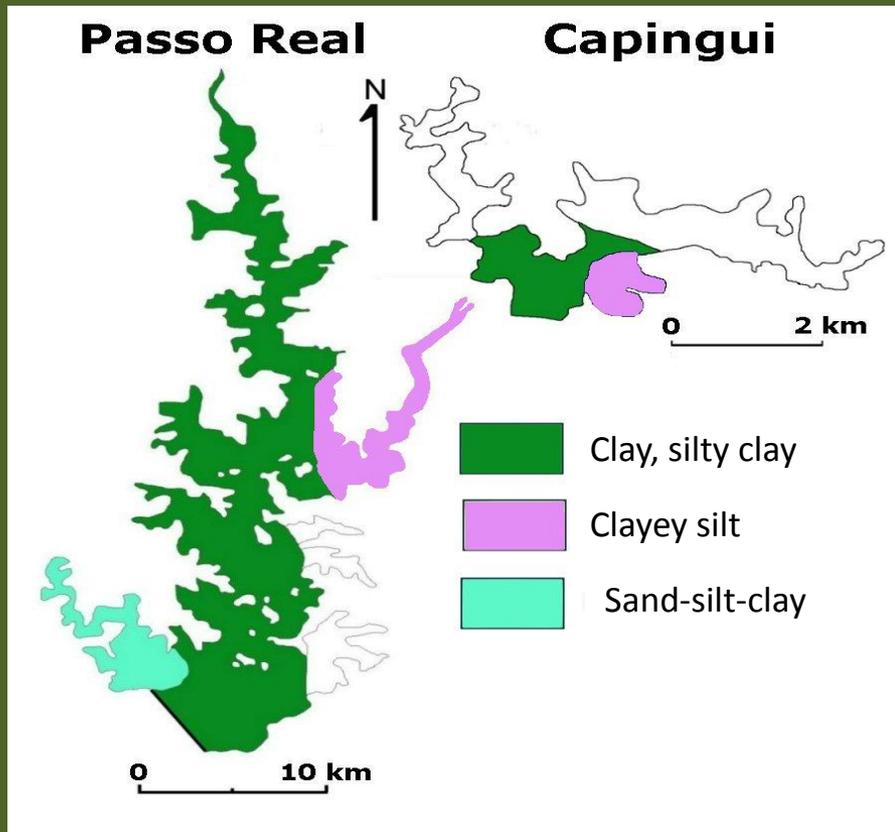




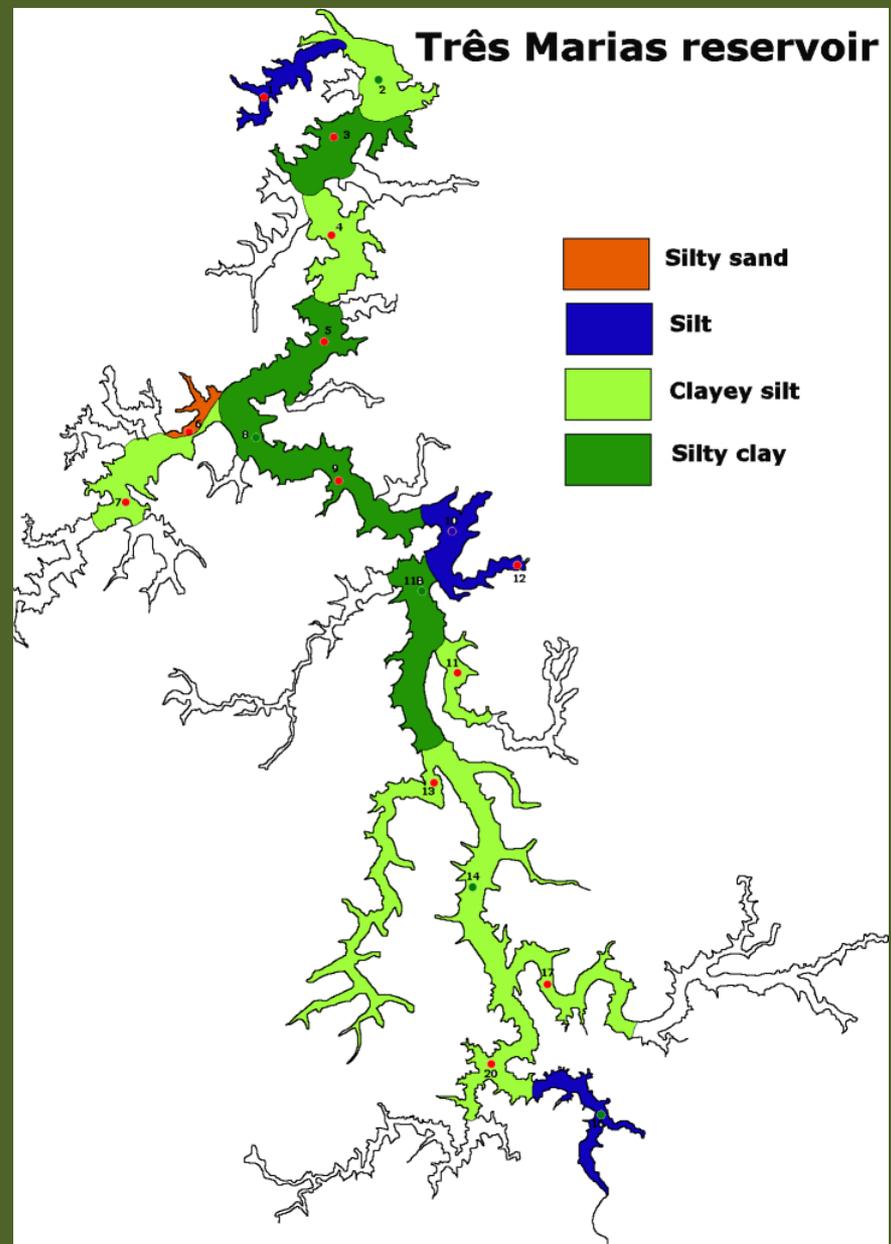
## Distribuição sedimentar nas albufeiras do Maranhão e Monte Novo

Importante contribuição de elementos finos no fundo das albufeiras. As classes granulométricas preponderantes são argila siltosa e silte argiloso que se depositam preferencialmente nos antigos leitos dos cursos de água principais ao longo das albufeiras, onde se registam as maiores profundidades. Em contraste, as zonas menos profundas, correspondentes aos sectores a montante das principais ribeiras de alimentação e às zonas marginais, têm componente arenosa importante.

## Reservatórios Brasileiros



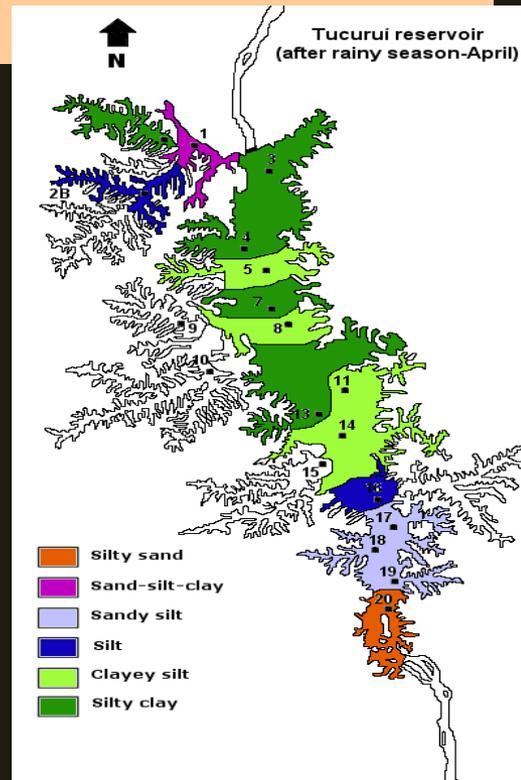
Em todos os sistemas a distribuição granulométrica evidencia a importante influência da litologia da bacia de drenagem



