

**COMPORTAMENTO GEOQUÍMICO DO URÂNIO NO MANTO DE INTEMPERISMO DA
JAZIDA LARANJEIRAS, PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL, BAHIA**

E.B. Rocha¹, J.-M. Schmitt², A.J. Melfi¹

1. Departamento de Geofísica/IAG-NUPEGEL-USP, São Paulo

2. École des Mines de Paris, Fontainebleau, France

ABSTRACT

The Lagoa Real Uranium Province, located in mid-southern Bahia state, contains several economic U deposits, including the Laranjeiras ore deposit. Uranium concentrations are associated to a facies of albite gneisses (lower Proterozoic Lagoa Real Complex). The Laranjeiras U deposit represents a good example of scarp type deposit. It is covered by a lateritic weathered mantle typical of tropical environments. Geochemical studies show that the leached U from mineralizations migrates downslope with the associated elements. The secondary U-bearing mineralogical phases are identified in the alteration profiles. Uranium is sorbed by weathering products, mostly in amorphous Ti-Fe oxihydroxide surfaces and Ce-rich clay products.

RESUMO

A Província Uranífera de Lagoa Real, localizada no centro-sul da Bahia, é formada por diversas jazidas de U. Uma delas, a Jazida Laranjeiras, constitui um bom exemplo de jazida de encosta. As mineralizações de U relacionam-se à fácies de albite gnaisses do Complexo Lagoa Real (Proterozóico inferior). A Jazida Laranjeiras é recoberta por um manto de intemperismo laterítico típico de ambientes tropicais. Os estudos geoquímicos mostram que o U lixiviado das mineralizações migra, com elementos associados, em direção a jusante. As fases minerais secundárias, portadoras de U, são identificadas nos perfis de alteração. O U ocorre sorvido nos produtos de alteração amorfos, particularmente nos oxihidróxidos de Fe-Ti e nos produtos argilosos ricos em Ce.

INTRODUÇÃO

A despeito do grande volume de informações existentes, o comportamento geoquímico do urânio e dos elementos a ele associados no ciclo supérgeno, em particular nos ambientes lateríticos, não é, ainda, perfeitamente conhecido. Sabe-se, porém, que os minerais de urânio mostram-se bastante sensíveis às alterações supérgenas, e a sua mobilidade é fato amplamente conhecido e constatado por aqueles que se dedicam à geologia do urânio, à sua prospecção e pesquisa. O problema básico que requer elucidação diz respeito a identificação do percurso do urânio remobilizado desde a sua origem, ou seja, a mineralização primária, até os ambientes onde é redepositado (Kogler et al., 1983; Samama, 1984; Mogé et al., 1987). Esses ambientes correspondem normalmente às mudanças locais das condições físico-químicas indutoras da precipitação e/ou fixação dos minerais de urânio hexavalente (Langmuir, 1978), as quais materializam-se no zoneamento da mineralização supérgena dentro do perfil laterítico.

Os depósitos e ocorrências de urânio são, em princípio, os alvos preferenciais para investigação de seu comportamento geoquímico, pois a ocorrência de teores mais elevados torna mais fácil o seu acom-

panhamento. A importância da pesquisa nesses locais reside tanto no campo do conhecimento básico do comportamento geoquímico do urânio diante da alteração intempérica, quanto na formulação de modelos de prospecção de urânio ou de elementos acompanhadores, adaptados aos ambientes lateríticos.

Os resultados dos estudos desenvolvidos sobre o manto de intemperismo da Jazida Laranjeiras constituem, neste momento, uma contribuição significativa ao melhor entendimento dos processos de mobilização e fixação do urânio em terrenos lateríticos gerados em ambientes intertropicais.

CONTEXTO REGIONAL

A Jazida Laranjeiras integra, juntamente com outras cinco jazidas e dezenas de anomalias (ocorrências e indícios), a Província Uranífera de Lagoa Real-BA (Fig. 1), uma das maiores e mais importantes áreas de ocorrência de urânio no Brasil (Oliveira et al., 1985).

