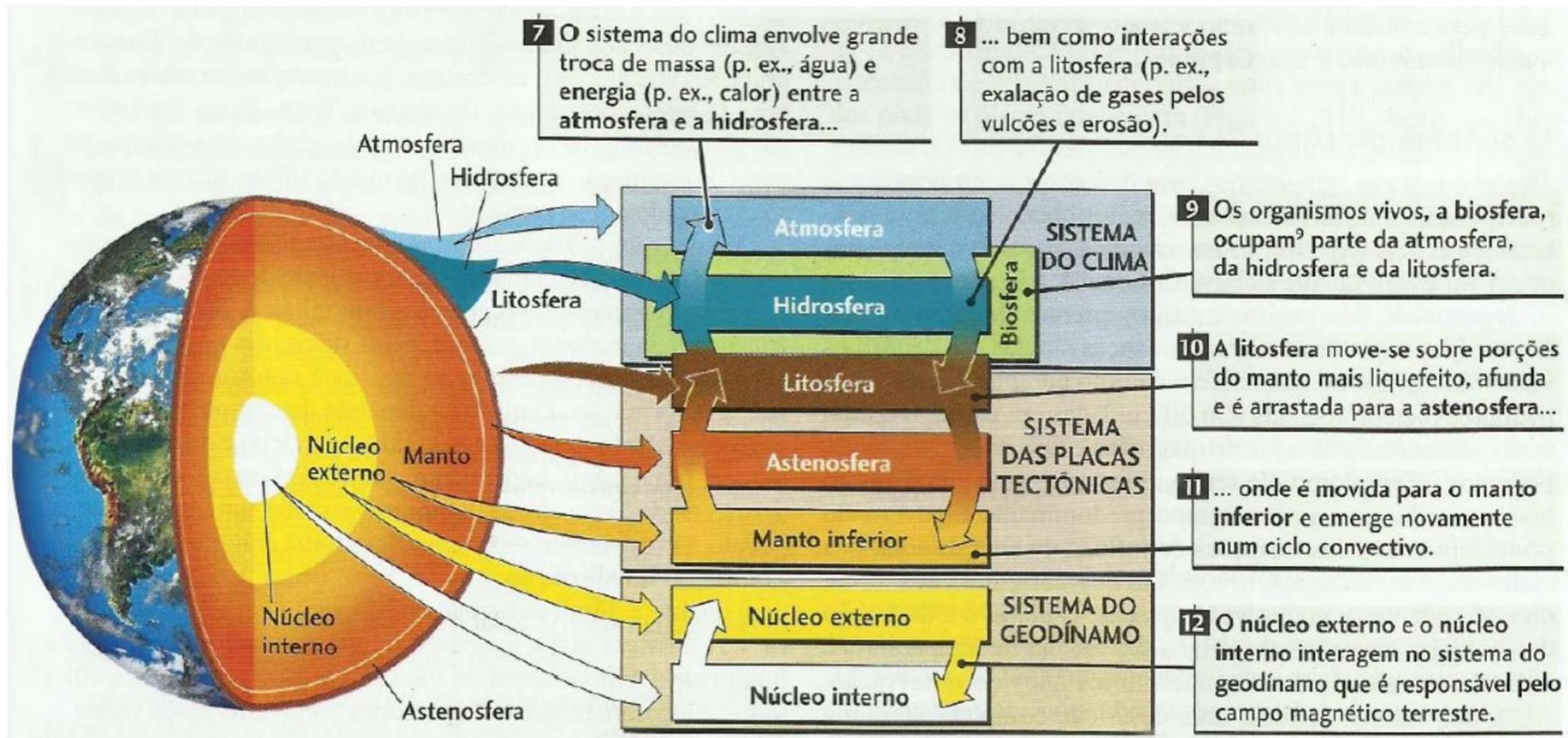




AGG 0201 Geoquímica de Ambientes Superficiais
Profa. Andréa Teixeira Ustra

Intemperismo

Interação entre o Sistema Clima e o Sistema Tectônica de placas



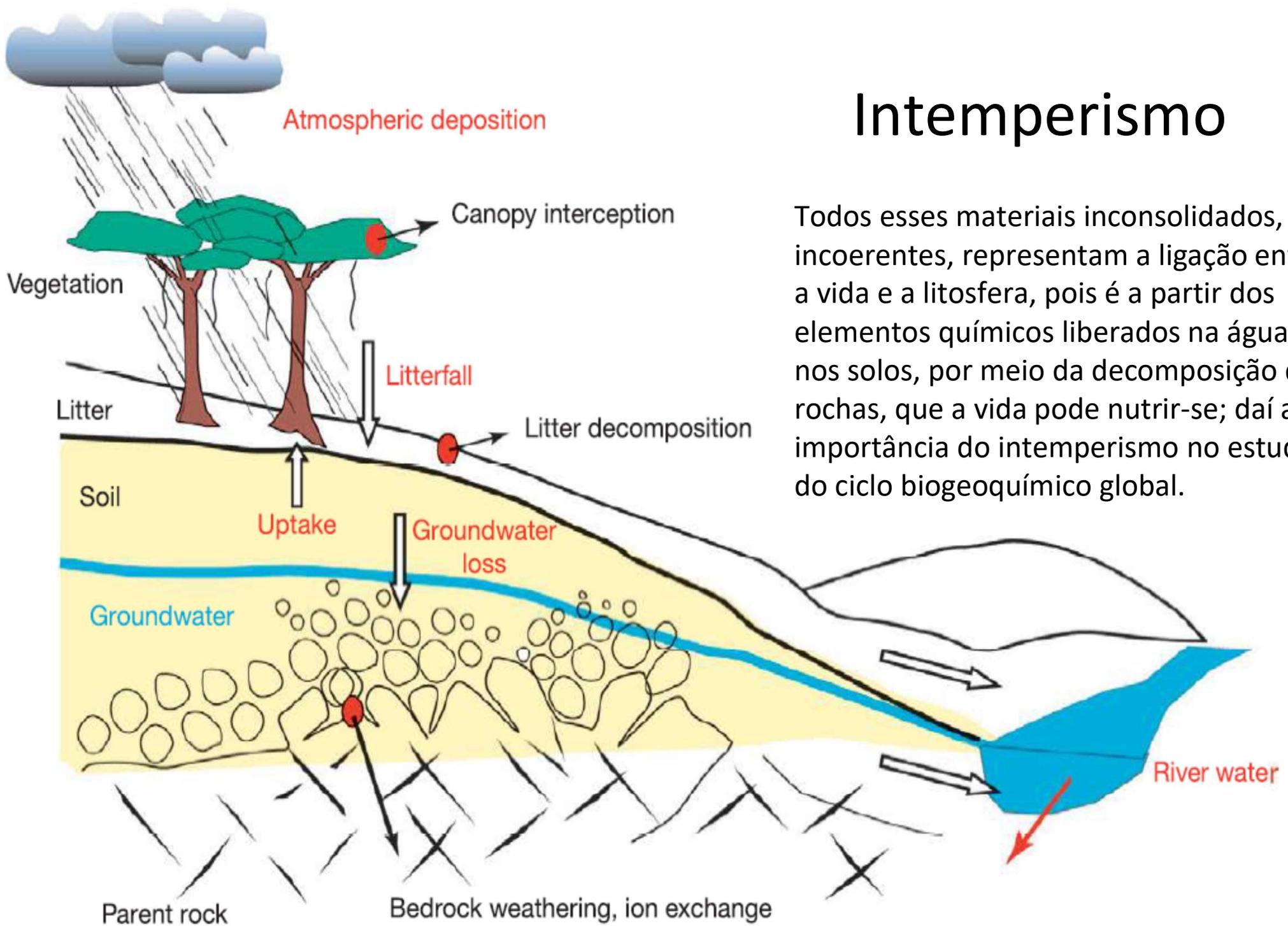
Intemperismo

- Terra – planeta rochoso (material consolidado, resistente e formado em grande parte por minerais silicáticos).
- Maior parte da superfície está exposta ao ar, ao Sol, à água e aos seres vivos
- Cobertura composta por materiais friáveis ~ **solo** – materiais que se originam das rochas, por desagregação e decomposição (**intemperismo**), depois por reorganização (**pedogênese**) e, conforme o caso, também por erosão, transporte e sedimentação



Intemperismo

- Ocorre na superfície dos continentes, na interação entre litosfera - - atmosfera-hidrosfera-biosfera
- Transforma as rochas em materiais móveis, inconsolidados, que podem ser erodidos, transportados e depositados em zonas mais baixas – soterrados por mais sedimentos sobrepostos, consolidam-se pela pressão e por processos de recristalização, tornando-se novamente rochas (sedimentares)



Intemperismo

Todos esses materiais inconsolidados, incoerentes, representam a ligação entre a vida e a litosfera, pois é a partir dos elementos químicos liberados na água e nos solos, por meio da decomposição das rochas, que a vida pode nutrir-se; daí a importância do intemperismo no estudo do ciclo biogeoquímico global.

Biogeochemical cycling of elements within the different reservoirs (i.e., soil–rock system, vegetation, and atmosphere) of a watershed.

Evolution of **Minerals**

BY ROBERT M. HAZEN

Looking at the mineral kingdom through the lens
of deep time leads to a startling conclusion:
most mineral species owe their existence to life



Processos do intemperismo

- Desagrega os minerais das rochas e os fragmenta
- Modificar sua composição, decompondo os minerais mais frágeis e formando novos minerais

Processos do intemperismo

- Desagrega os minerais das rochas e os fragmenta

Intemperismo físico
Intemperismo físico -biológico

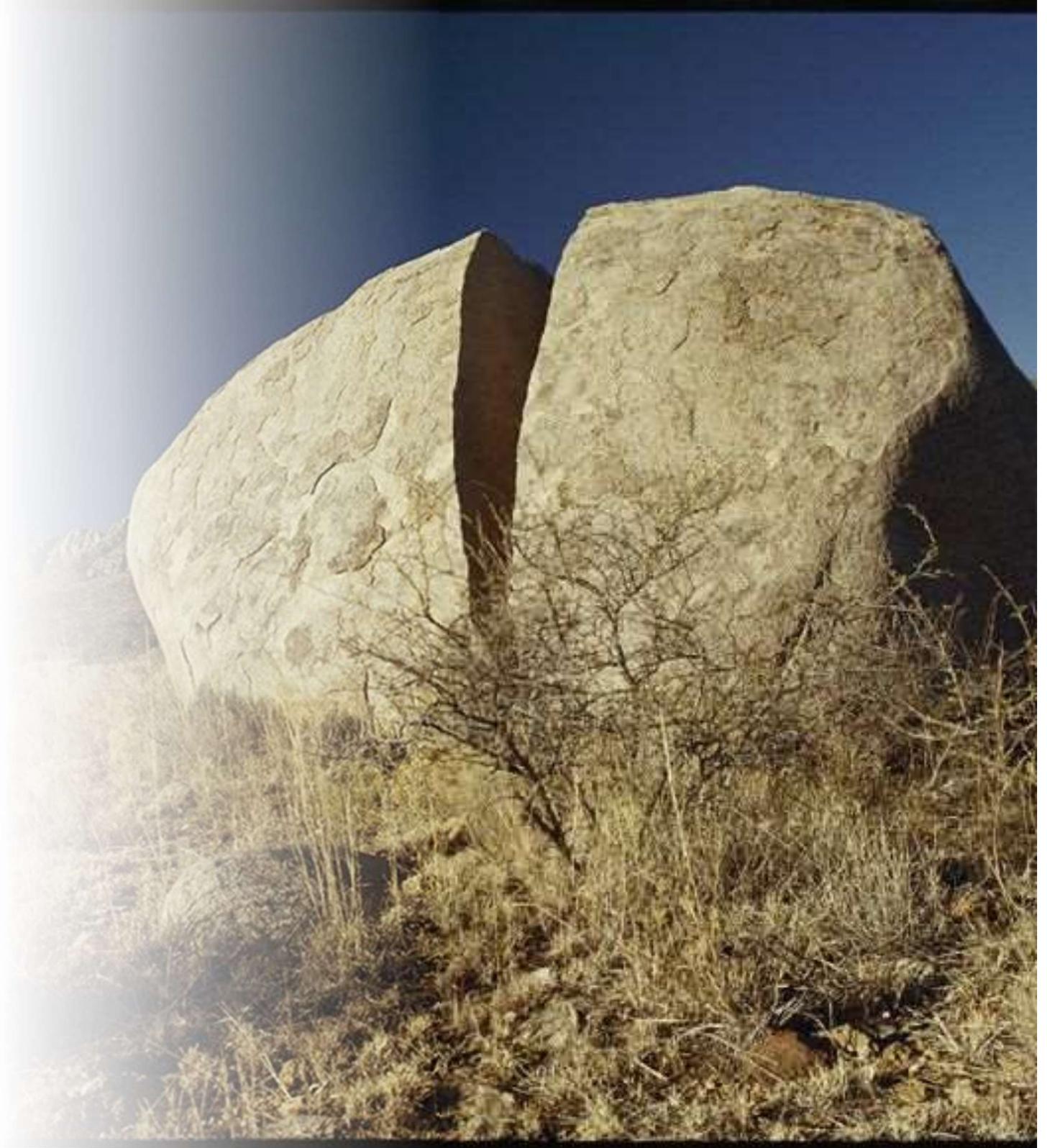
- Modificar sua composição, decompondo os minerais mais frágeis e formando novos minerais

Intemperismo químico
Intemperismo químico-biológico

Intemperismo físico

Transformações
simplesmente mecânicas

Fragmentação das rochas e
dos grãos minerais devido a
variações de temperatura e
de pressão



Intemperismo físico

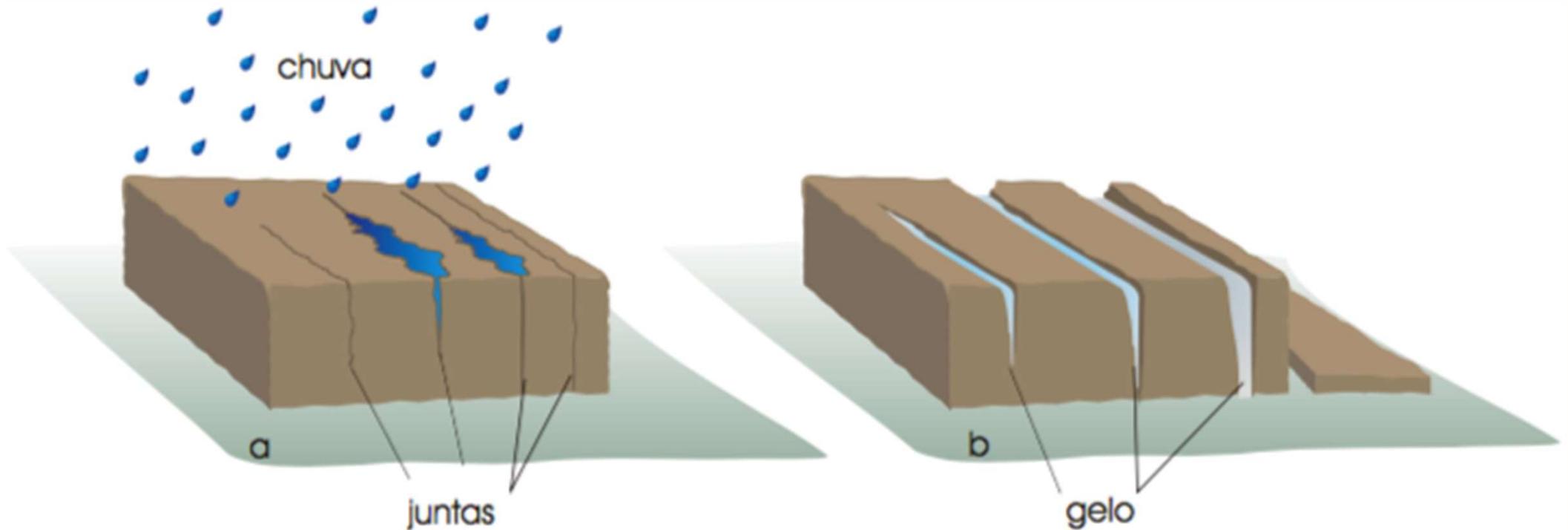


Fig. 8.2 Fragmentação por ação do gelo. A água líquida ocupa as fissuras da rocha (a), que posteriormente congelada, expande e exerce pressão nas paredes (b).

Intemperismo físico

Cristalização de gelo e de sais em fissuras: crescimento de cristais (tanto de gelo como de sais) nos espaços intergranulares dentro da rocha → paredes são pressionadas → descolamento e fraturamento dos grãos.

Este mecanismo com gelo é comum nos climas em que a água ocorre tanto no estado líquido quanto no estado sólido.