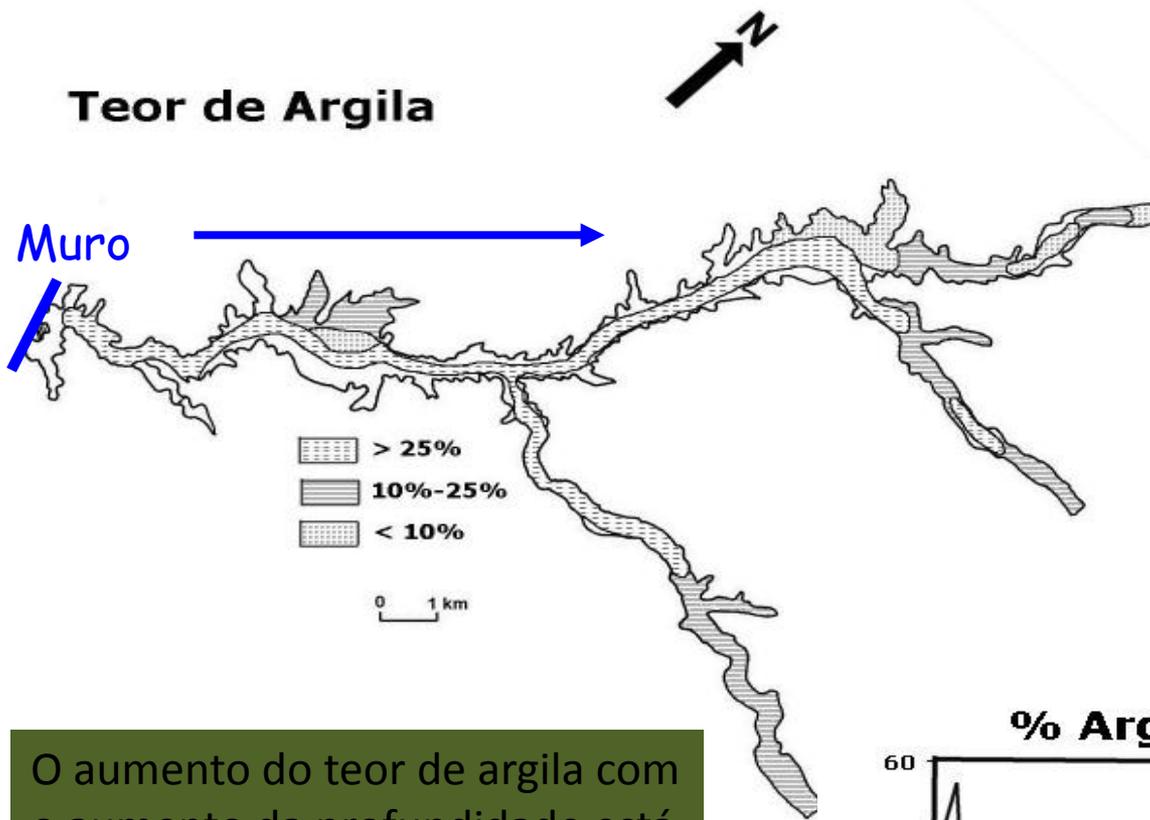


Verifica-se um aumento da granulometria média em direcção às margens, onde tem lugar preponderante a deposição das fracções mais grosseiras, por processos de erosão local.

Verifica-se igualmente a tendência generalizada para a diminuição da fracção argilosa dos sedimentos com a distância ao muro da barragem, a qual coincide com uma diminuição da profundidade.



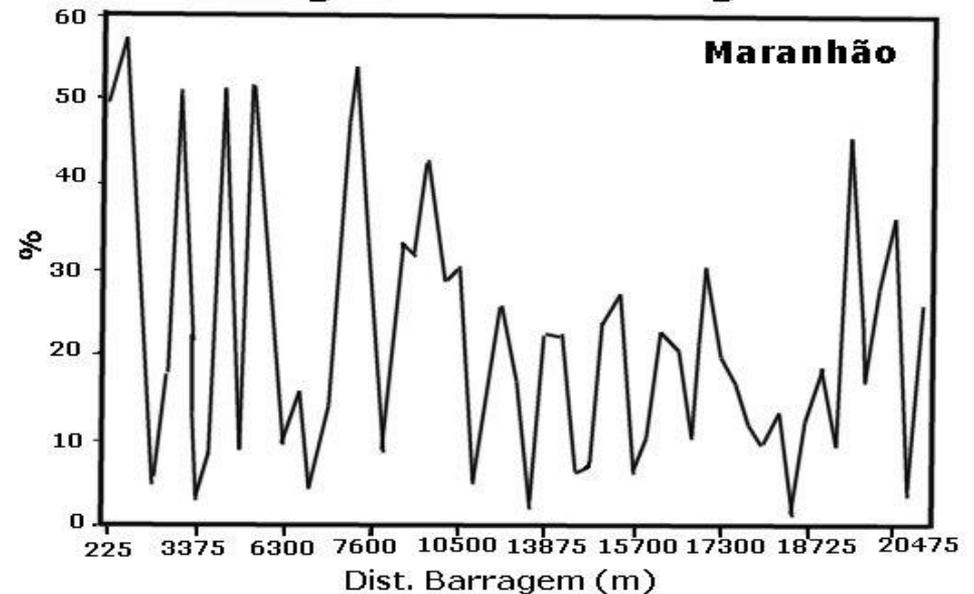
## Teor de Argila



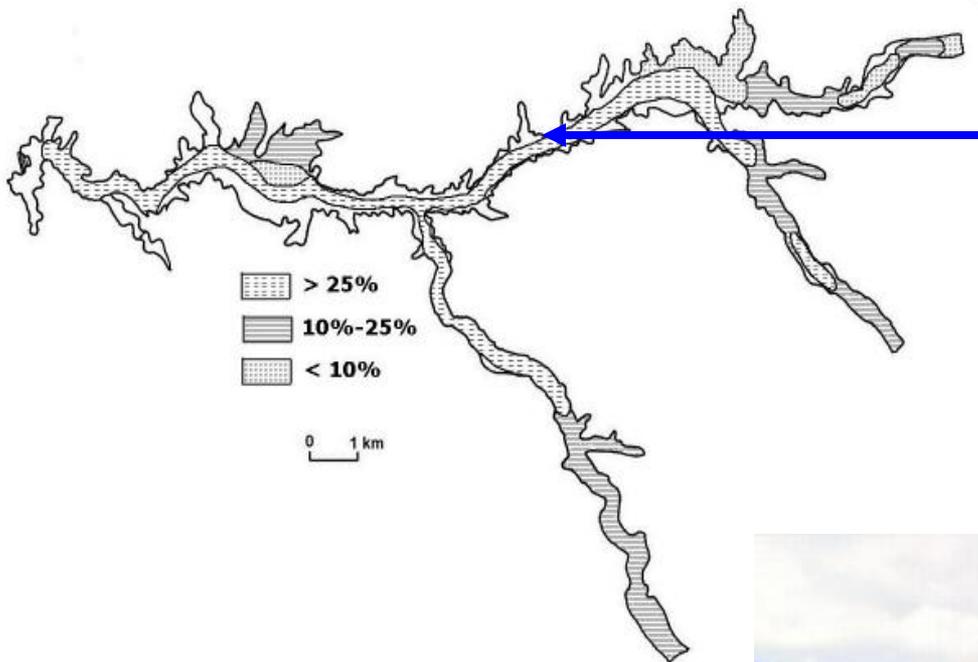
A percentagem de argila diminui com o aumento da distância ao muro da barragem

O aumento do teor de argila com o aumento da profundidade está relacionado com a diminuição da energia física no sistema. Nas áreas menos profundas dos lagos e albufeiras, os níveis de energia decrescem mais rapidamente com a profundidade

## % Argila - Dist. Barragem



## Teor de Argila

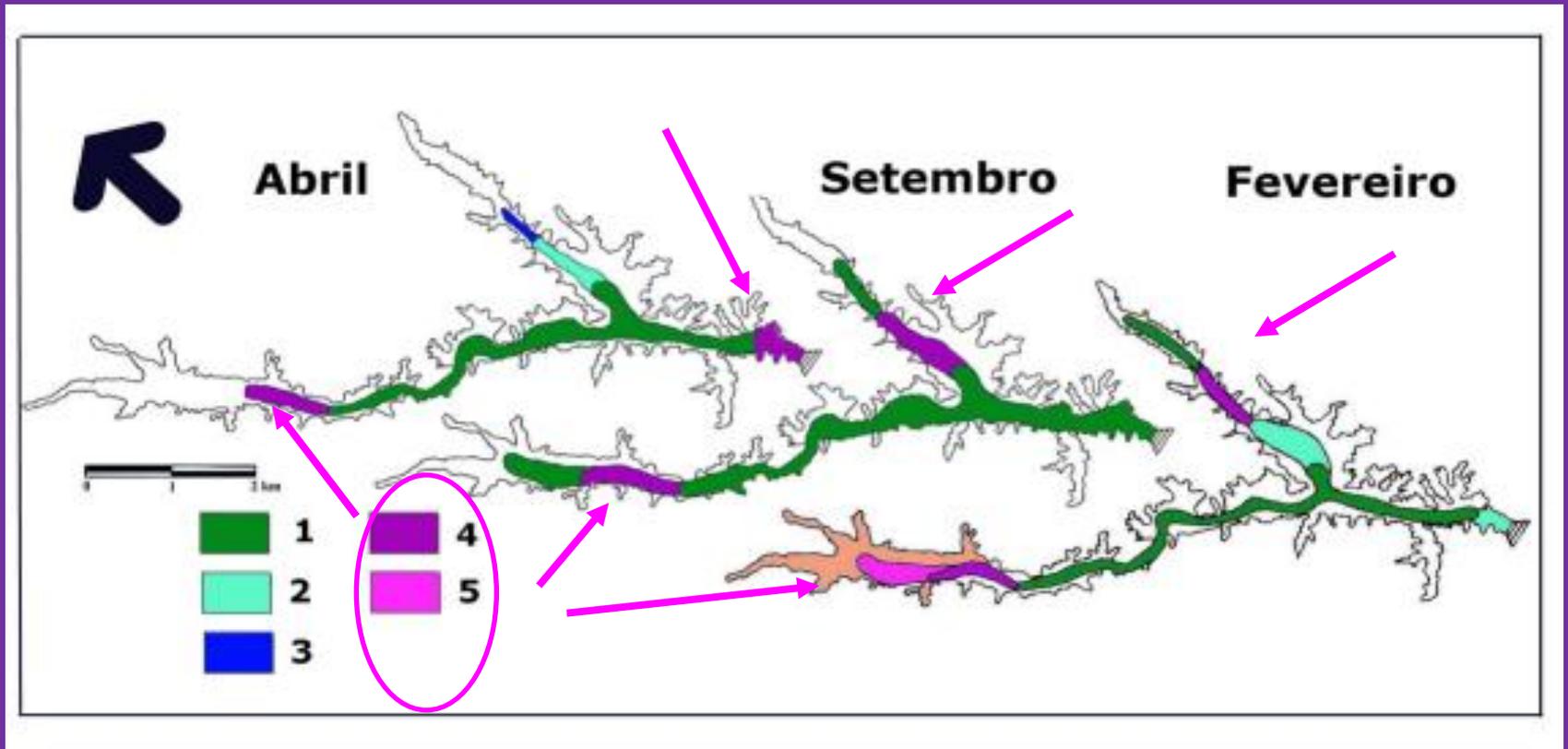


As fracções mais finas predominam nos sedimentos existentes nas zonas mais profundas das albufeiras → antigo leito do curso de água principal.

