

Geoquímica dos regolitos tropicais: processos e aplicações

Alfredo Borges De-Campos

Departamento de Geologia e Recursos Naturais

Instituto de Geociências – UNICAMP

Campinas, 27 de agosto de 2020



UNICAMP



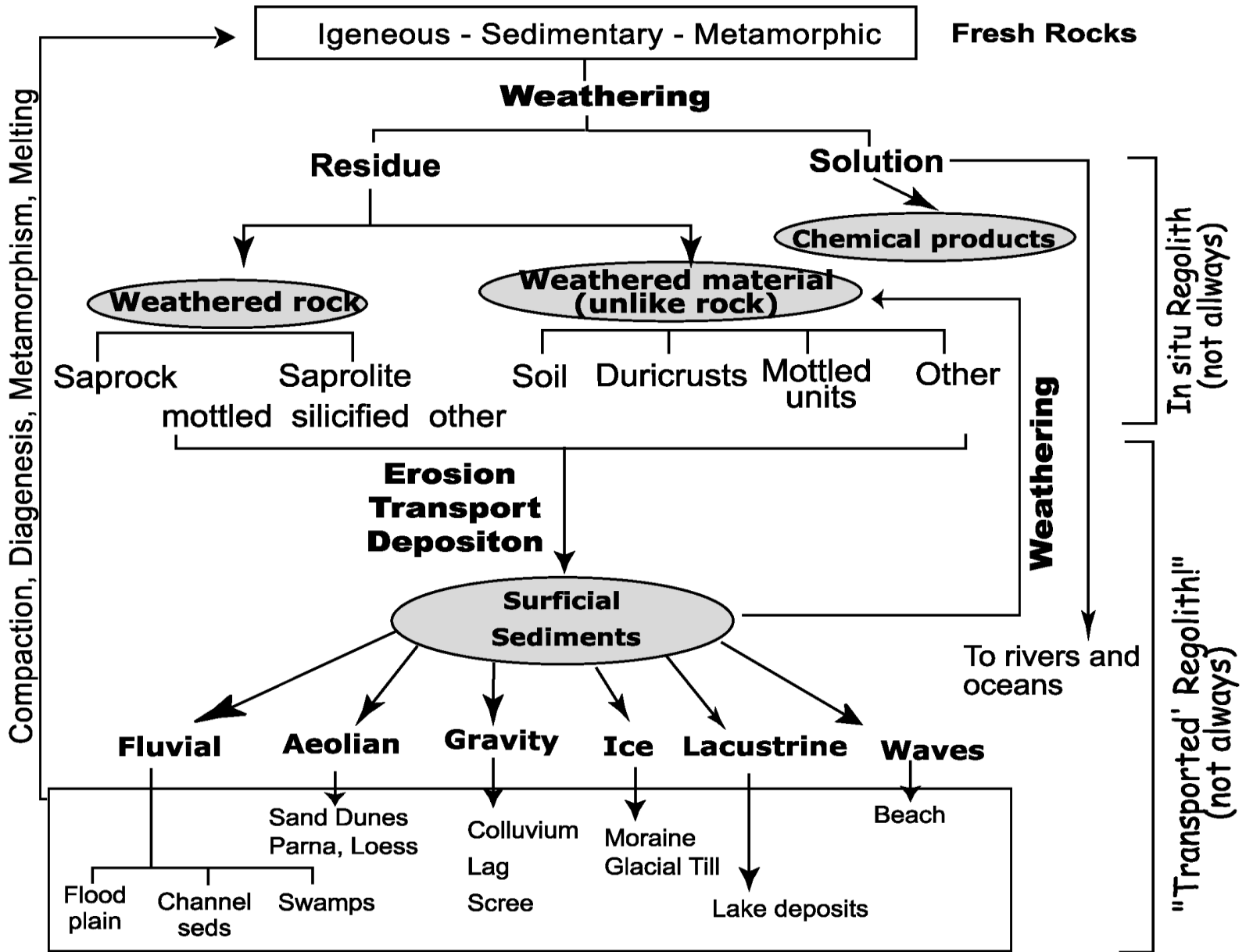
Sumário

1. Conceito de regolito
2. Processos geoquímicos em regolitos tropicais
3. Métodos e técnicas analíticas
4. Aplicação da geoquímica dos regolitos tropicais
 - Exploração mineral
 - Meio ambiente

Conceito de regolito

“Regolith is the surficial blanket of material including weathered rock, sediments, soils and biota that forms by the natural processes of weathering, erosion, transport and deposition. It has complex architecture and may vary in thickness from a few centimetres to hundreds of metres. It hosts or hides valuable mineral deposits, we live on it, we grow our food in it, it is the foundation of many major engineering works, and much of our water supplies are stored in it. It underpins our economic, social and infrastructure systems.”

Gee & Anand (2004)

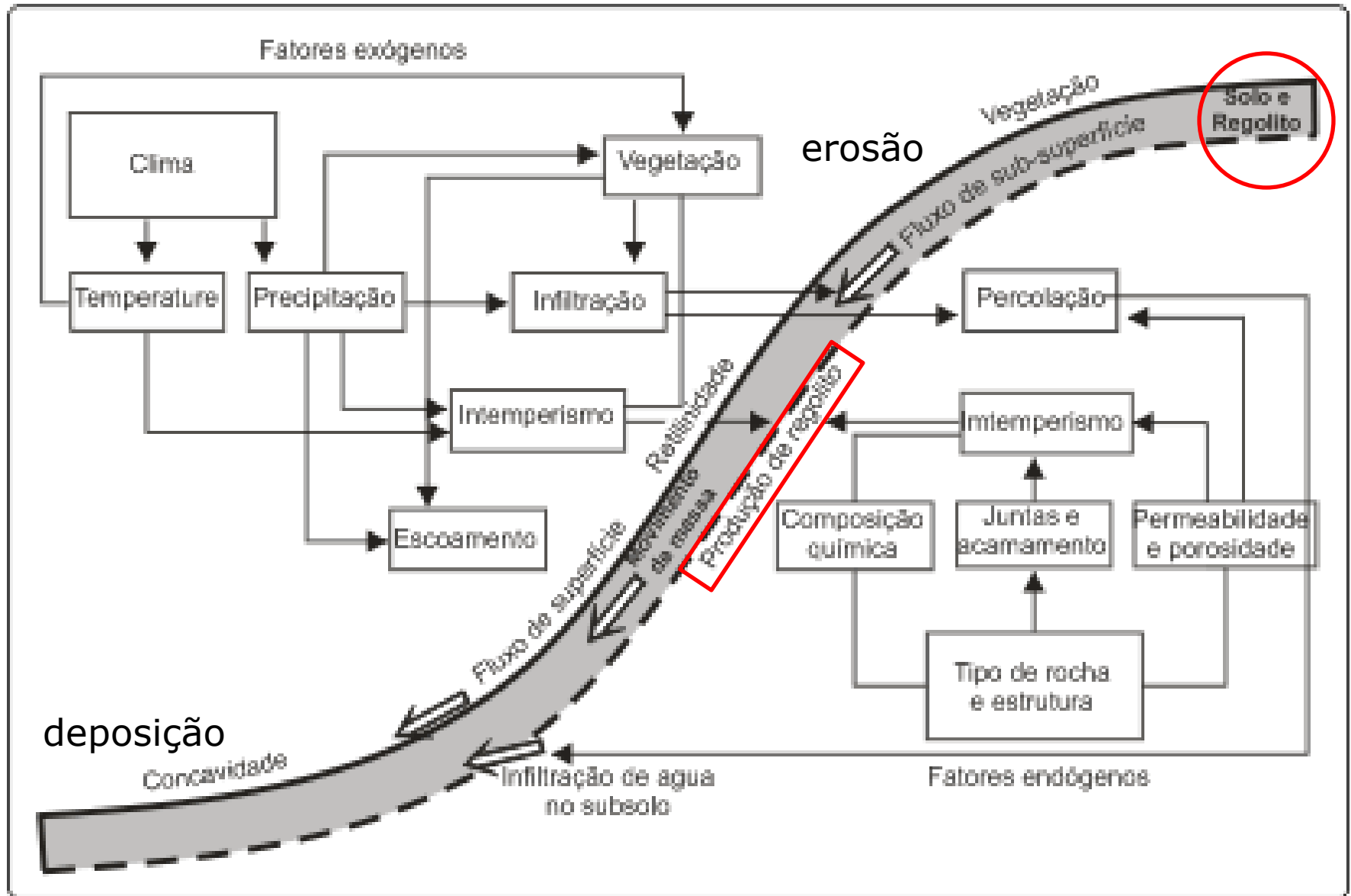


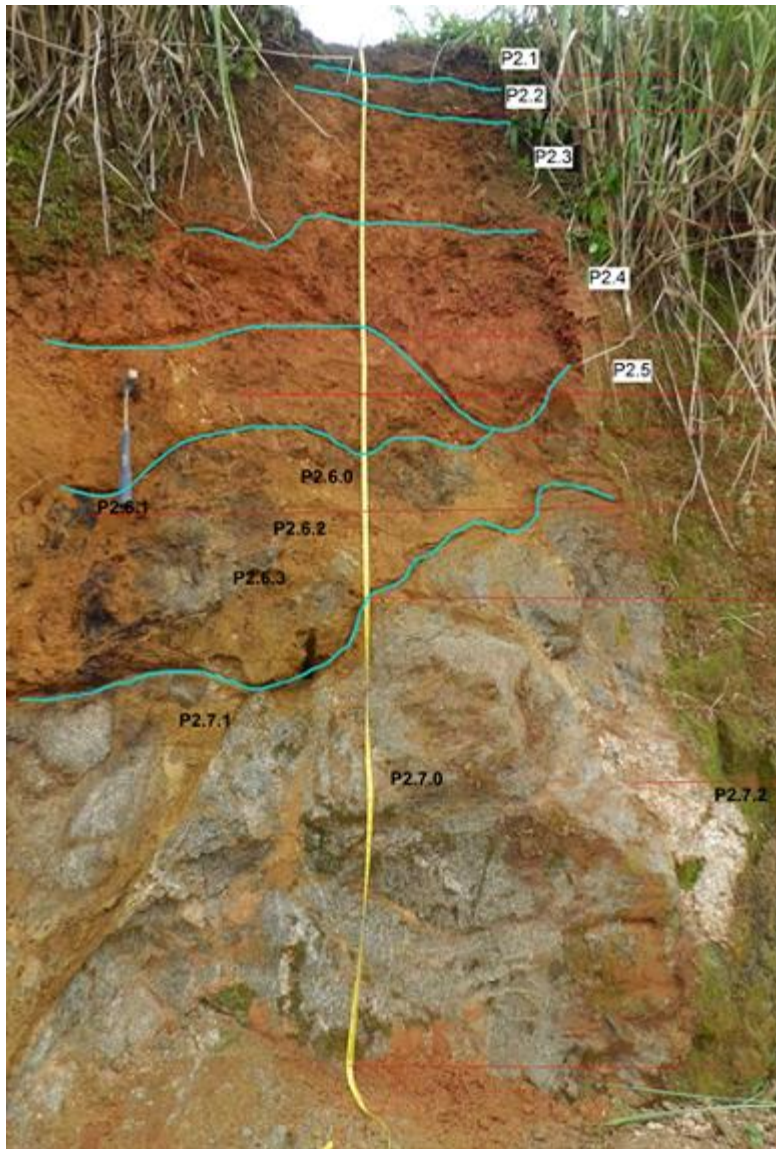
Aspandiar (2007)

Ciclo supérgeno

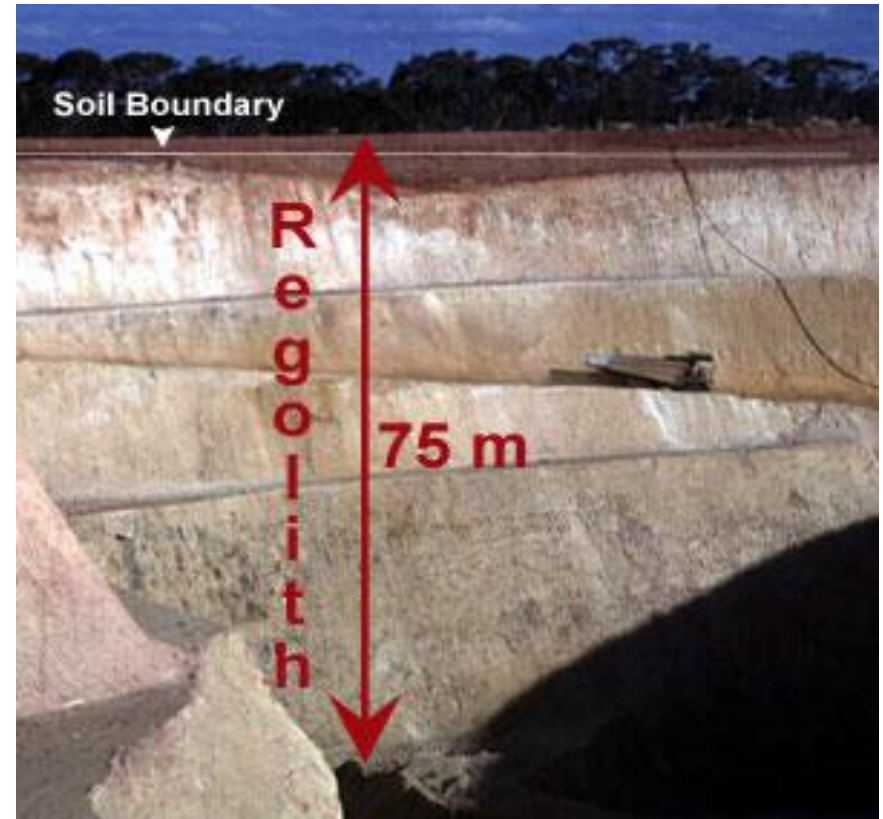
- ✓ Atua na superfície podendo formar regolitos.
- ✓ Compreende os processos de intemperismo, pedogênese, erosão e sedimentação continental

O sistema vertente



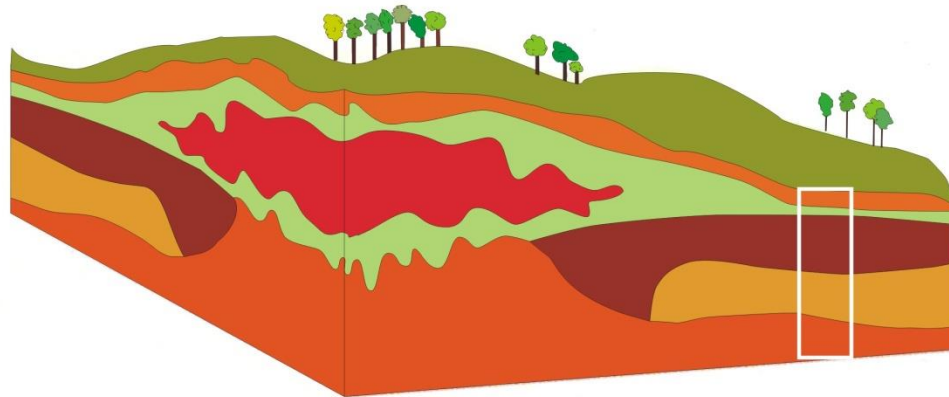


De-Campos (2015)



Aspandiar (2007)

Verticalidade e lateralidade do regolito



A organização do regolito ocorre tanto verticalmente como lateralmente, função da forma do relevo

Arquivo de aulas – Prof. A.J.Melfi (ESAQ-USP)

O DOMÍNIO LATOSSÓLICO
LE DOMAINE FERRALLITIQUE

- 1 Sistema Solo Pedregoso e concrecionário
Système-sol pierreux et concrétionnaire
- 2 Sistema Solo Vermelho-Amarelo (Degradação superficial)
Système-sol rouge-jaune (Dégradation superficielle)
- 3 Sistema Solo Vermelho-Escuro
Système-sol rouge-sombre

O DOMÍNIO FERRUGINOSO E HIDROMÓRFICO
LE DOMAINE FERRUGINEUX ET HYDROMORPHE

- 4 Sistema endurecido (petroplântico) de encosta
Système induré (pétropiñtique) de versant
- 5 Sistema Hidromórfico (plântico)
Système hydromorphe (a piñtite)
- 6 Sistema Superficial de aporte coluvio-aluvial (Gleico-orgânico)
Système superficiel d'apport coluvio-aluvial (Gley-organique)

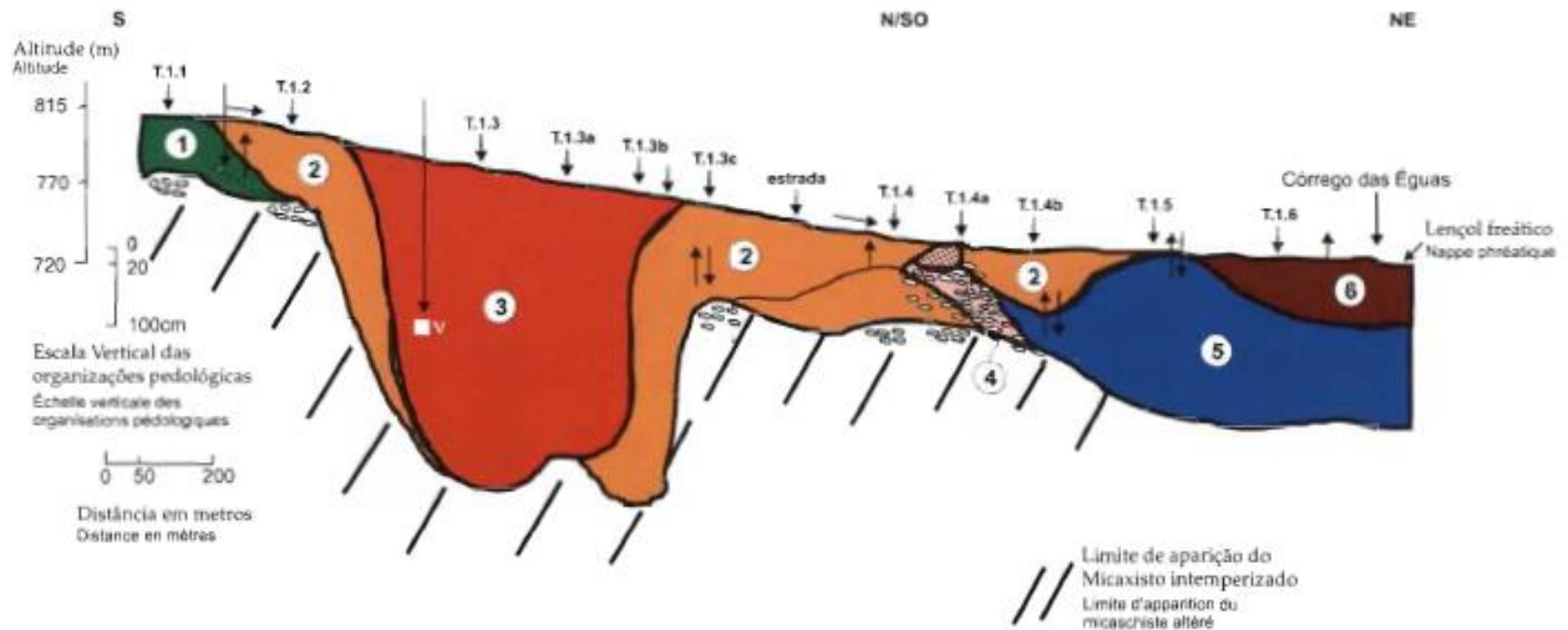
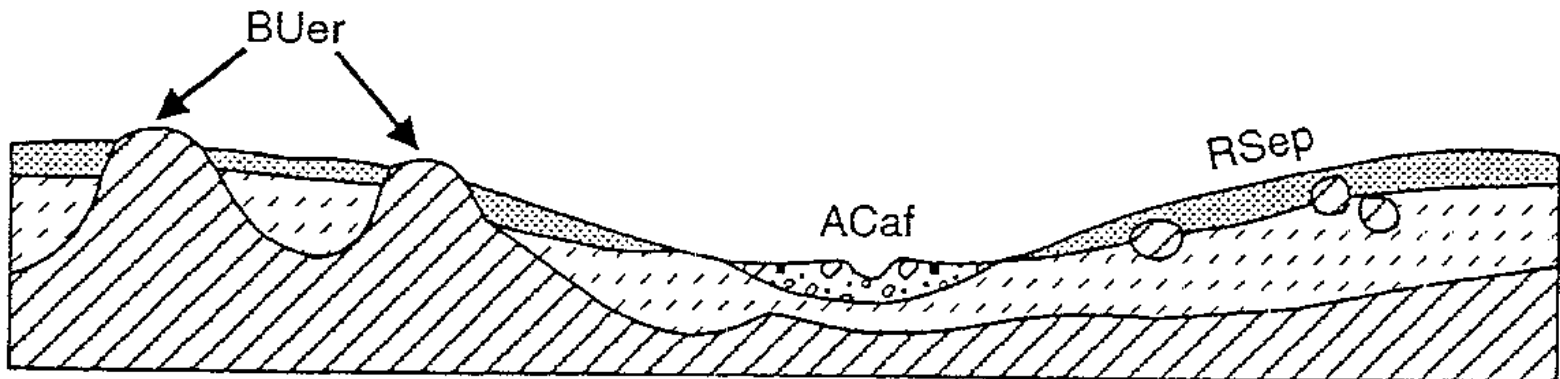


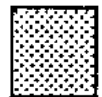
Fig. 3 - Os grandes domínios de alteração e pedogênese e os Sistemas Pedológicos da Cobertura Pedológica. Topossequência I. Morrinhos.