A Província de Lagoa Real está localizada no centro-sul do Estado da Bahia, cerca de 350 km da costa Atlântica, entre 42°00' e 42°30' de longitude oeste, e entre 13°45' e 14°15' de latitude sul. Esta área

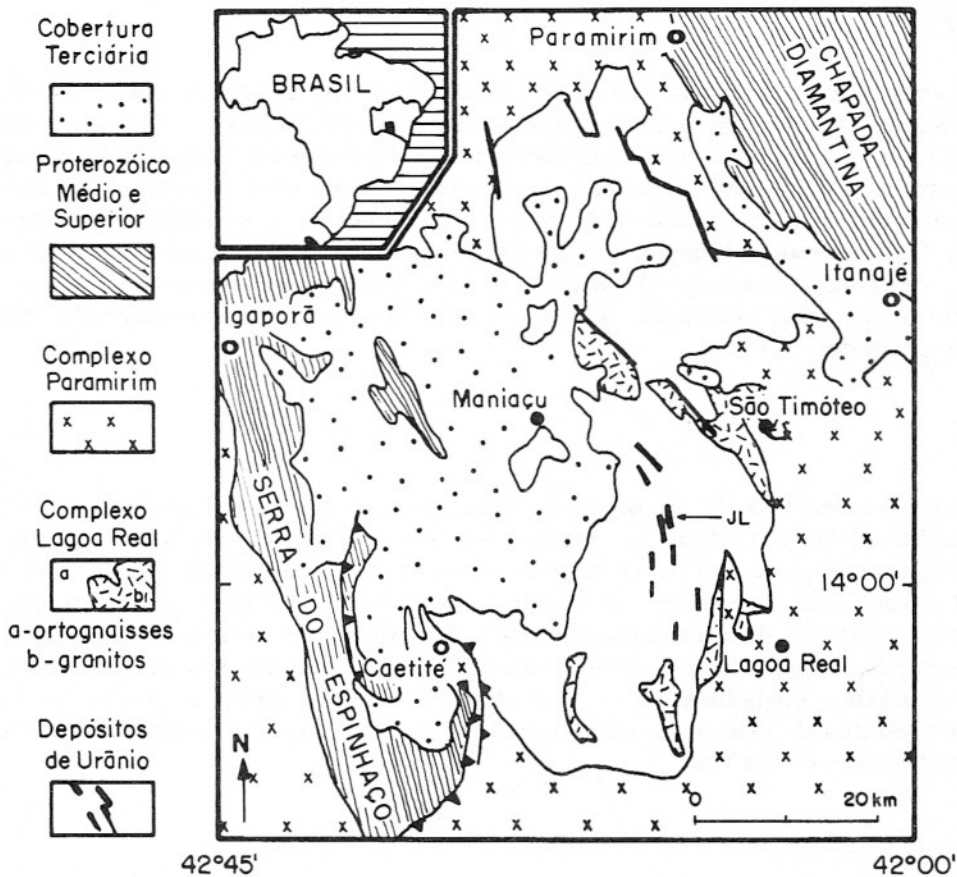


Figura 1 – Mapa geológico esquemático da Província Uranífera de Lagoa Real. JL: Jazida Laranjeiras (modificado de Maruejol, 1989).

compõe a parte superior ocidental da bacia hidrográfica do Rio de Contas.

O clima da região é tropical quente e sub-úmido (Nimer, 1977) com duas estações contrastadas. A estação seca se estende de maio a setembro, e a estação chuvosa, durante a qual ocorrem 80% das precipitações, de outubro a abril. A temperatura média anual é 22°C. A precipitação anual excede 800 mm, mas a rede de drenagem consiste, essencialmente, de cursos d'água temporários. A vegetação é constituída por savanas tropicais dos tipos caatinga e cerrado.

A Província de Lagoa Real faz parte do cráton São Francisco, o qual compreende um embasamento Arqueano e Proterozóico Inferior e dois cinturões dobrados do Proterozóico Médio e Superior: Chapada Diamantina a leste e Serra do Espinhaço a oeste (Moutinho da Costa et al., 1976; Inda & Barbosa, 1978; Almeida & Hasui, 1984).

As seguintes unidades litológicas são distinguidas no embasamento: (i) migmati-

tos e rochas plutônicas do Arqueano e Proterozóico Inferior (complexo Paramirim); e (ii) o complexo granítico Lagoa Real, constituído de ortognaisses com alguns corpos graníticos indeformados (Costa et al., 1983, 1985). Na parte oeste da região, encontra-se uma cobertura pouco espessa de sedimentos arenosos terciários.