As partículas de menor dimensão deslocam-se em suspensão a grandes distâncias do material originário e são transportadas até à zona das "águas abertas" através de fluxos de turbulência e de correntes induzidas pelo vento.



## Variação espacial e sazonal da textura dos sedimentos



As partículas mais grosseiras estão preferencialmente associadas às áreas marginais dos sistemas onde, de forma relativamente descontínua, emerge alguma vegetação macrófita que restringe a turbulência da água, e às zonas de entrada das ribeiras, por perda de competência do agente de transporte.



**Os materiais de textura mais fina podem permanecer durante longos períodos em suspensão.**

**Parte dos elementos químicos retidos nos sedimentos de fundo, sob determinadas condições químicas do meio, circulam para o meio aquoso suprajacente, constituindo assim os próprios sedimentos, fontes internas dos nutrientes e metais existentes na coluna de água**

## Taxas de sedimentação em lagos



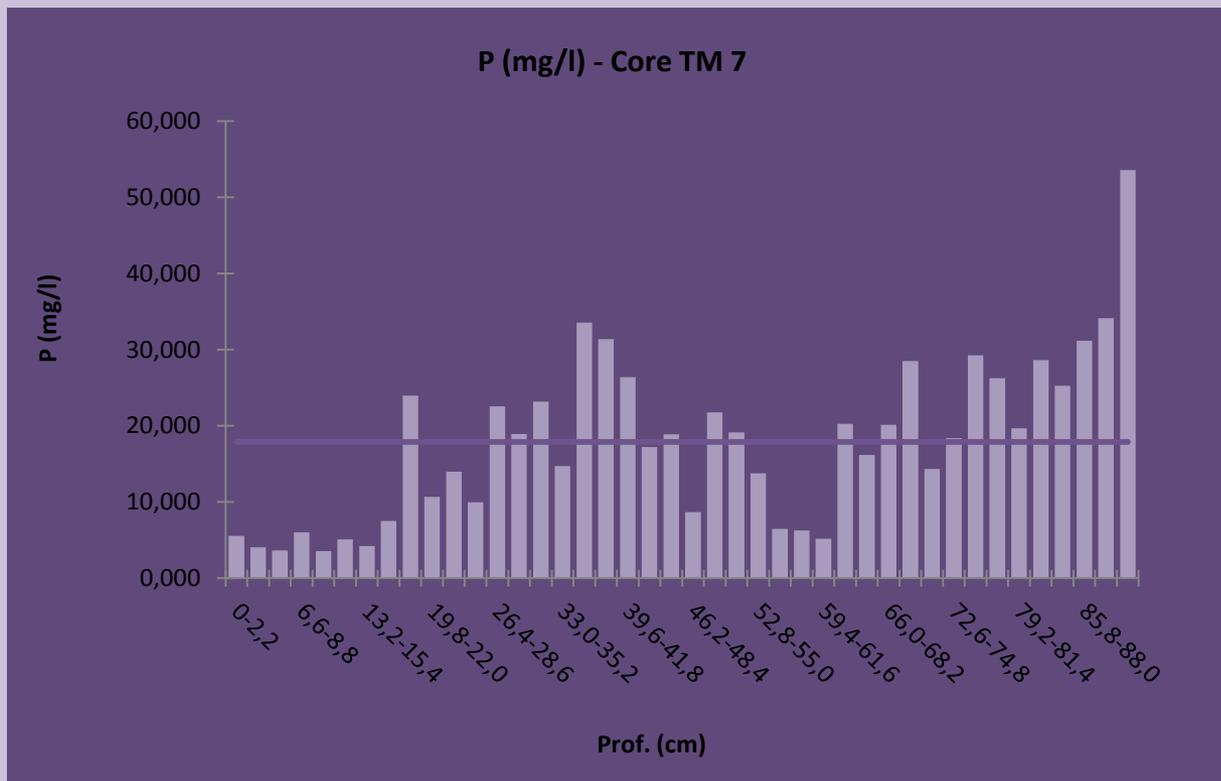
Estudos das variações das taxas de sedimentação em lagos → fundamentais para:

- ✓ Interpretar os variados processos de interacção lago-sedimentos
- ✓ Analisar a cinética de transferência sedimento-coluna de água

Determinação das taxas de sedimentação → informações sobre:

- ✓ Avaliação das taxas de acumulação de massa e variação temporal de minerais + resíduos orgânicos + nutrientes + metais traço

- ✓ Cálculo dos fluxos regenerativos e difusos de elementos através da interface dos sedimentos
- ✓ Estimar a importância relativa das diferentes fontes dos sedimentos (entrada pelos rios, erosão das margens, precipitação endogénica, influência antrópica)
- ✓ Estudos das variações temporais da sedimentação lacustre e relação dessas variações com modificações climáticas e antrópicas.



## Métodos de determinação das taxas de sedimentação

1. Determinação do crescimento de poléns (*Ambrosia*)
2. Determinação de radioisótopos naturais ( $^{210}\text{Pb}$ ) e relacionados com fallout de acidente de Chernobyl, Ucrânia ( $^{137}\text{Cs}$ )

→ Só no Hemisfério Norte

Isótopos de vida curta (22,3 anos para o  $^{210}\text{Pb}$  e 30 anos para o  $^{137}\text{Cs}$ ) → ideais para sistemas lacustres com taxa de sedimentação da ordem de poucos mm/ano

### Como se determina a taxa de sedimentação com $^{210}\text{Pb}$ ?

- A série de decaimento radioactivo do  $^{238}\text{U}$  inclui  $^{222}\text{Rn}$  que escapa para a atmosfera (taxa de 42 átomos/minuto/cm<sup>2</sup> de superfície de terreno)
- $^{222}\text{Rn}$  decai através de uma série de termos de curta vida até  $^{210}\text{Pb}$
- $^{210}\text{Pb}$  tem um tempo de residência de apenas 10 dias → é removido da atmosfera pela chuva → deposita-se nos lagos sendo incorporado nos sedimentos
- A actividade do “unsuported”  $^{210}\text{Pb}$  diminui em função do tempo a uma taxa controlada pelo seu período de semi-vida de 22,3 anos



Determinação da idade de materiais geológicos recentes (< 100 anos)

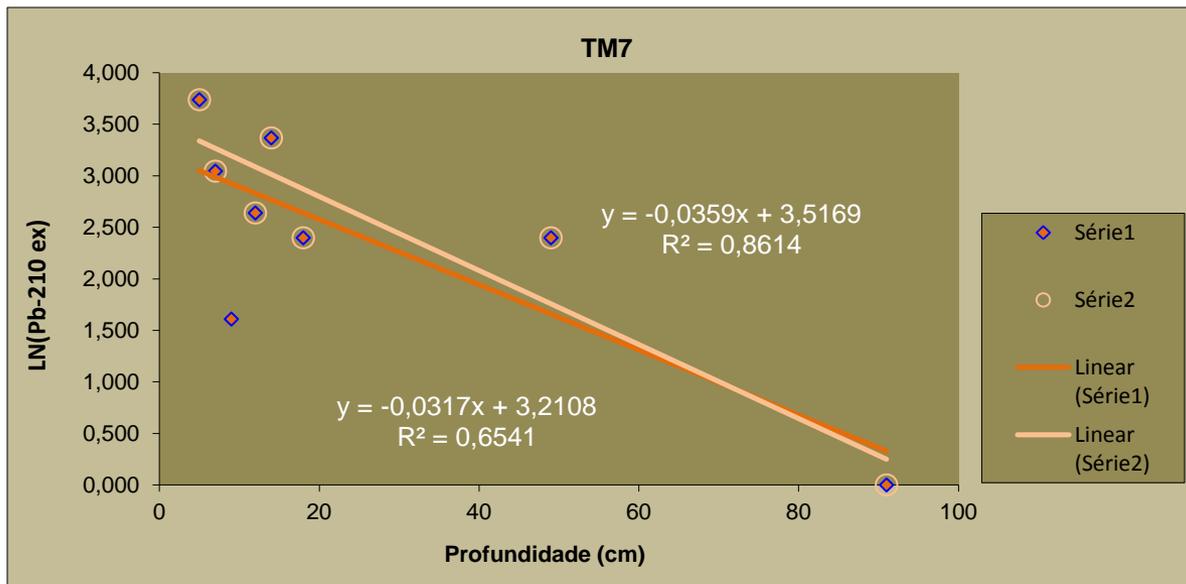
**Exemplo de medição da actividade de  $^{210}\text{Pb}$  de uma amostra de sedimento da represa de Três Marias (MG, Brasil) – TM 7**