Ex: Itatiaia (RJ), Brasil (gelo de noite e água de dia)



Intemperismo físico

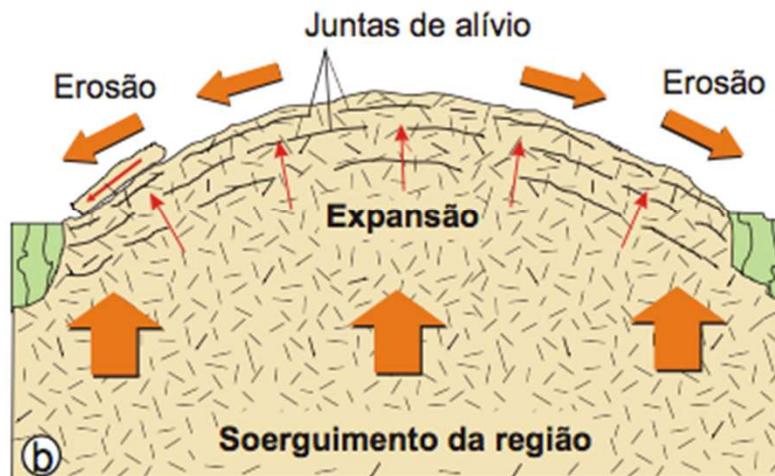
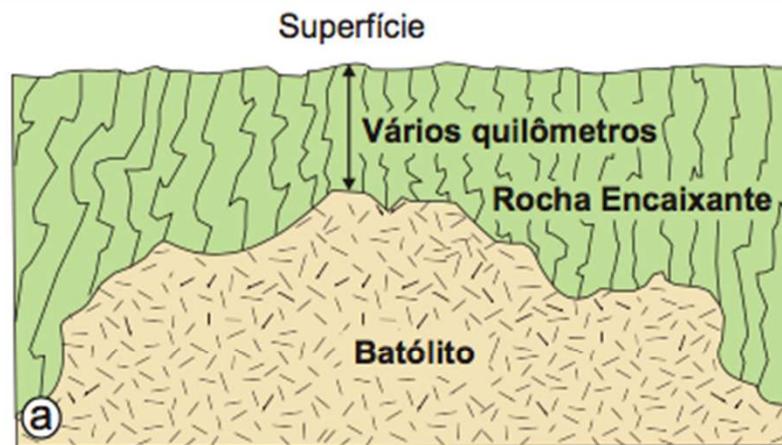
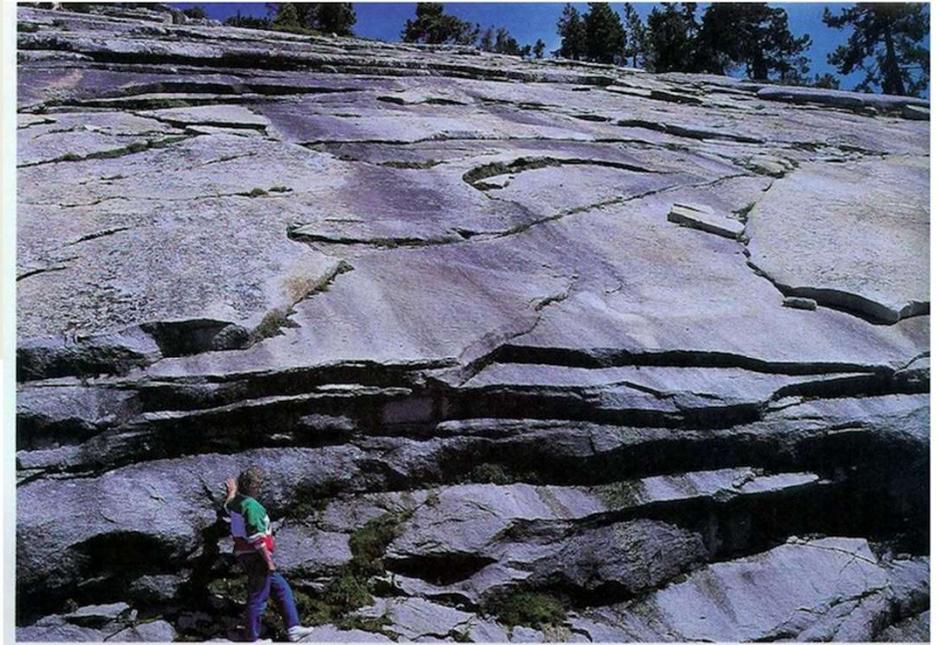


Fig. 8.4 Formação das **juntas de alívio** em consequência da expansão do corpo rochoso sujeito a alívio de pressão pela erosão do material sobreposto. Estas discontinuidades servem de caminhos para a percolação das águas que promovem a alteração química. a) antes da erosão; b) depois da erosão.

Intemperismo físico

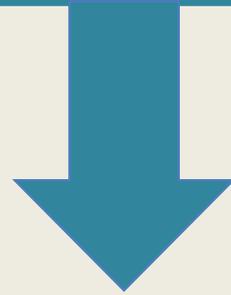
A presença de raízes também pode fragmentar as rochas. Este tipo pode ser chamado de intemperismo físico-biológico.



Intemperismo químico

Conjunto de reações promovidas pela presença da água no estado líquido, em contato com as rochas

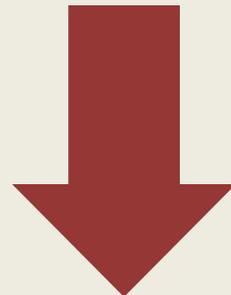
Intemperismo físico



Fragmentação aumenta a área exposta ao meio externo



Rochas com maior superfície exposta à ação da água

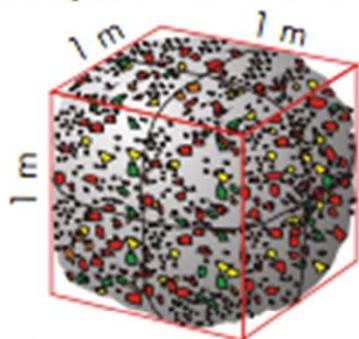


Intemperismo químico

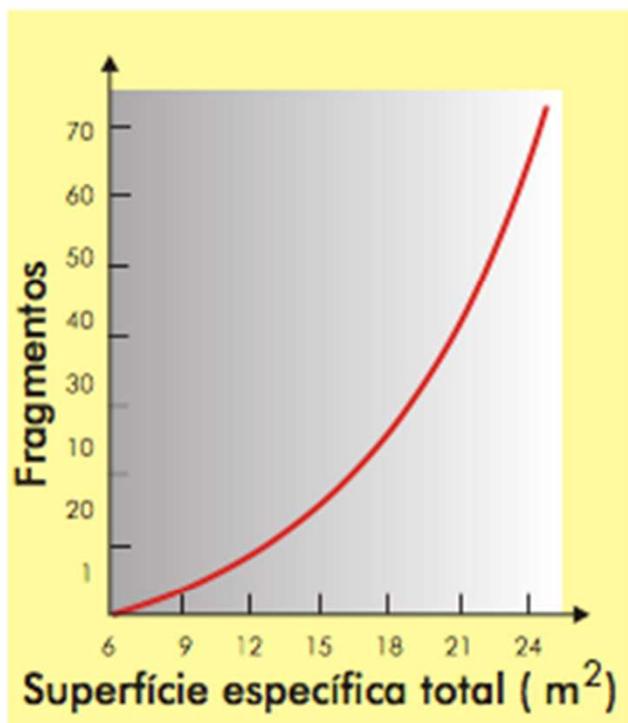
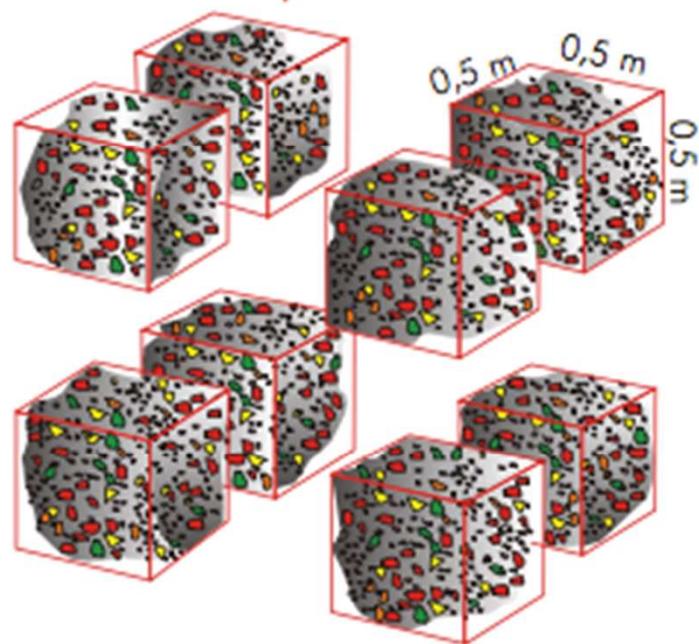
- Bloco único de aproximadamente 1 m de lado

- Volume = 1 m^3

- Superfície específica = 6 m^2



Ruptura ao longo de fraturas



- 8 fragmentos, cada um com aproximadamente 0,5 m de lado

- Volume = $(0,5)^3 \times 8 = 1 \text{ m}^3$

- Superfície específica = 12 m^2

Fig. 8.6 A fragmentação de um bloco de rocha é acompanhada por um aumento significativo da superfície exposta à ação dos agentes intempéricos.

Intemperismo químico

- Água da chuva = solução de alteração = solução de intemperismo
- Substâncias dissolvidas ao longo de sua trajetória pela atmosfera e pelo contato com a biosfera

Intemperismo químico

- Água da chuva = solução de alteração = solução de intemperismo
- Substâncias dissolvidas ao longo de sua trajetória pela atmosfera e pelo contato com a biosfera
- Minerais primários - sofrem reações químicas que dependem dos reagentes (minerais originais da rocha e soluções de alteração) e das condições em que as reações se processam (clima, relevo, presença de organismos e tempo)

Intemperismo químico

- Água da chuva = solução de alteração = solução de intemperismo
- Substâncias dissolvidas ao longo de sua trajetória pela atmosfera e pelo contato com a biosfera
- Minerais primários - sofrem reações químicas que dependem dos reagentes (minerais originais da rocha e soluções de alteração) e das condições em que as reações se processam (clima, relevo, presença de organismos e tempo)
- Resultado = conjunto de minerais secundários (ou supérgenos, pois são gerados na superfície), que constituem as formações superficiais.

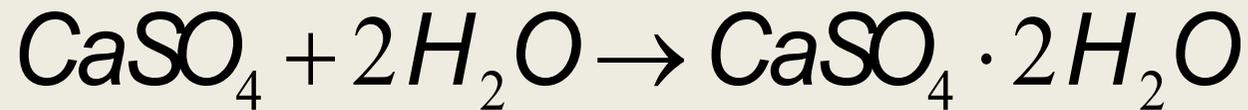
Exemplo

- **Mineral I** + solução de alteração \Rightarrow **Mineral II** + solução de lixiviação
- **Mineral I**: mineral primário = mineral existente na rocha dura (ex.: quartzo, feldspato, mica, piroxênio)
- **solução de alteração**: água da chuva carregada de elementos/substâncias dissolvidas, que se infiltra e percola a rocha em vias de alteração
- **Mineral II**: mineral secundário (ou neoformado) (ex: goethita, gibbsita, argilominerais etc.)
- **solução de lixiviação**: água da chuva, cuja composição foi modificada pelas reações do intemperismo e que caminhará em meio aos materiais geológicos até atingir um aquífero, um rio ou até voltar à superfície



Principais reações do intemperismo químico - **hidratação**

- Entrada de água na estrutura de um mineral, enfraquecendo-a e podendo formar um outro mineral com características distintas.



- Ex: anidrita (sulfato de cálcio) transforma-se em outro mineral, o gipso, pela entrada de H₂O em sua estrutura cristalina

hidratação

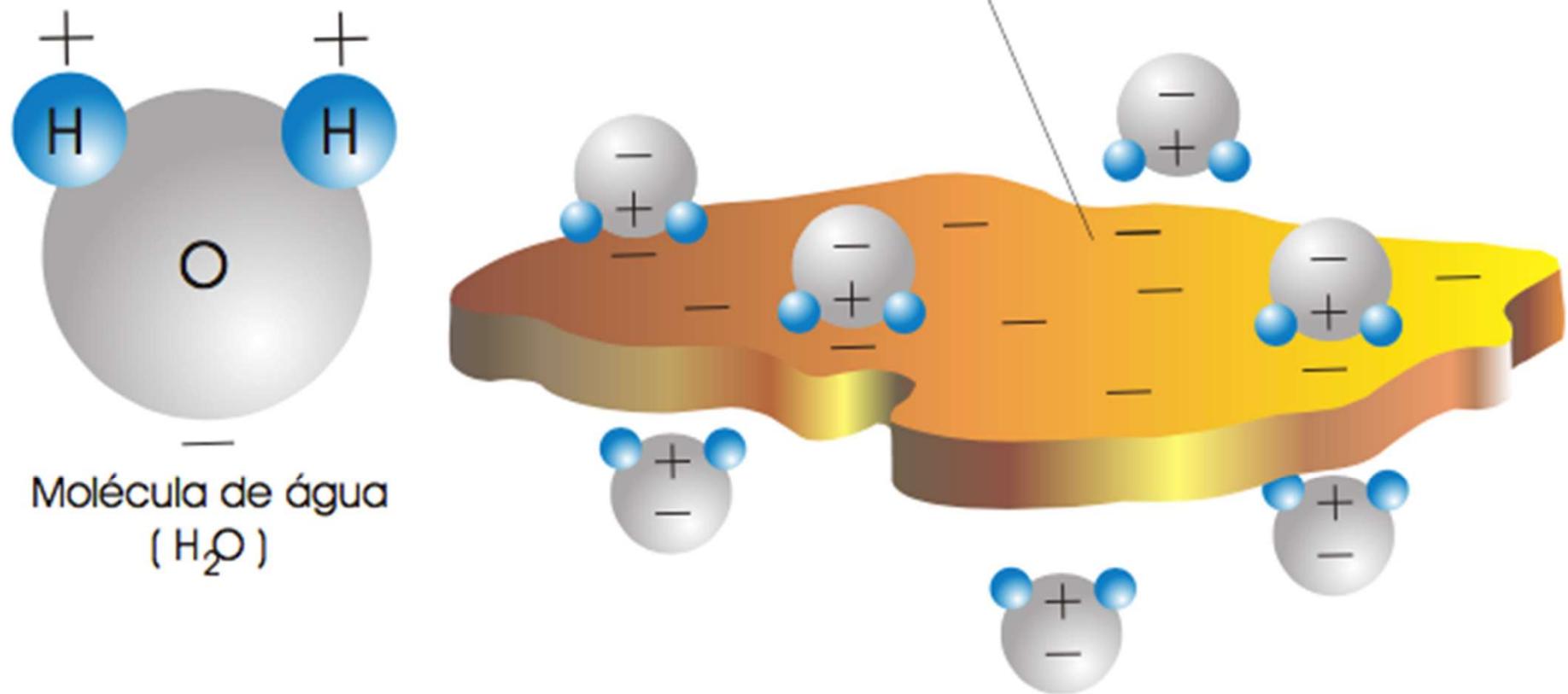


Fig. 8.7 As cargas elétricas insaturadas na superfície dos grãos minerais atraem as moléculas de água, que funcionam como dipolos devido à sua morfologia.

Principais reações do intemperismo químico - **dissolução**

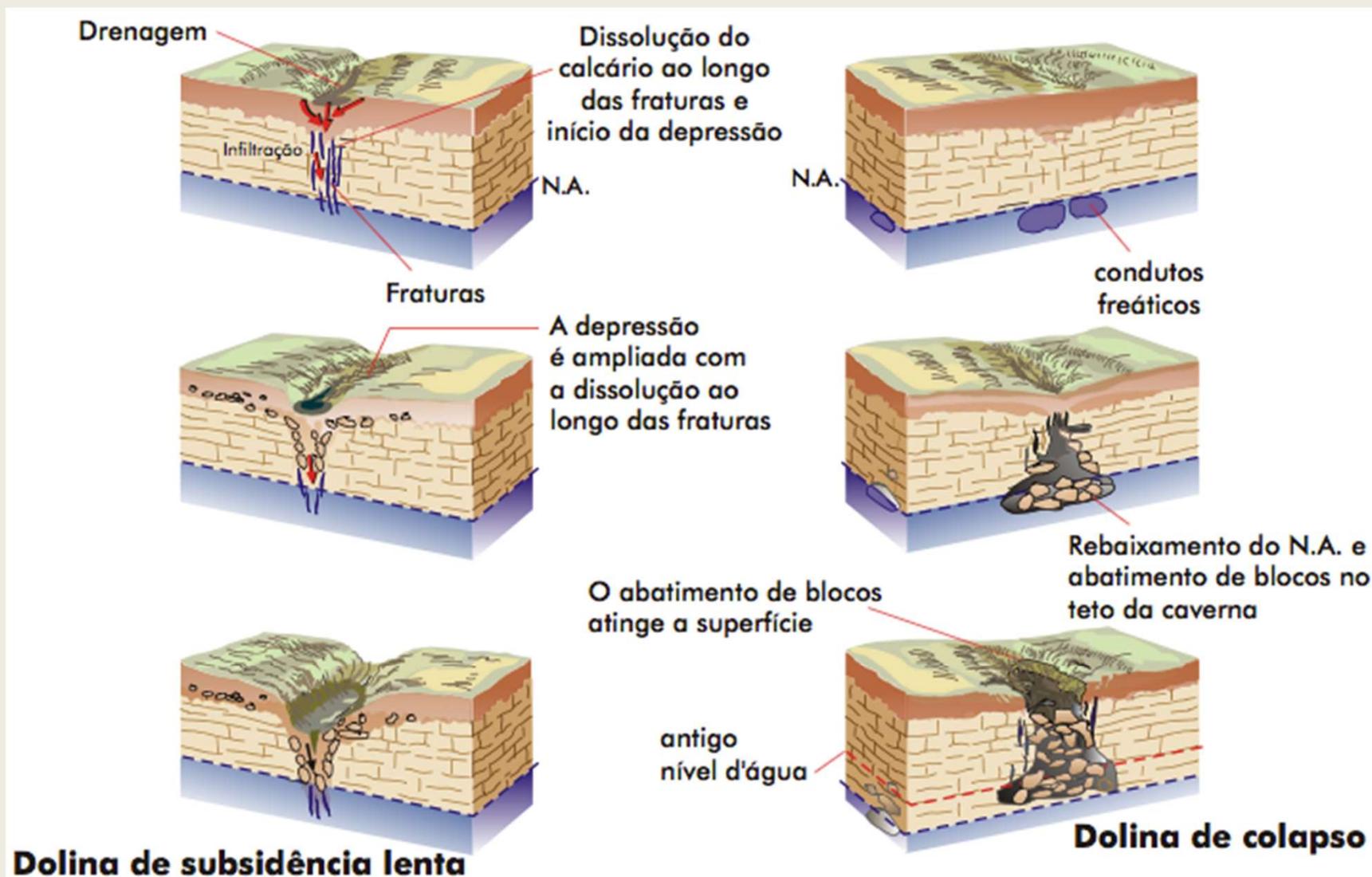
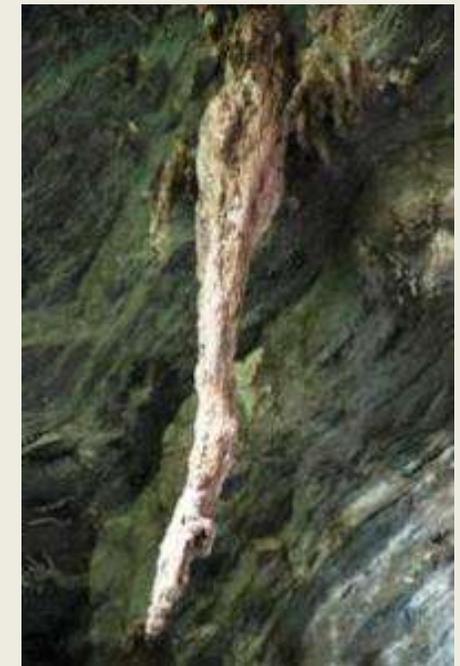
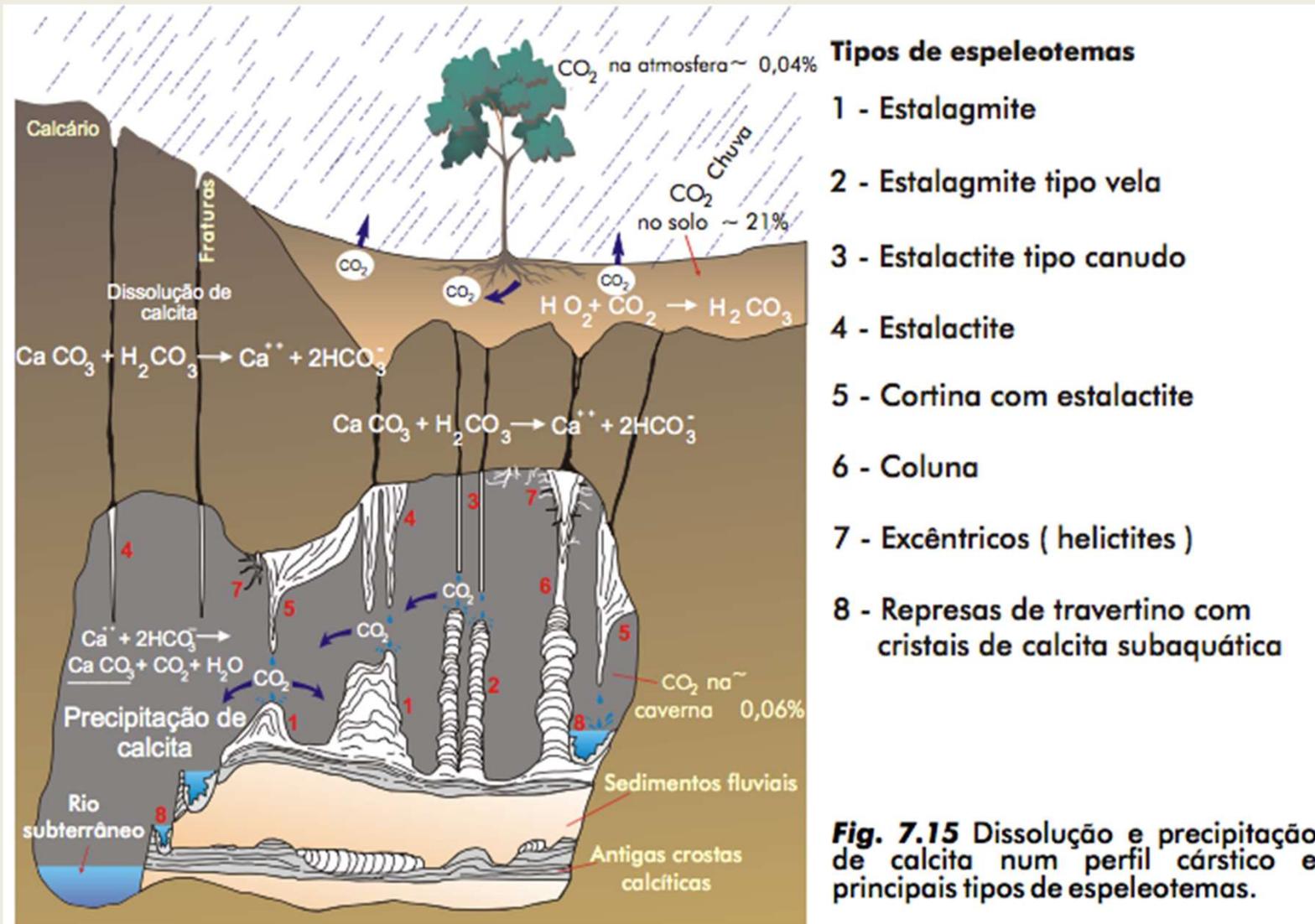