A prospecção de urânio na região foi iniciada no ano de 1971 (Ramos & Maciel, 1974), principalmente por meio de levantamentos aerogamaespectrométricos. Esta fase inicial e os levantamentos complementares, realizados pela NUCLEBRÁS (hoje Urânio do Brasil) na segunda metade daquela década (Geisel Sobrinho et al., 1980; Raposo & Matos, 1982), resultaram na descoberta de mais de 30 ocorrências de interesse econômico.

Foi através da adoção de estratégias clássicas de pesquisa e prospecção que as jazidas de U de Lagoa Real vieram a ser descobertas e delimitadas. Evidentemente, apenas as áreas com radioatividade anô-

mala em superfície foram detectadas. Isso, porém, não significa que a extensão atual das jazidas não possa vir a ser modificada e provavelmente ampliada. Para isso, basta que sejam desenvolvidos e aplicados métodos de prospecção geoquímica capazes de revelar as áreas favoráveis à presença de U, mesmo nos lugares onde não haja anomalias radiométricas evidentes em superfície (p.ex. depósitos recentes), ou onde elas estejam mascaradas por uma cobertura de alteração.

Os depósitos de urânio, econômicos ou sub-econômicos, conhecidos atualmente, formam um cinturão arqueado, submeridiano, localizado no quadrilátero Caetité-Maniaçu-São Timóteo-Lagoa Real (Fig. 1). A mineralização de urânio ocorre como corpos de minério albitizados que se colocam como veios de direções NS a NNW-SSE no complexo granitóide Lagoa Real. Estudos petrológicos e geocronológicos (Fuzikawa et al., 1988; Turpin et al., 1988; Maruejol, 1989) mostraram que a mineralização de urânio e o metassomatismo sódico foram causados por um evento hidrotermal ocorrido há cerca de 1,4 Ga. Há, entretanto, autores que postulam uma idade brasileira para esses mesmos eventos (Lobato & Fyfe, 1990).

METODOLOGIA

A pesquisa do manto de intemperismo da Jazida Laranjeiras desenvolveu-se em duas fases. A primeira visou a aquisição dos resultados de base. Nessa fase foram caracterizadas, do ponto de vista mineralógico e petrográfico, as mineralizações primárias, as rochas encaixantes estéreis e seus respectivos produtos de alteração. Dessas caracterizações fizeram parte: as observações sobre textura do minério (diseminado e agregado), a natureza dos minerais uraníferos (primários e secundários), e a sua paragênese (minerais acompanhadores). Com relação especificamente à caracterização da alteração laterítica, foi definida a sua geometria e estrutura por meio do reconhecimento macroscópico dos perfis sobre rochas-mãe e corpos de minério, e estudada a sua evolução lateral, reconstituída através do estudo de uma toposequência. Dados estruturais, de repartição geral de teores, de distribuição da radioatividade superficial e da geometria dos corpos mineralizados já haviam sido obtidos previamente. A caracterização mineralógica

e petrográfica dos diferentes horizontes de alteração foi feita também na escala de lâmina delgada, e por meio de análises por difratometria de raios-x sobre rocha total e frações extraídas. Essas análises visavam à identificação das filiações minerais e dos mecanismos da alteração. Em particular, sobre os corpos de minério, a petrografia das alterações buscava o reconhecimento das fases portadoras, residuais ou neofornadas e das filiações dos minerais uraníferos na alteração.