Niveau en cm	$^{210}\text{Pb}$	incertitude	$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$	incertitude	$^{226}\text{Ra}$	incertitude
1	63	21	19	26	43	5
3	nd		nd		43	6
5	87	21	42	27	45	6
7	54	22	21	28	33	6
9	50	22	5	27	45	6
12	60	23	14	28	46	6
14	68	21	29	26	39	5
18	53	21	11	26	42	5
23	nd		nd		45	6
29	nd		nd		40	6
49	31	10	11	12	20	3
58	nd		nd		18	3
69	nd		nd		17	3
80	nd		nd		20	3
91	22	10	1	13	20	3

TM7		
Prof (cm)	$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$	Log $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$
1	19	2,944
3		
5	42	3,738
7	21	3,045
9	5	1,609
12	14	2,639
14	29	3,367
18	11	2,398
23		
29		
49	11	2,398
58		
69		
80		
91	1	0,000

Datação dos sedimentos → distribuição vertical do radioisótopo  $^{210}\text{Pb}$

Medição da actividade do  $^{210}\text{Pb}$  em excesso em cada profundidade, por comparação com a actividade medida na camada superficial da coluna sedimentar, assumindo que a fracção de  $^{210}\text{Pb}$  “supported” (resultante da transformação do  $^{226}\text{Ra}$  em  $^{210}\text{Pb}$ , *in situ*) é constante em profundidade.



$$TxSed \text{ (cm/ano)} = \lambda/m$$

$\lambda$  - decaimento de  $^{210}\text{Pb}$   
( $\lambda = 0,030108$ )

$m$  - declive da recta do excesso de  $^{210}\text{Pb}$  em função da profundidade



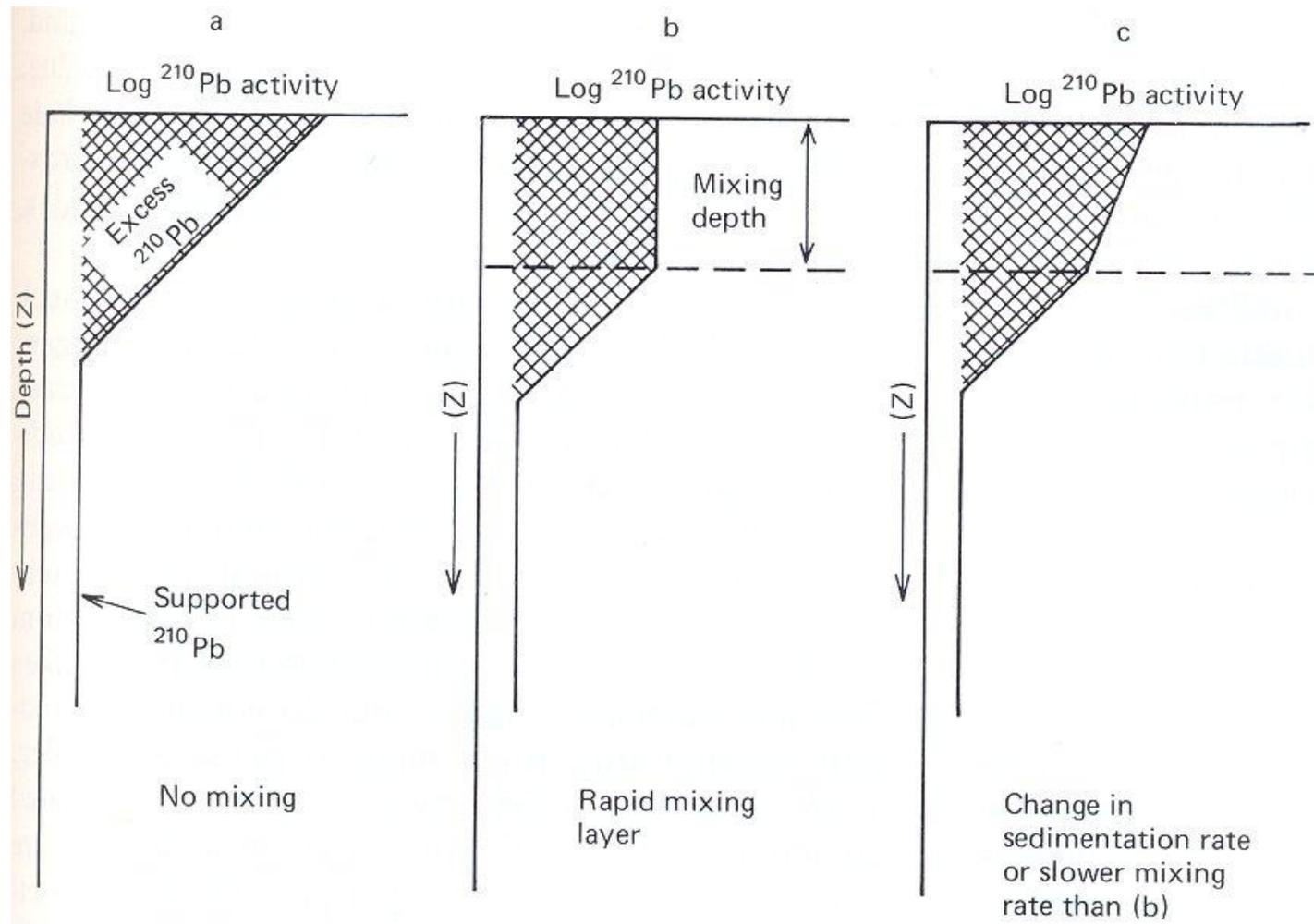
Core	$m$	Taxa de sedimentação (cm/ano)	Idade do material (anos)
TM4	0,0345	0,87	$\pm 102$
TM7	0,0359	0,84	$\pm 108$
TM10	0,0482	0,62	$\pm 52$

Taxas mais elevadas nas estações situadas mais a montante (antigo leito dos rios) onde se depositam preferencialmente as partículas de mais fina granulometria

1. Grande área do reservatório (1050 Km<sup>2</sup>)
2. Granularidade média a grosseira das litologias
3. Topografia pouco acidentada da bacia (que condiciona a deposição dos materiais mais grosseiros ao longo dos cursos de água de alimentação)

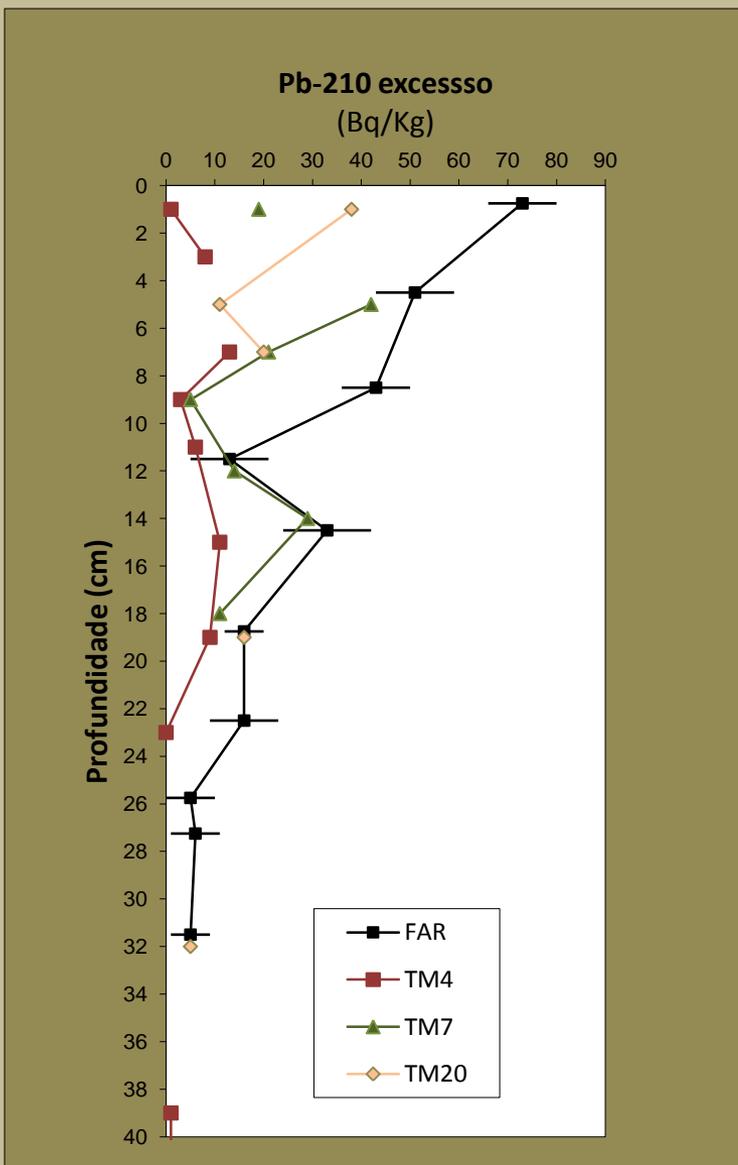
Baixas taxas de sedimentação, em geral, inferiores a 1 cm/ano