Blancaneaux (1998)

Descontinuidade e distribuição do regolito



Alluvium



Residual sand



Mottled saprolite



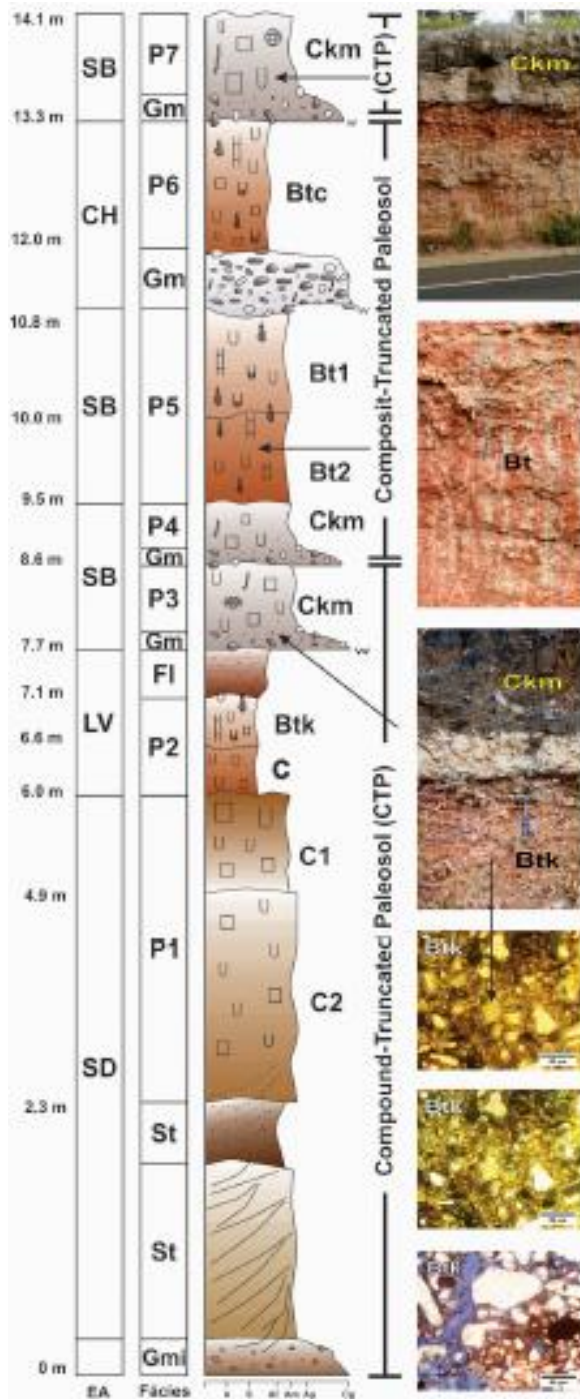
Moderately weathered saprolite



Granite bedrock

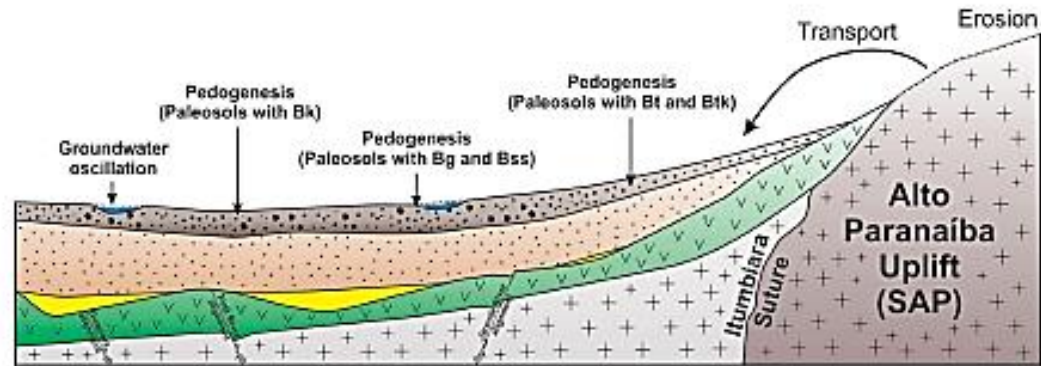
Pain et al. (2001)

Regolitos antigos

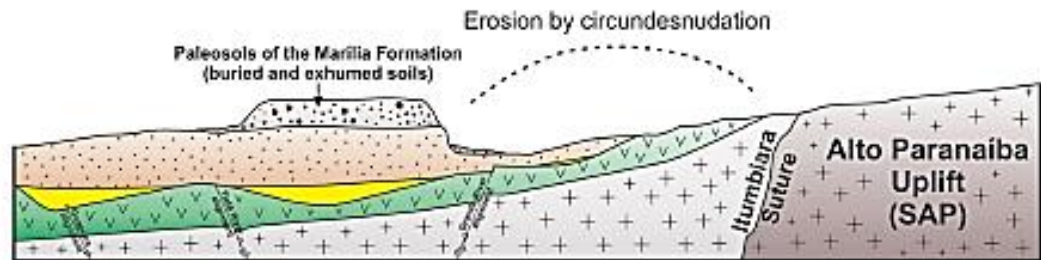


Paleossolos exumados e soterrados da Formação Marília (Silva et al., 2019)

a) SW Bauru Basin - Upper Cretaceous (80 to 60 Ma) NE



b) SW Bauru Basin - Currently NE



Grupo Bauru

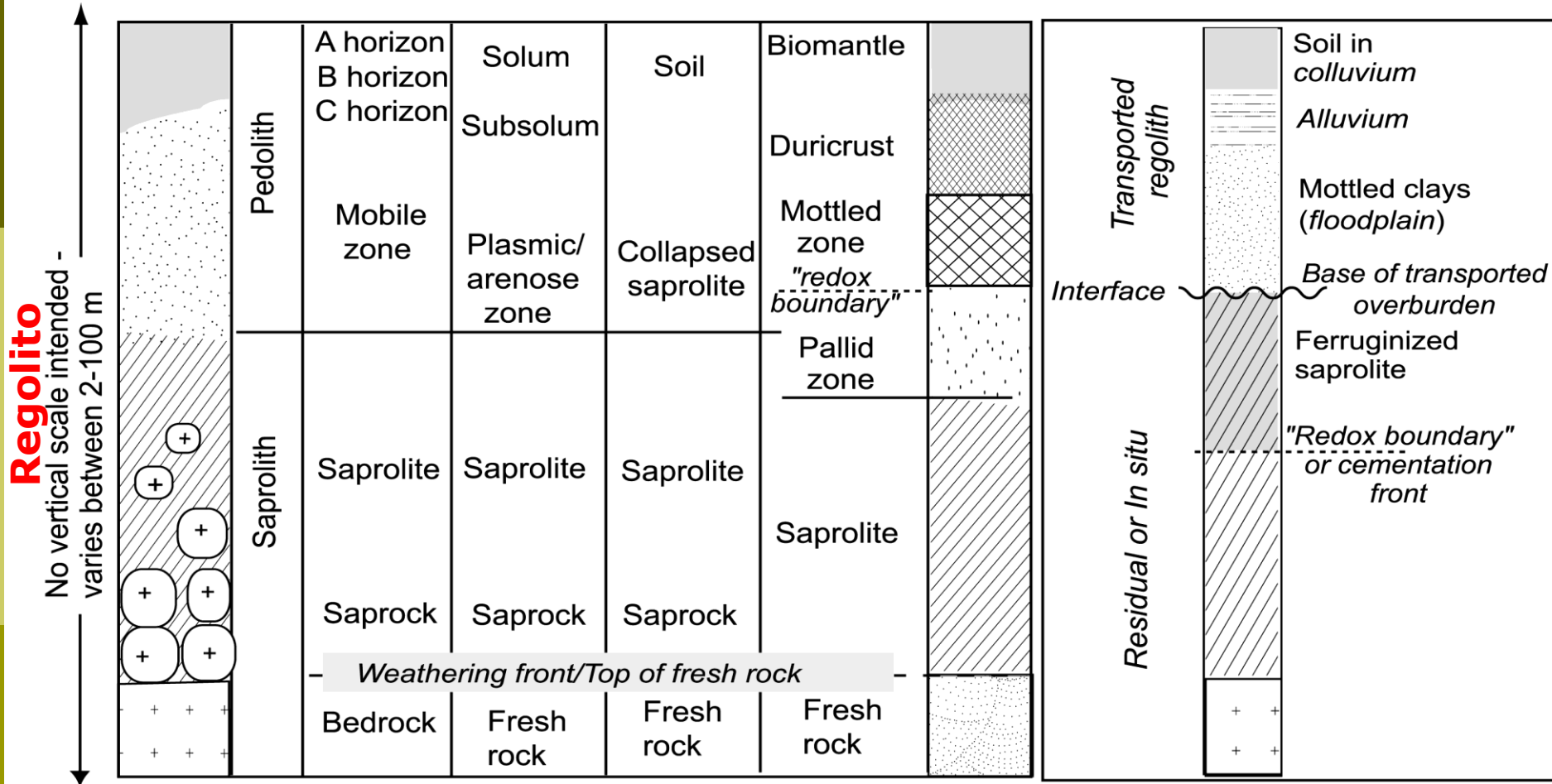
- Fluvial-alluvial deposits: Low-accommodation system tract (TSBTA) - Marília Formation
- Lacustrine deposits: High-accommodation system tract (TSATA)

Grupo Caiuá

- Aeolian sandstone
- Basalt - Serra Geral Formation
- Paleozoic units of the Paraná Basin

Gênese e evolução do relevo regional destacando os depósitos sedimentares e a pedogênese na Formação Marília (Silva et al., 2019)

Perfis clássicos do regolito



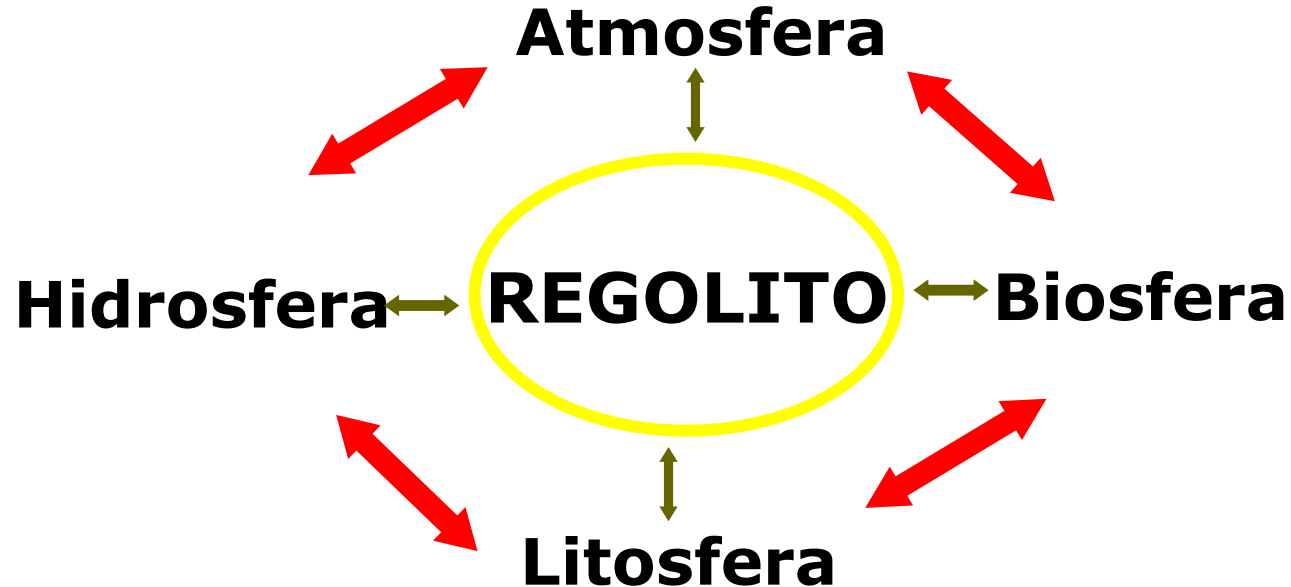
Taylor e Enggleton (2001)



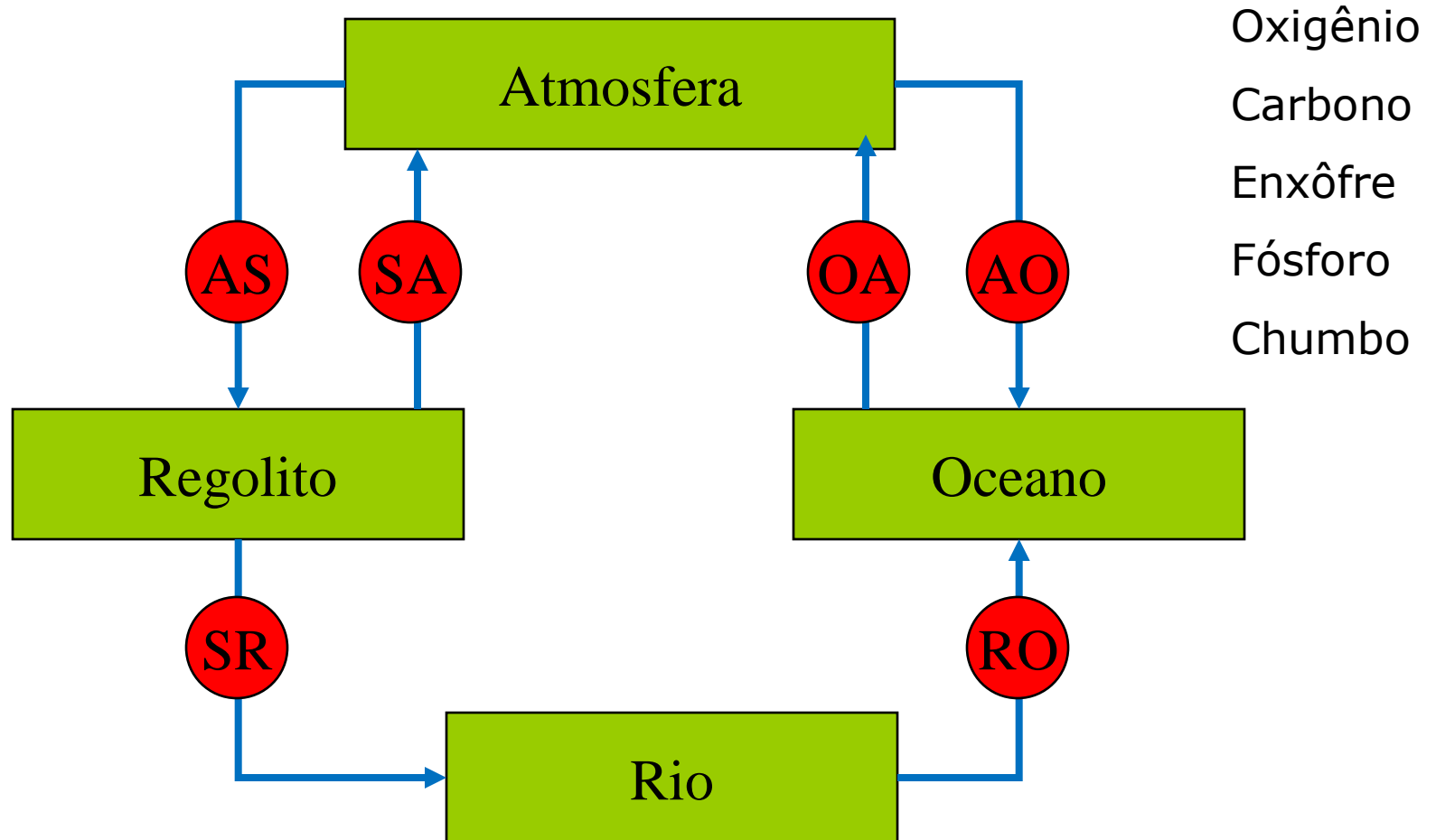
Perfil do regolito sobre rochas pelíticas do Grupo Bambuí (Fotos: próximo ao aeroporto de Confins, MG)

Processos geoquímicos em regolitos tropicais

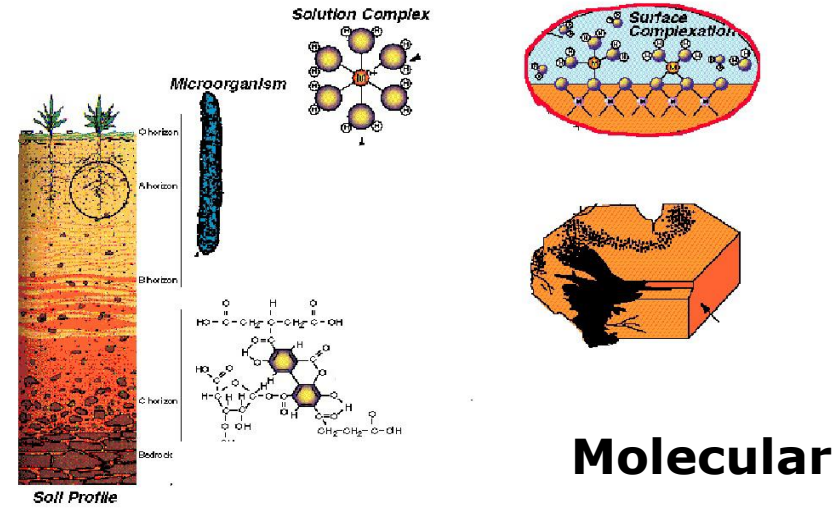
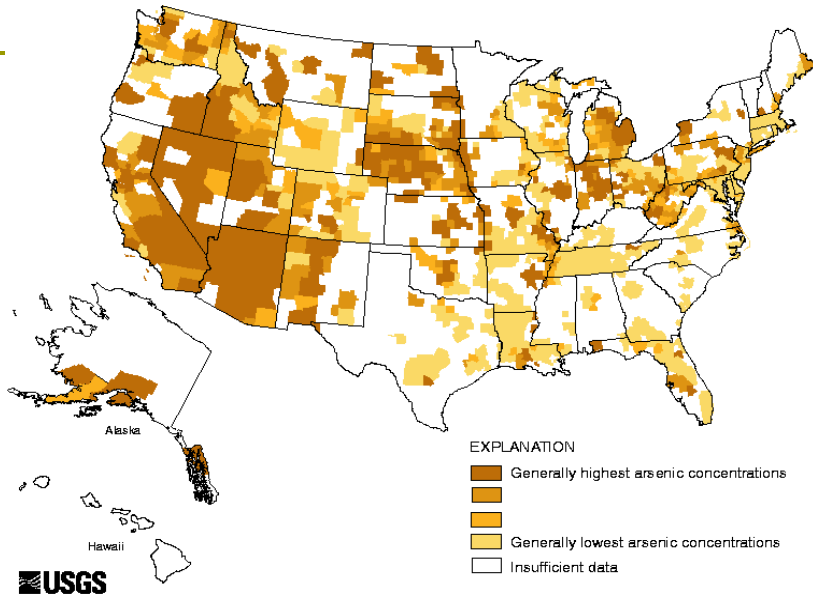
Regolito é uma fina camada que se situa na interface entre atmosfera, hidrosfera, biosfera e litosfera



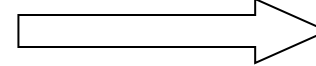
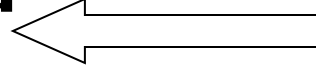
Armazenamento e transferência de compostos no ciclo global de elementos químicos



Em qual escala são feitos os estudos em GR?