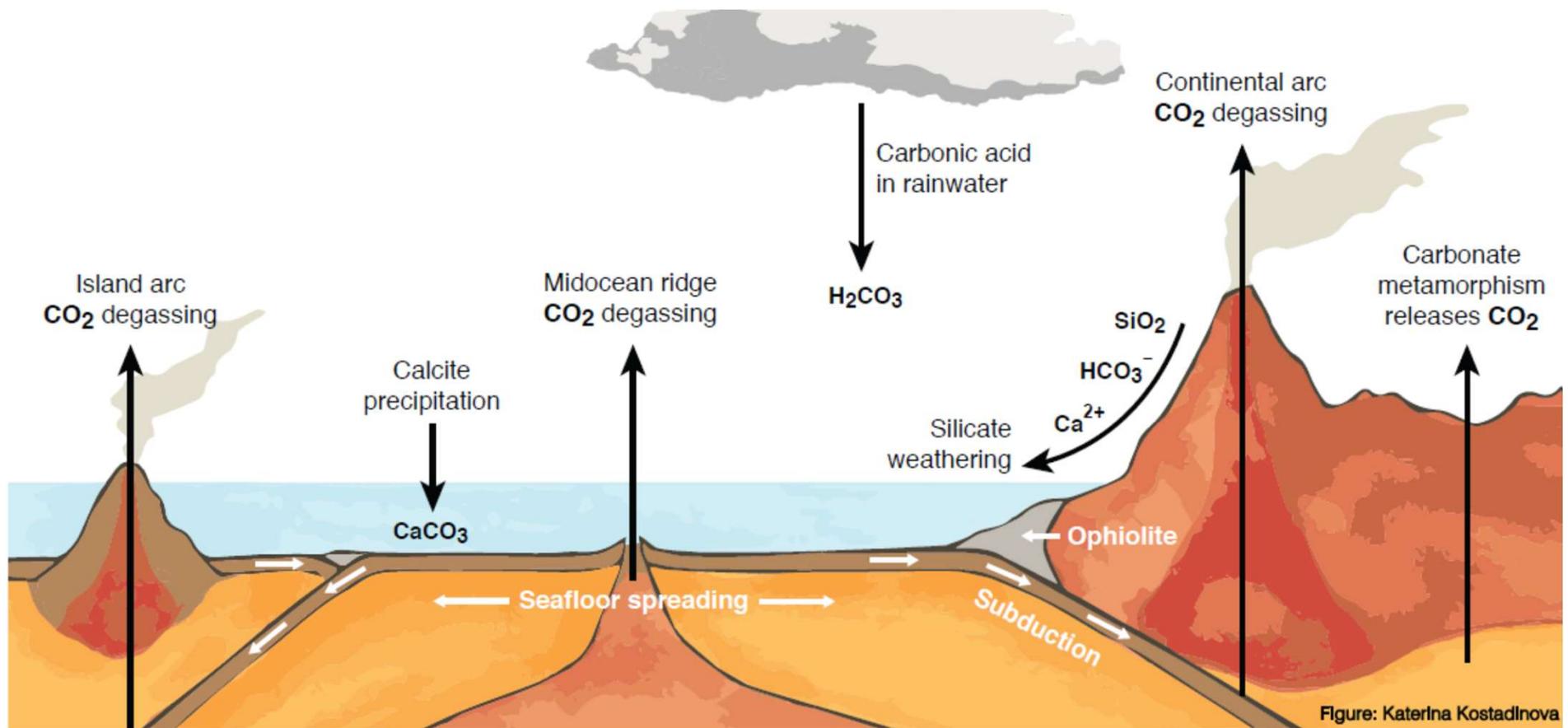
Fig. 7.18 Evolução esquemática das dolinas.

Principais reações do intemperismo químico - **dissolução**



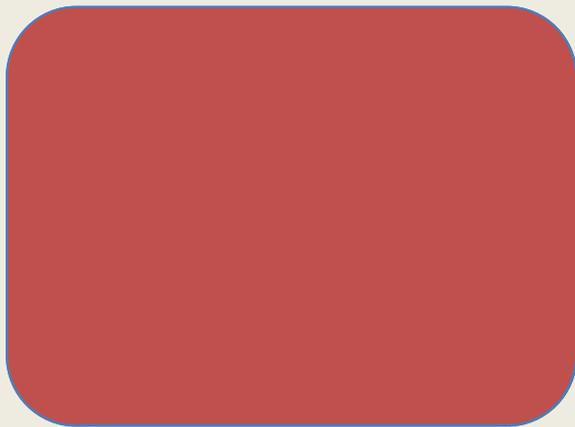
“Perna de bailarina” – Gruta do Janelão, em Januária – MG.

Fig. 7.15 Dissolução e precipitação de calcita num perfil cárstico e principais tipos de espeleotemas.



CO₂ e
intemperismo

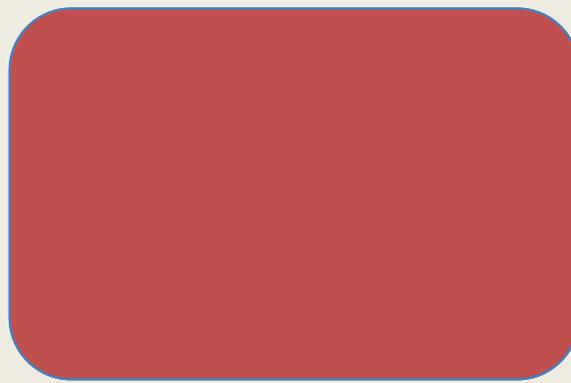
O intemperismo
reduz o CO₂ na
atmosfera como
CO₂ → HCO₃⁻



CO₂ e intemperismo

A baixa
concentração de
CO₂ causa o
resfriamento
climático

O intemperismo
reduz o CO₂ na
atmosfera como
CO₂ → HCO₃⁻

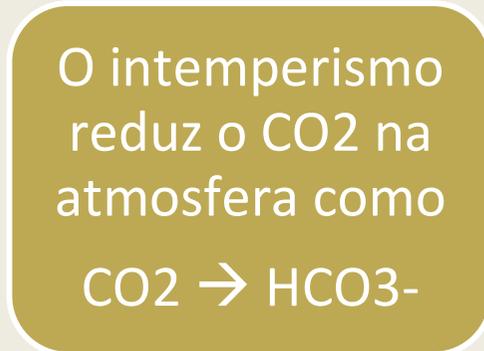
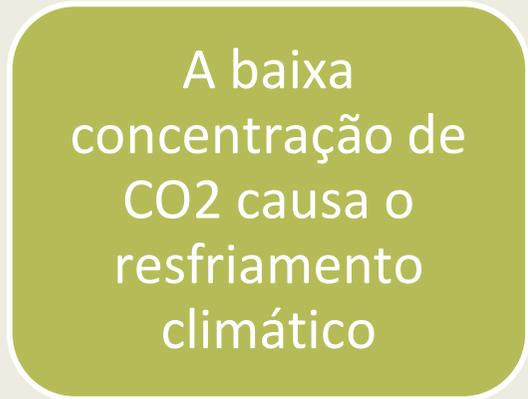
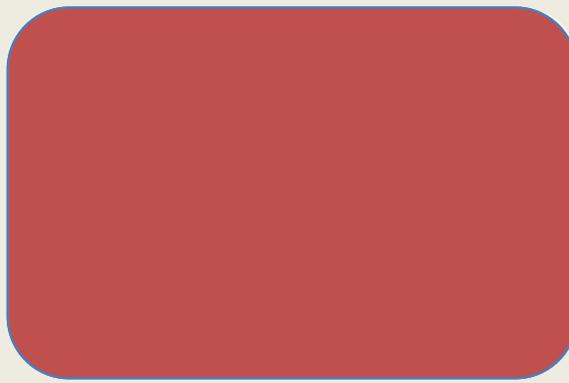
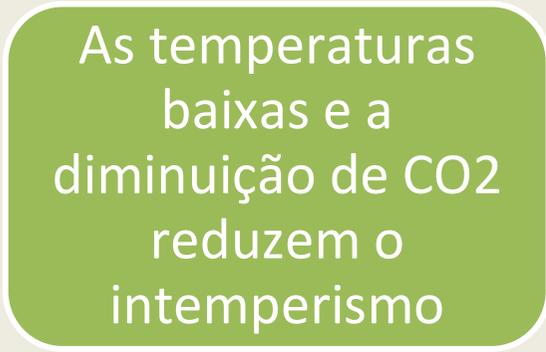


CO₂ e intemperismo

As temperaturas baixas e a diminuição de CO₂ reduzem o intemperismo

A baixa concentração de CO₂ causa o resfriamento climático

O intemperismo reduz o CO₂ na atmosfera como
CO₂ → HCO₃⁻



A redução da taxa de intemperismo

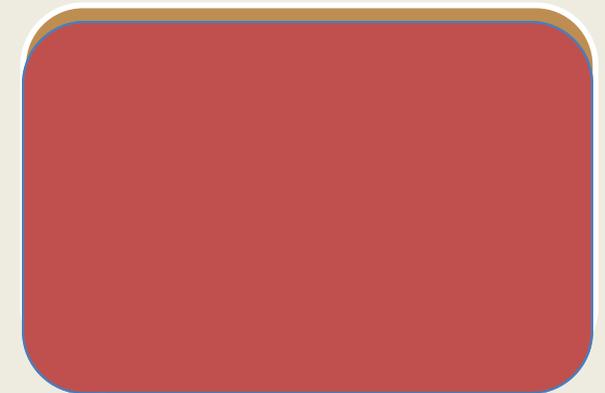
As temperaturas baixas e a diminuição de CO₂ reduzem o intemperismo

Leva ao aumento da concentração de CO₂ atmosférico

CO₂ e intemperismo

A baixa concentração de CO₂ causa o resfriamento climático

O intemperismo reduz o CO₂ na atmosfera como
CO₂ → HCO₃⁻



CO₂ e intemperismo

A redução da taxa
de intemperismo

Leva ao aumento da
concentração de
CO₂ atmosférico

Que causa o
aquecimento global,
que faz o
intemperismo
aumentar

O intemperismo
reduz o CO₂ na
atmosfera como
CO₂ → HCO₃⁻

As temperaturas
baixas e a
diminuição de CO₂
reduzem o
intemperismo

A baixa
concentração de
CO₂ causa o
resfriamento
climático

Principais reações do intemperismo químico - **hidrólise**

- Quebra das ligações químicas entre os elementos químicos que constituem cada mineral atingido e os libera nas águas, em forma de cátions e ânions.
- Estes serão ou removidos pela drenagem (água em movimento dentro do manto de intemperismo) ou recombinaados em novos minerais.

Hidrólise

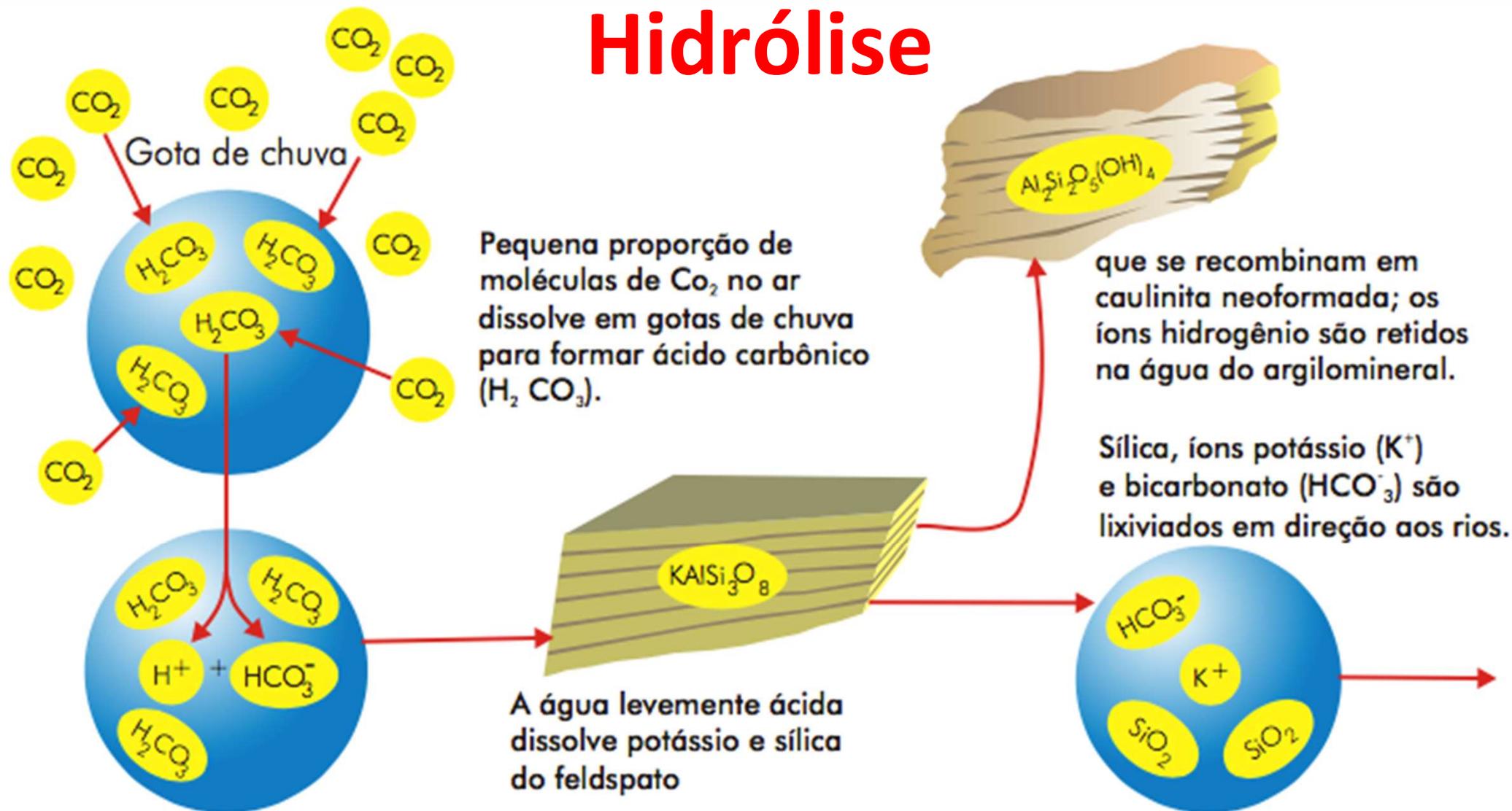


Fig. 8.8 Alteração de um feldspato potássico em presença de água e ácido carbônico, com a entrada de H^+ na estrutura do mineral, substituindo K^+ .