## Exemplos de projecções do Log $^{210}\text{Pb}$ versus profundidade da coluna sedimentar



Não linearidade da projecção Log  $^{210}\text{Pb}$  versus profundidade → efeitos de bioturbação afecta a mobilidade dos isótopos (alguns cm de espessura nas profundidades mais baixas) → ideia errónea de aumento da taxa de sedimentação nos 1<sup>os</sup> cm → requer estudo cuidadoso da composição mineralógica e química em função da profundidade

# Determinação das taxas de sedimentação (casos de estudo – Três Marias, MG)

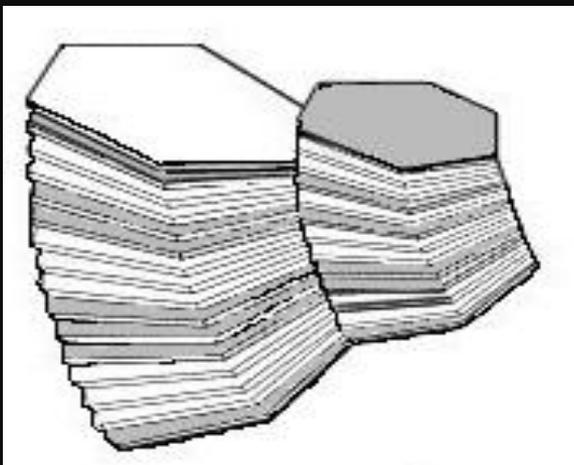
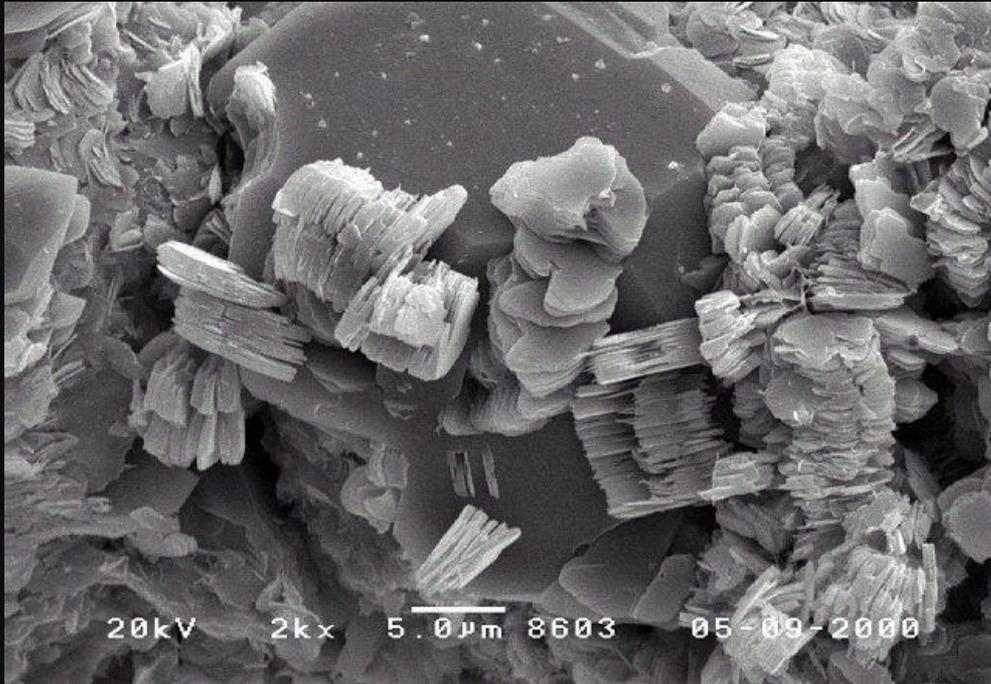


## Diminuição do excesso de $^{210}\text{Pb}$ com a profundidade não é linear:

- (1) elevado hidrodinamismo → remobilização e consequente mistura dos materiais depositados
- (2) perturbação dos sedimentos superficiais por processos biológicos e físicos.
- (3) as partículas sedimentares poderão ter origens muito diversas → influenciar a sua capacidade de adsorção do Pb em excesso (*unsupported*  $^{210}\text{Pb}$ ) usado na datação

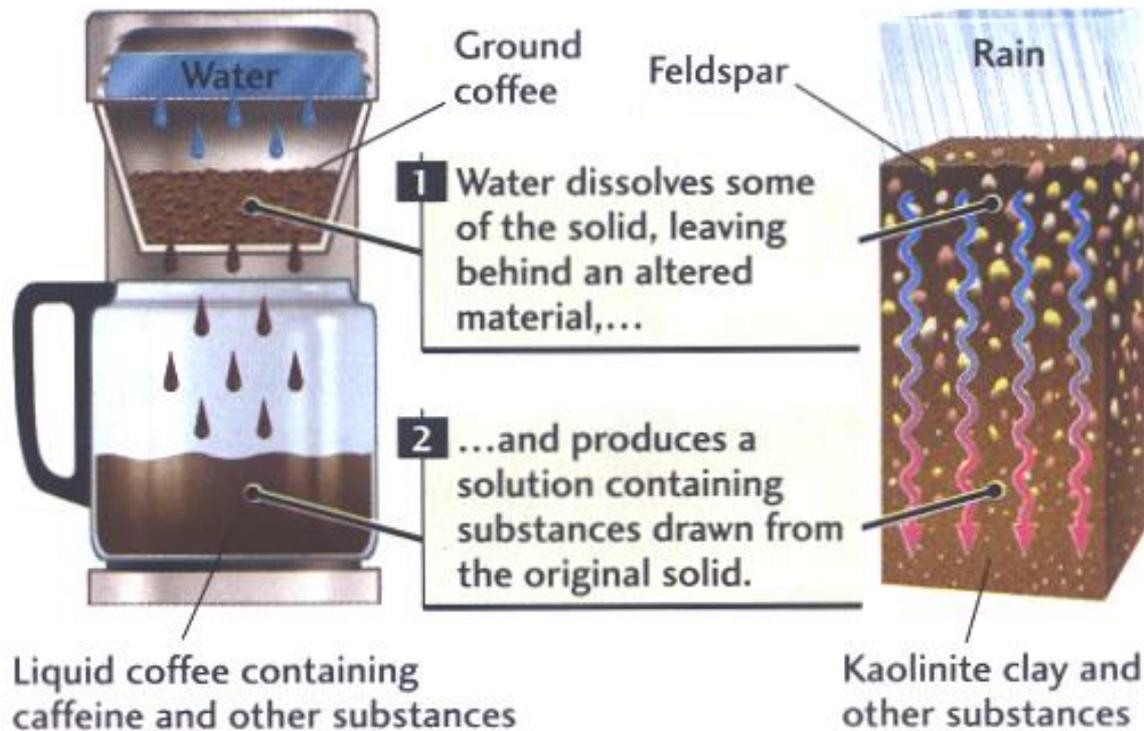
## 3.7 - Mecanismos de Transporte e Deposição dos Minerais Argilosos

*Qual a sua importância nos sedimentos ?*



Os minerais argilosos são os constituintes mais importantes dos sedimentos depositados nas albufeiras e as suas principais fontes devido a (1) serem os principais componentes da fracção argilosa, fracção dominante na maioria dos sedimentos, (2) devido à sua grande actividade química, influenciarem directamente os nutrientes contidos nos sedimentos e coluna de água, os quais poderão ficar fixados e/ou adsorvidos à superfície ou nos espaços inter-folhetos destes minerais e (3) em consequência da sua capacidade de troca iónica, terem importante papel como reguladores da química da massa de água.