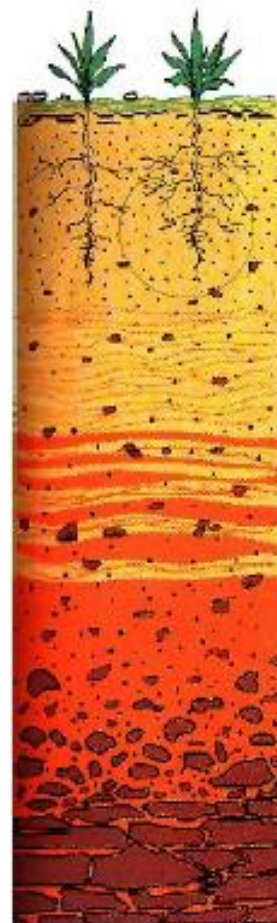
**Pequena
Escala**



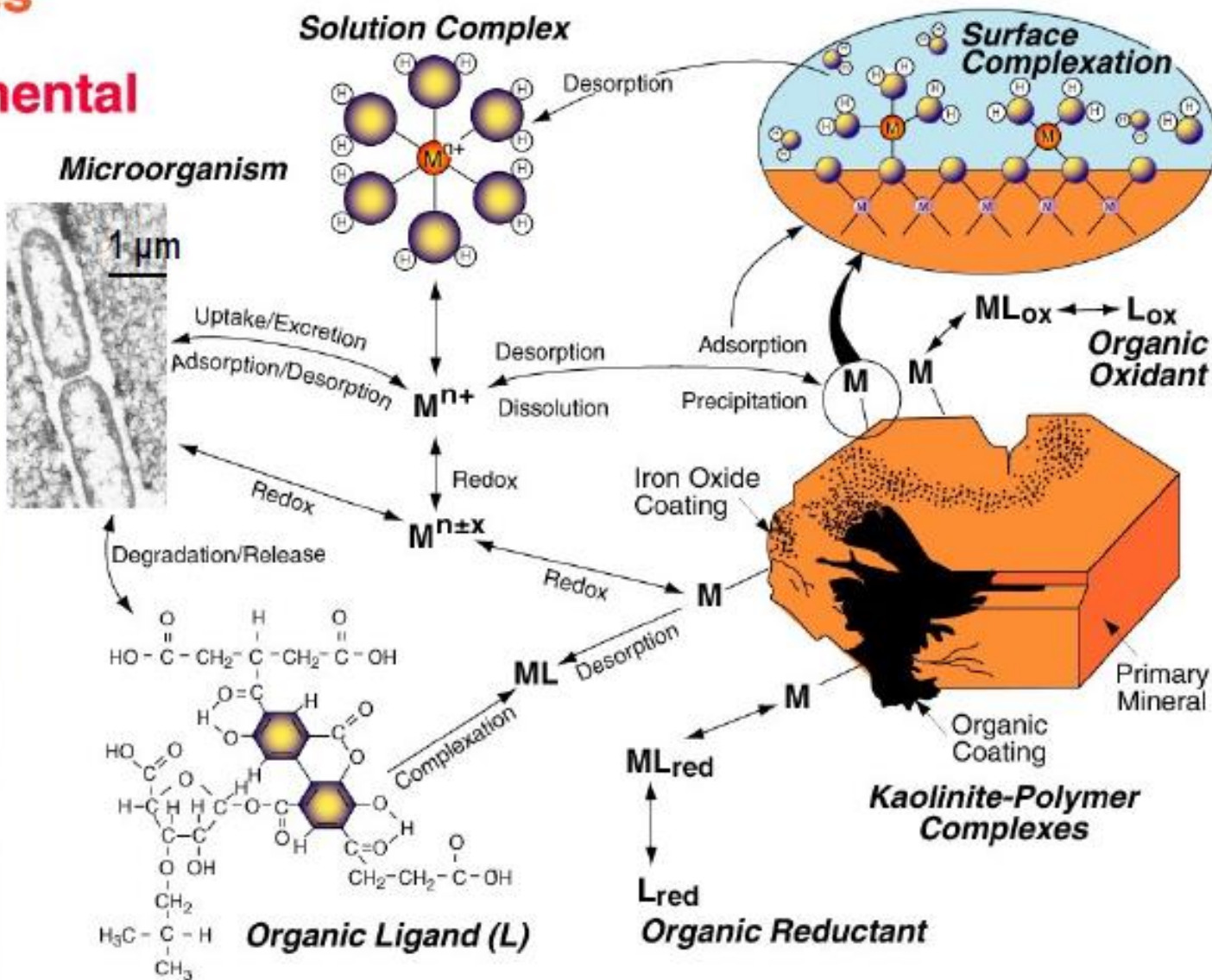
**Grande
Escala**

Perfil do Regolito

Molecular-Scale Processes in Environmental Science



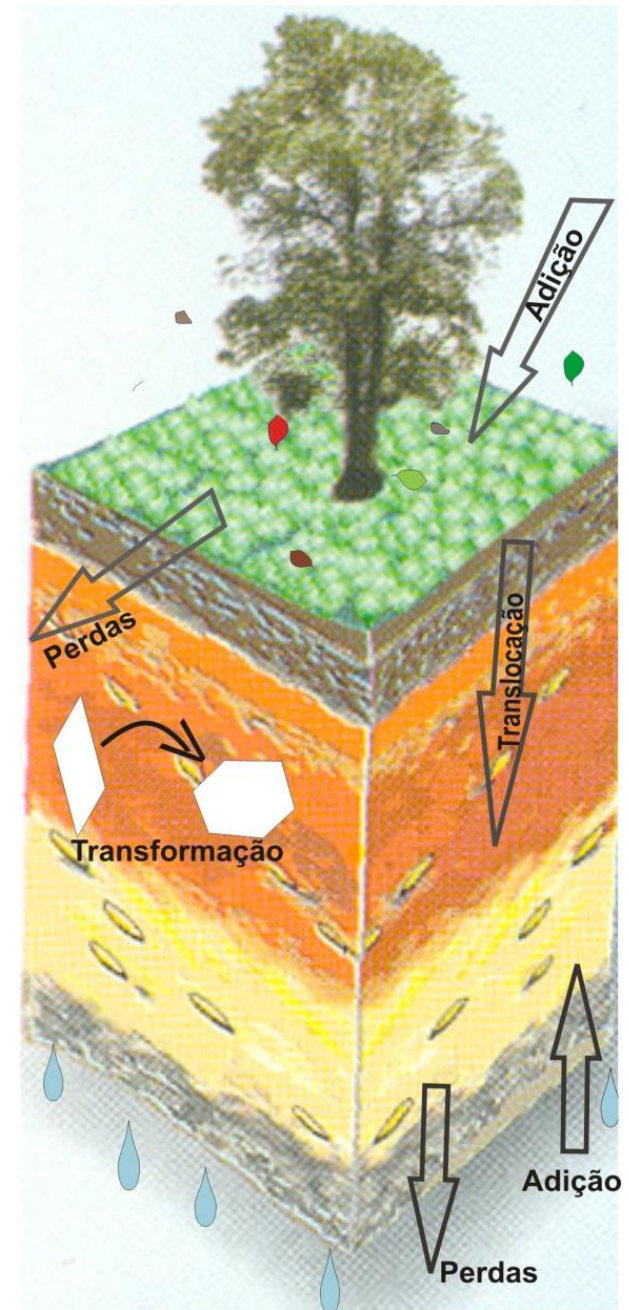
Soil Profile



Brown (1999)

Mecanismos fundamentais para reorganização do regolito

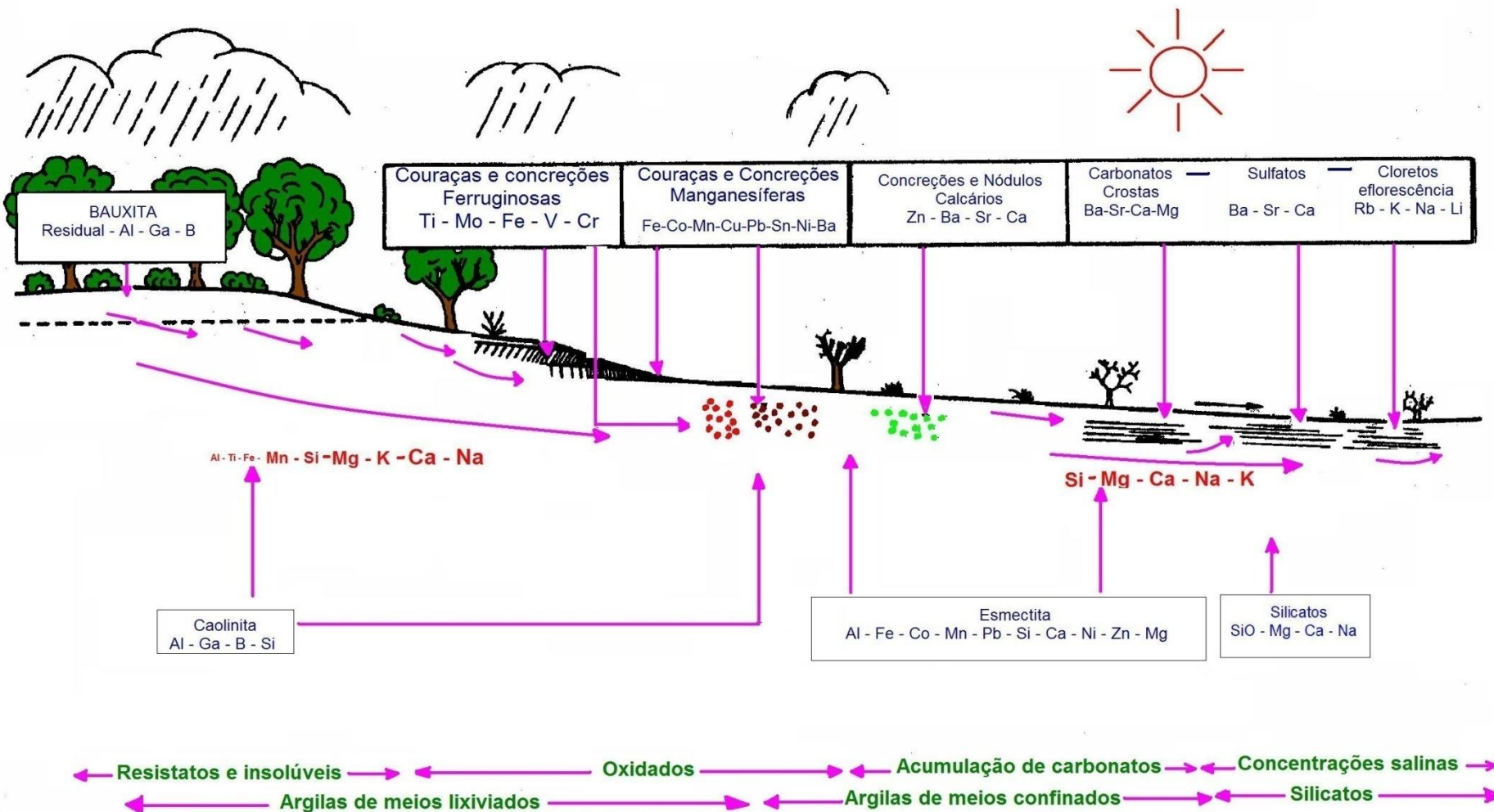
- ✓ Adição de matéria
- ✓ Perda de matéria
- ✓ Transformação de matéria
- ✓ Translocação de matéria



Clima Tropical Úmido

Clima Árido

Deserto



Cromatografia da Paisagem
 Arquivo de aulas – Prof. A.J.Melfi (ESALQ-USP)

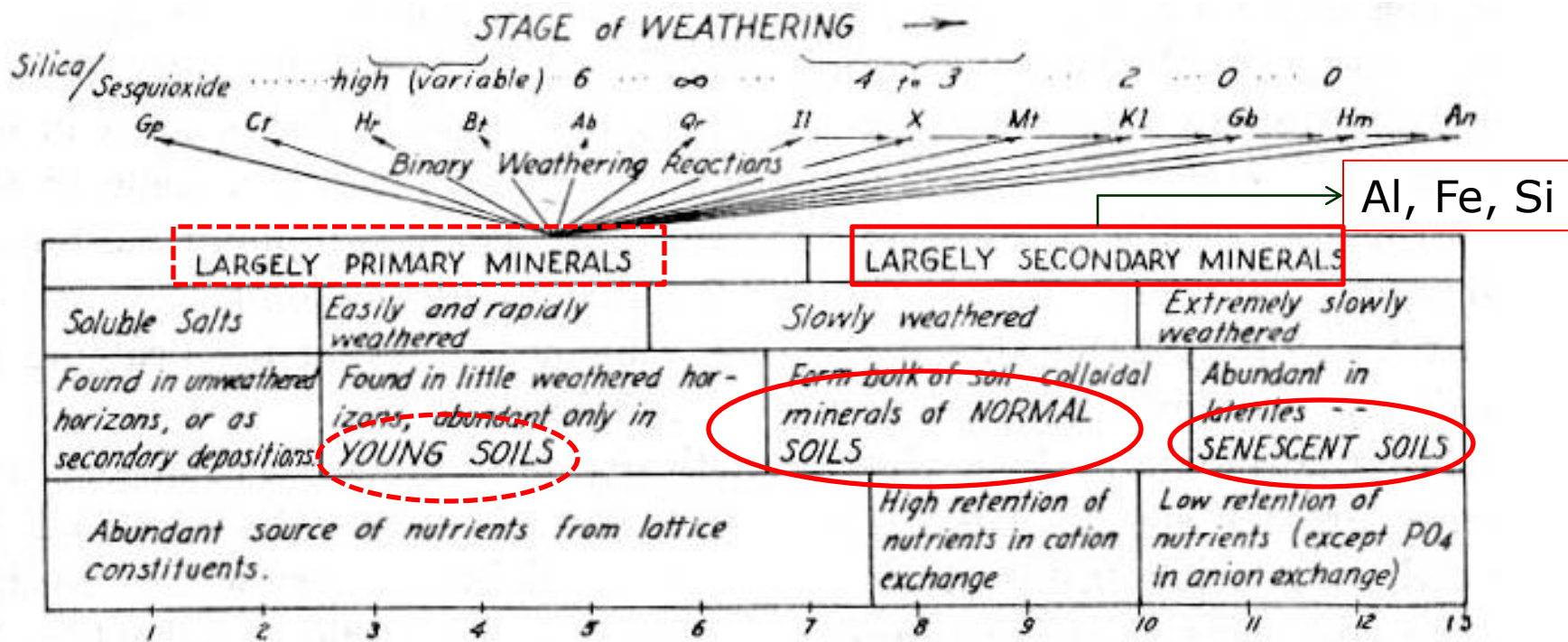


Figure 2.16. Frequency distribution curves for mineral colloids of various stages of weathering, and their significance. Particle sizes are less than 0.2 micron unless otherwise stated (102). (Courtesy Williams and Wilkins Co., publishers of the Journal of Physical and Colloid Chemistry)

Intemperismo

Conjunto de transformações de natureza física (desagregação mecânica), química (decomposição) e biológica (desagregação mecânica e decomposição química) que as rochas sofrem na superfície.

Tipos de intemperismo

- Físico
- **Químico**
- Biológico (Físico-biológico e Químico-biológico)

Intemperismo Químico

Processo que causa transformação química e mineralógica das rochas sob novas condições de T e P, e presença de água e oxigênio em ambiente (meio) específico. Processo dominante na alteração dos materiais em superfície



Condições do meio são definidas por parâmetros climáticos (pluviometria e T), termodinâmicos (pH, concentração de íons em solução) e hídricos (topografia, percolação da solução)

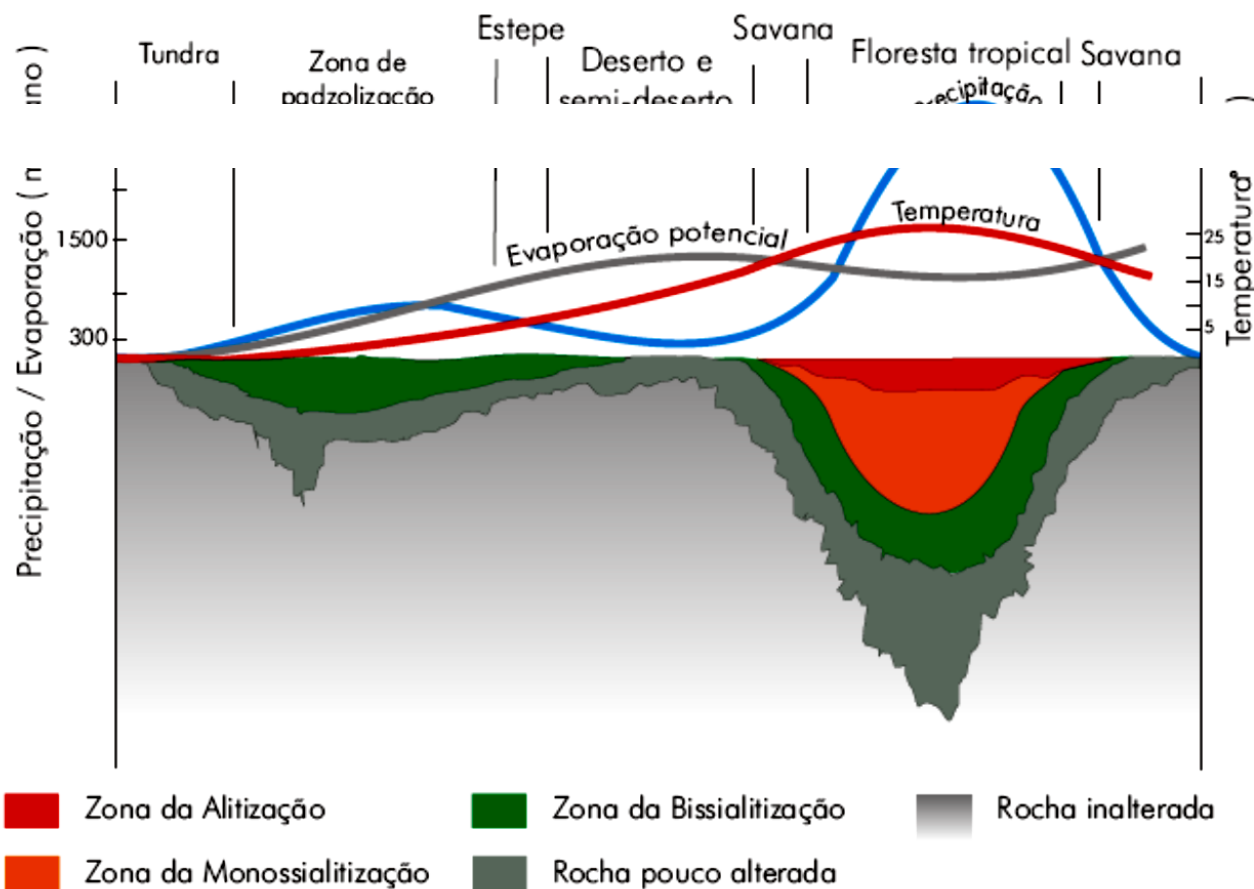


Fig. 8.19 O tipo e a intensidade do intemperismo podem ser relacionados com a temperatura, pluviosidade e vegetação. O intemperismo químico é mais pronunciado nos trópicos. Nas regiões polares e nos desertos, o intemperismo é mínimo.

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

Reações envolvidas no intemperismo químico

Equação genérica do intemperismo químico



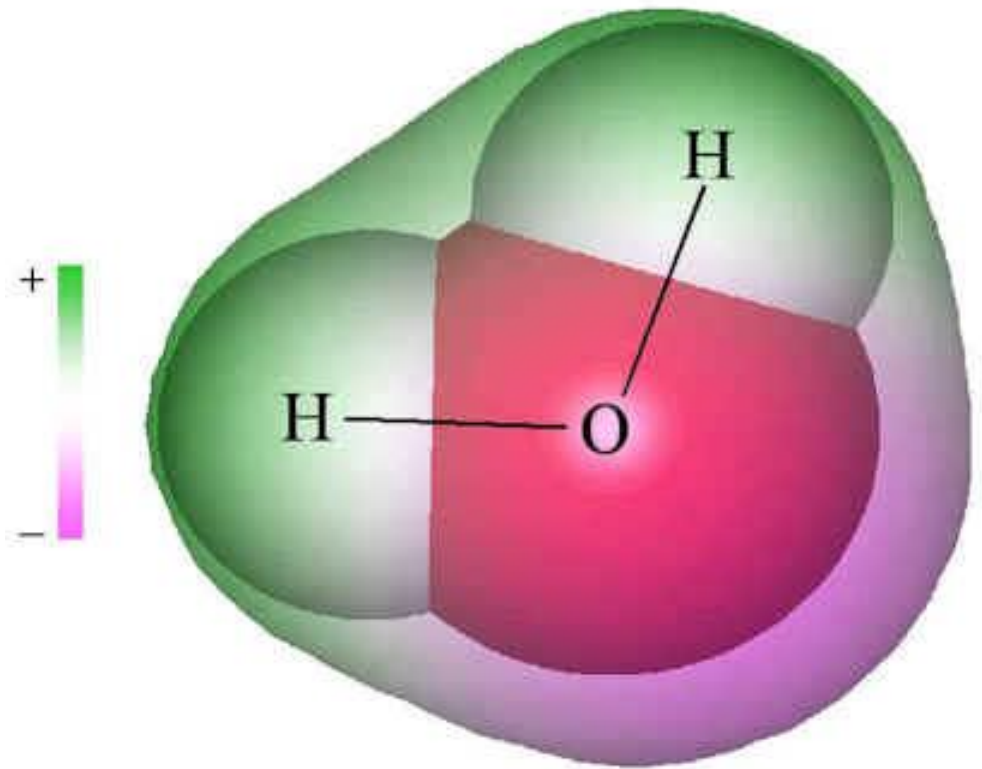
Reações químicas com pH entre 5 e 9

- **Hidratação**
- **Dissolução**
- **Oxidação**
- **Hidrólise**

A água é o grande agente gerador dos processos de intemperismo químico e formação dos regolitos...

Água é polar

- O caráter polar da água é que permite separar substâncias polares e explica o alto poder solvente da água.



Variáveis mestras

- pH
- Eh or pE
- Condições de Eh e pH controlam diversas reações e processos geoquímicos no regolito, como hidrólise, dissolução, redução-oxidação (REDOX), precipitação, adsorção, complexação

Solubilização e especiação

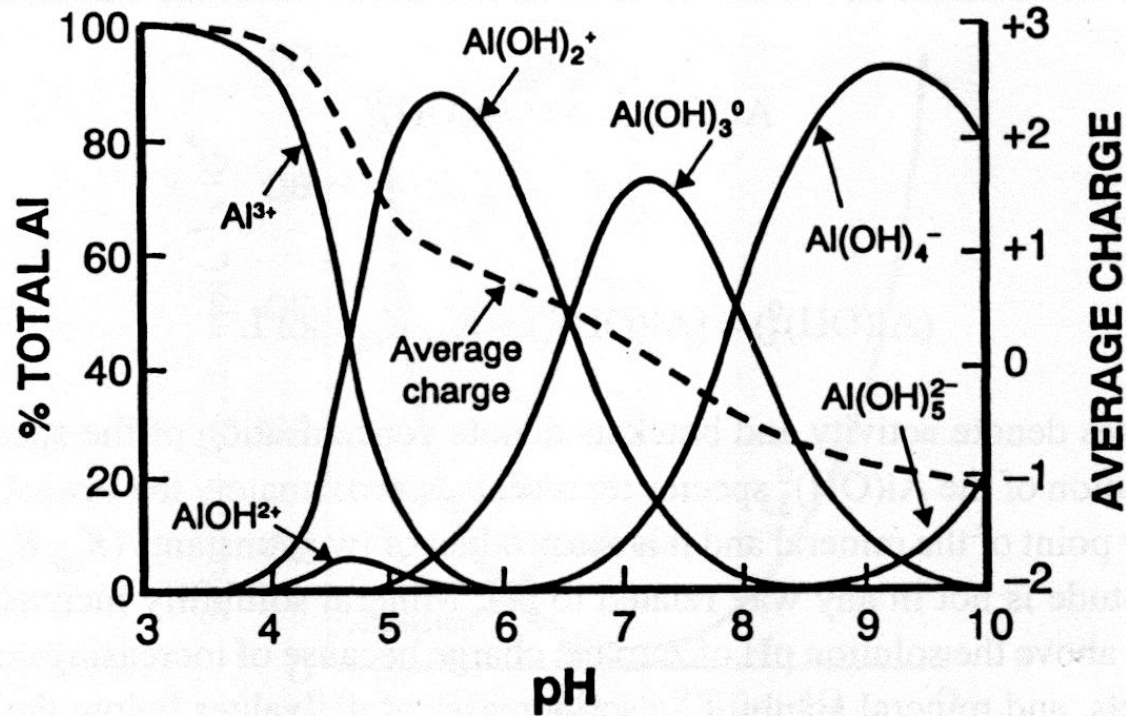


Figure 2.11. Relationship between pH and the distribution and average charge of soluble aluminum species (from Marion et al., 1976, with permission).