Hidrólise total

- 100% da silícia e potássio são eliminados
- Condições de alta pluviosidade e drenagem
- Resíduo = hidróxido de alumínio (**gibsit**), insolúvel; na faixa de pH que ocorre hidrólise (5-9)



Hidrólise

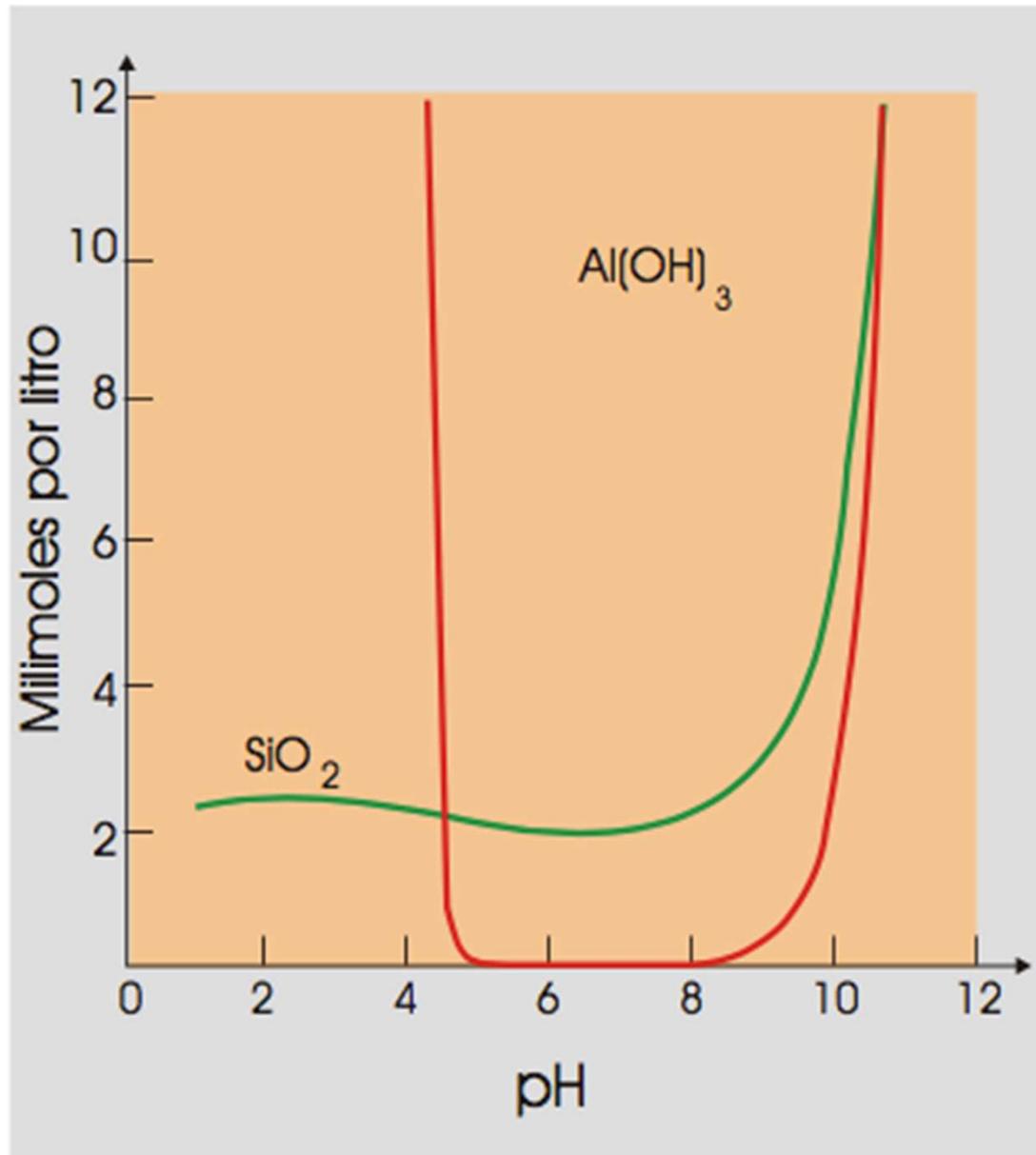


Fig. 8.10 Solubilidade da sílica e do alumínio em função do pH, a 25°C.

Hidrólise parcial

- Devido a drenagem menos eficiente, parte da sílica permanece no perfil; o potássio pode ser total ou parcialmente eliminado.
- Esses elementos reagem com o alumínio, formando aluminossilicatos hidratados = argilominerais



Processo de **SiAl**ITIZAÇÃO

Kaolinite

100% do potássio é eliminado

Hidrólise parcial

Illite-smectite

Parte do potássio permanece

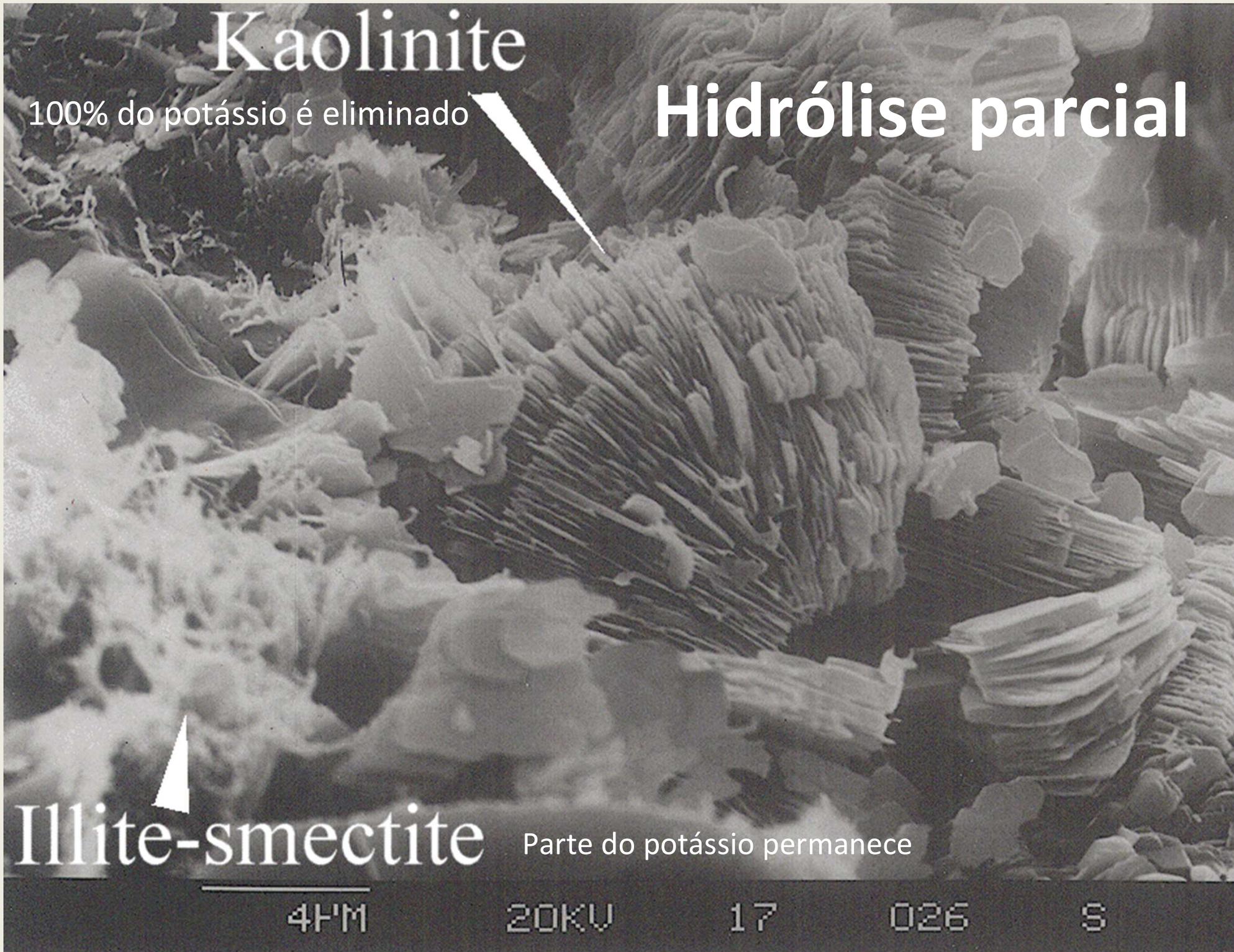
4µm

20KV

17

026

S



Kaolinite $\text{Si:Al} = 1:1 =$ monossilização

Hidrólise parcial

Illite-smectite $\text{Si:Al} = 2:1 =$ bissialitização

4µm

20KV

17

026

S

Kaolinite $\text{Si:Al} = 1:1 = \text{monossilitização}$

Fe não entra no mineral

Hidrólise parcial

Fe entra no mineral

Illite-smectite $\text{Si:Al} = 2:1 = \text{bissialitização}$

4µM

20KV

17

026

S

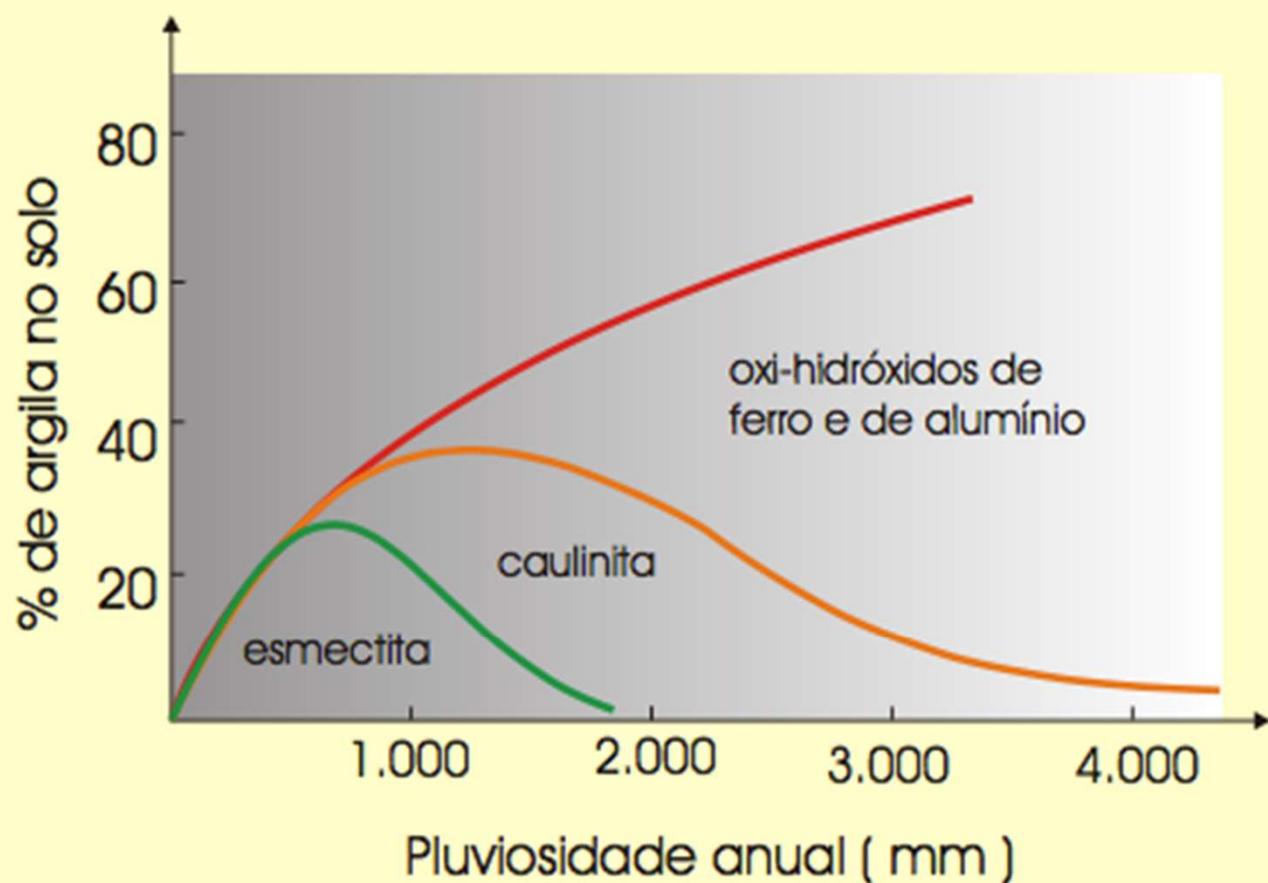


Fig. 8.18 A intensidade do intemperismo aumenta com a pluviosidade, resultando num solo com maior proporção de minerais secundários (fração argila). A cada faixa de pluviosidade corresponde uma composição preponderante dos minerais secundários.

Principais reações do intemperismo químico - **oxidação**

- Ocorre com todos os minerais que contêm elementos químicos passíveis de serem oxidados, como o ferro.
- Nos minerais primários, quase sempre o ferro se encontra no estado reduzido, pois os ambientes de formação de rochas duras normalmente não são oxidantes. Em contato com as águas de superfície, no entanto, quase sempre carregadas de oxigênio, esses elementos são oxidados, desestabilizando a estrutura mineral em que estavam.

Oxidação

Piroxênio rico em ferro, libera sílica e íons ferrosos para a solução.

Ferro ferroso é oxidado pelas moléculas de oxigênio, formando ferro férrico.

Ferro férrico combina com água precipitando produtos ferruginosos.

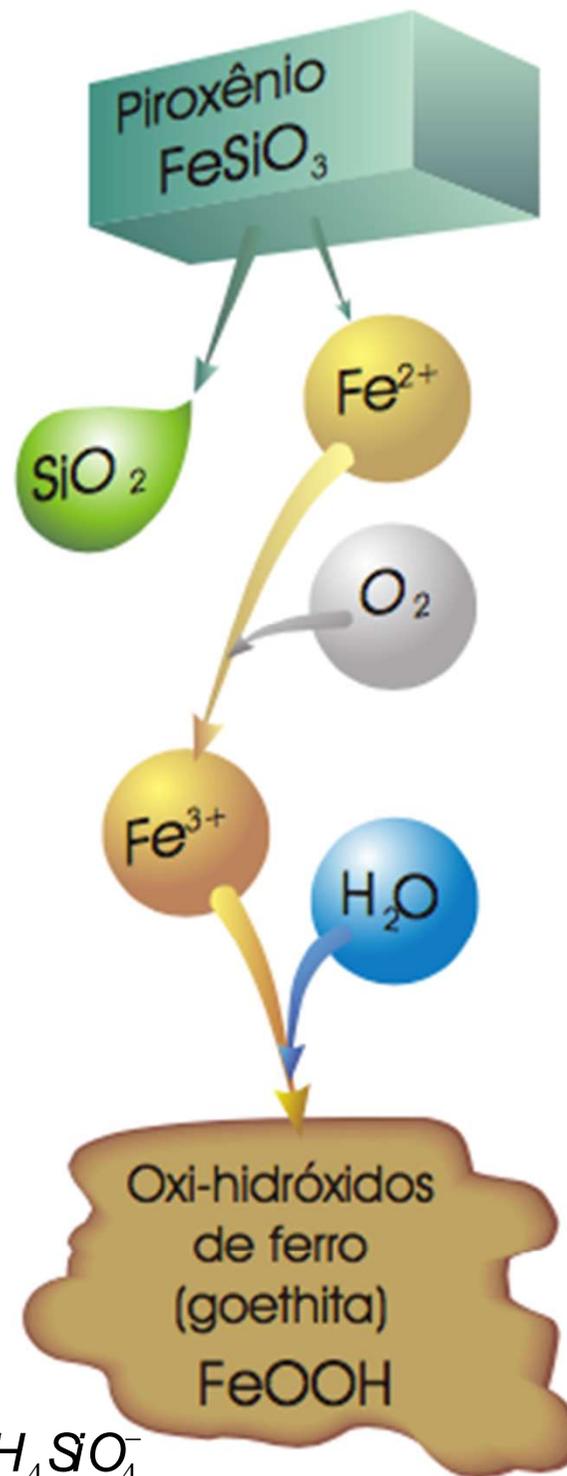
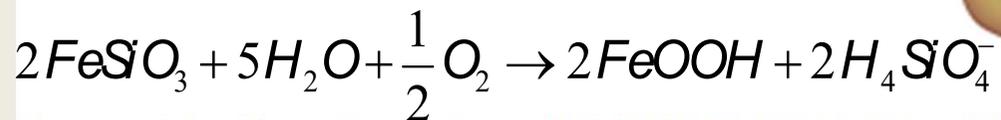
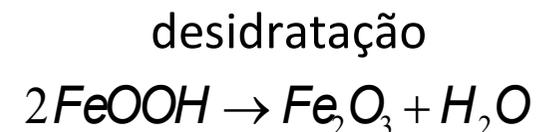


Fig. 8.11 A alteração intempérica de um mineral com Fe²⁺ resulta, por oxidação do Fe²⁺ para Fe³⁺, na formação de um oxi-hidróxido, a goethita.