## De onde vêm os minerais argilosos?

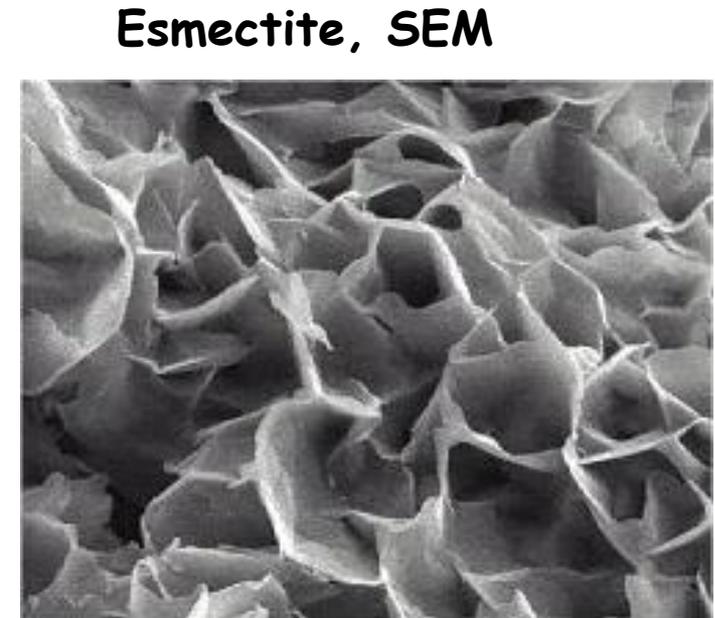
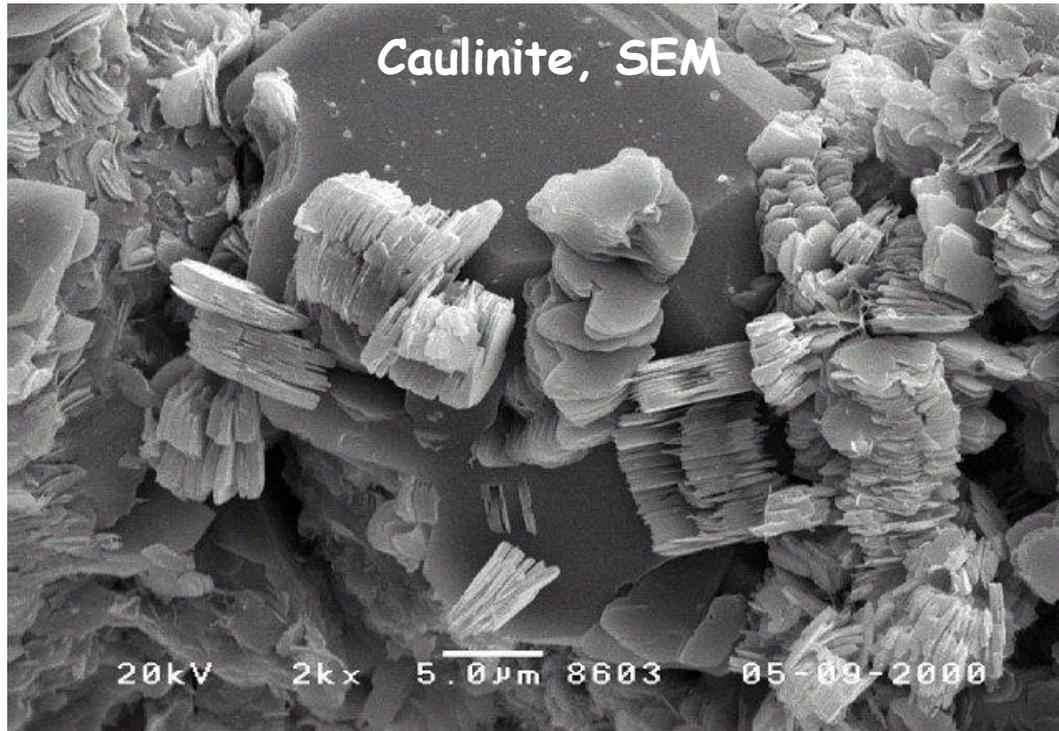


Provêm dos processos de alteração sub-aérea ou sub-aquática → dissolução incongruente dos silicatos inicialmente formados em condições de mais alta pressão e temperatura.

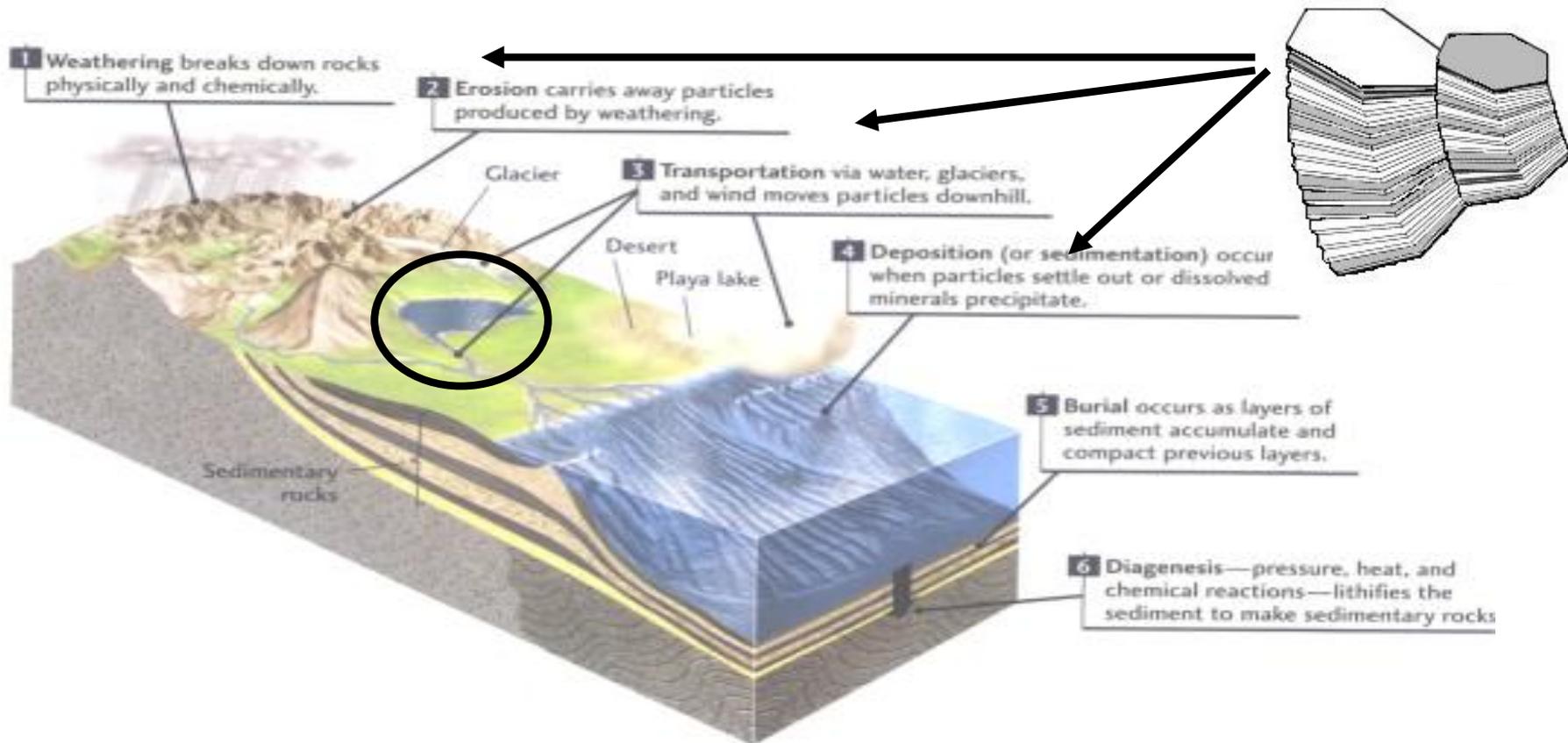
Após a formação dos minerais argilosos através de processos de intemperismo dos minerais primários, estes poderão ser removidos por processos erosivos e transportados pelas linhas de água em direcção às albufeiras

Também os minerais existentes nos solos, os quais já poderão ter sofrido modificações mais ou menos acentuadas face aos processos de acelerada erosão a que actualmente estão sujeitos, poderão seguir percurso idêntico

**Minerais argilosos**, na sua maioria neoformados a partir das primeiras etapas da intemperismo, são os minerais prioritariamente lixiviados pelas águas de escorrência, transportados pelos rios e depositados no fundo das albufeiras, dada a sua pequena dimensão e baixa densidade



**Material argiloso em suspensão na albufeira de Passo Real, RS, Brasil**

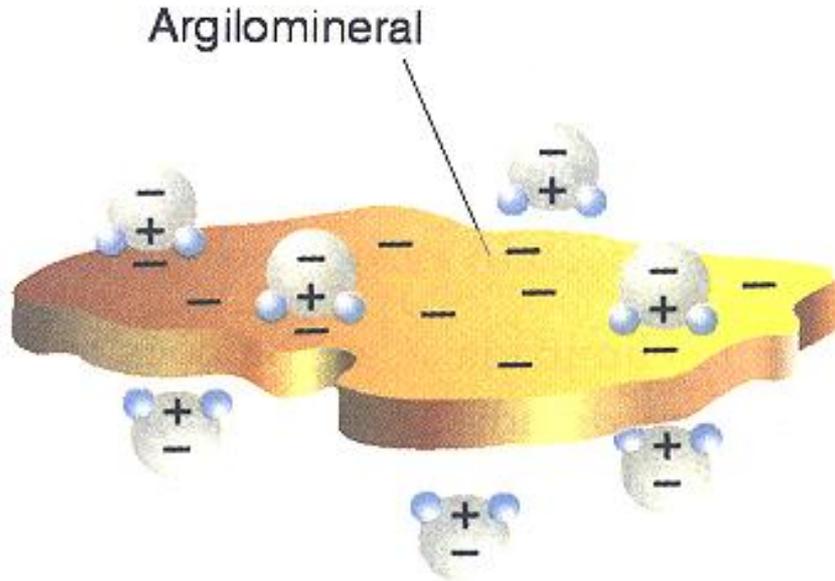


Ao longo dos sucessivos **ciclos de intemperismo, transporte e deposição** os minerais sofrem mutações ou transformações, podendo-se transformar noutros. Considerando que as barragens constituem barreiras ao transporte fluvial até às zonas costeiras, os minerais ficam retidos no interior das albufeiras podendo sofrer novamente modificações mais ou menos profundas.