A segunda fase comportou os estudos e interpretações de natureza mais estritamente geoquímica. Com a utilização de métodos de análise mais finos (p.ex. Microsonda Eletrônica - ME) foi possível um melhor reconhecimento das fases portadoras de urânio, dos produtos secundários adsorvidos e dos elementos e tipos de microestruturas associadas. Adicionalmente aos dados adquiridos na fase anterior, com os resultados de análises químicas pontuais (ME) e de rocha total (elementos maiores e elementos traço), foi possível interpretar a geoquímica dos elementos não radiogênicos, seja na mineralização primária, seja na alteração; e discutir a dinâmica do urânio e elementos associados na alteração recente. As microanálises foram feitas em microsonda eletrônica do tipo CAMEBAX, com a aplicação de dois programas de análise. O primeiro é utilizado para caracterizar os diferentes minerais de urânio (silicatos, fosfatos, titanatos, arsenatos, vanadatos, molibdatos, selenatos, ...), e também as fases minerais acessórias, portadoras de U não dominante (fons em substituição diadômica). Este programa permite a dosagem dos elementos maiores: Si, P, Ca, Fe, Ti; e dos elementos traço: Se, As, Mo, S, Pb, U, Th, Zr, Y, V, Ce, Ba, Cu e W. O segundo é um programa mais apropriado à caracterização dos minerais formadores da rocha. Através dele são dosados os elementos maiores: Na, Si, Mg, Al, K, Ca, Fe, Mn, e Ti; e os elementos traço: F, Cl, Cr e Ba. Os produtos de alteração analisados apresentam, com frequência, uma composição mineralógica mal definida e, por consequência, são quimicamente não uniformes. Assim, os programas aplicados são incapazes de prever a dosagem de todos os elementos contidos em cada amostra. Acredita-se que este fator, juntamente com o grau de microfraturamento e hidratação dos produtos de alteração sejam os principais responsáveis pelo não fechamento das análises em 100%.

A JAZIDA LARANJEIRAS

Abrangendo uma superfície superior a 40 ha, a Jazida Laranjeiras (denominada "anomalia 6" pelos prospectores) localiza-se na porção setentrional da província uranífera, aproximadamente a meio caminho entre Lagoa Real e Maniaçu (Fig. 1). As rochas, via de regra mal expostas, apresentam-se na área da jazida como blocos rolados e matacões. São essencialmente gnaisses e albititos (termos metassomáticos com alto conteúdo de albita), estes últimos ocorrendo em superfície como corpos lenticulares alongados. A mineralização de urânio encontra-se, exclusivamente, associada à fácies albitica desprovida de quartzo e, em geral, rica em minerais cálcicos.

A mineralização é constituída, essencialmente, por cristais microgranulares de uraninita que, em certos locais, apresenta-se parcialmente alterada em uranofânio. A análise dos testemunhos de sondagem revela que a uraninita se apresenta como massas ou agregados e filetes concordantes com a foliação, concentrada nas bandas máficas, normalmente inclusa nos anfíbios, piroxênios, granadas e nas titanitas. Ocorre também como inclusões ou na interface dos cristais de feldspato.

A maior parte da área da Jazida (>85%) apresenta uma cobertura pouco espessa (<30 cm) de solo marrom-avermelhado, desenvolvido sobre materiais "in situ", comparáveis aos solos ferruginosos tropicais característicos de regiões de clima semi-úmido.

Desde os primeiros trabalhos de campo, a Jazida Laranjeiras mostrou-se como uma área apropriada para o reconhecimento das diferentes alteritas desenvolvidas às custas das fácies mineralizadas e das rochas estéreis. Os trabalhos prévios mostravam que o limite de alteração da rocha mãe, na área da Jazida, situava-se a profundidades que variavam no intervalo entre 1,5 e 8 metros. Com empreendimentos modestos de perfuração, seria possível reconstituir toda a seqüência de alteração, desde a rocha mãe até os horizontes mais superficiais. Uma das trincheiras abertas pela NUCLEBRÁS, durante os trabalhos de prospecção, serviu de imediato às primeiras observações. Estas mostravam a existência de fenômenos, a priori, reveladores de uma migração importante do urânio na alteração. Por apresentar tais condições favoráveis, a Jazida Laranjeiras foi escolhida para o estudo da

redistribuição vertical e lateral do urânio e de seus acompanhadores ao curso da alteração laterítica.

DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS PERFIS DO MANTO DE ALTERAÇÃO DA JAZIDA LARANJEIRAS

A Jazida Laranjeiras localiza-se numa área de encosta, em cuja porção superior, foi estabelecida uma toposeqüência composta por uma *trincheira* e por dois *poços de investigação*.

Nas paredes da trincheira, encontra-se exposto o manto de alteração sobre o principal corpo mineralizado da Jazida (Raposo & Matos, 1983). O levantamento do perfil de alteração na trincheira foi feito pelo exame minucioso da sua parede norte (Fig. 2). Nela, foi possível observar duas litologias em contato: albitito mineralizado e rochas gnáissicas alteradas. As características desta passagem direta do corpo de albitito mineralizado, de um e do outro lado, para o gnaiss estéril, informam sobre certos aspectos relevantes ligados à evolução lateral da alteração (Rocha & Schmitt, 1990).