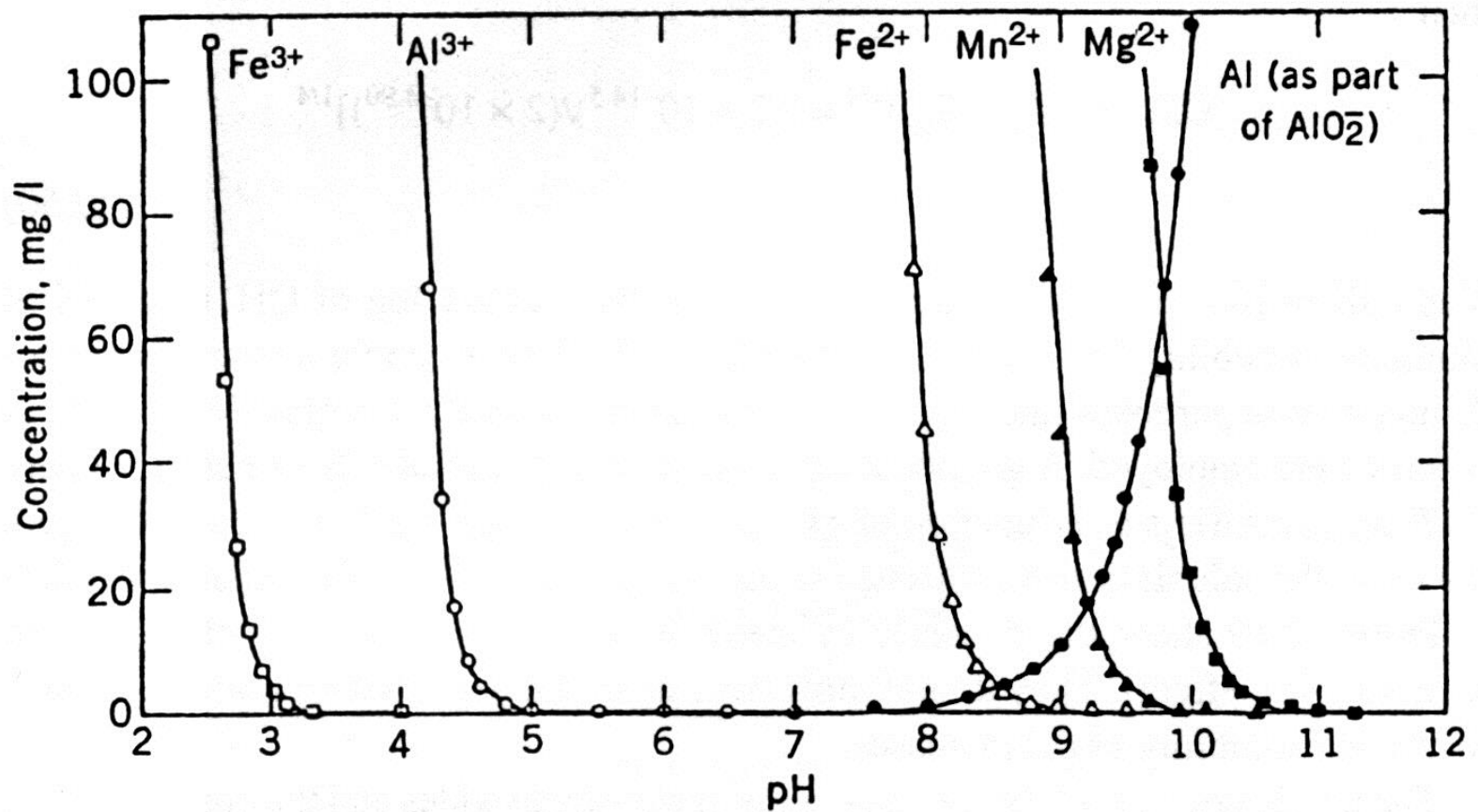
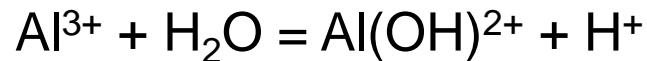


Figure 2.10. Solubility of various metal–hydroxides. Note that the figure exhibits only the common ion effect (from U.S. EPA, 1983).

Hidrólise

- Grau no qual as moléculas de água adsorvidas dissociam-se para satisfazer a eletronegatividade iônica.
- Quebra das moléculas de água. Moléculas de água separam-se em H^+ e OH^- e o H^+ substitui o cátion da estrutura mineral e forma um complexo de esfera interna.



- Provoca a dissolução sendo uma importante fonte de acidez no regolito.

HIDRÓLISE - pH entre 5 e 9

Hidrólise parcial - fluxo de soluções muito menos importante

87% de bases eliminadas

46% de sílica eliminada

Alumínio imóvel



Possibilita a formação de esmectita \Rightarrow Bissialitização

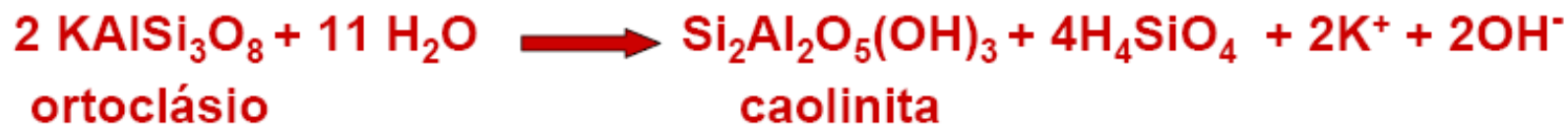
HIDRÓLISE - pH entre 5 e 9

Hidrólise parcial - fluxo de soluções menos importante

100% de bases eliminadas

66% de sílica eliminada

Alumínio imóvel



Possibilita a formação de caolinita \longrightarrow Monossilitização

HIDRÓLISE - pH entre 5 e 9

Diferentes graus \longrightarrow fluxo da água

remoção das espécies dissolvidas

Hidrólise total - 100% de sílica e bases eliminadas
Alumínio imóvel



Possibilita a concentração de Al \longrightarrow Alitização

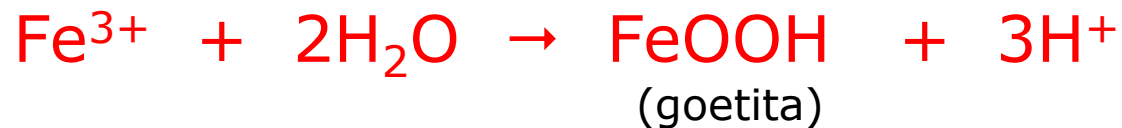
Reações REDOX

- Fotossíntese
- Respiração microbiana
- Cátions e ânions
 - Fe, Mn, Cr, Co, As, Pb, Pu, Se, Mo, Cu
- Nutrientes
 - N, S
- Poluentes Orgânicos

Dinâmica do ferro oxidado vs reduzido

□ Oxidado: Fe³⁺

- Sofre hidrólise e produz precipitados muito insolúveis
- Precipita como goetita, hematita, lepidocrocita, maghemita, ou ferrihidrita



□ Reduzido: Fe²⁺

- *Muito solúvel* na faixa do pH dos regolitos
- Migra com a solução do regolito

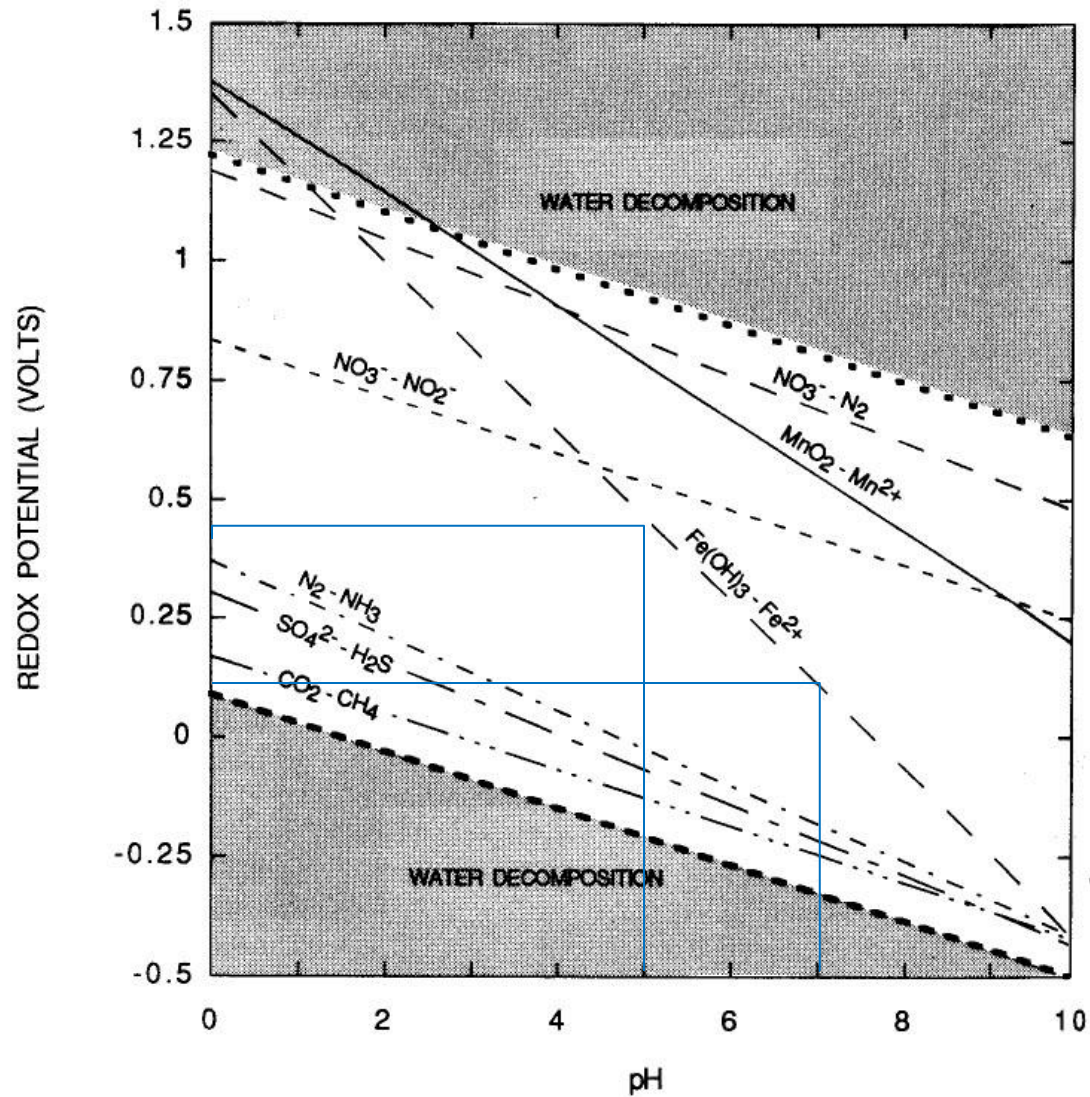
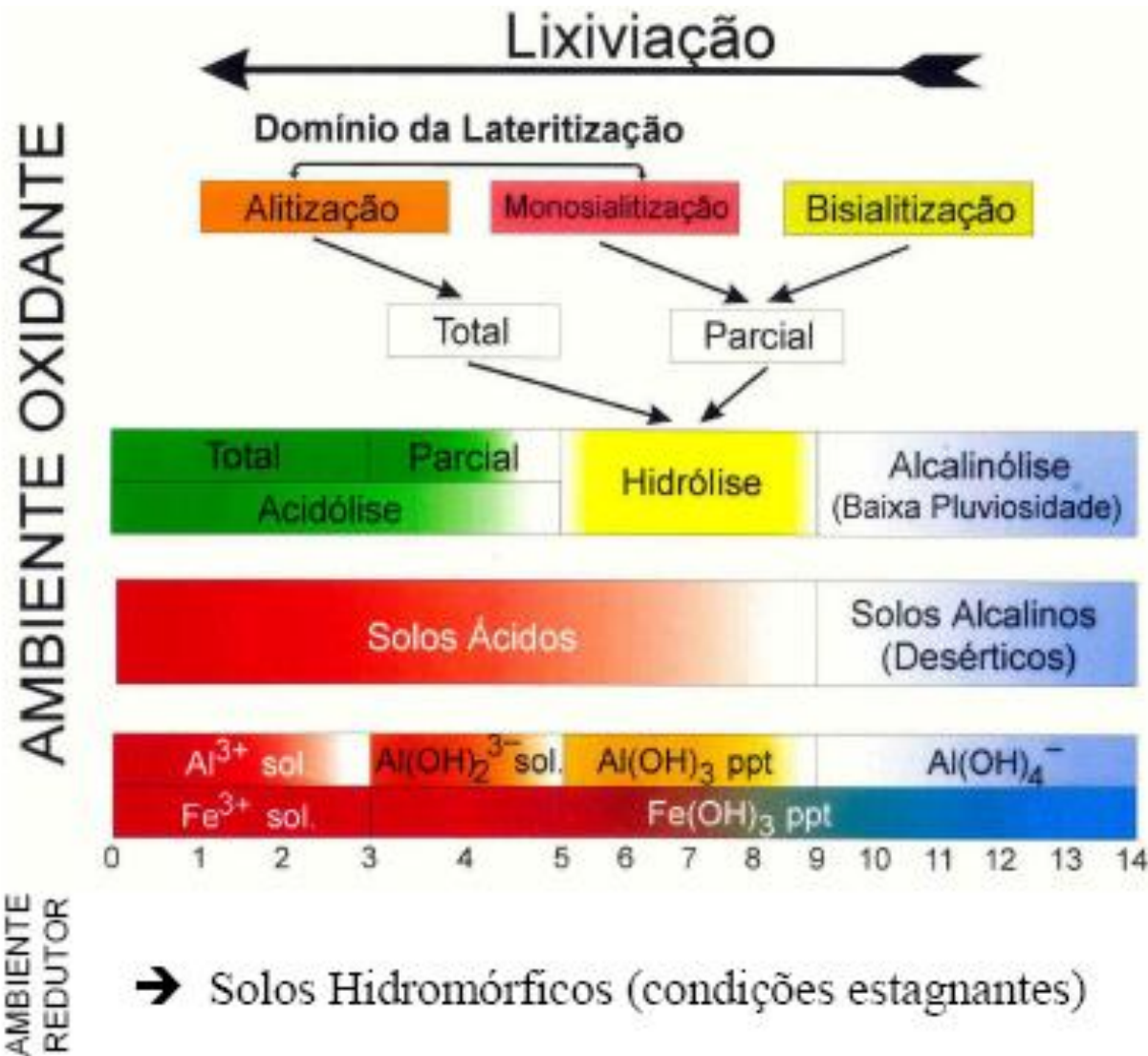


Figure 7.1. The relationship of redox potential, E_h , to pH for important half-cell reactions in water. The bold broken lines denote the E_h at which water is oxidized to O_2 (upper line) or reduced to H_2 (lower line).

McBride (1994)



Arquivo de aulas – Prof. A.J.Melfi
(ESALQ-USP)

Mineralogia e Geoquímica andam juntas

Secondary Minerals

Clay minerals^c

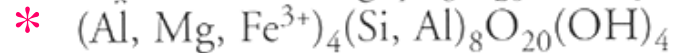
Kaolinite



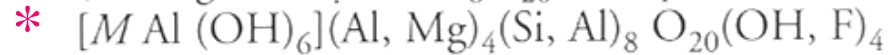
Montmorillonite



Vermiculite



Chlorite



Allophane



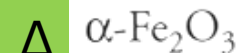
Imogolite



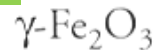
Goethite



Hematite



Maghemite



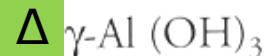
Ferrihydrite



Bohemite



Gibbsite



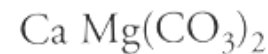
Pyrolusite



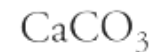
Birnessite



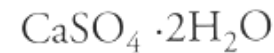
Dolomite



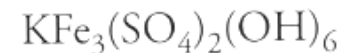
Calcite



Gypsum



Jarosite



*
Minerais de argila
mais importantes em
regolitos e solos

Δ Outros minerais da
fração argila importantes
em regolitos tropicais

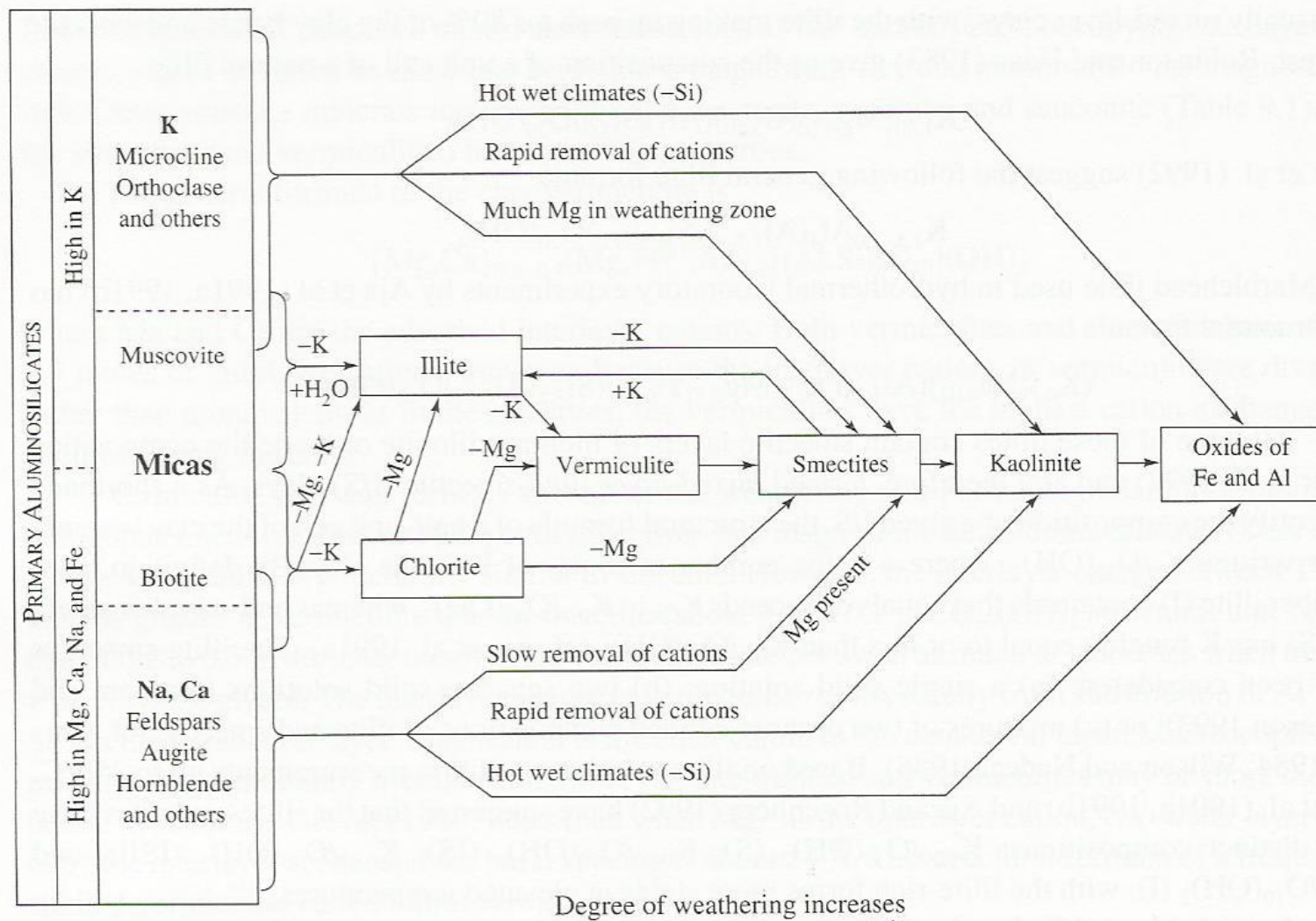


Figure 9.4 Weathering products of primary minerals and sequence of forming clays. Modified from N. C. Brady. *The nature and prospecting of soils*, 8th ed. Copyright © 1974. Used by permission of Macmillan Publ. Co., New York.

Laterização

Schellmann (1981),

“Laterites are products of intense subaerial weathering whose Fe and Al content is higher and Si content is lower than in merely kaolinized parent rock. They consist predominantly of mineral assemblages of goethite, hematite, Al hydroxides, kaolinite minerals and quartz”

Em geral formam coberturas espessas de cor vermelha-amarela.