**Minerais argilosos nos sedimentos de fundo das albufeiras  $\neq$  Minerais argilosos do material de origem – solos das bacias de drenagem**

## Transformações nos minerais argilosos

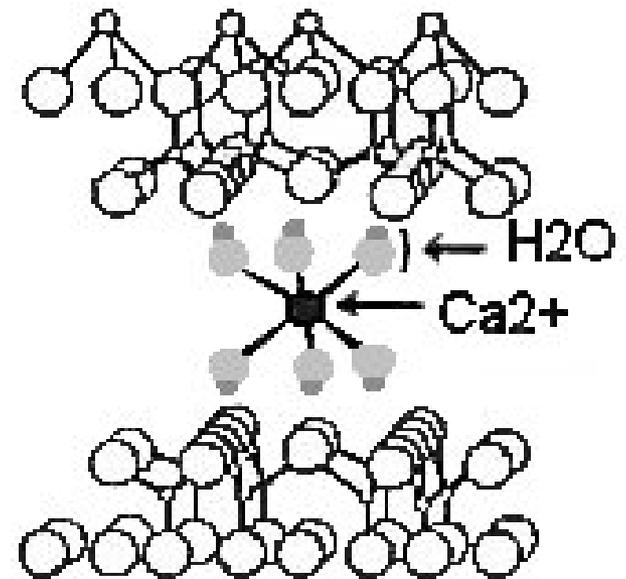
### 1. Durante o transporte e deposição temporária nos cursos de água



De entre as modificações e transformações químicas e físicas que os minerais argilosos poderão sofrer durante o transporte e a deposição temporária, de salientar os processos de troca iônica e fixação em virtude dos efeitos de mistura e ressuspensão, característicos destes meios.

Sedimentos em suspensão → variedade de minerais argilosos + óxidos, hidróxidos + matéria orgânica → elevados valores de CTC (capacidade de troca catiónica).

Devido a esta possibilidade de troca de iões, os minerais argilosos, durante o seu transporte e deposição, podem fixar determinados catiões que existam em certa concentração na água, transformando-se por vezes em minerais de outra espécie ou grupo.



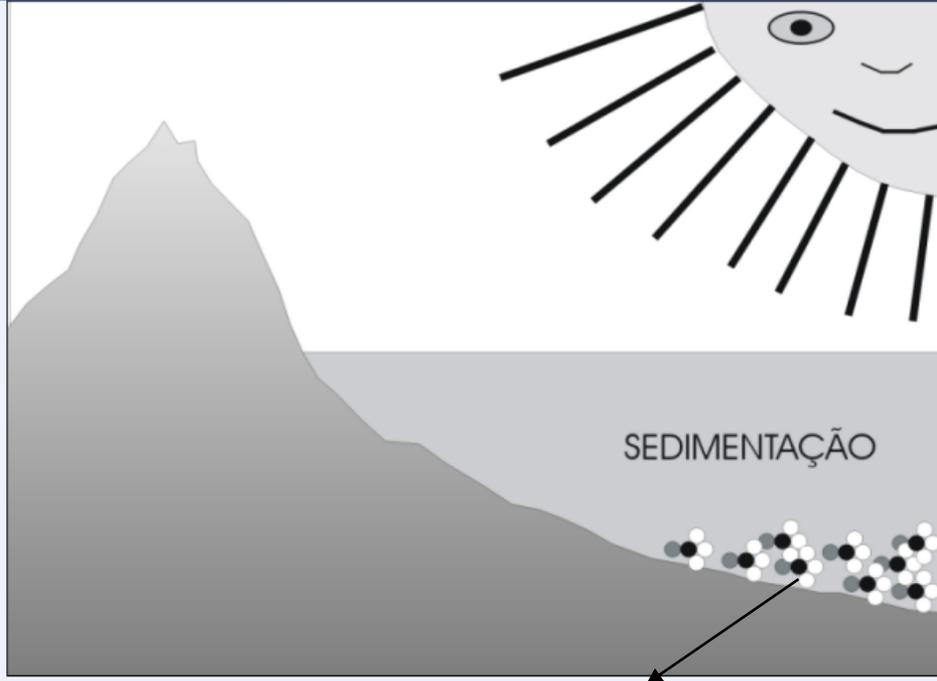
## ***2. Após a deposição nas albufeiras***



É um ambiente caracterizado por:

- Baixo hidrodinamismo
- Estratificação térmica
- Elevada temperatura
- Condições redutoras

As modificações na mineralogia das argilas ocorrem na interface sedimento-água, imediatamente após a sua deposição. Nesta interface, o ambiente químico é diferente dos existentes nos ambientes aquosos correspondentes a (1) processos de alteração iniciais ocorridos nos minerais silicatados primários e (2) cursos de água de alimentação onde estes minerais se mantêm preferencialmente em suspensão

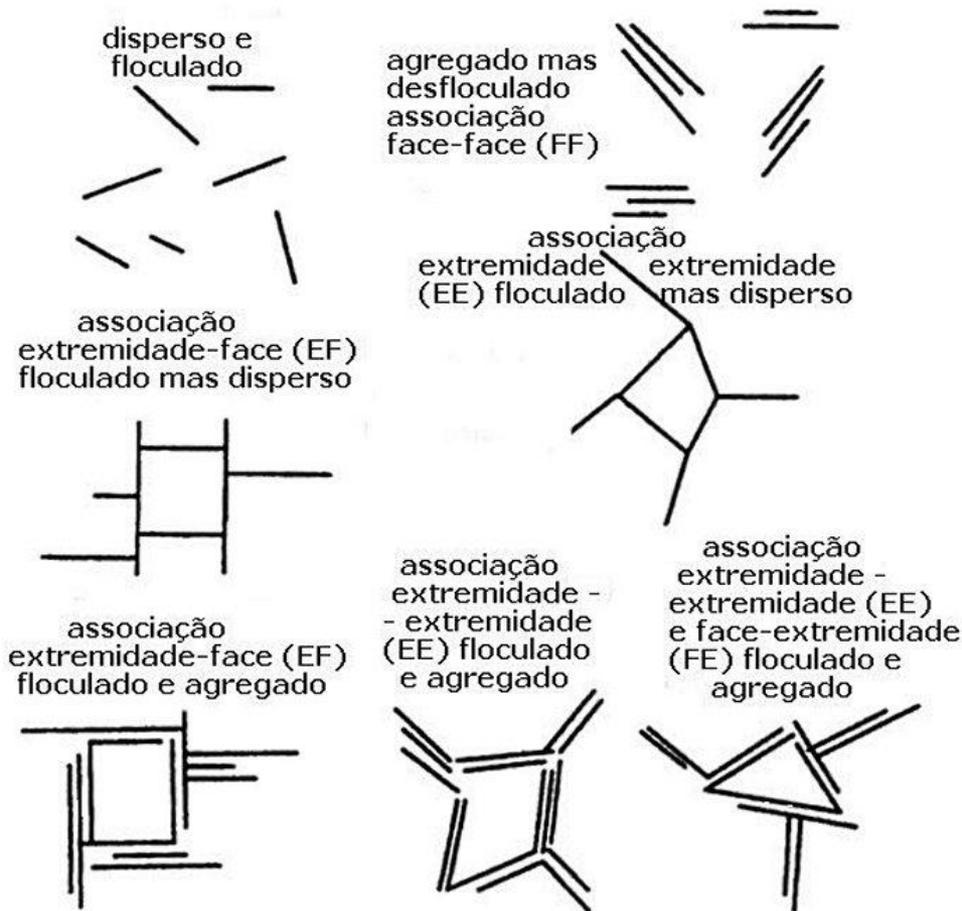


Durante os estádios iniciais de deposição nas albufeiras, a solução aquosa dos sedimentos torna-se mais concentrada em elementos dissolvidos → potencial químico diferente do existente durante os processos de formação inicial dos minerais argilosos.

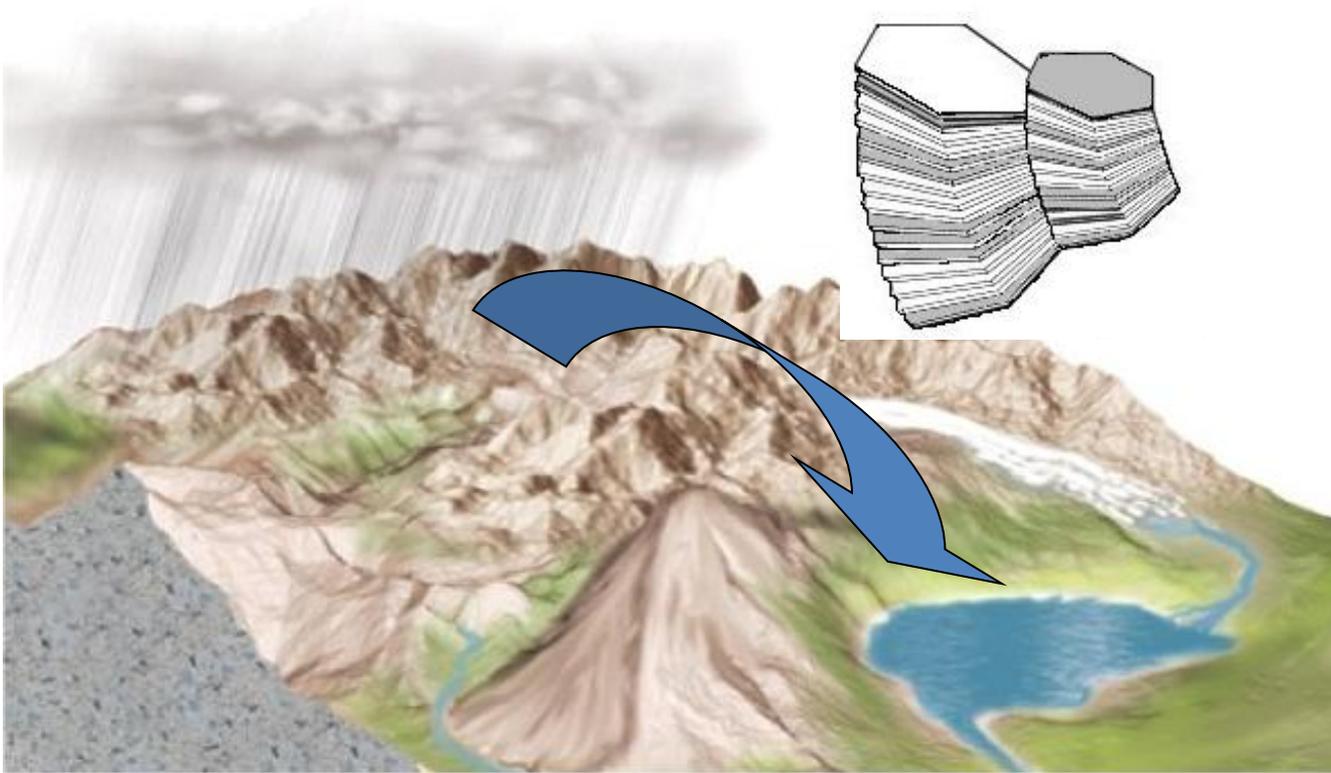
O tempo de residência dos minerais neste novo ambiente sedimentar é muito superior ao dos processos de alteração primária → mais tempo para reagirem com o ambiente solúvel