Além de transformarem os minerais,
essas reações contribuem

Tanto para a composição química das águas
superficiais e subterrâneas

Que por sua vez contribuem para
outras transformações minerais

Ambiente superficial

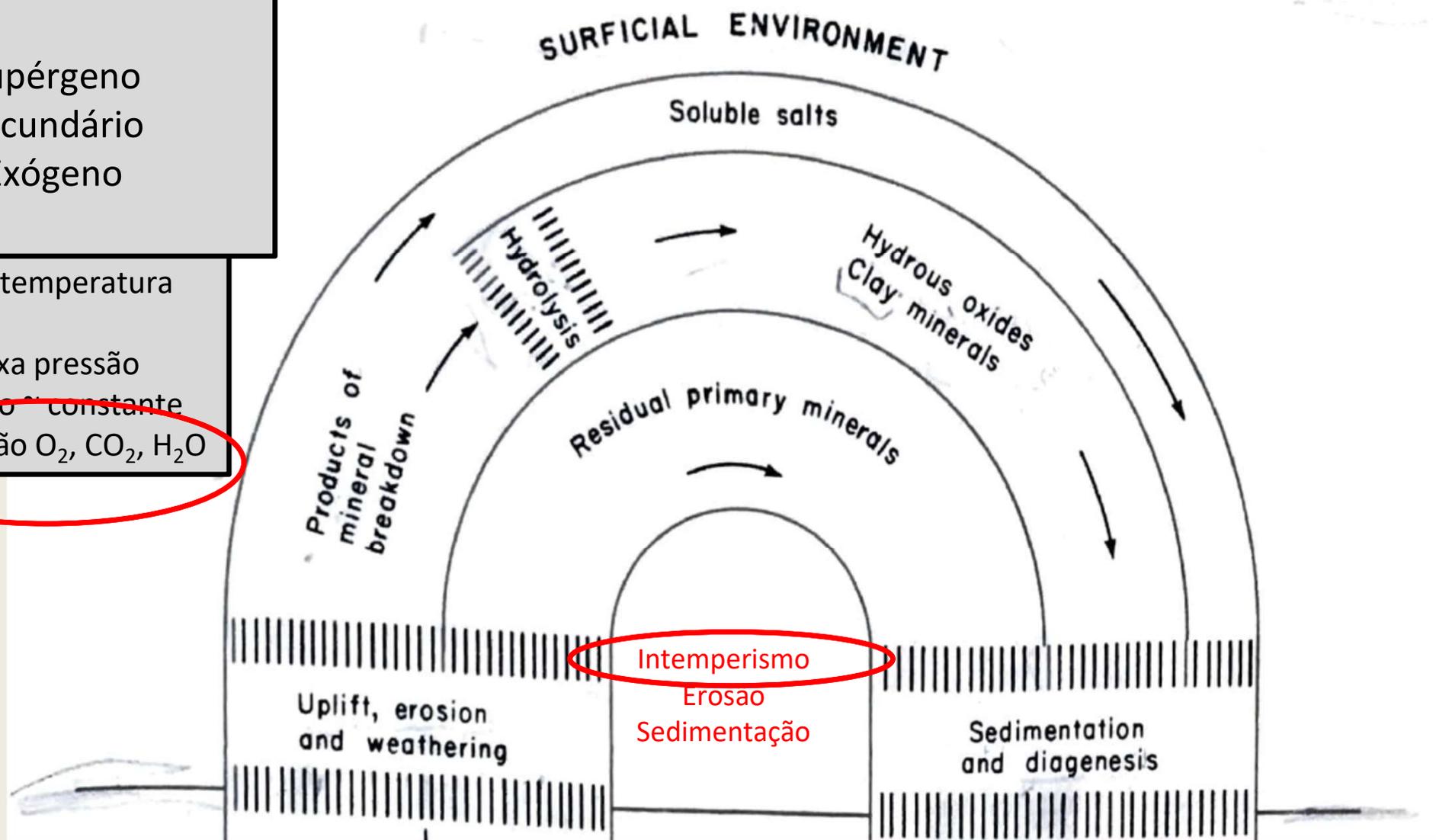
Supérgeno
Secundário
Exógeno

Baixa temperatura

Baixa pressão

Pressão ~ constante

Circulação O_2 , CO_2 , H_2O



Algumas questões da geoquímica:

- Quais são as condições ambientais para um determinado mineral se formar?
- Que minerais são estáveis em dado ambiente geoquímico?
- Que íons/moléculas são consumidos ou produzidos quando os minerais instáveis reagem em um ambiente geoquímico?

Fatores que controlam o intemperismo

- Material parental
- Clima
- Relevo
- Tempo
- Biológico (veremos em mais detalhe muitos exemplos)

Material parental

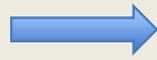


Fig. 8.15 Rochas diferentes expostas na mesma época (década de 1960), apresentando diferentes graus de alteração. A escultura, em mármore, encontra-se bastante alterada, enquanto o túmulo, em granito, está bem melhor preservado. Foto: M. C. M. de Toledo.

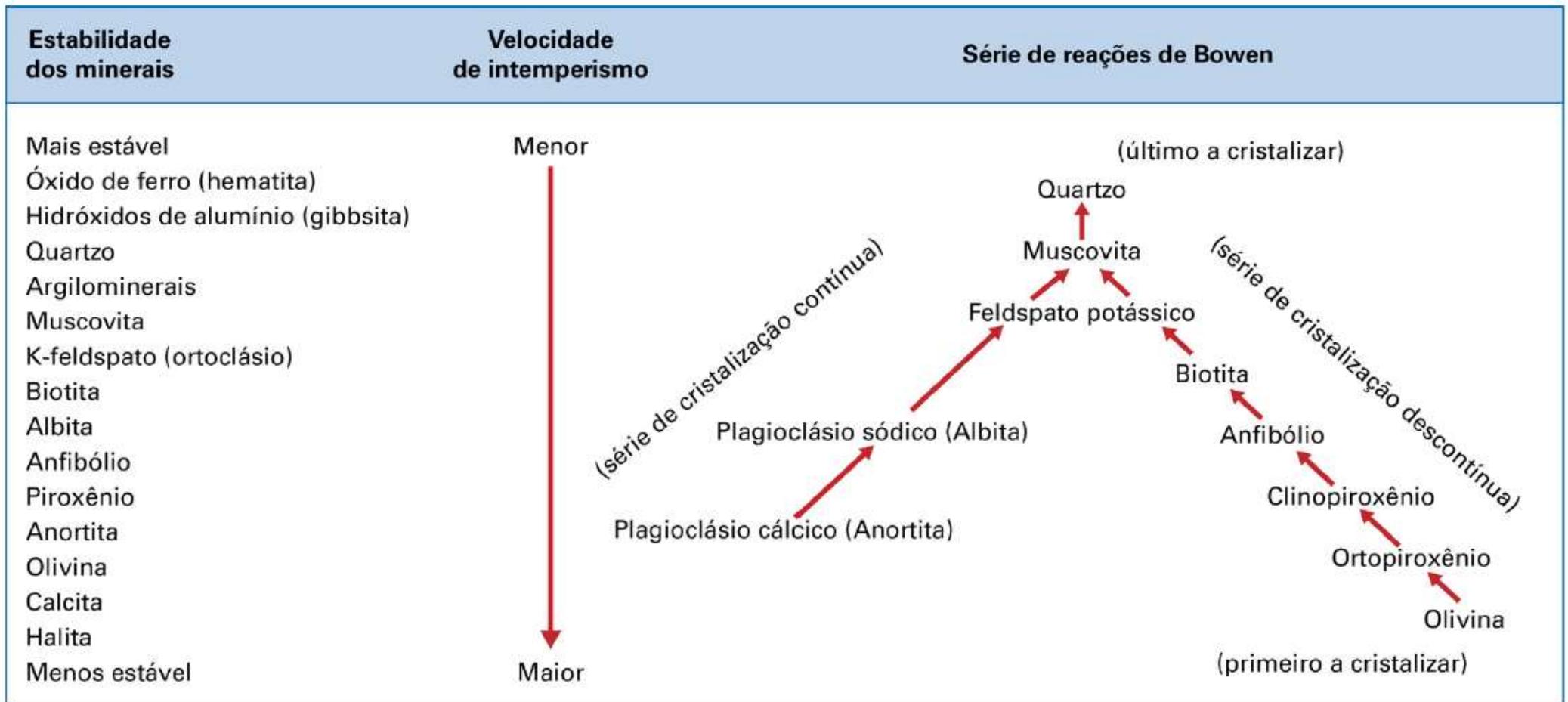
Material parental



Em relação a um ambiente



Determinada pela solubilidade do material e pela taxa de dissolução



Material parental

Minerais formados em T e P altas serão os primeiros a serem desestabilizados. Ex: Olivina, plagioclásio cálcico, piroxênio, que cristalizam no ambiente magmático ($T > 1.000 \text{ } ^\circ\text{C}$)

Minerais formados em temperaturas menores têm arranjo cristalóquímico mais resistente às condições de superfície, como. Ex: Quartzo, que cristaliza em $\sim 500 \text{ } ^\circ\text{C}$, é muito mais resistente que os outros minerais que cristalizam a temperaturas mais altas.

Material parental

Ex: Pia feita em rocha silicática (granito ou gnaisse, muito comuns para essa finalidade de utilização em construções).

As partes mais escurecidas dessas rochas são mais ricas em biotita (mica preta, com Fe em sua composição) → após alguns anos de uso, perdem o brilho e se tornam ásperas;

As partes mais claras da rocha, constituídas predominantemente por minerais mais resistentes (quartzo e feldspato).

Trata-se da reprodução, em ambiente doméstico e em curto intervalo de tempo, do que ocorre na natureza ao longo de milhões de anos.

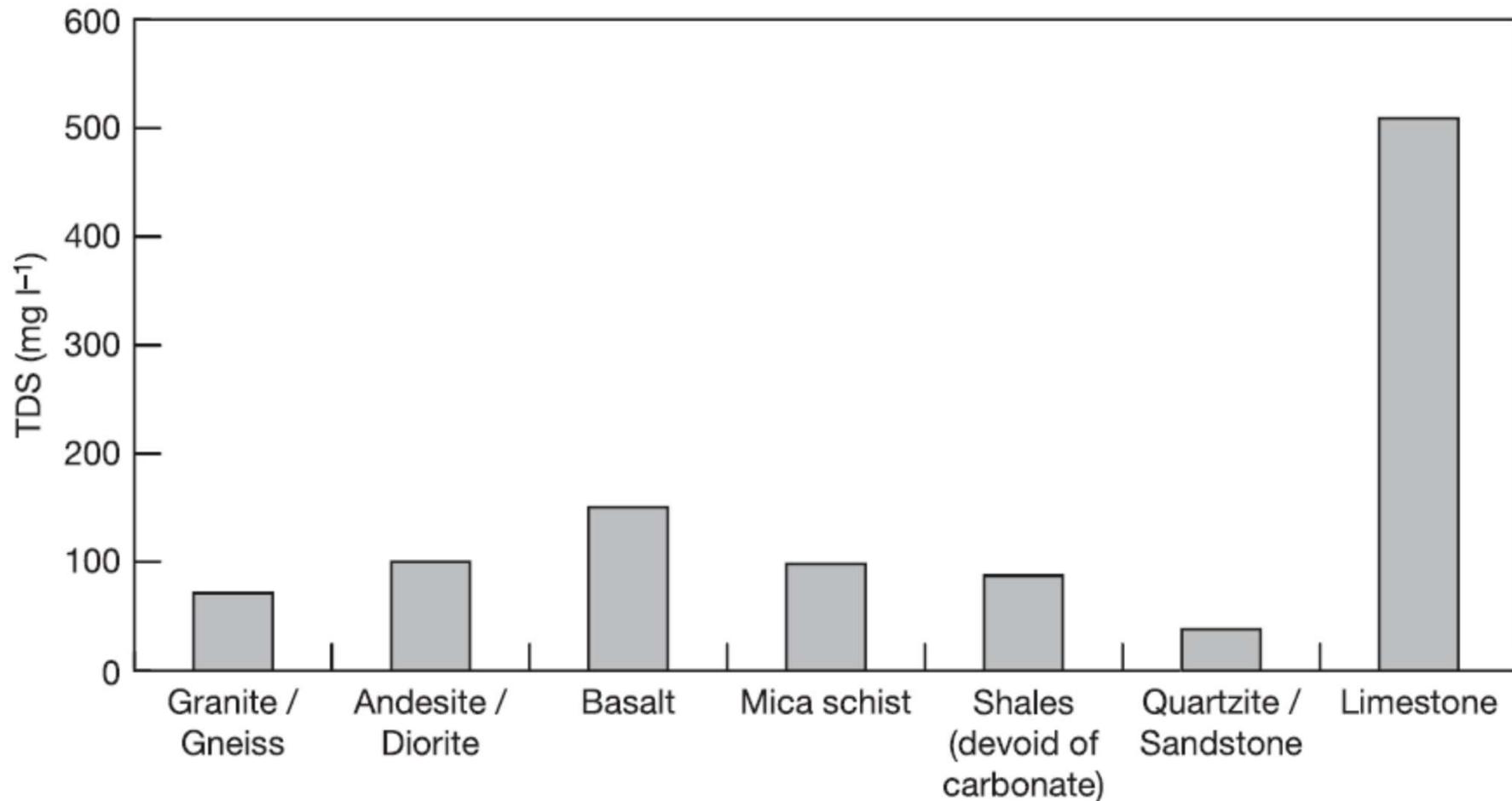
Material parental

- Tamanho dos grãos → superfície específica
quanto menores os grãos, maior área de contato (superfície específica) com eles terá a água, num mesmo volume, promovendo as reações químicas do intemperismo de forma mais eficiente
- Arranjo original dos grãos → porosidade e permeabilidade → acelerar ou retardar as reações

Porosidade = volume de vazios/volume total

Permeabilidade = comunicação entre os poros, permitindo a circulação de fluidos.

Material parental



Sólidos dissolvidos totais de águas subterrâneas que drenam as rochas. TDS corresponde a coma de SiO₂, principais cátion (Ca, Mag, Na, e K) e ânions (HCO₃, SO₄ e Cl)

Clima

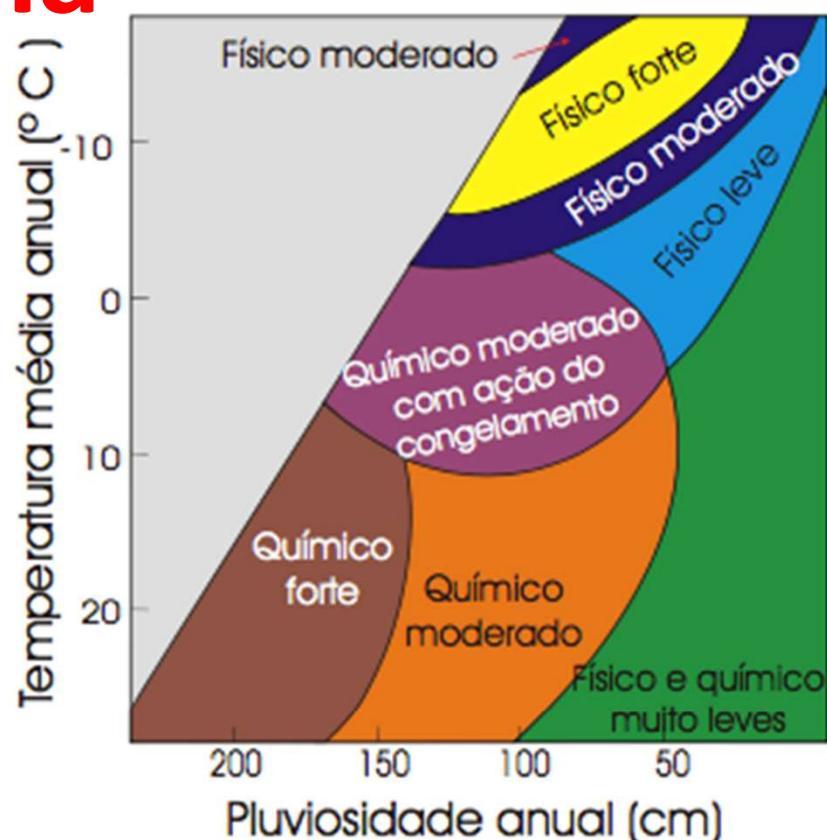


Fig. 8.17 O papel do clima é preponderante na determinação do tipo e eficácia do intemperismo. O intemperismo físico predomina nas áreas onde temperatura e pluviosidade são baixas. Ao contrário, temperatura e pluviosidade mais altas favorecem o intemperismo químico.

Os diferentes regimes de intemperismo em várias regiões do continente americano. →



Clima

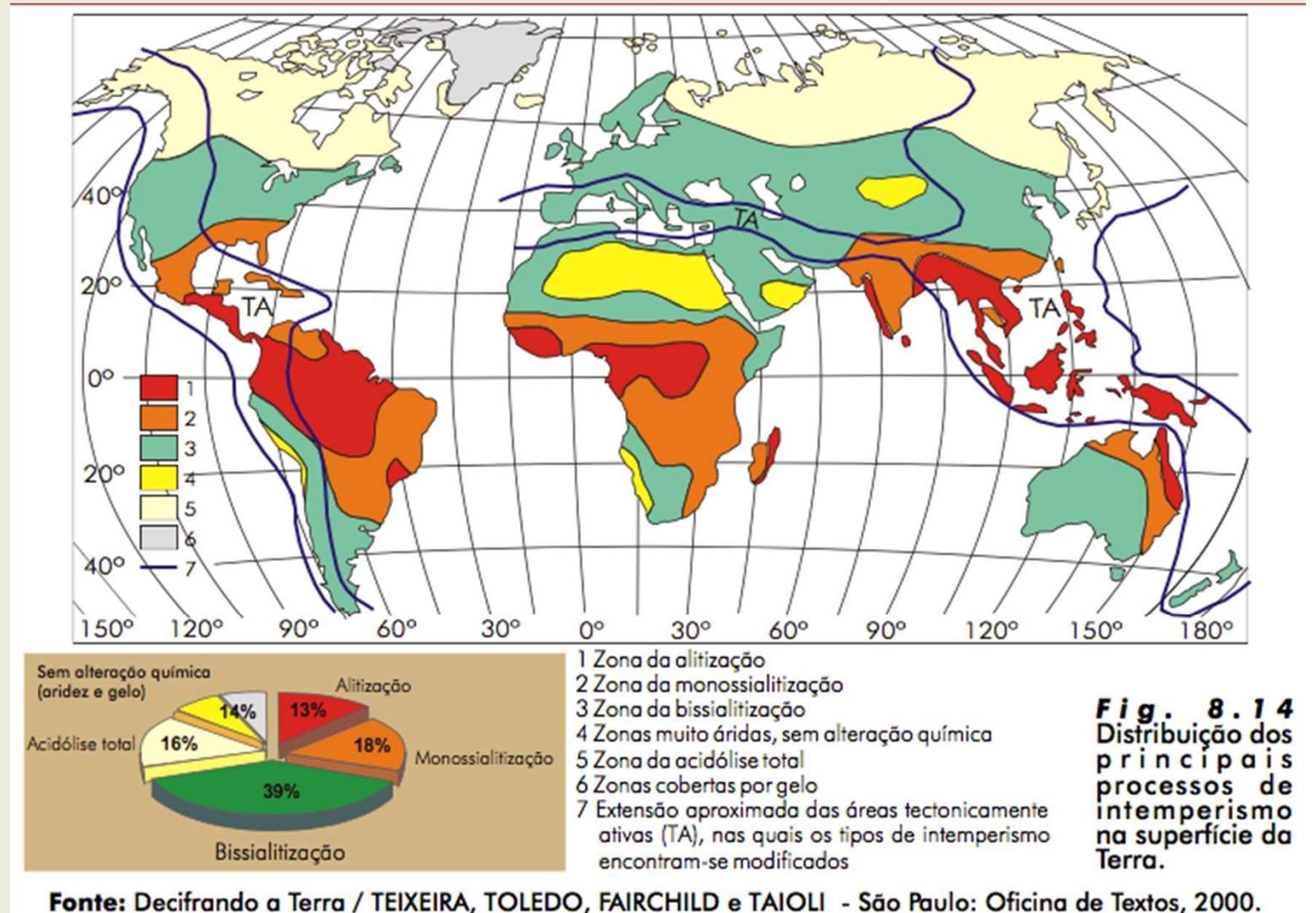


Fig. 8.18 A intensidade do intemperismo aumenta com a pluviosidade, resultando num solo com maior proporção de minerais secundários (fração argila). A cada faixa de pluviosidade corresponde uma composição preponderante dos minerais secundários.