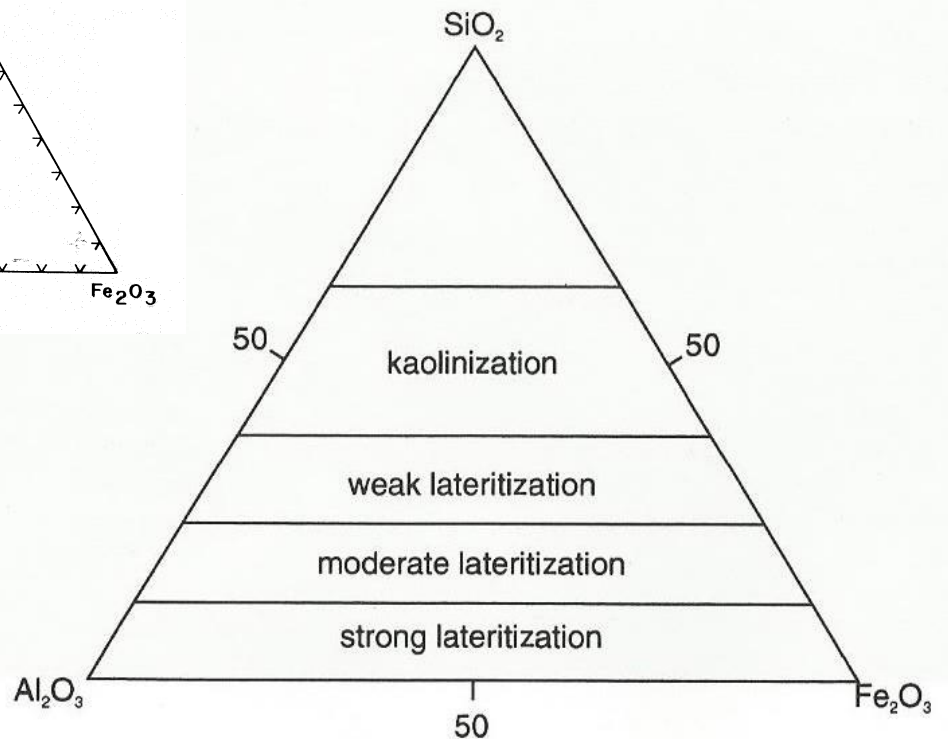
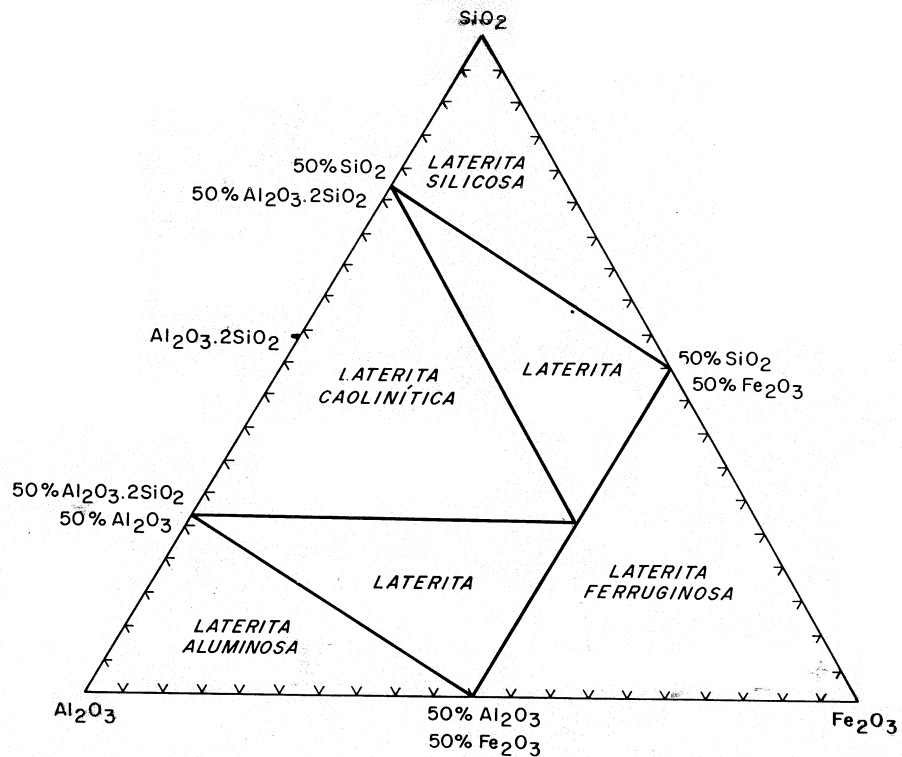
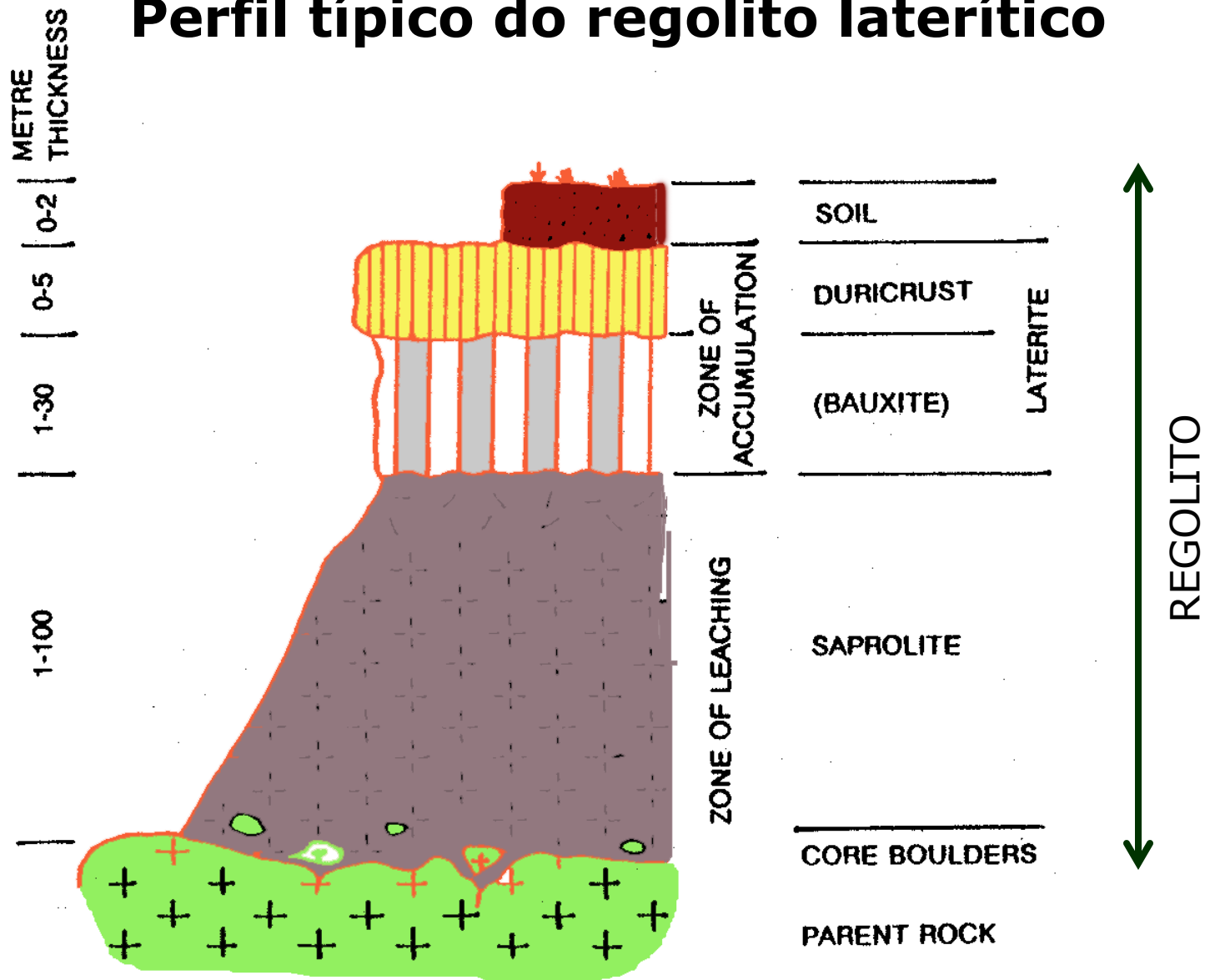


Figure 11.5 Schellmann triangular diagram of laterites.

Perfil típico do regolito laterítico



Arquivo de aulas – Prof. A.J.Melfi
(ESALQ-USP)

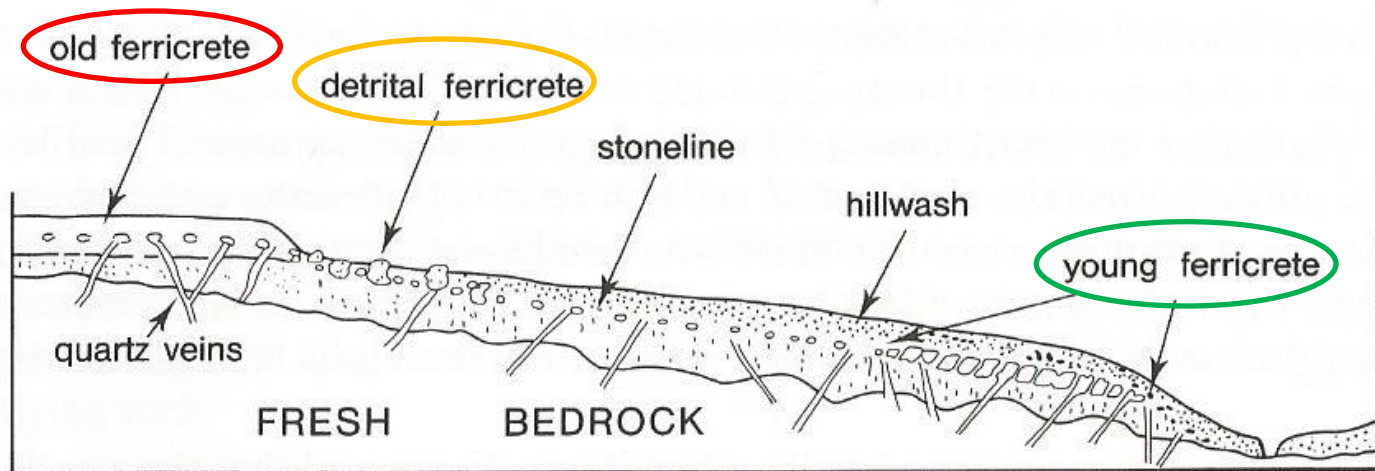


Figure 11.4 Formation of a young ferricrete on a footslope (after Rohdenburg, 1969). There may or may not be an old ferricrete on the upper slope. Note that the stone line lies between saprolite (indicated by quartz veins) and hillwash or colluvium. The young ferricrete also lies between hillwash and saprolite, as in Fig. 11.2.

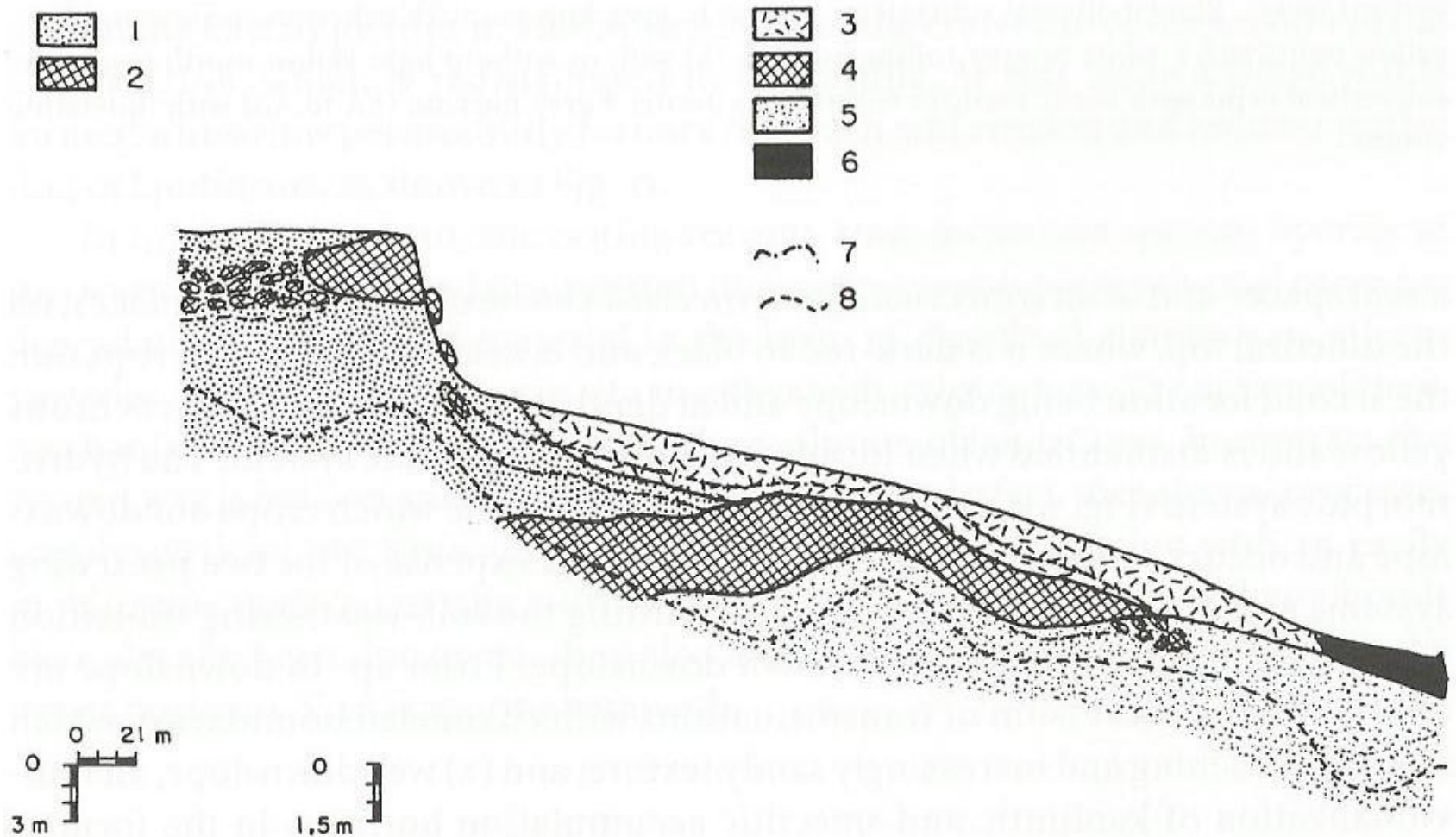


Fig. 9. Hyperbav (Ivory Coast, Africa; Fritsch et al. 1990). Reproduced by permission of ORSTOM. Ferrallitic domain: 1 red soil system. 2 iron crust system on plateau Ferruginous domain: 3 surficial degradation system. 4 iron crust system on slope. 5 hydromorphic system. 6 alluvial system. 7 fine gravel unit. 8 top of alterite.



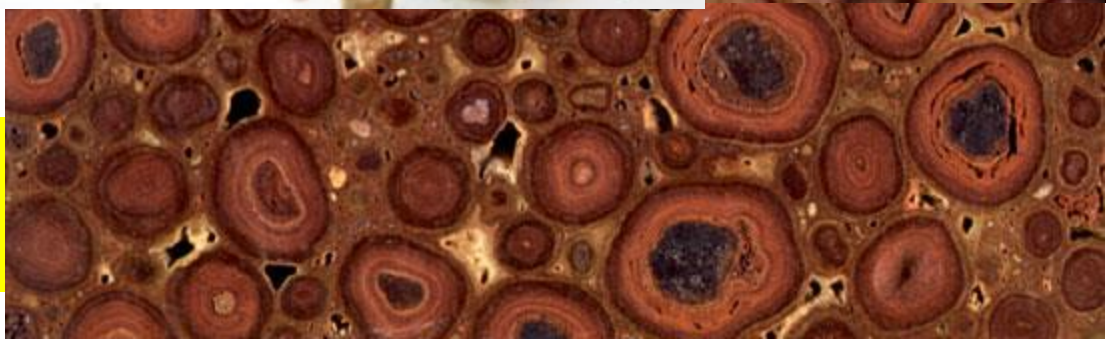
**Fácies Superior
(hidr.)óxidos**



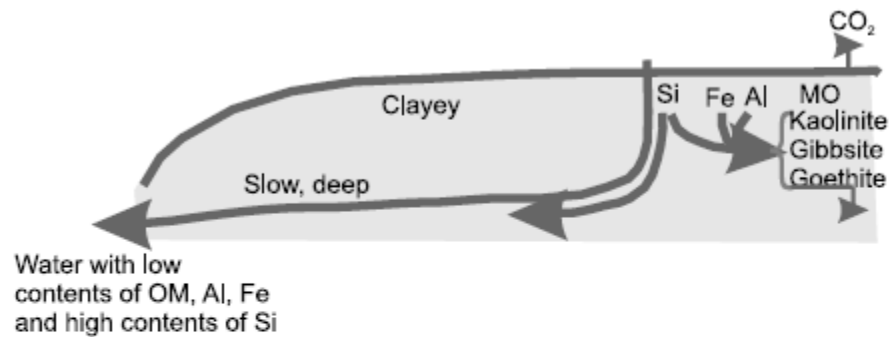
Laterita



**Fácies Inferior
perda de matéria**

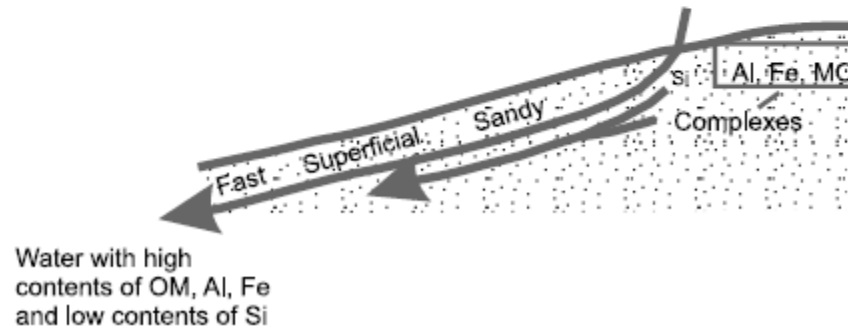


Laterização



Depósitos minerais

Podzolização



Mobilidade geoquímica em processo de laterização e podzolização em regolitos da Amazônia – Formoso (2006)

Influência da laterização na mobilidade geoquímica de elementos

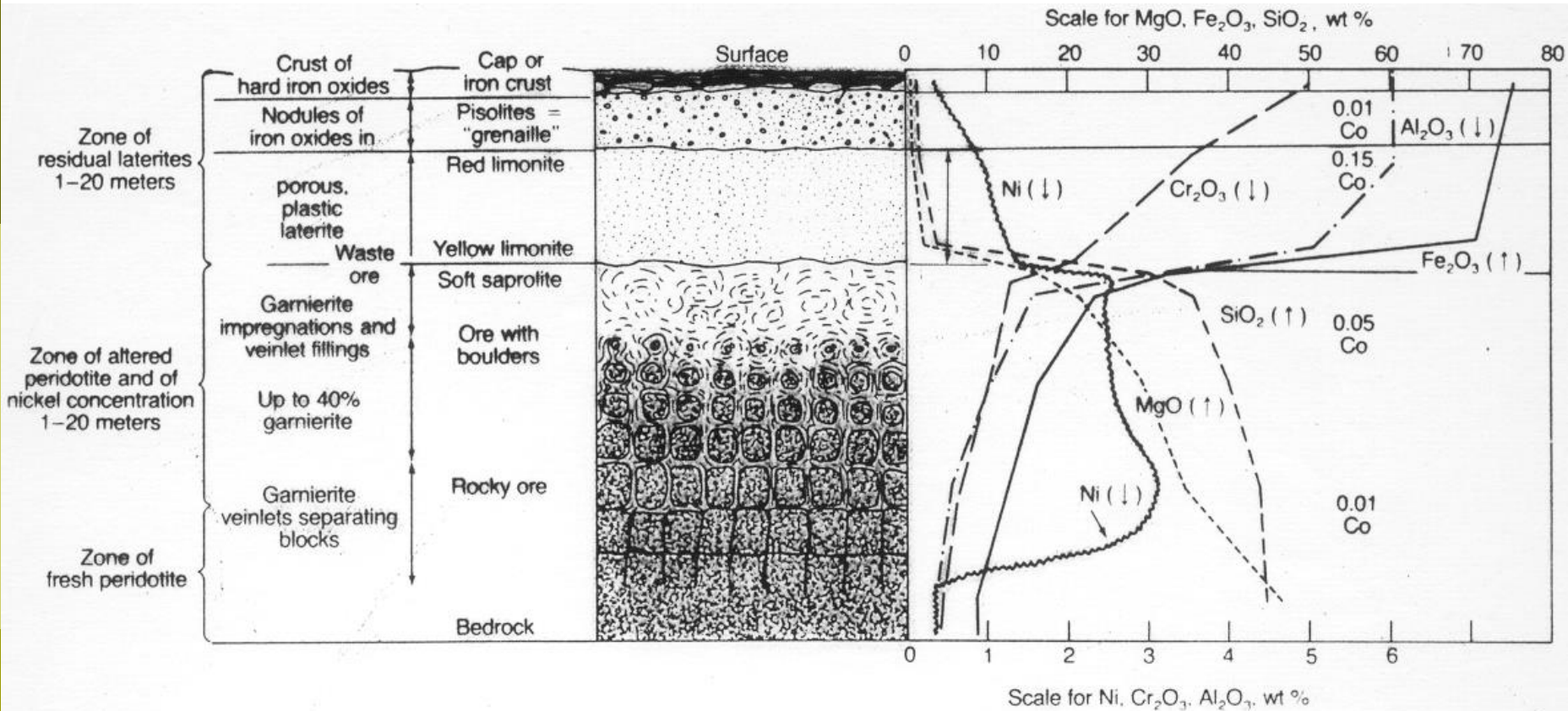


Figure 17-5. Descriptive, occurrence, and chemical variation profile of a typical New Caledonian laterite. Note that there are two chemical scales, and that the highest nickel contents are near the base of the immediate weathering effects. (Chemical data from Troly et al., 1979.)