Os poços de investigação (Fig. 3), situados respectivamente 30 m a montante e 70 m a jusante da trincheira, foram abertos com o intuito de estabelecer perfis de alteração comparativos sobre o gnaiss estéril, encaixante das mineralizações, nas partes superior e inferior da toposeqüência.

Os horizontes de alteração, seja sobre gnaiss ou albitito, podem ser agrupados, por aproximação, nos seguintes conjuntos: *horizontes inferiores*, constituídos por alterita, normalmente com estrutura conservada (isalteríticos); e os *horizontes superiores*, tipicamente argilo-ferruginosos, nos quais não se distinguem as estruturas originais da rocha-mãe (aloteríticos). Na transição para os níveis superiores, interpõem-se horizontes intermediários, estreitos, que incluem, via de regra, porções dos níveis alteríticos inferiores. As características mais relevantes destes conjuntos de horizontes é fornecida a seguir. A descrição detalhada de todos os perfis de alteração está apresentada em Rocha (1991).

Perfil sobre albitito

Isalterita de albitito (IA)

Na trincheira (Fig. 2, parte central),

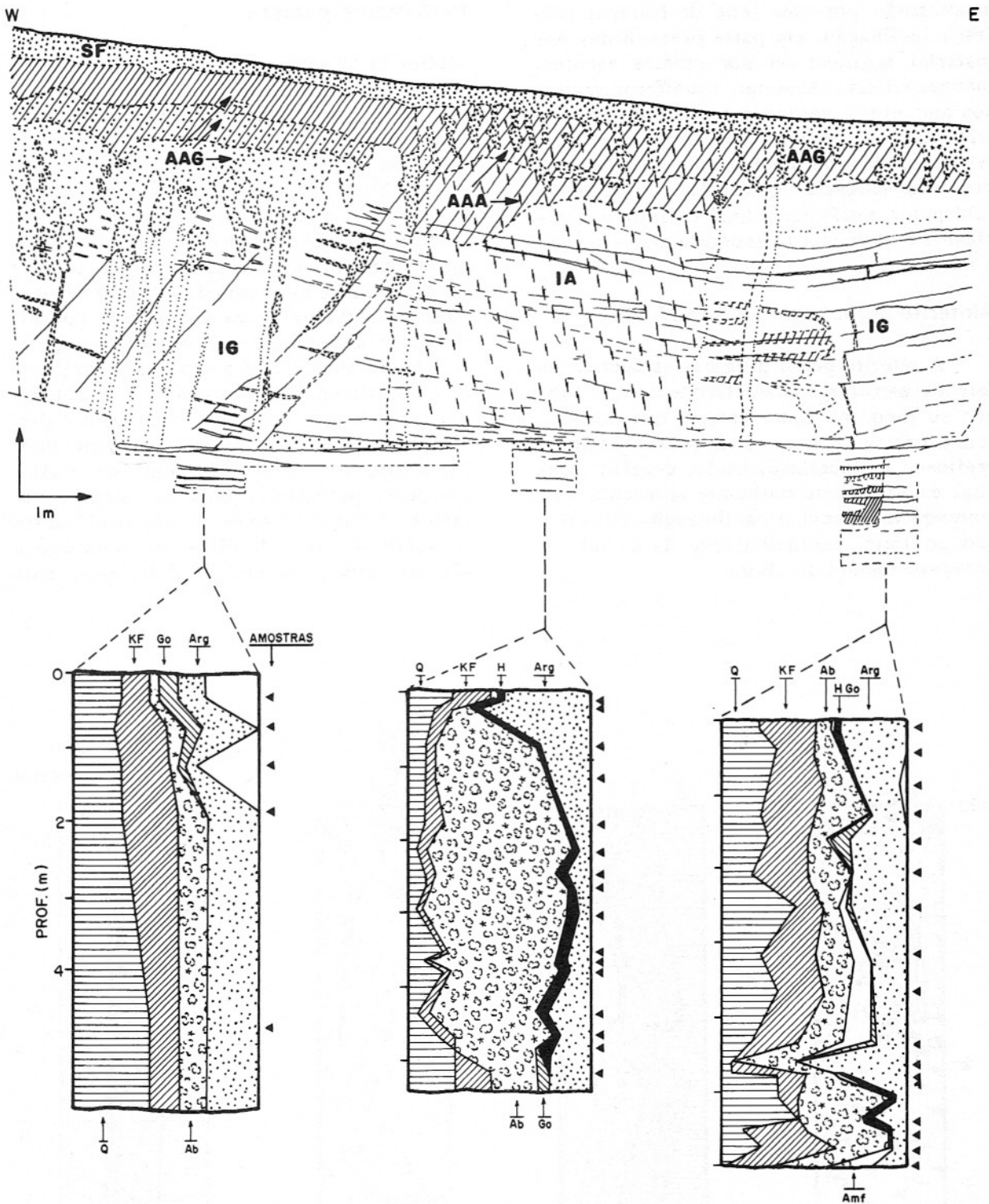


Figura 2 - Perfil de alteração na trincheira e logs mineralógicos. IG: isalterita de gnaiss, AAG: aloterita argilo-ferruginosa de gnaiss. IA: isalterita de albitito, AAA: aloterita argilosa de albitito, SF: solo ferruginoso; Q: quartzo, KF: feldspato potássico, Go: goethita, Arg: argilo-minerais, Ab: albitito, Amf: anfíbólio, H: hematita.

esse horizonte se estende por mais de 3 m a partir da base do perfil. É constituído por isalterita branco-amarelada, com estrutura

maciça, lineação vertical pouco marcada, acentuada por manchas de ferromagnesianos mais ou menos alterados. O horizonte é