Clima

Nas zonas com água líquida (climas que não incluem congelamento da água) – intemperismo químico é importante → mantos de intemperismo que poderão ser erodidos ou pedogeneizados antes da erosão que virá, obrigatoriamente, mais cedo ou mais tarde, no tempo geológico.

Na distribuição dos grandes processos geoquímicos de intemperismo ao redor do globo terrestre há evidente influência do zoneamento climático do globo terrestre.



Clima

Duas principais zonas podem ser destacadas nessa distribuição dos produtos de intemperismo no globo:

- Regiões **sem alteração química** (zonas polares e desertos, correspondentes a mais ou menos 14% da superfície dos continentes) e
- Regiões **com alteração química** (86% da superfície dos continentes)

Clima

- **Zonas frias** (16% da superfície continental), onde a vegetação é composta principalmente por líquens e coníferas, cujos resíduos se degradam lentamente. Os solos resultantes são ricos em quartzo e em matéria orgânica; estas zonas correspondem à zona circumpolar do hemisfério norte.
- **Zonas equatoriais** (13,5% da superfície continental), caracterizadas por precipitação abundante, superior a 1.500 mm por ano, e vegetação exuberante. A associação mineral característica é de oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio (goethita e gibbsita, respectivamente).
- **Zonas tropicais** (18% da superfície continental), no domínio tropical subúmido, com precipitação superior a 500 mm e temperatura média anual superior a 15 °C. Os principais minerais formados são a caolinita e os oxi-hidróxidos de ferro. Aí, a gibbsita só se forma se houver excesso de Al em relação ao Si; caso contrário, todo o Al entra na constituição do argilomineral caolinita.
- **Zonas temperadas** (39% da superfície continental), onde a alteração e lixiviação são pouco intensas, resultando na formação de argilominerais ricos em silício e em parte dos cátions alcalinos e alcalino-terrosos presentes nas rochas originais; estes argilominerais podem encerrar o ferro em sua estrutura cristalina, não permitindo que este elemento forme seus óxidos ou oxi-hidróxidos e não ocorrendo, portanto, as cores avermelhadas, alaranjadas, amareladas e castanhas dos materiais intemperizados das zonas tropicais e equatoriais, conforme já foi mencionado.

Clima

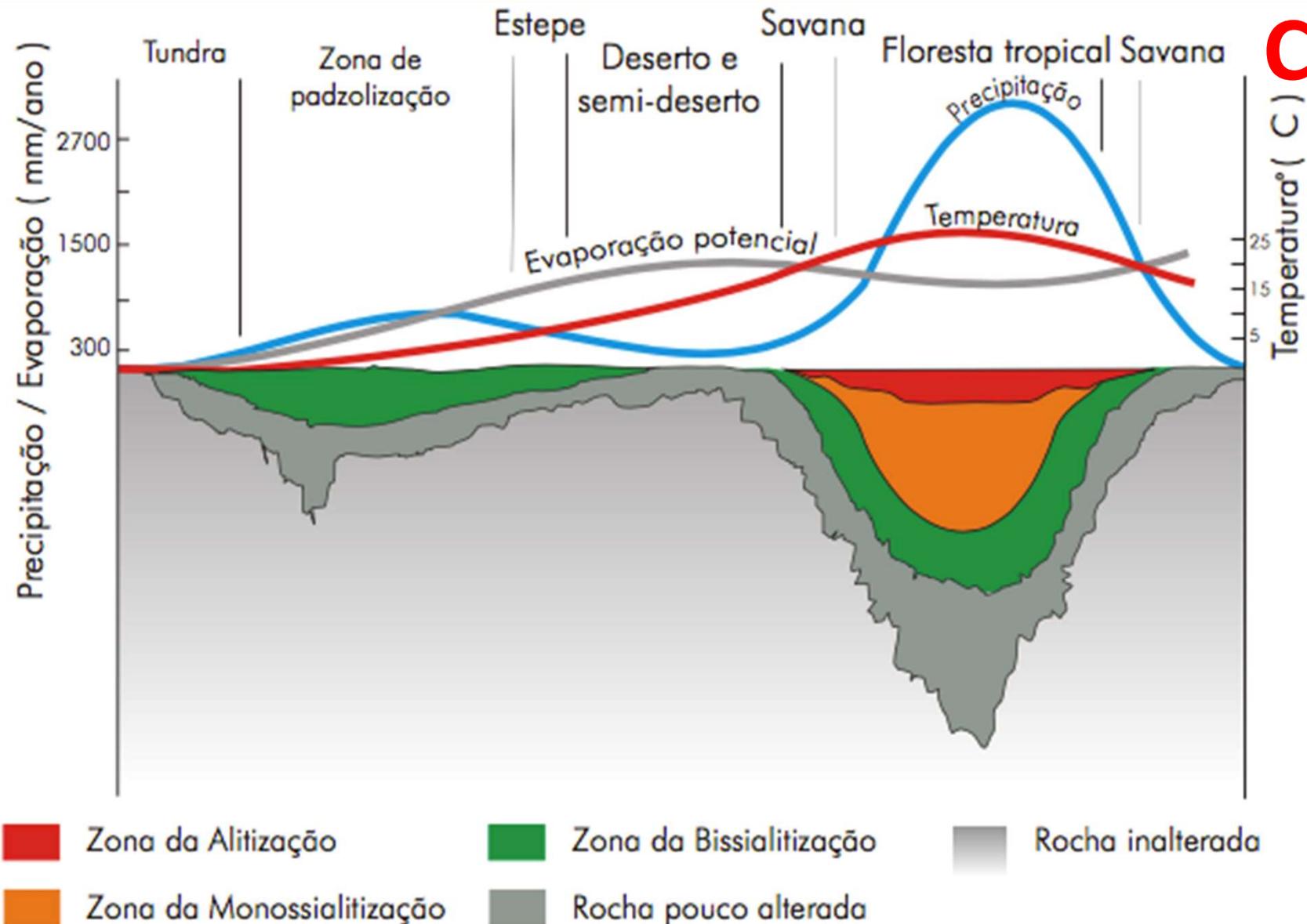


Fig. 8.19 O tipo e a intensidade do intemperismo podem ser relacionados com a temperatura, pluviosidade e vegetação. O intemperismo químico é mais pronunciado nos trópicos. Nas regiões polares e nos desertos, o intemperismo é mínimo.

Clima

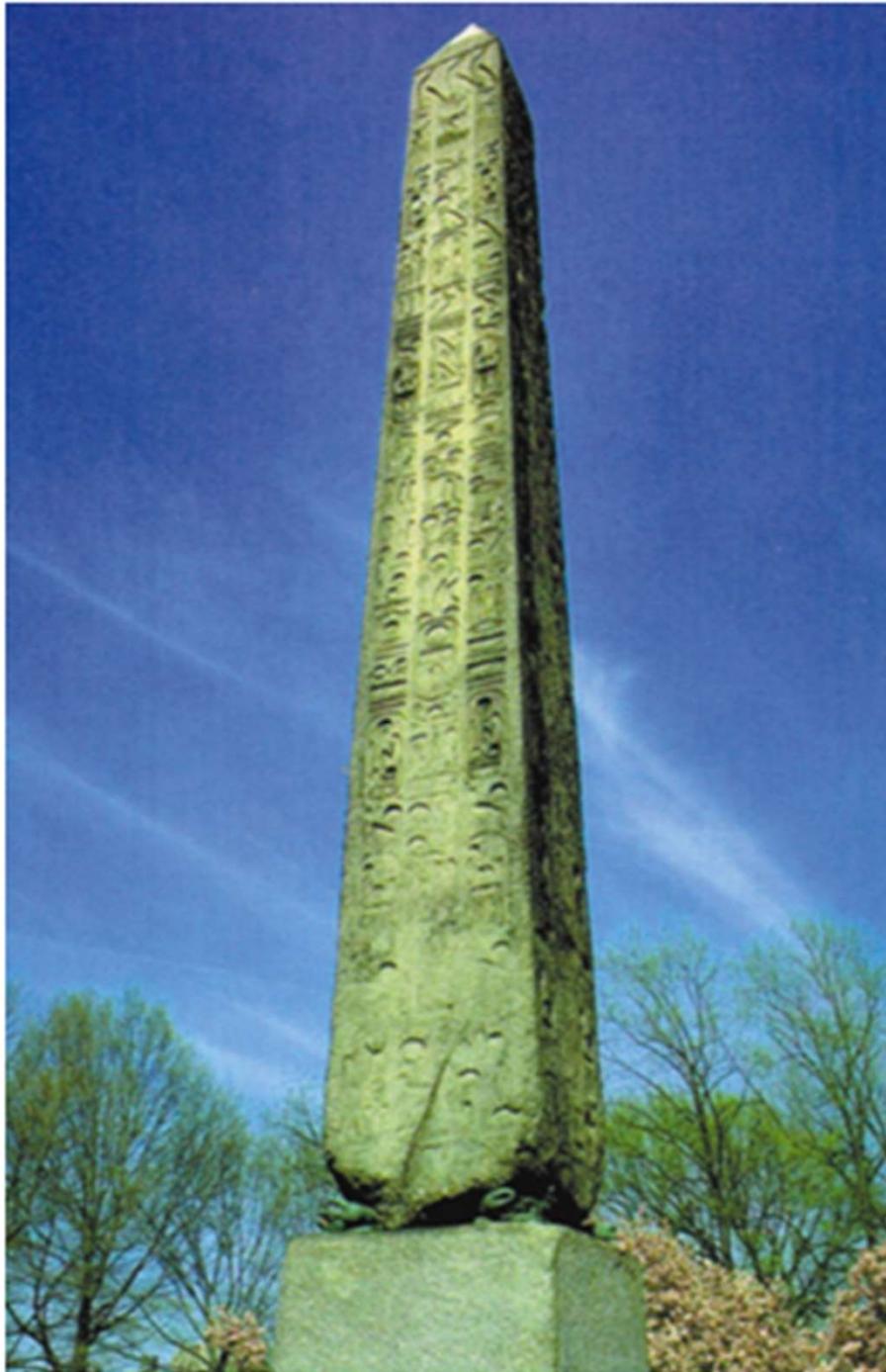


Fig. 8.20 A agulha de Cleópatra, um obelisco egípcio de granito, sofreu alteração mais intensa em 75 anos em Nova Iorque do que em 35 séculos no Egito, sob clima muito mais seco. Foto: M. C. M. de Toledo.

Relevo

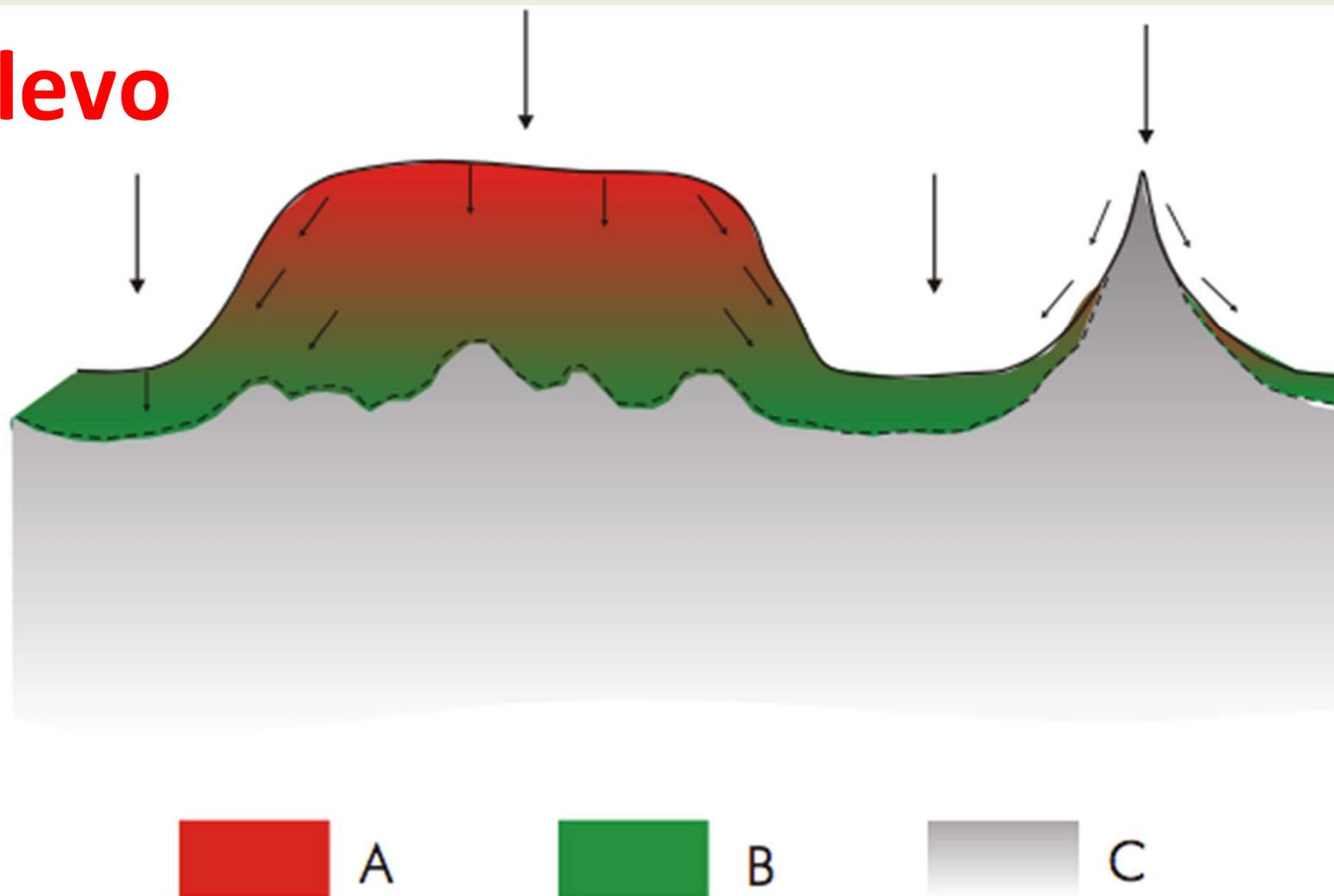


Fig. 8.21 Influência da topografia na intensidade do intemperismo.

Setor A: Boa infiltração e boa drenagem favorecem o intemperismo químico.

Setor B: Boa infiltração e má drenagem desfavorecem o intemperismo químico.

Setor C: Má infiltração e má drenagem desfavorecem o intemperismo químico e favorecem a erosão.

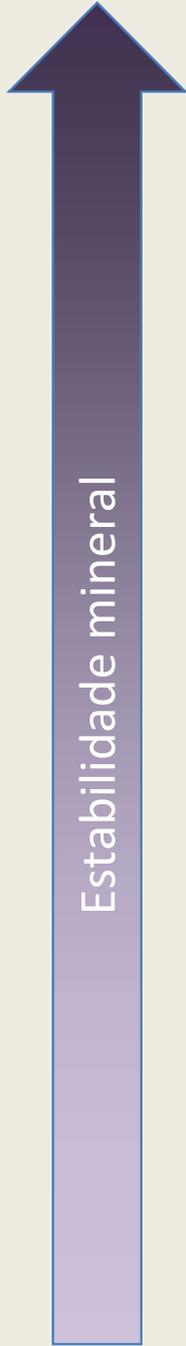
- Se houver bastante água e a topografia for tal que permita o livre movimento das águas em direção às partes mais baixas, todos os elementos solúveis serão eliminados, restando apenas os elementos menos solúveis naquelas condições de ambiente.
- Se, ao contrário, houver algum impedimento para a drenagem, o que ocorre geralmente em regiões baixas, onde as águas não têm para onde correr, ou seja, em locais estagnantes, nem os elementos químicos mais solúveis poderão ser eliminados.