Métodos e técnicas analíticas

Métodos e técnicas analíticas usuais (exemplos)

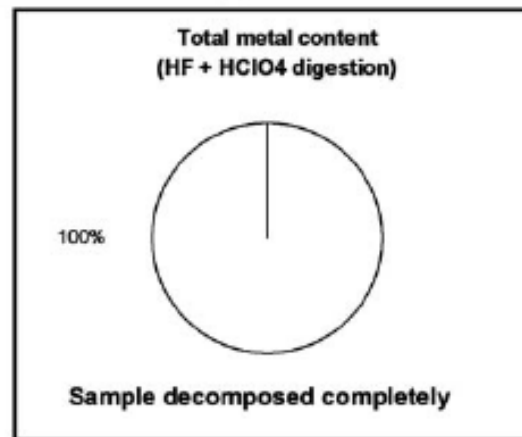
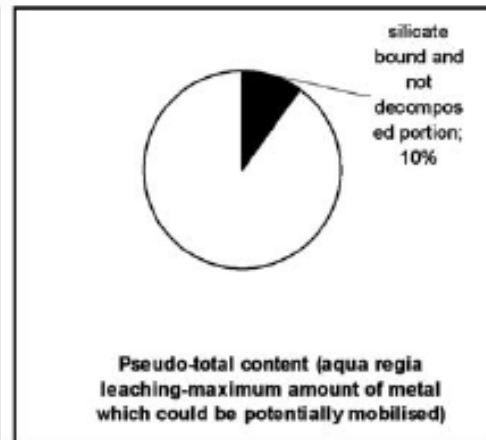
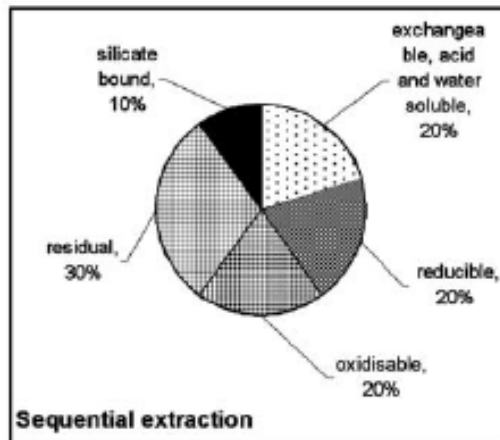
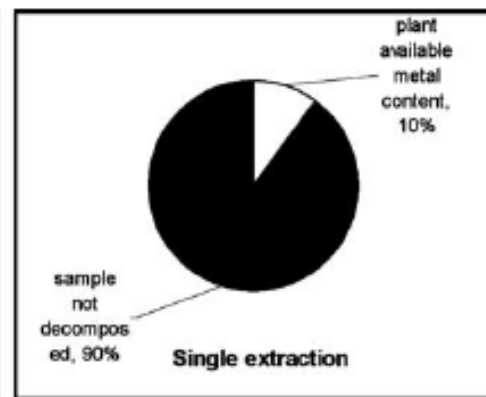
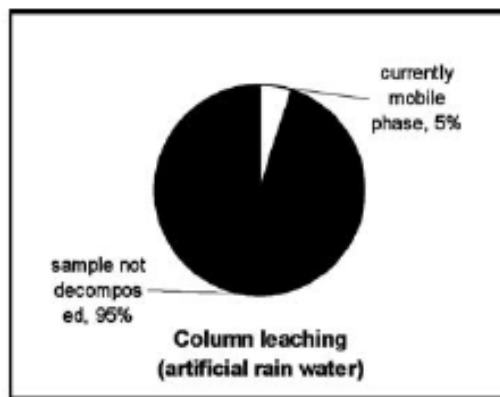
- ✓ Espectrometria de absorção atômica (AAS)
- ✓ Espectrofotometria UV-vis
- ✓ Fluorescência de raios-X
- ✓ ICP-OES
- ✓ ICP-MS
- ✓ Cromatografia iônica
- ✓ Extração sequencial e de fração única
- * Elementos maiores, menores, traços, (~especiação, terras raras)

Métodos e técnicas analíticas mais recentes (exemplos)

- ✓ Thermal ionization mass spectrometry (TIMS)
- ✓ ICP-MS
- ✓ Laser ablation (LA-ICP-MS)
- ✓ Secondary ion mass spectrometry (SIMS)
- * Isótopos estáveis, instáveis, geocronologia, especiação, terras raras

Outras técnicas recentes

- ✓ Airborne gamma-ray spectrometry (campo - regional)
- ✓ Portable X-ray fluorescence (pXRF) (campo - local)
- ✓ Radiação sincrotron (nível molecular, especiação)



Métodos de extração para metais com ácido ou base - Rao et al. (2008)

A determinação de isótopos estáveis leves (H, C, N, O, S) e pesados (Cu, Zn, Ca, Mo, Si, Fe, Cr, Se, Hg, Re, Ni, Ce, Sr) avançou bastante, especialmente com a introdução dos ICP-MS multicoletores.

O estudo de isótopos pode ser usado para traçar a fonte dos materiais do regolito, mobilidade de elementos, tempo de residência e degradação, transporte e contaminação.

Exemplos:

- ✓ Mo, Re e Ce apresenta mobilidade em condições oxidantes
- ✓ Fe apresenta mobilidade em condições redutoras
- ✓ Alta razão $Se^{82}/78$ indica condições subóxicas
- ✓ Alta razão $Sr^{87}/86$ indica intemperismo mais ativo

Mobilidade ou retenção de terras raras (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) em compostos inorgânicos e orgânicos pode ser utilizado para estimar intensidade de intemperismo, depleção de elementos, lixiviação e condições redox.

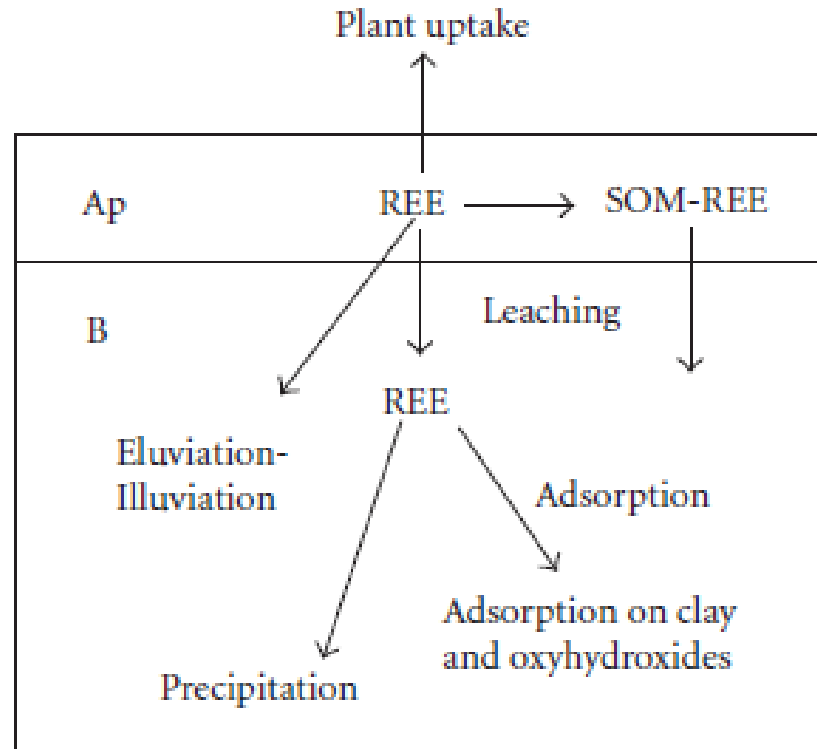
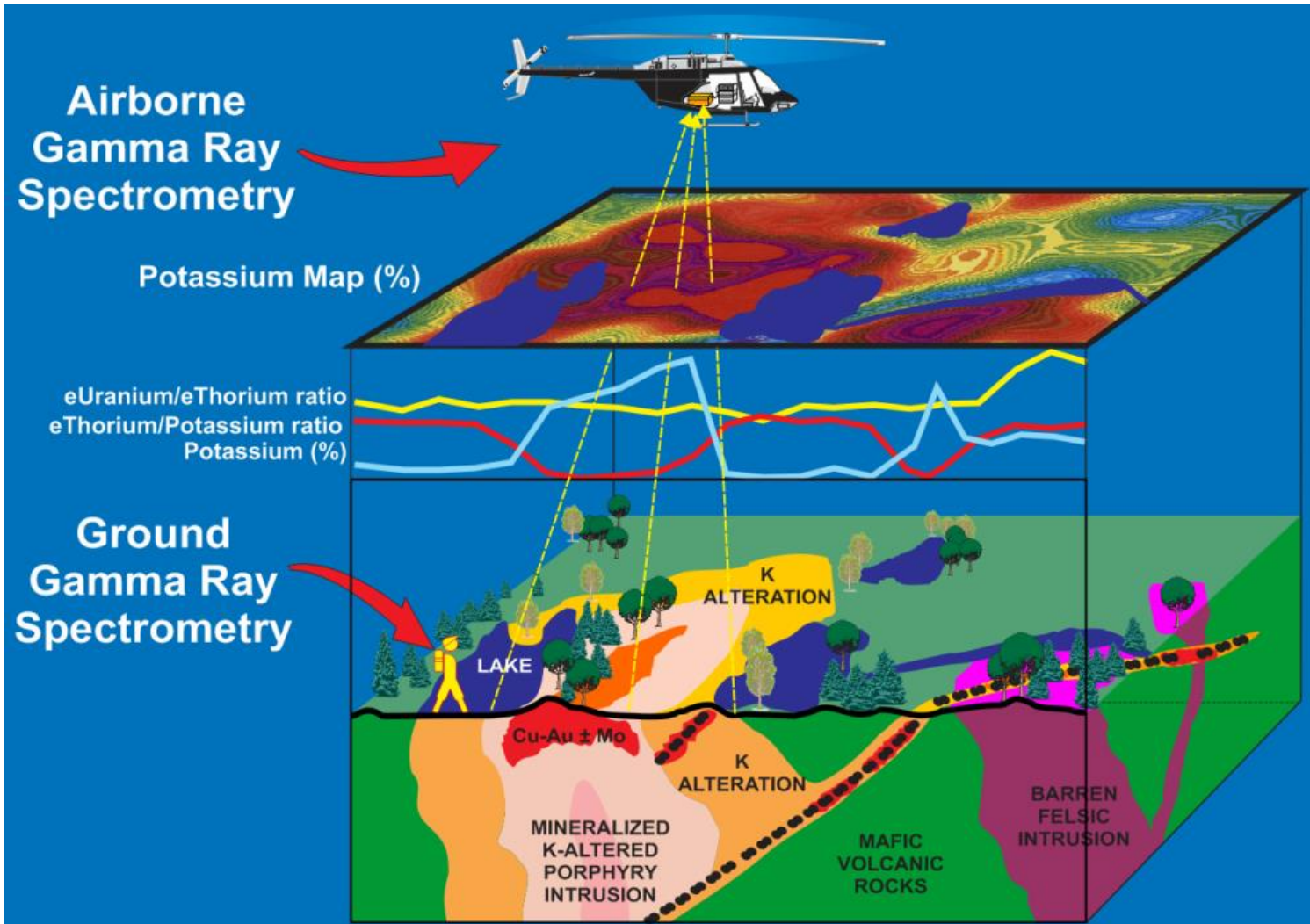


FIGURE 13: An illustration of the potential pathways for REE migration and sequestration.

Aide & Aide (2012)



http://gamx.ca/wp/?page_id=273

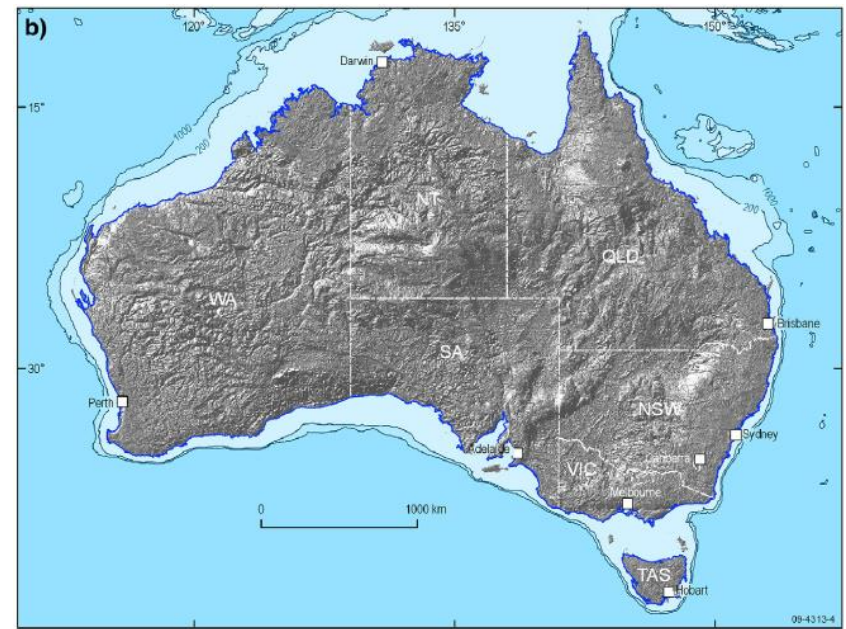
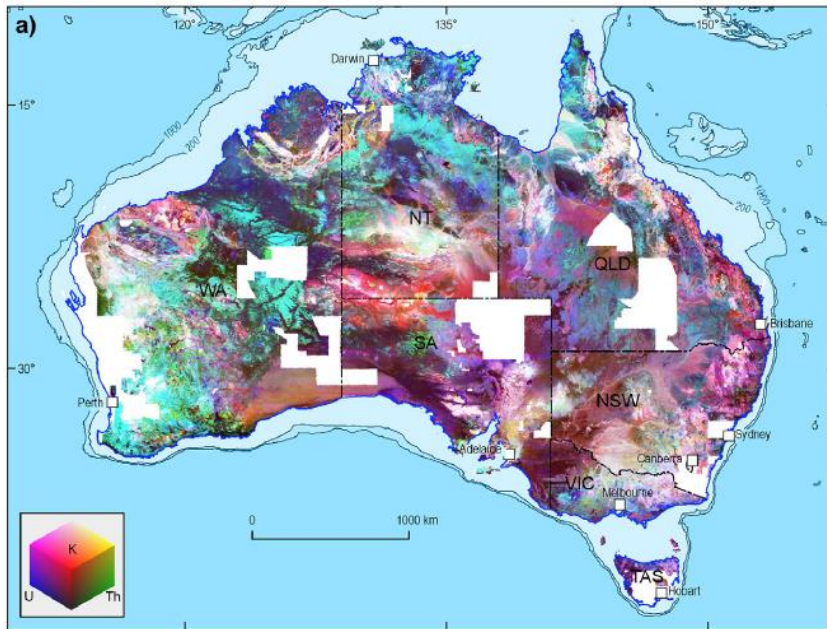


Fig. a — Radiometric map of Australia ternary image with K in red, eTh in green and eU in blue. b — Hillshaded 90m SRTM DEM image with NWSun illumination.

Mede a intensidade de emissão da radiação gama dos elementos K, Th e U presentes no solo e rocha até 40cm de profundidade sendo a intensidade proporcional a concentração. Alta razão Th/K and U/K indica material laterítico.

Wilford (2012)

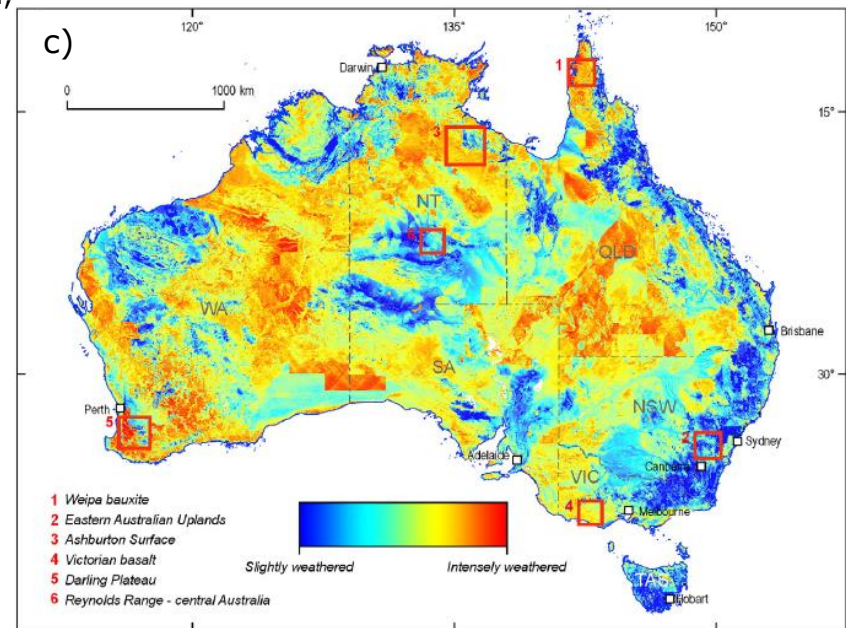


Fig. c — Weathering intensity index.

Amazônia

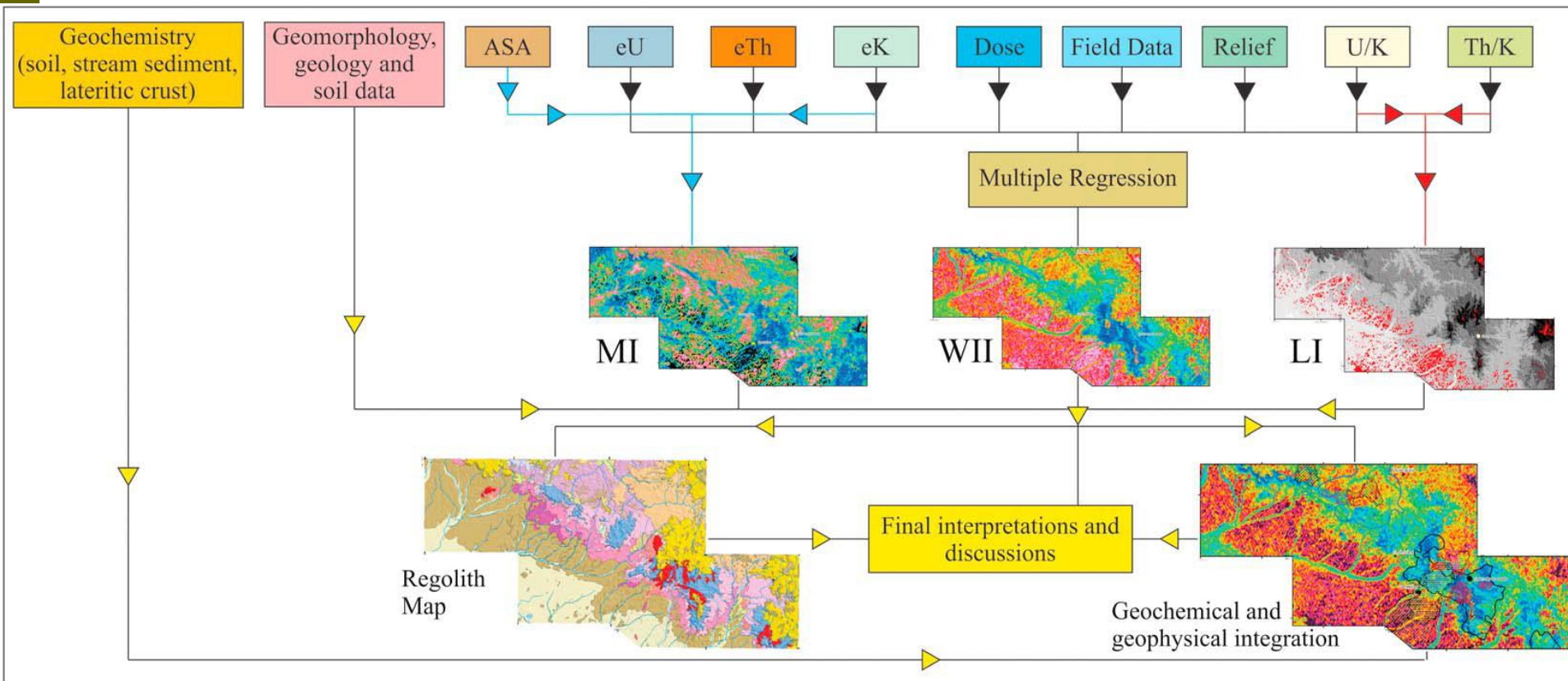


Figure 2. Summary of procedures for mapping the regolith and lateritic duricrusts and then integrating the geochemical and geophysical data. ASA = analytic signal amplitude; WII = weathering intensity index; MI mafic index; LI = lateritic index.

Iza et al. (2018)

Elements for pXRF analysis																		He
H																		He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

	cannot be analysed by pXRF, or out of scope of field analysis
	may be analysed with specific pXRF technologies
	may be analysed according to contents and matrix with current equipment
	can be analysed by pXRF in most cases
	detected but cannot be analysed individually by current equipment

Fig. 3. Elements accessible to pXRF analysis.



Portable XRF (pXRF)
Lemière (2018)

Técnicas espectroscópicas com uso da radiação síncrotron (no Brasil – LNLS)

Múltiplas técnicas:

XRF, XRD, IR, XANES, XAFS, NEXAFS

Exemplo: Cr(VI) é tóxico enquanto Cr(III) não é tóxico. O espectro do X-ray absorption near edge structure (XANES) mostra as duas espécies e o modelo molecular que ilustra a diferença nas estruturas que pode ser importante para se prever o comportamento do metal em termos de sorção, precipitação, dissolução.