atravessado por uma rede de fraturas com fraca inclinação, em parte preenchidas por material argiloso ou por crostas escuras, manganêsíferas. Minerais uraníferos argilosos amarelos e verdes ocorrem preenchendo fraturas e disseminados na massa alterítica. Albita predomina amplamente. Quartzo tem presença modesta. Quantidades baixas de feldspatos potássicos (microclínio e ortoclásio) e de hematita encontram-se em todo o horizonte.

Aloterita argilosa de albitito (AAA)

A alterita perde progressivamente suas feições estruturais características em direção ao topo. As finas fraturas que atravessam o horizonte apresentam preenchimentos argilosos e, localizadamente, contêm manchas escuras. Este horizonte apresenta uma marcada tendência à caolinização em direção ao topo, essencialmente às custas do desaparecimento da albita.

Perfil sobre gnaiss

Isalterita de gnaiss (IG)

Este importante horizonte está presente em todos os perfis. Ocorre a partir de 2 e 1 m de profundidade na zona da trincheira (Fig. 2, lados esquerdo e direito), 2 m no perfil a montante, e 4 m no perfil a jusante (Fig. 3). A isalterita que o compõe apresenta foliação subvertical e textura ocelar, com fenocristais de feldspato potássico. A forte presença de quartzo nos níveis inferiores, em geral, decresce progressivamente em direção aos níveis superiores desse horizonte. Opostamente, os feldspatos seguem uma tendência de aumento discreto, em particular nos perfis a montante. Caolinita, o principal mineral de argila, apresenta proporções mais ou menos constantes ao longo do todo o horizonte. Dentre os máficos, os anfibólios arvedsoníticos são os mais importantes. Entretanto, nem