Tempo → perfil de alteração

O tempo age permitindo que o progresso do intemperismo aprofunde os perfis e que os materiais intemperizados evoluam em sua organização

Fatores que influenciam o intemperismo e a erosão

Rocha



Estabilidade mineral

Temperatura



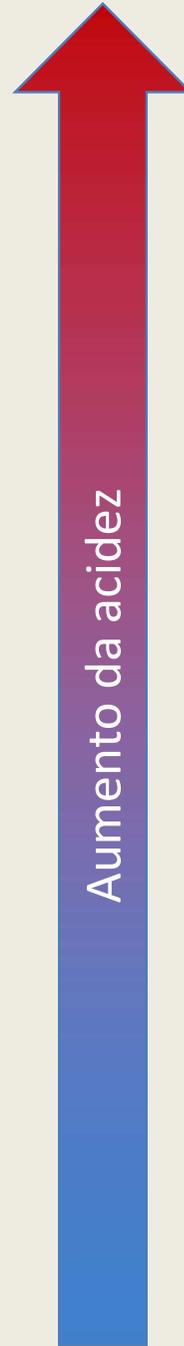
Aumento da temperatura

Volume de precipitação



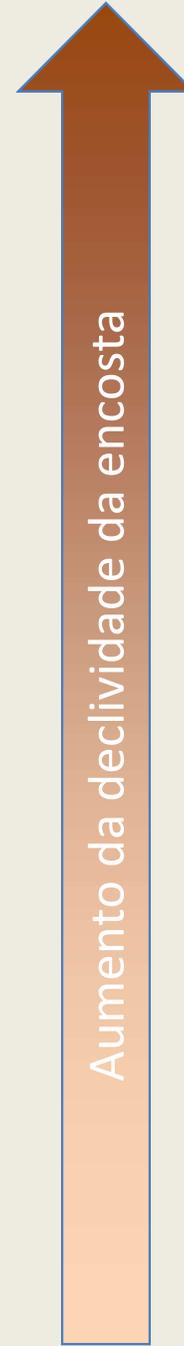
Aumento do volume de precipitação

Acidez da chuva



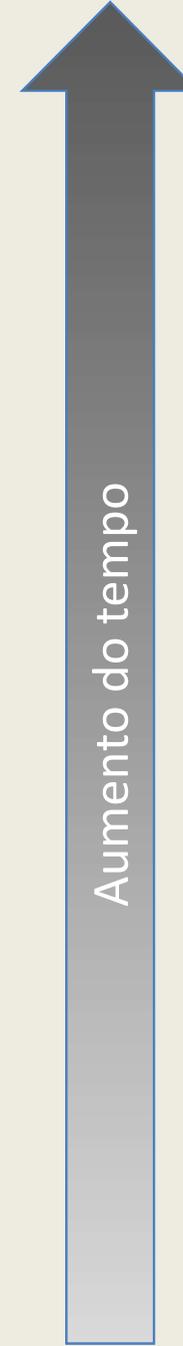
Aumento da acidez

Topografia



Aumento da declividade da encosta

Duração do intemperismo



Aumento do tempo

Fatores que influenciam o intemperismo e a erosão

Rocha

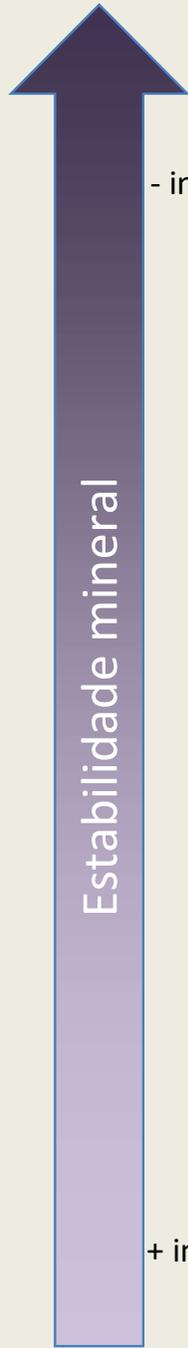
Temperatura

Volume de precipitação

Acidez da chuva

Topografia

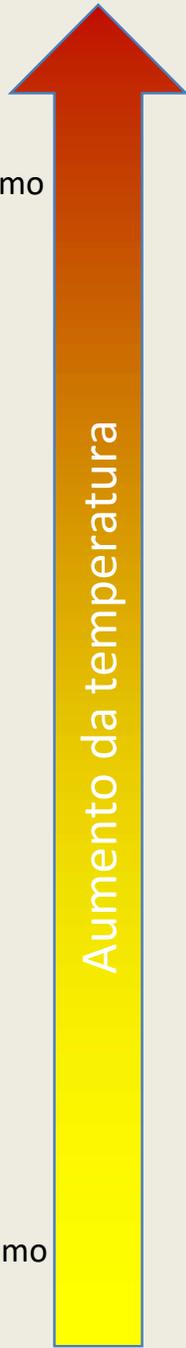
Duração do intemperismo



Estabilidade mineral

- intemperismo

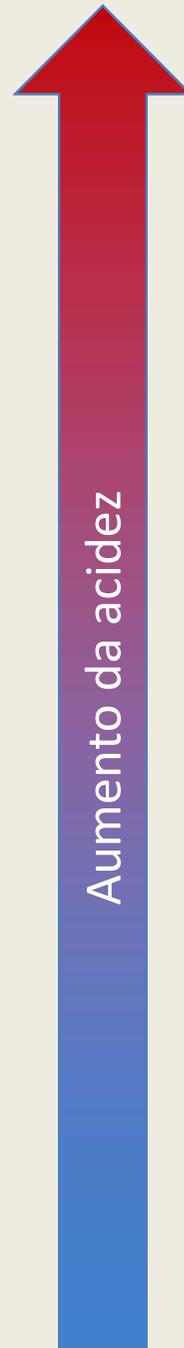
+ intemperismo



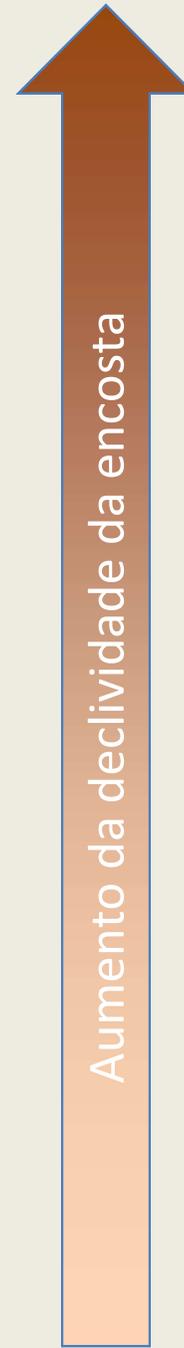
Aumento da temperatura



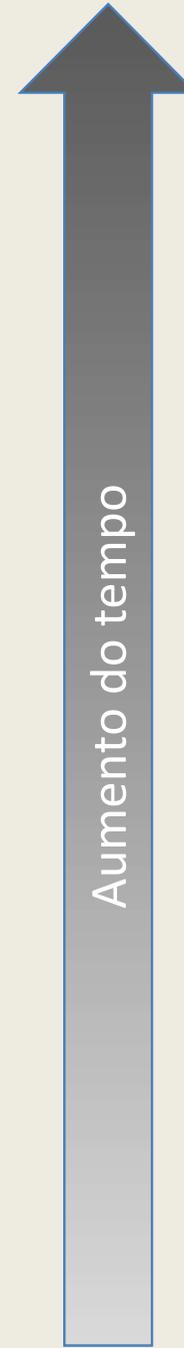
Aumento do volume de precipitação



Aumento da acidez



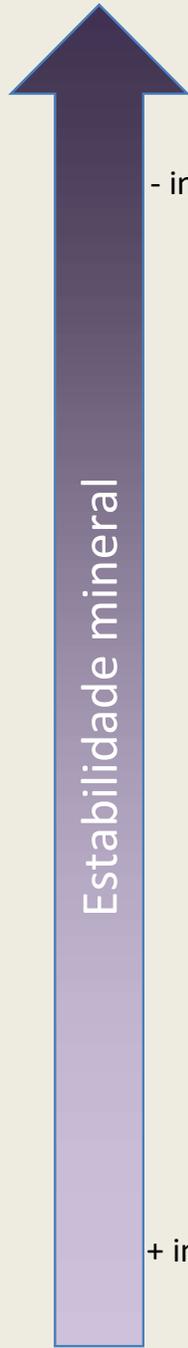
Aumento da declividade da encosta



Aumento do tempo

Fatores que influenciam o intemperismo e a erosão

Rocha

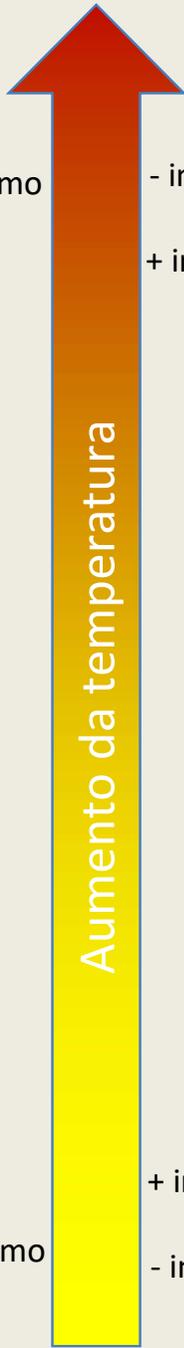


Estabilidade mineral

- intemperismo

+ intemperismo

Temperatura



Aumento da temperatura

- intemperismo físico
+ intemperismo químico

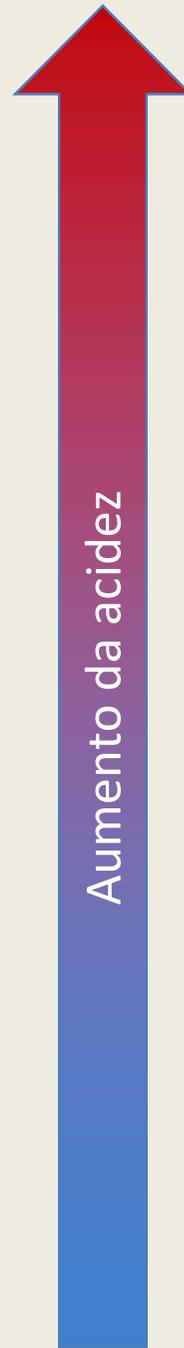
+ intemperismo físico
- intemperismo químico