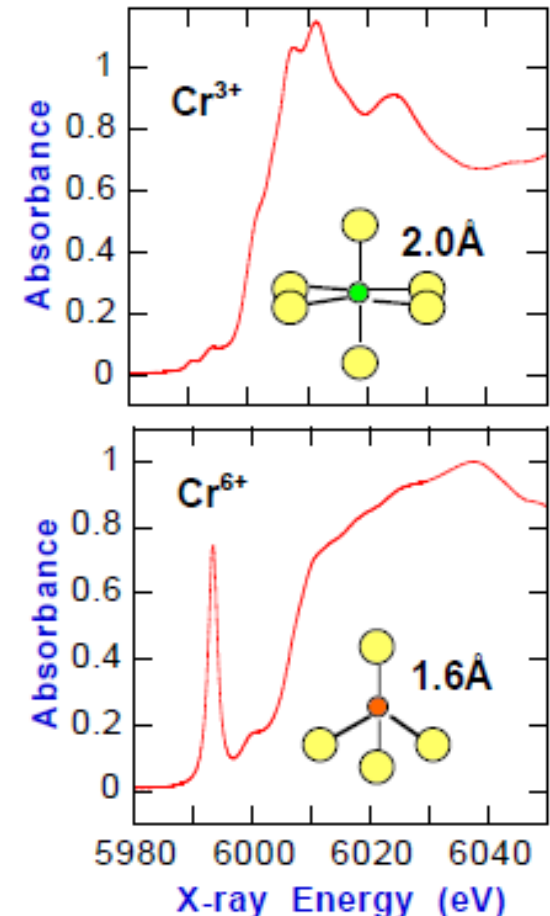
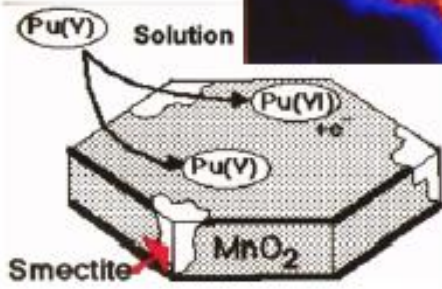
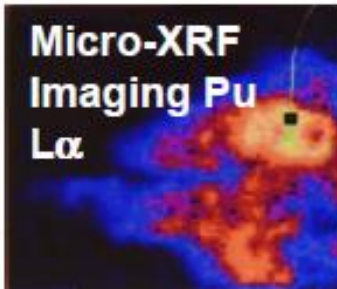


Figure 3. XANES spectra of Cr in the trivalent (top; green atom) and hexavalent (bottom; red atom) chemical forms. (from [4])

Brown et al. (2003)



Exemplo: Plutônio é adsorbido preferencialmente em óxido de Mn e esmectita mas não em óxido de Fe. Também que Pu(V) é oxidado para Pu(VI) durante a reação com óxido de Mn

Figure 4. Micro-XRF image of Pu sorbed onto manganese oxide coatings on smectite grains in Yucca Mountain tuff reacted with a Pu(V)-containing aqueous solution. (from [5,6])

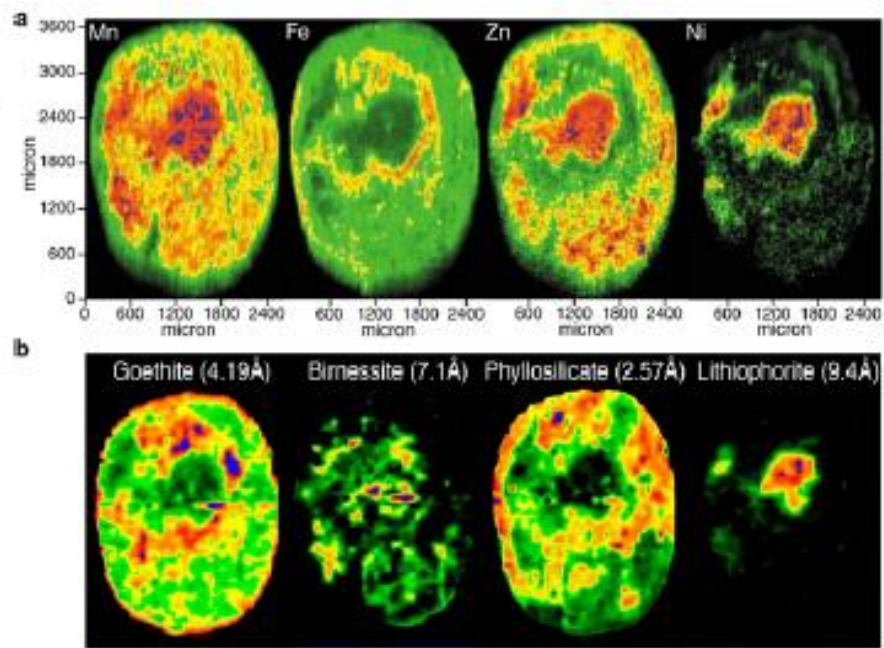


Figure 34. Combined fluorescence (a) and diffraction (b) measurements recorded on a soil ferromanganese nodule. The four top images are elemental maps obtained by μ SXRF, and the four images on the bottom are mineral species maps obtained by rastering the sample in an XY pattern, collecting point XRD patterns, and integrating the diffracted intensity of the relevant (hkl) reflections (*d*-spacings in parenthesis). (from [42])

Aplicação da geoquímica dos regolitos

Exploração mineral

Depósito de Cu e Au de Chapada, GO (Porto, 2010)

- ✓ Associado a xistos ricos em calcopirita, pirita, magnetita que hospedam Cu e Au
- ✓ Laterização no final do Mioceno (~3My – ciclo de agradação Velhas) – Platôs lateríticos, perfil relictual
- ✓ Degradação posterior (lixiviação e erosão) em clima tropical úmido – perfil erosional associado a nova frente de intemperismo, bordas de platôs, vales

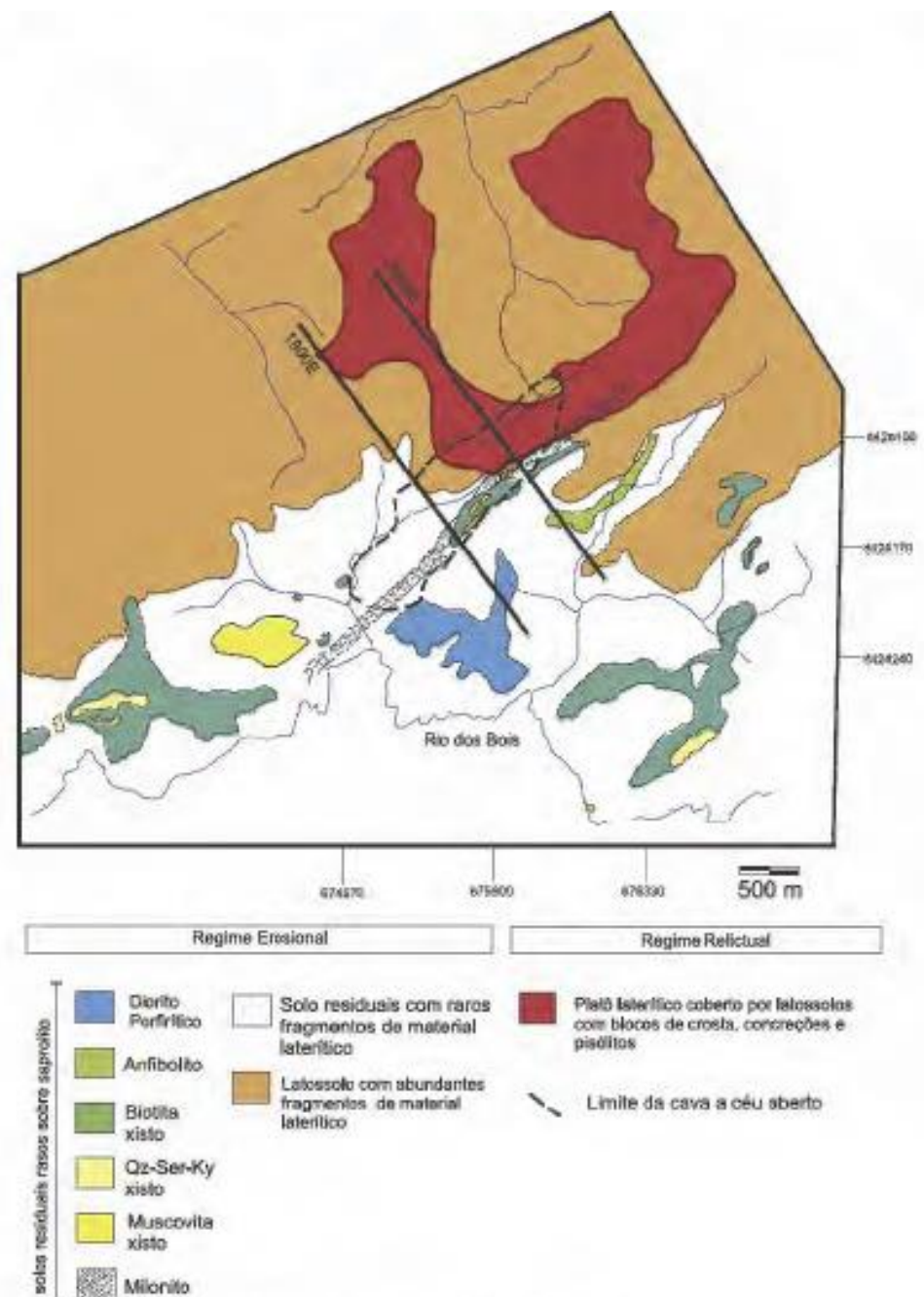


Figura 1 Mapa de regolito nas imediações do depósito de Chapada.

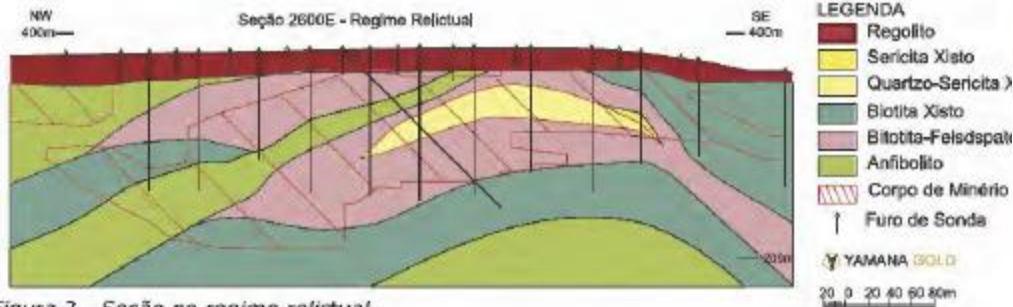


Figura 2 Seção no regime relictual.

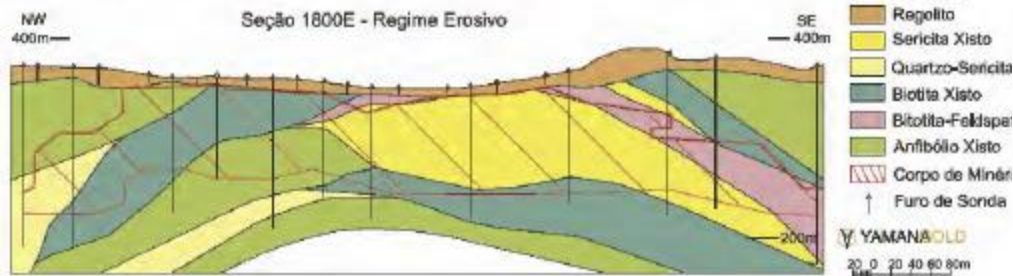


Figura 3 Seção no regime erosivo.

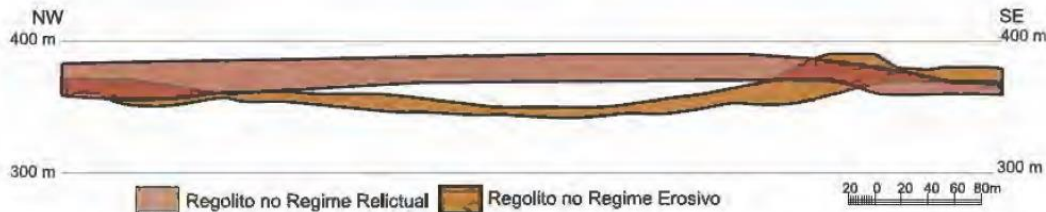
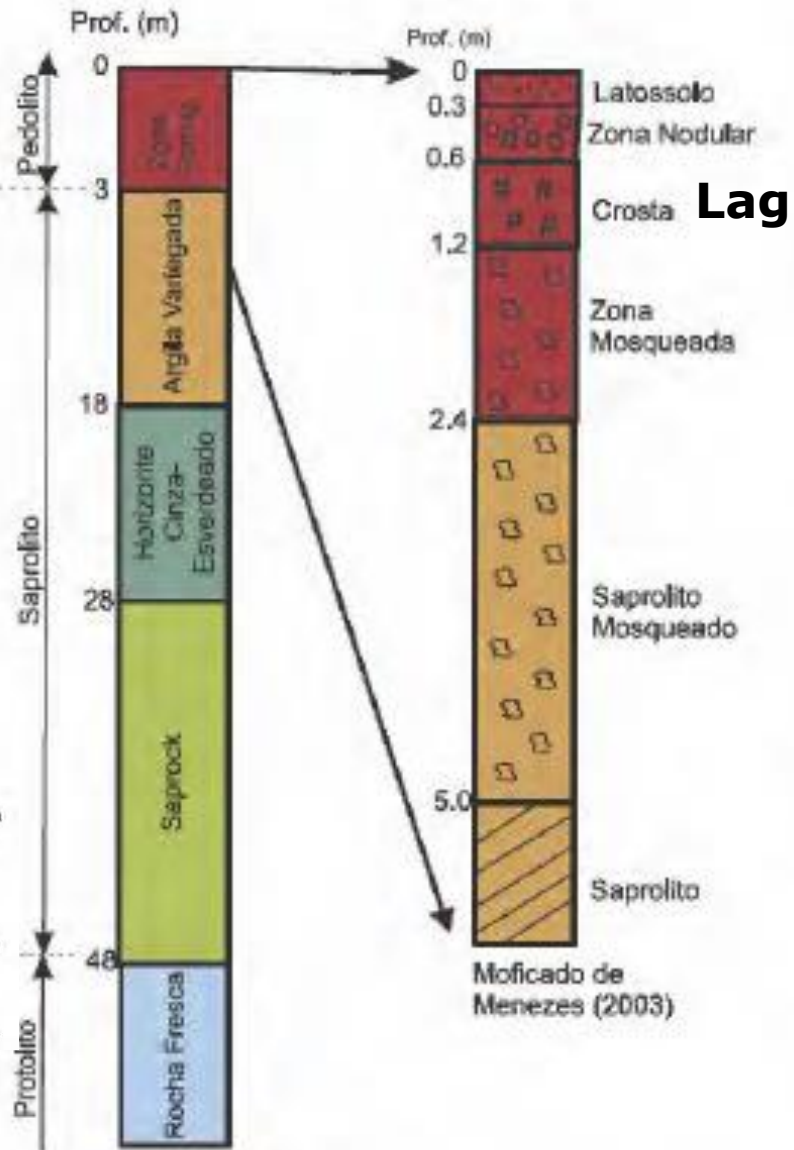


Figura 8 Superfície e profundidade do regolito nas seções dos regimes relictual e erosivo.



Modificado de Parisot et al. (1990)

Figura 4 Estratigrafia do regolito no regime relictual do depósito de Chapada.

Dispersão e mobilidade geoquímica

Depleção Cu aumenta ↑

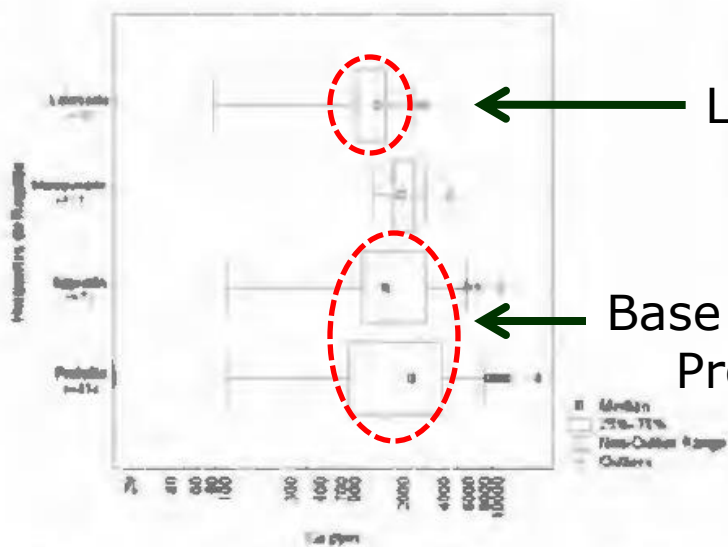


Figura 11 Distribuição de teores de Cu no regolito no regime erosivo.

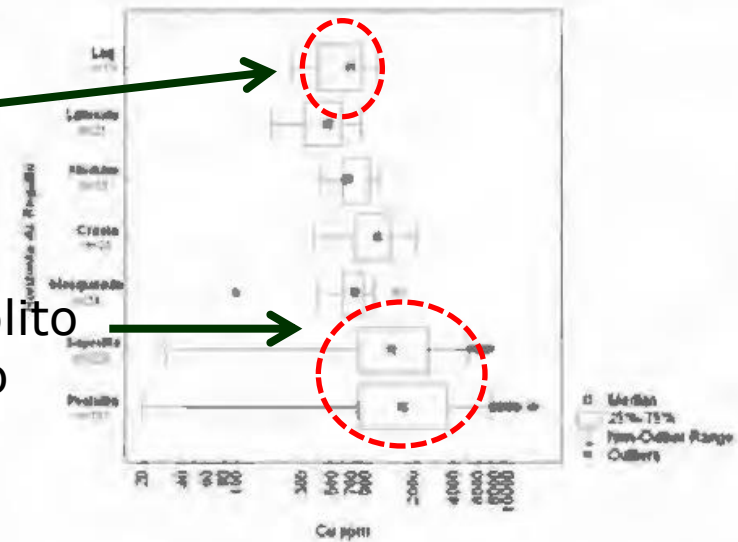


Figura 9 Distribuição de teores de Cu no regolito no regime relictual.

Depleção Au menor (exceto Lag)



Figura 12 Distribuição de teores de Au no regolito no regime erosivo. Figura 14 Distribuição do Au nos diferentes tipos de Lag.

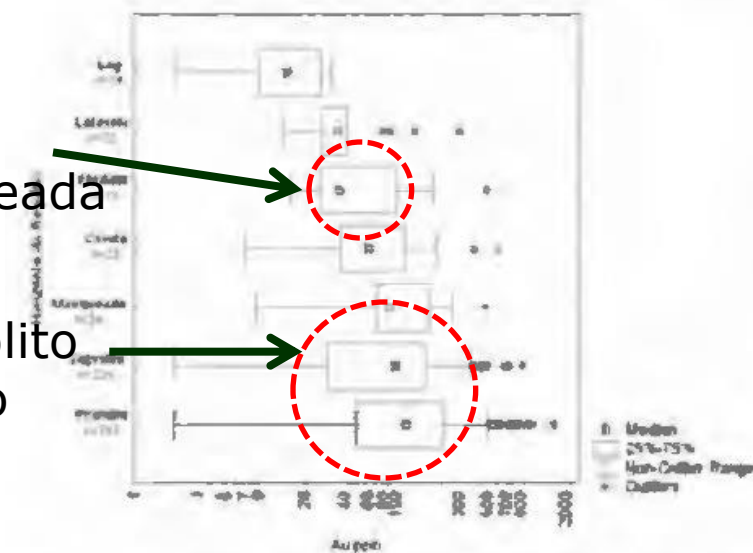


Figura 10 Distribuição de teores de Au no regolito no regime relictual.



Figura 5 Lag junto a latossolos em superfície.

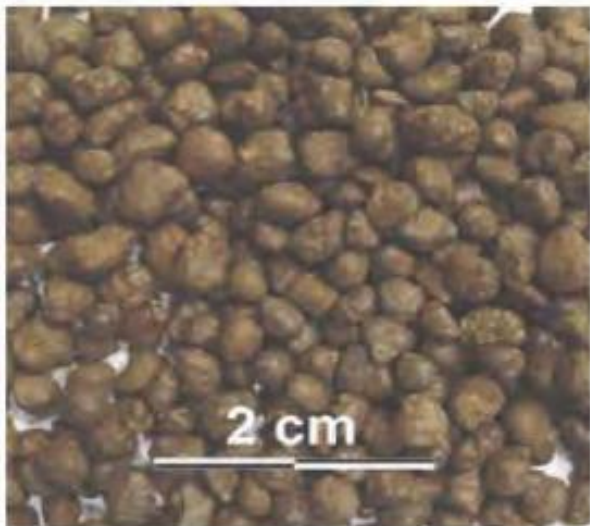


Figura 6 Lag cinza metálico.



Figura 7 Lag laterítico.