- As partículas argilosas podem fixar cátions existentes na coluna de água e/ou libertar da sua estrutura cátions mais instáveis
- Formação de agregados



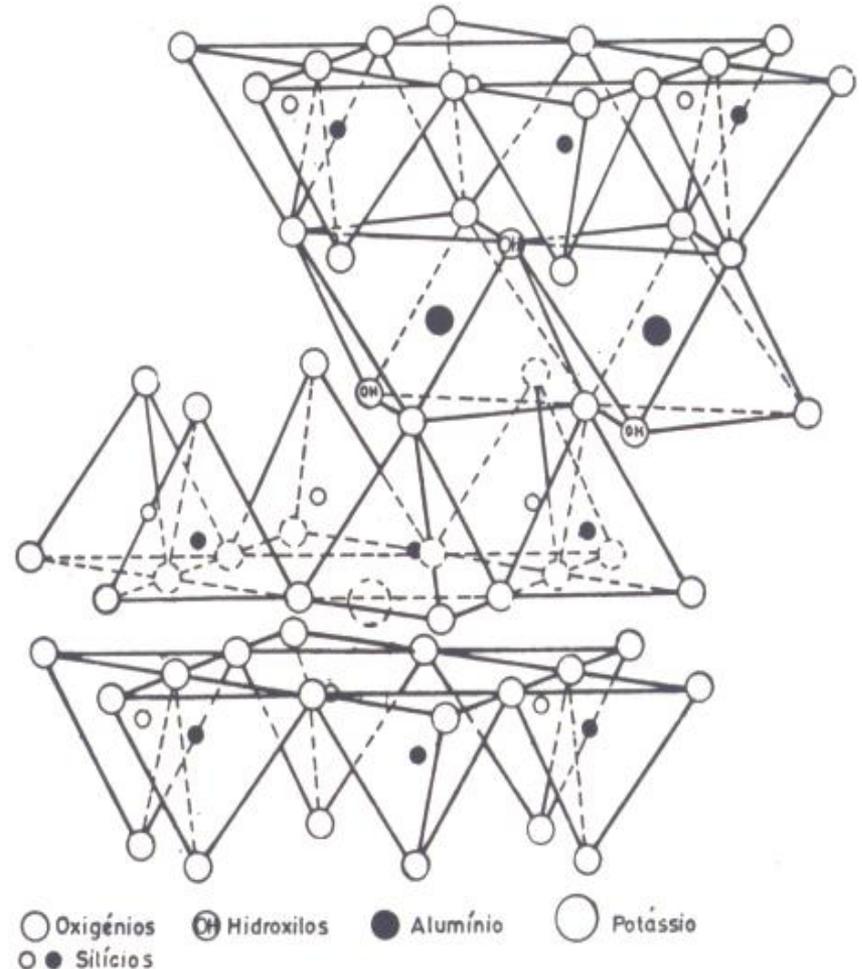
## *Herança dos minerais argilosos*



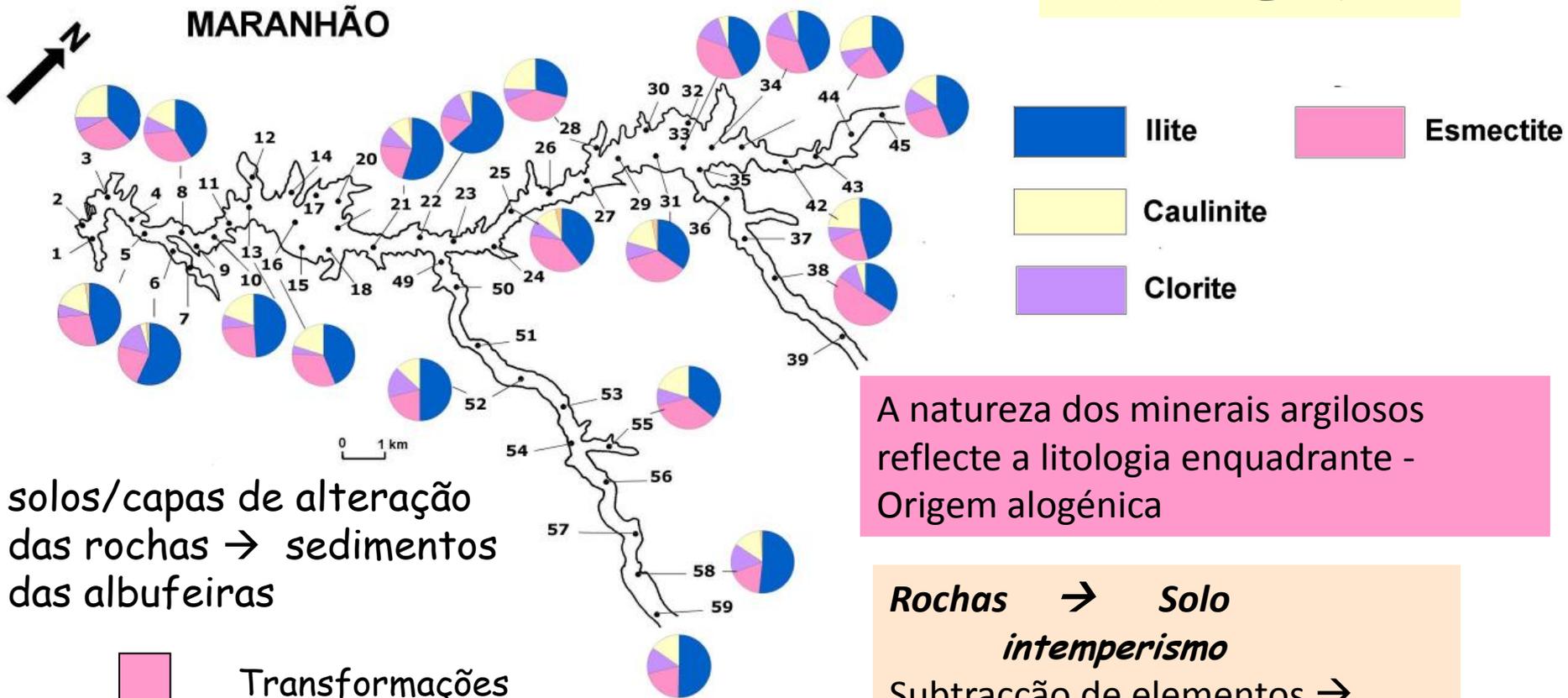
Nestes meios a deposição é essencialmente detrítica e as argilas destes sistemas são herdadas das argilas das capas de alteração das rochas e dos solos das bacias de alimentação, delas pouco diferindo no aspecto cristalquímico. Geralmente, apenas ocorrem pequenas modificações na dimensão média e na distribuição dimensional dos cristais, no grau de ordem-desordem estrutural e na composição química.

## Neoformação dos minerais argilosos

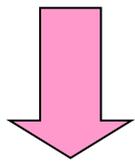
Algumas partículas de minerais argilosos podem ter unicamente origem no novo ambiente sedimentar representado pelas albufeiras. Nas reacções responsáveis pela sua síntese, existe a recombinação de iões como o silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e outros, existentes em solução. Estes novos minerais - minerais de neoformação - são intensamente afectados pelo potencial de oxidação do meio, no qual tem particular importância, o material orgânico aí existente em teores apreciáveis



## Casos de Estudo



solos/capas de alteração  
das rochas → sedimentos  
das albufeiras



Transformações  
mineralógicas

- 1) Maior evolução mineralógica
- 2) Mecanismos de transformação com características agradativas (fixação) - Maior ordenação estrutural

A natureza dos minerais argilosos  
reflecte a litologia enquadrante -  
Origem alogénica

**Rochas → Solo**  
*intemperismo*

Subtracção de elementos →  
Degradação da estrutura

**Solo → Albufeiras**  
*transporte, deposição*

Fixação de iões da coluna de água →  
Rearranjo da estrutura / maior  
ordenação estrutural