Volume de precipitação



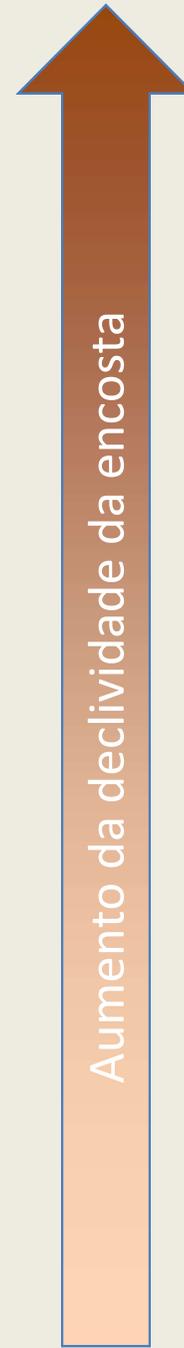
Aumento do volume de precipitação

Acidez da chuva



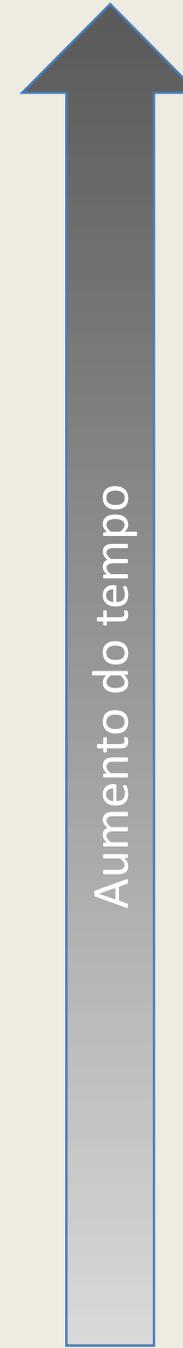
Aumento da acidez

Topografia



Aumento da declividade da encosta

Duração do intemperismo



Aumento do tempo

Fatores que influenciam o intemperismo e a erosão

Rocha

Temperatura

Volume de precipitação

Acidez da chuva

Topografia

Duração do intemperismo



Estabilidade mineral

- intemperismo

+ intemperismo



Aumento da temperatura

- intemperismo físico
+ intemperismo químico

+ intemperismo físico
- intemperismo químico



Aumento do volume de precipitação

+ intemperismo físico e químico

- intemperismo físico e químico



Aumento da acidez

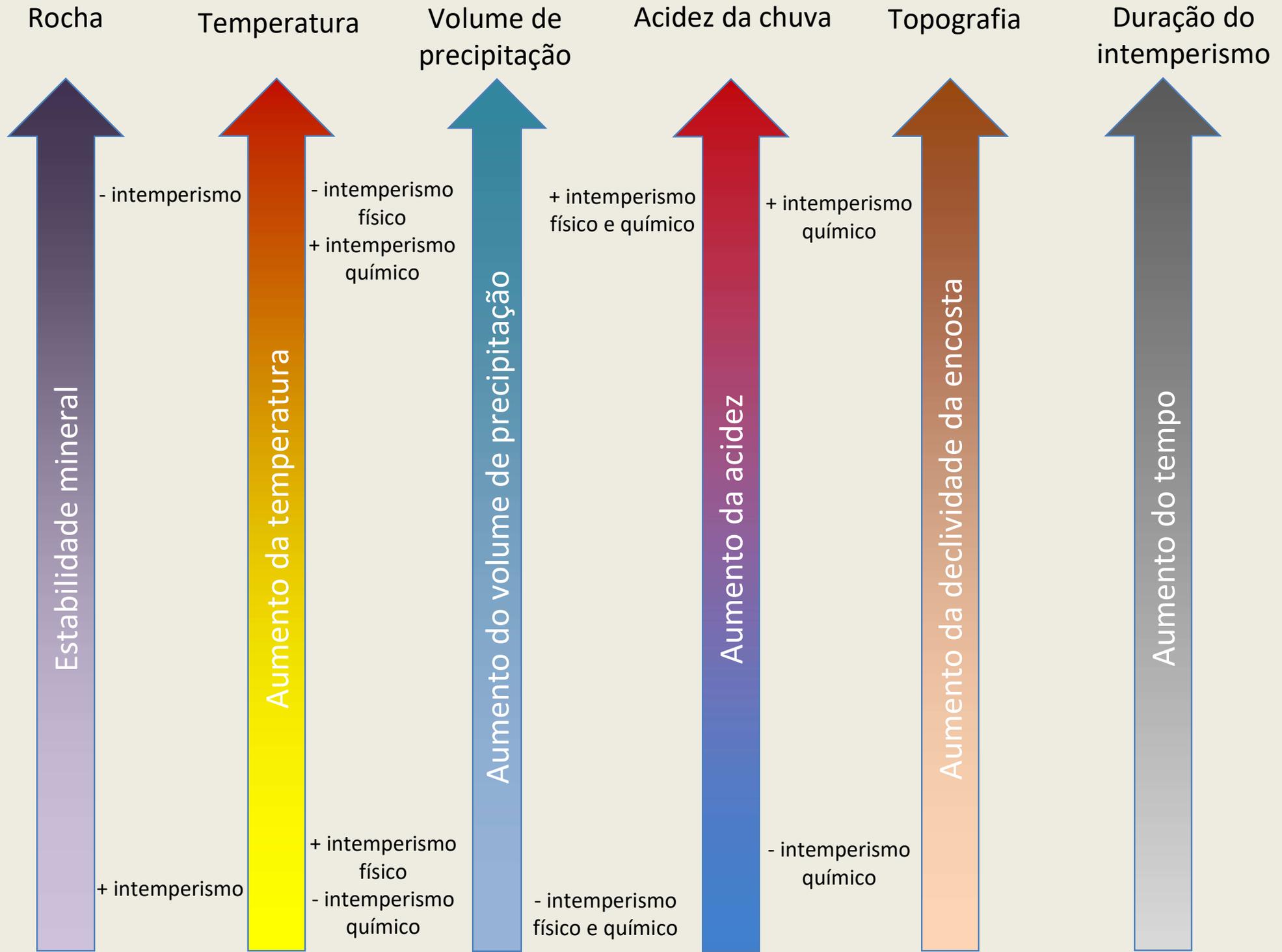


Aumento da declividade da encosta

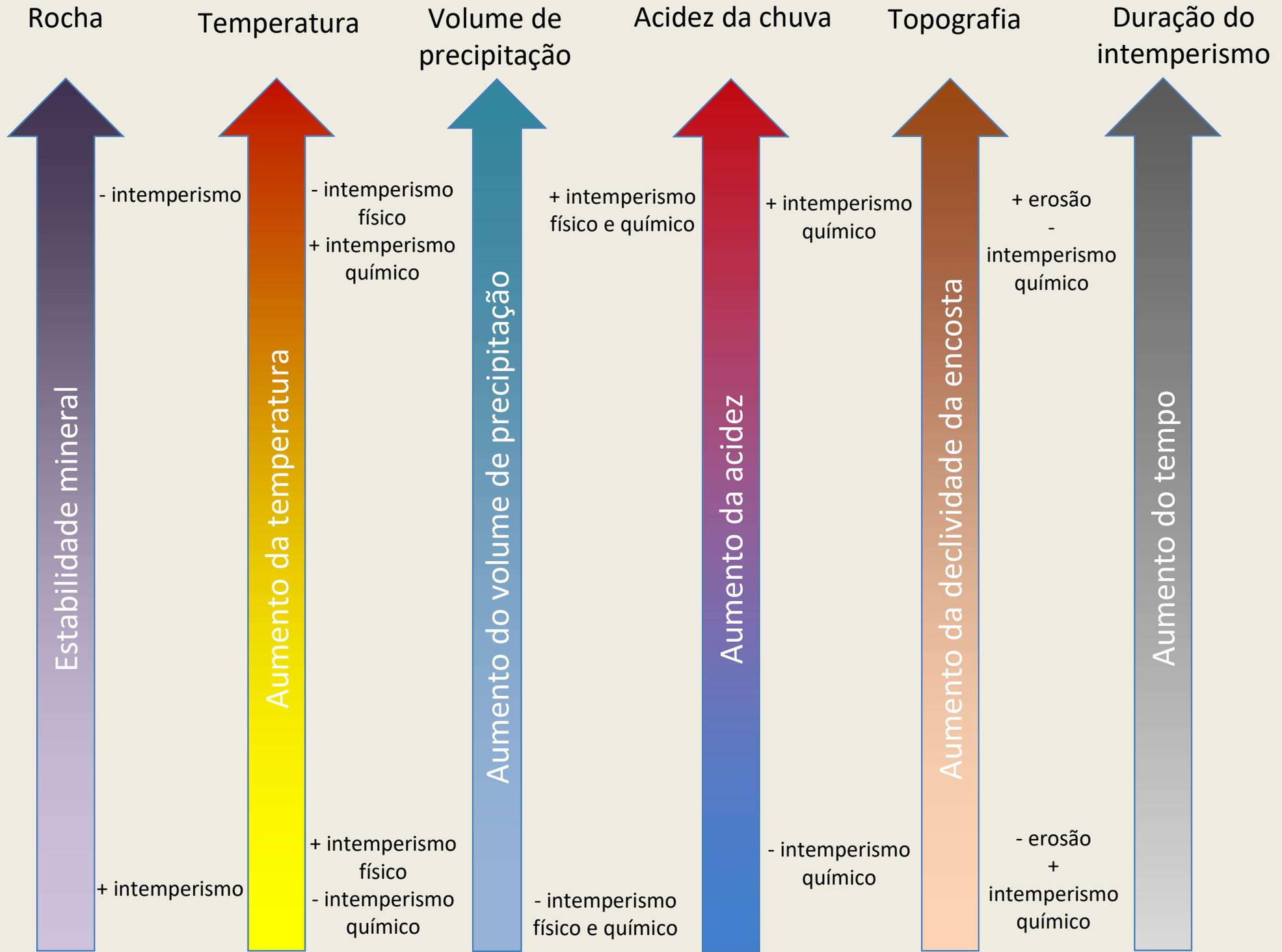


Aumento do tempo

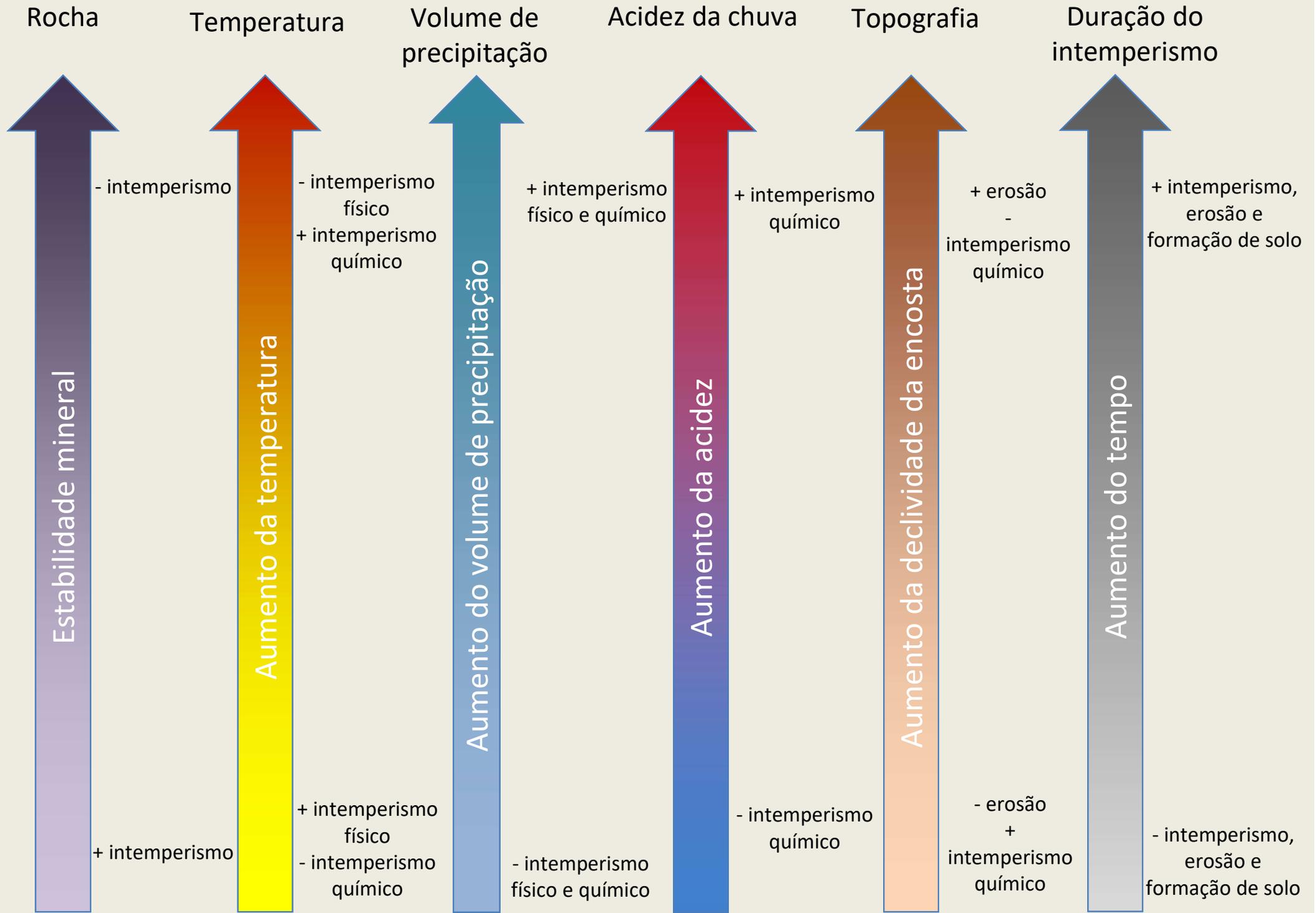
Fatores que influenciam o intemperismo e a erosão



Fatores que influenciam o intemperismo e a erosão



Fatores que influenciam o intemperismo e a erosão



Rocha

Temperatura

Volume de precipitação

Acidez da chuva

Topografia

Duração do intemperismo

Estabilidade mineral

Aumento da temperatura

Aumento do volume de precipitação

Aumento da acidez

Aumento da declividade da encosta

Aumento do tempo

- intemperismo

- intemperismo físico
+ intemperismo químico

+ intemperismo físico e químico

+ intemperismo químico

+ erosão
- intemperismo químico

+ intemperismo, erosão e formação de solo

+ intemperismo

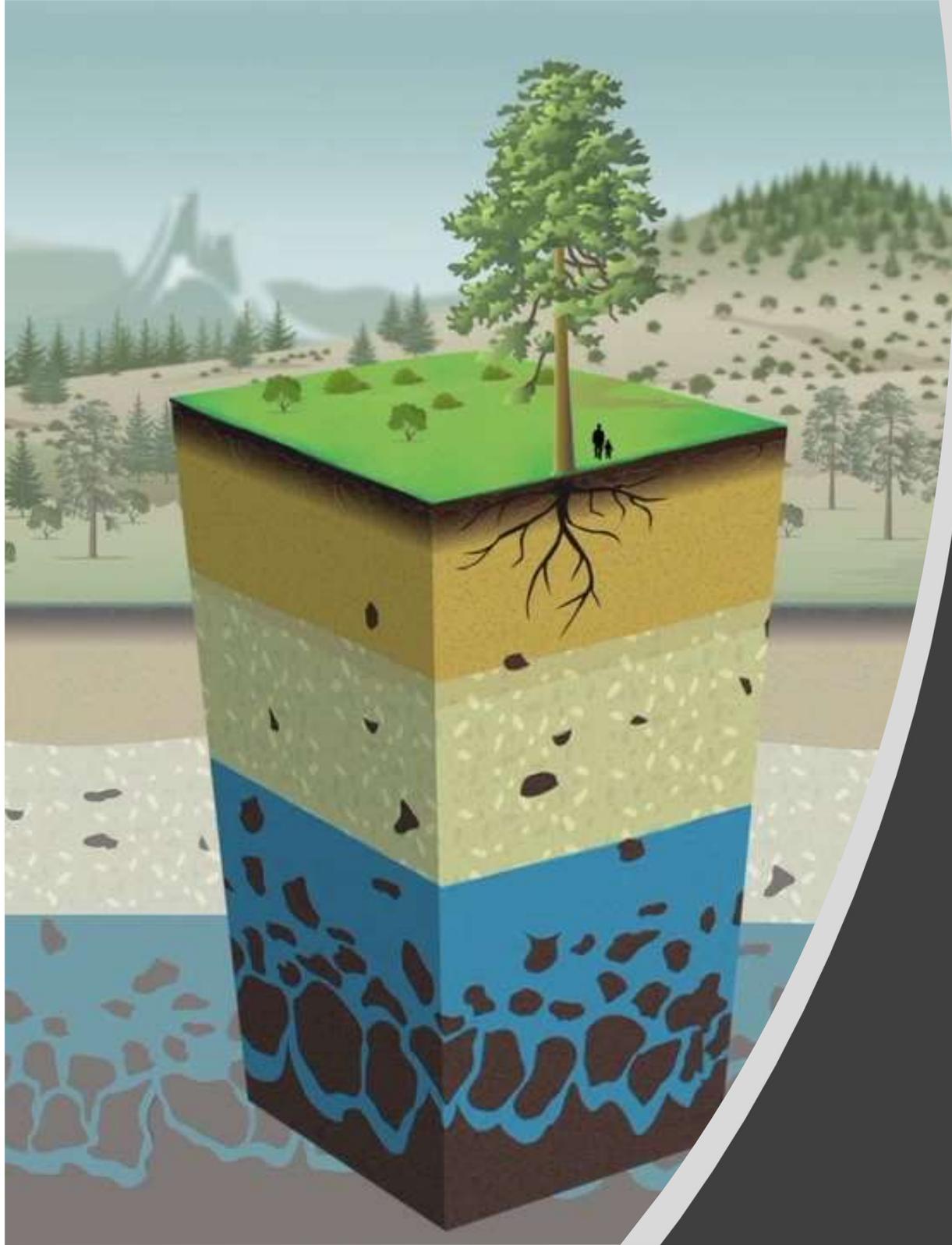
+ intemperismo físico
- intemperismo químico

- intemperismo físico e químico

- intemperismo químico

- erosão
+ intemperismo químico

- intemperismo, erosão e formação de solo

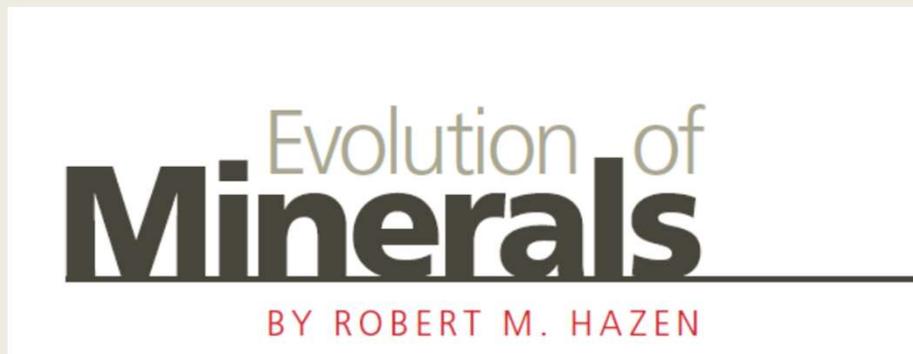


E na próxima aula

O que são solos?

O que é a zona crítica?

Leitura complementar:



Looking at the mineral kingdom through the lens of deep time leads to a startling conclusion: most mineral species owe their existence to life



Vejam o vídeo também



Black Earth



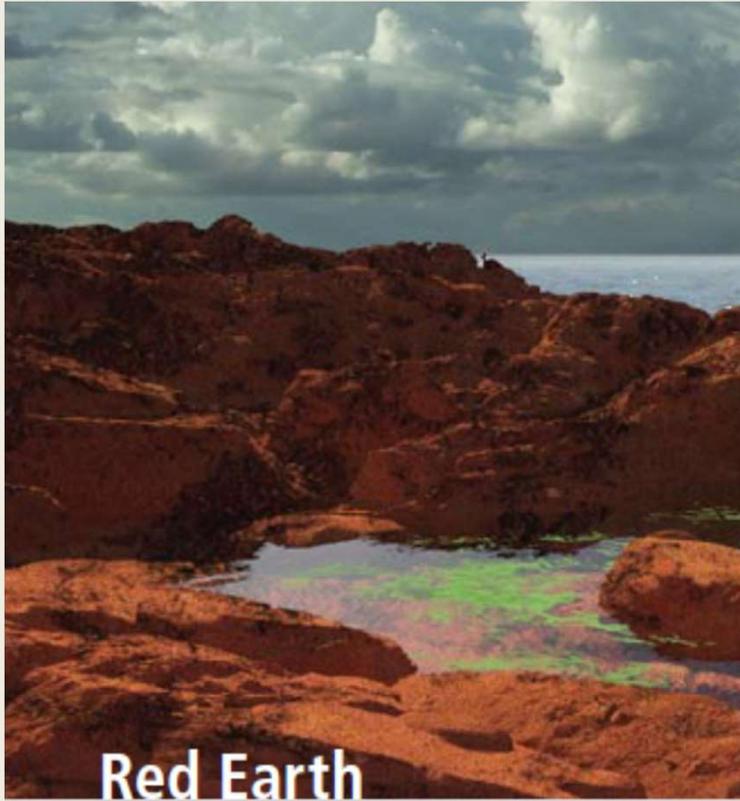


Red Earth



Black Earth





Red Earth

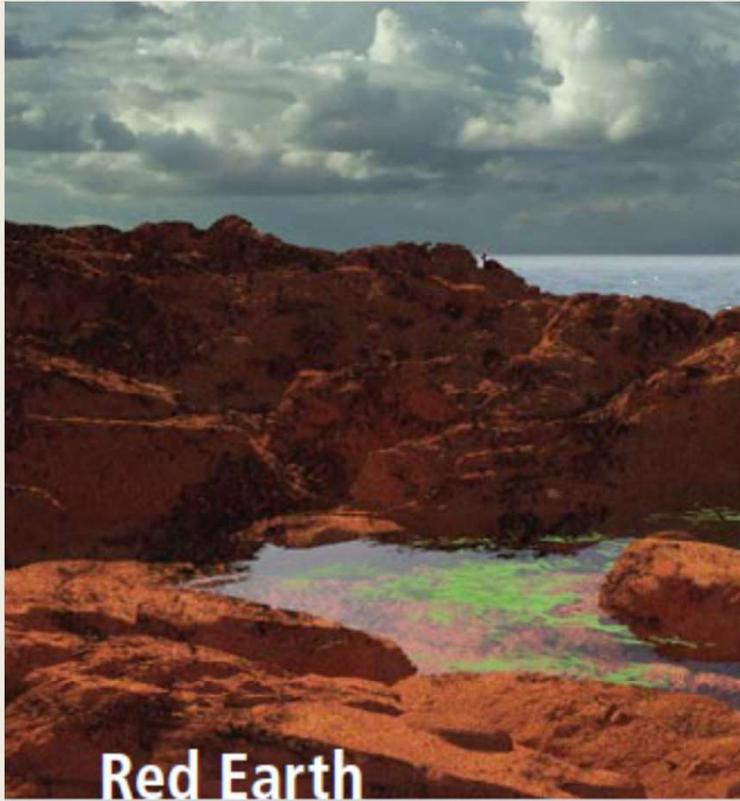


White Earth



Black Earth





Red Earth



White Earth



Black Earth

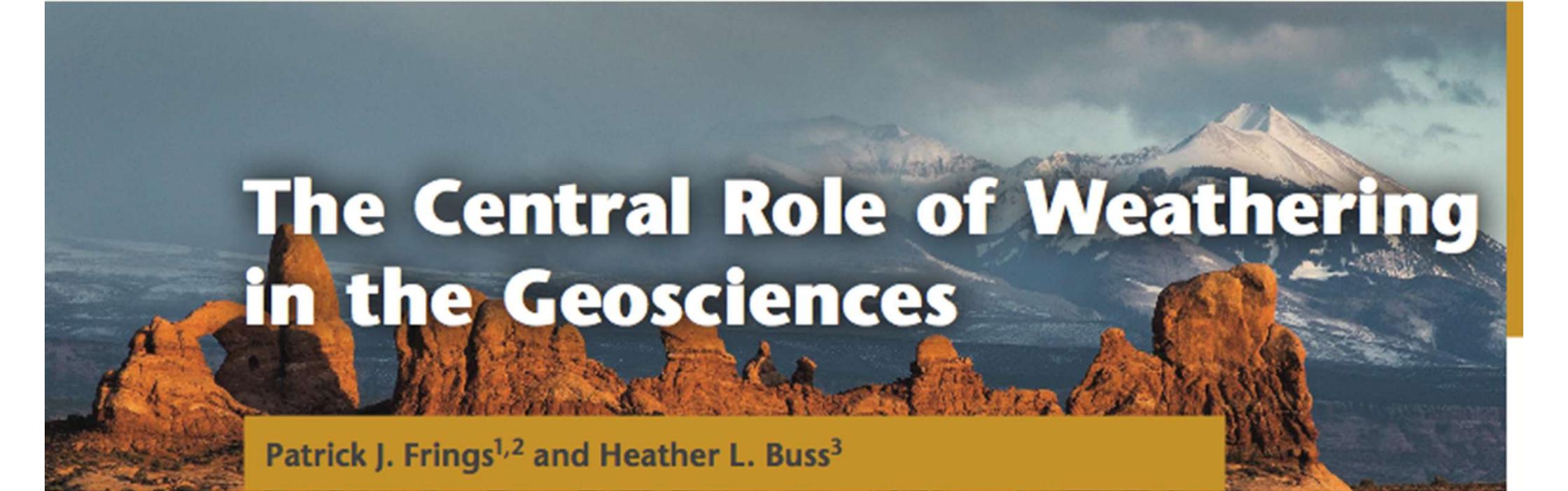


Green Earth

Discussão em grupo 1

Intemperismo

Escolher 1 artigo apenas



The Central Role of Weathering in the Geosciences

Patrick J. Frings^{1,2} and Heather L. Buss³

1811-5209/19/0015-0229\$2.50 DOI: 10.2138/gselements.15.4.229

Weathering is the chemical and physical alteration of rock at the surface of the Earth, but its importance is felt well beyond the rock itself. The repercussions of weathering echo throughout the Earth sciences...

This article outlines how weathering interacts with various geoscience disciplines across a huge range of scales, both spatial and temporal.

It traces the evolution of scientific thinking about weathering and man's impact on weathering itself—for better and for worse.

Keywords: weathering, Earth system science, nutrient cycling, landforms, enhanced weathering, planetary habitability



Combating Climate Change Through Enhanced Weathering of Agricultural Soils

M. Grace Andrews¹ and Lyla L. Taylor²

1811-5209/19/0015-0253\$2.50 DOI: 10.2138/gselements.15.4.253

Rising levels of atmospheric carbon dioxide (CO₂) are driving increases in global temperatures.

Enhanced weathering of silicate rocks is a CO₂ removal technology that could help mitigate anthropogenic climate change.

This article summarizes the research into enhanced weathering and the uncertainties of enhanced weathering due to the key differences with natural weathering, as well as future research directions.

Keywords: enhanced weathering, chemical weathering, climate change, carbon dioxide removal technologies, negative emission technologies, agriculture



How Plants Enhance Weathering and How Weathering is Important to Plants

Stephen Porder¹

1811-5209/19/0015-0241\$2.50 DOI: 10.2138/gselements.15.4.241

Since land plants emerged from swampy coastlines over 400 million years ago, they have played a fundamental role in shaping the Earth system.

... for many terrestrial ecosystems, weathering ultimately constrains primary production (carbon uptake) and decomposition (carbon loss). These constraints are most acute in agricultural systems, which rely on mined fertilizer rather than the recycling of organic material to maintain production. Humans now mine similar amounts of some elements as weather out of rocks globally. This increase in supply has myriad environmental consequences.

Keywords: weathering, plants, phosphorus, roots, nutrient limitation

The background of the slide features a composite image. On the left, a bright yellow planet is partially visible, glowing against the dark space. On the right, the Earth is shown from space, with its blue oceans and green continents. The background is filled with numerous small, distant stars.

The Goldilocks Planet? How Silicate Weathering Maintains Earth “Just Right”

James F. Kasting¹

1811-5209/19/0015-0235\$2.50 DOI: 10.2138/gselements.15.4.235

Earth’s climate is buffered over long timescales by a negative feedback between atmospheric CO₂ level and surface temperature. The rate of silicate weathering slows as the climate cools, causing CO₂ to increase and warming the surface through the greenhouse effect. This buffering system has kept liquid water stable at Earth’s surface... A similar stabilizing feedback is predicted to occur on rocky planets orbiting other stars if they share analogous properties with Earth, most importantly an adequate abundance of water and a mechanism for recycling carbonate rocks into CO₂ ... Most silicate weathering is thought to occur on the continents today, but sea floor weathering (and reverse weathering) may have been equally important earlier in Earth’s history.

Keywords: carbonate–silicate cycle, silicate weathering, habitable zone, climate limit cycling, Snowball Earth, sea floor weathering, reverse weathering.