Extração seletiva – Cu
 Fe – goetita e caulinita
 (> Lag laterítico)

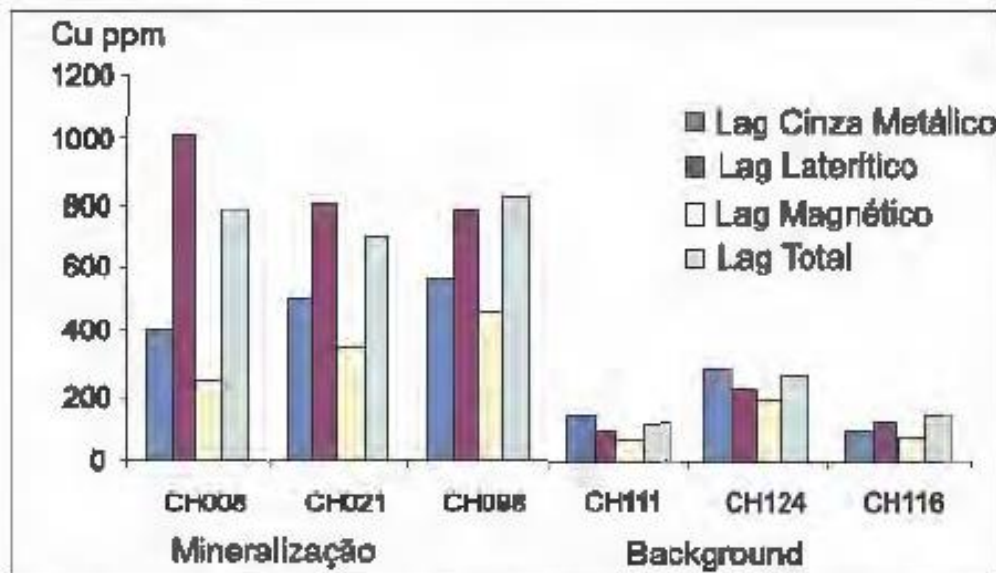


Figura 13 Distribuição do Cu nos diferentes tipos de Lag.

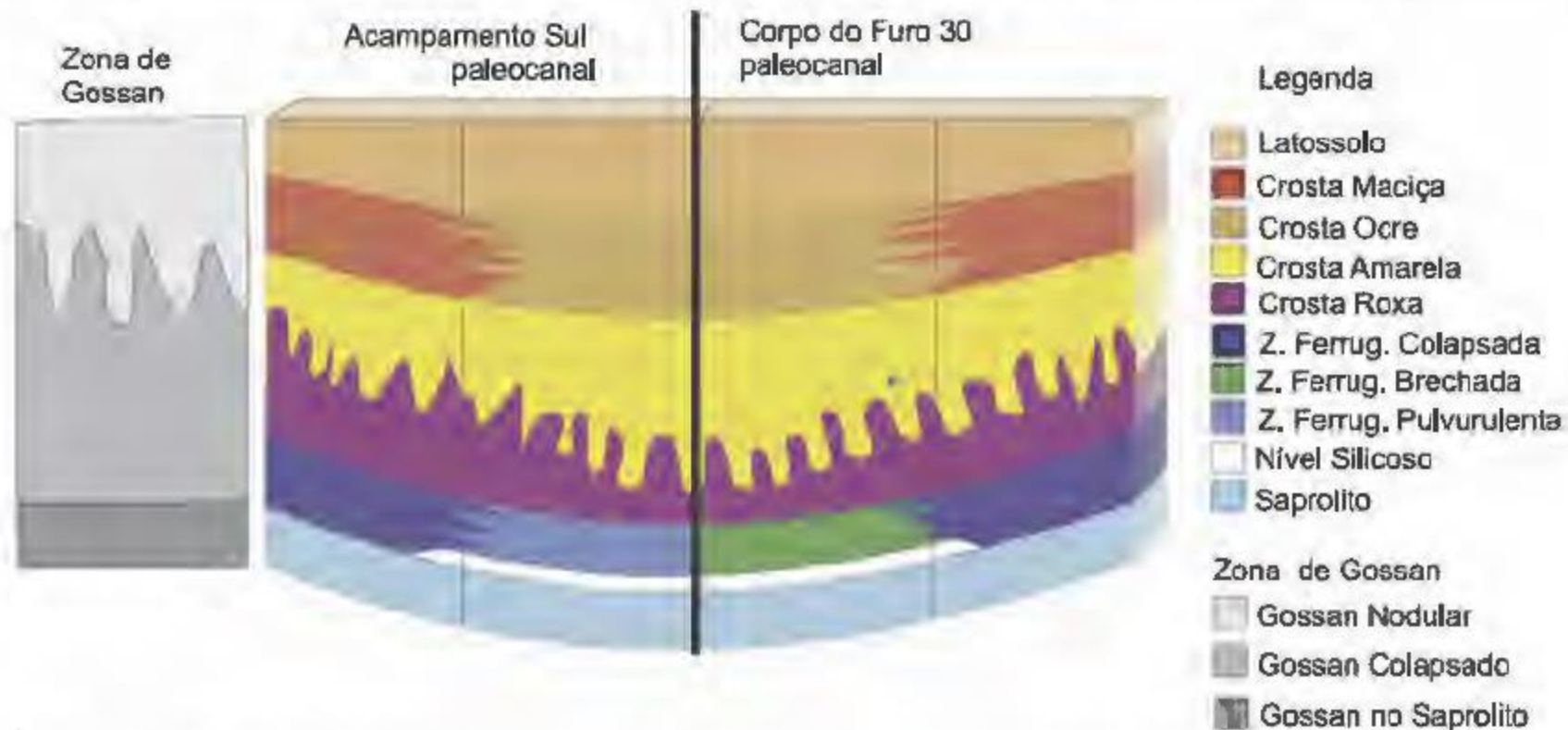
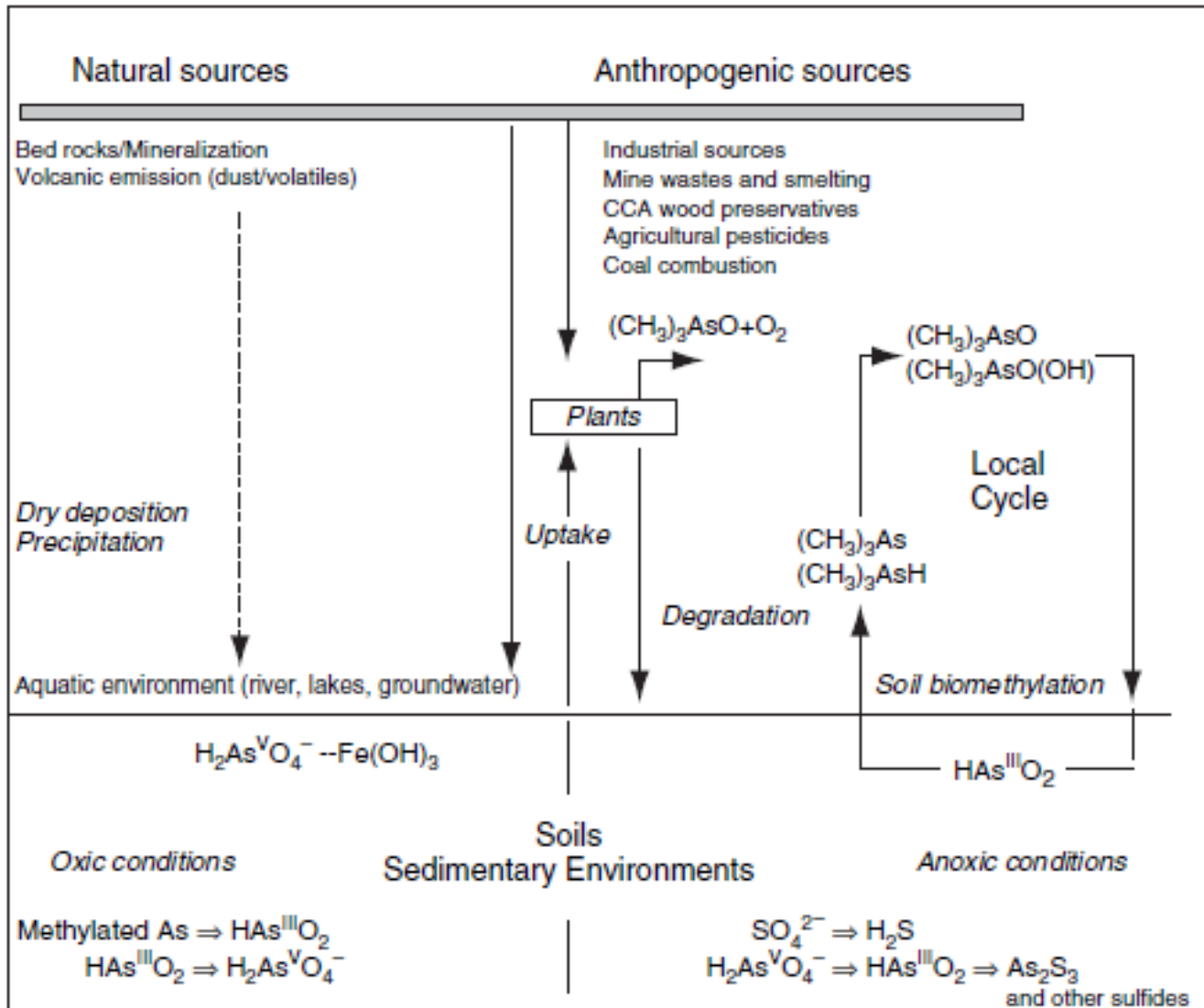


Figura 16 Bloco diagrama que ilustra a estratigrafia de regolito de Igarapé Bahia.

Aplicação da geoquímica dos regolitos

Meio ambiente



Ciclo biogeoquímico do arsênio na superfície – Nriagu et al. (2007)

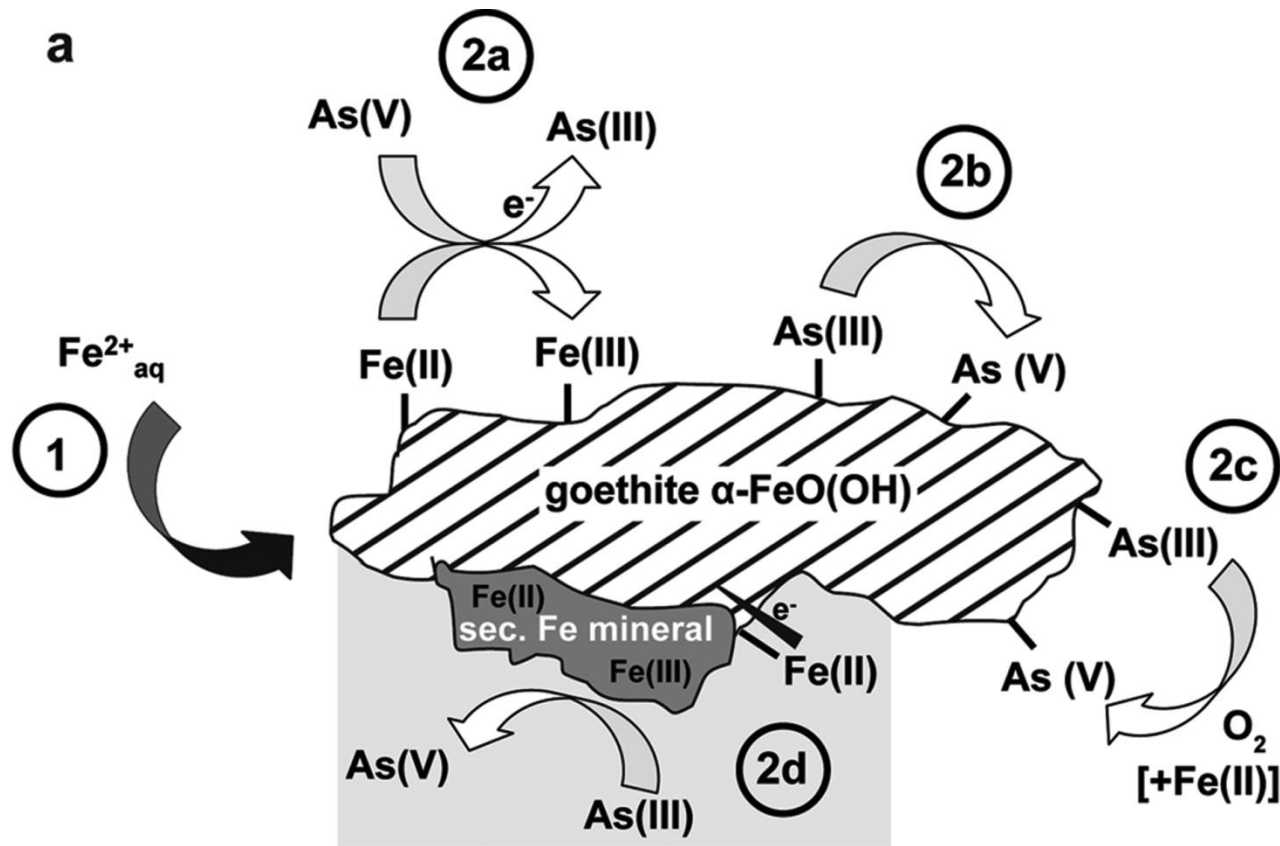
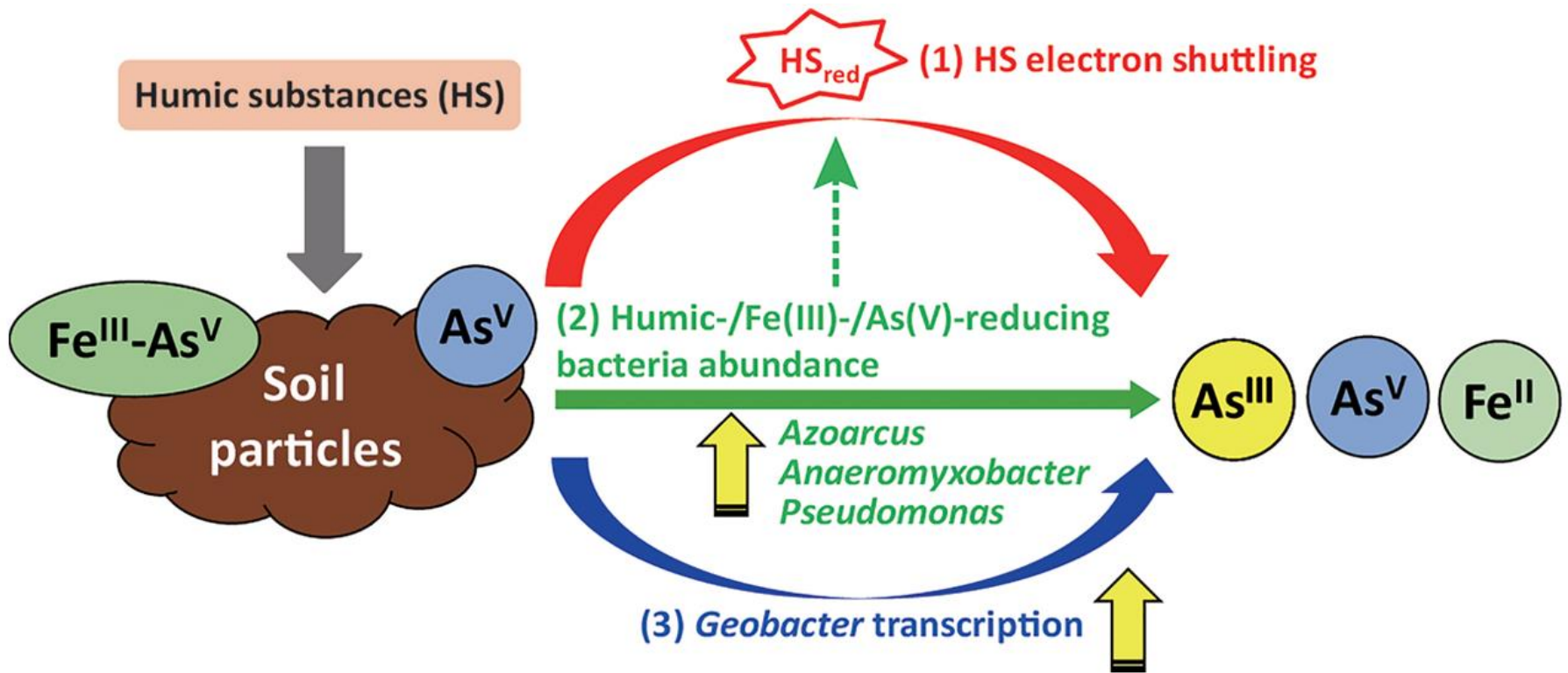


FIGURE 3. (a) Scheme summarizing possible redox reactions in a system containing dissolved Fe(II), goethite and the arsenic species As(III) or As(V). (1) Adsorption of dissolved Fe(II), (2a) reduction of As(V) by adsorbed Fe(II), (2b) direct oxidation of As(III) at the goethite surface, (2c) oxidation of As(III) by O₂, and (2d) As(III) oxidation by secondary mixed-valent iron mineral phases (the latter one probably being relevant for our study and therefore highlighted in gray).



Qiao et al. (2019)

Conclusão

1. Mapeamento dos regolitos no Brasil é escasso
2. Combinação de técnicas analíticas complementares é desejável (usuais e modernas)
3. Incorporação de técnicas analíticas avançadas (p.ex. radiação síncrotron) permitirá elucidar mecanismos geoquímicos a nível molecular
4. Há um vasto campo para aplicação da geoquímica dos regolitos na mineração, meio ambiente e geologia de engenharia

Referências citadas

Gee, R.D.; Anand, R.R. 2004. Advances in Regolith Research — A CRC LEME Perspective. Pacrim, 29-44

Aspandiar, M.F. 2007 Regolith Profiles Types, Materials, Genesis and Terrestrial Processes. Apresentação CRC LEME.

Blancaneaux, P. 1998. Interações Ambientais no Cerrado Microbacia Piloto de Morrinhos, Estado de Goiás, Brasil. Embrapa, Rio de Janeiro. 338p.

Pain, C.F.; Craig, M.A.; Gibson, D.L.; Wilford, J.R. 2001. Regolith-landform mapping: An Australian approach. In: Geoenvironmental mapping, method and practice. Editor: P.T. Bobrowsky. A.A.Balkema, Swets and Zeillinger Publishers, 29-58.

Silva, M.L.; Batezelli, A.,Ladeira, F.S.B. 2019. Genesis and evolution of paleosols of the Marília Formation, Maastrichtian of the Bauru Basin, Brazil. Catena 182, 1-28.

Taylor, G.; Eggleton, R. A. 2001. Regolith Geology and Geomorphology. viii+375 pp. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: John Wiley & Sons Ltd.

Brown, G.E., Jr., Foster, A.L., Ostergren, J.D.. 1999. Mineral surfaces and bioavailability of heavy metals: a molecular-scale perspective. Proc. Nat. Acad. Sci. USA,96, 3388-3395.

Brown, G.E. et al. 2003. MOLECULAR ENVIRONMENTAL SCIENCE: An Assessment of Research Accomplishments, Available Synchrotron Radiation Facilities, and Needs. Report of EnviroSync – A National Organization of Environmental Science Users of Synchrotron Radiation Sources, Stanford Linear Accelerator Center, California.

Bride, M. B. 1994. Environmental chemistry of soils. Oxford: Oxford University Press. 406 p.:il.

Schellmann, W. 1981. Considerations on the definition and classification of laterites. In: International Seminar on Lateritization Processes, 1. Trivandrum, Proceedings, p. 1-10

Formoso, M.L.L. 2006. Some topics on geochemistry of weathering: a review. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 78(4): 809-820.

Rao, C.R.M.; Sahuquillo, A.; Lopez Sanchez, J. F. 2008. A Review of the Different Methods Applied in Environmental Geochemistry For Single and Sequential Extraction of Trace Elements in Soils and Related Materials. Water Air Soil Pollut, 189:291-333

Aide, M.T.; Aide, C. 2012. Rare Earth Elements: Their Importance in Understanding Soil Genesis. ISRN Soil Science, Vol.2012, 1-11.

Wilford, J. 2012. A weathering intensity index for the Australian continent using airborne gamma-ray spectrometry and digital terrain analysis. Geoderma 183-184, 124-142.

Iza, E. R. H. F., Horbe, A. M. C., Castro, C. C., & Herrera, I. L. I. E. 2018. Integration of geochemical and geophysical data to characterize and map lateritic regolith: An example in the Brazilian Amazon. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 19. <https://doi.org/10.1029/2017GC007352>

Lemière, B. 2018. A review of pXRF (field portable X-ray fluorescence) applications for applied Geochemistry. Journal of Geochemical Exploration 188, 350-363.

Porto, C.G; Imbernon, R.A.L.; Toledo, M.C.M.; Menezes, R.O.G.; Souza, J.J.S.; Borges, C.E.P. 2010. DEPÓSITOS DE COBRE E OURO EM REGOLITOS LATERÍTICOS NO BRASIL: CASOS DE CHAPADA (GO), IGARAPÉ BAHIA E SALOBO (CARAJÁS, PA). In: MODELOS DE DEPÓSITOS DE COBRE DO BRASIL E SUA RESPOSTA AO INTEMPERISMO. Brito, R.S.C.B.; Silva, M.G.; Kuyumjian, R.M. (editores). Capítulo IX. p. 189-213.

Nriagu, J.O.; Bhattacharya, P.; Mukherjee, A. B.; Bundschuh, J.; Zevenhoven, R.; Loeppert, R.H. 2007. Arsenic in soil and groundwater: an overview. Trace Metals and other Contaminants in the Environment, Volume 9, 3-60

Amstaetter, K.; Borch, T.; Larese-Casanova, P.; Kappler, A. 2010. Redox transformation of arsenic by Fe(II)- activated goethite (α -FeOOH) Environ. Sci. Technol., 44, 102-108.

Qiao, J.; Li, X.; Li, F.; Liu, T.; Young, L.Y.; Huang, W.; Sun, K.; Tong, H.; Hu, M. 2019. Humic Substances Facilitate Arsenic Reduction and Release in Flooded Paddy Soil. Environ. Sci. Technol. 53:5034-5042.

Obrigado!



acampos@ige.unicamp.br