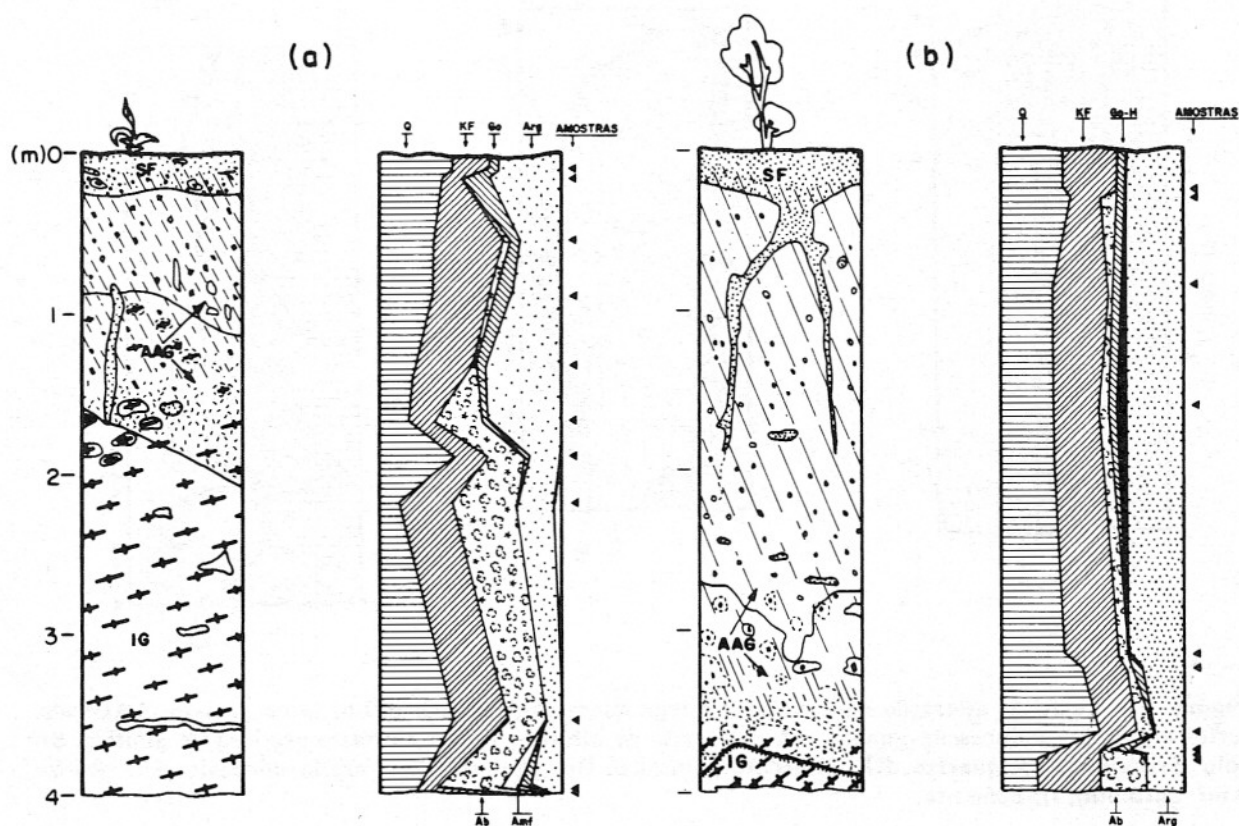


Figura 3 - Perfil de alteração sobre gnaiss a montante (a) e a jusante (b) e respectivos logs mineralógicos. IG: isalterita de gnaiss, AAG: aloterita argilo-ferruginosa de gnaiss, SF: solo ferruginoso; Q: quartzo, KF: feldspato potássico, Go: goethita, Arg: argilo-minerais, Ab: albita, Amf: anfibólio, H: hematita.

sempre estão presentes em proporções significativas. Quando presentes, fazem-se acompanhar de produtos de alteração ferruginosa, derivados, normalmente, de goethita.

Aloterita argilo-ferruginosa de gnaiss (AAG)

Sob essa denominação, estão reunidos todos os horizontes aloteríticos. A alterita apresenta estrutura maciça, é coerente na consistência, mais ou menos homogênea, e pouco friável no todo. As porções mais friáveis, quando presentes, situam-se normalmente junto aos nfeis de base. É atravessada por vários sistemas de fraturamento, alguns deles contendo preenchimentos peliculares argilosos. Compõe-se de uma matriz argilosa mais ou menos micácea, que inclui um esqueleto formado por grãos de quartzo e feldspato fraturados. Contém, sobretudo nos nfeis de base, blocos de isalterita de gnaiss. Inclui, localizadamente, manchas e tufos racinários com preenchimentos friáveis, micáceos e de agregados argilosos. Nos nfeis de topo são encontrados, também localizadamente, concrecionamentos orgânicos. As transformações mineralógicas dos feldspatos são marcantes neste horizonte. Os plagioclásios, sobretudo, sofrem uma drástica alteração, chegando, em certos casos, a desaparecer por completo a partir do topo do horizonte. Os feldspatos potássicos sofrem menor variação. Contrariamente, a goethita apresenta teores crescentes em direção ao topo. A hematita também está presente, porém apenas nos perfis a jusante.

Solo laterítico ferruginoso (SF)

O solo apresenta espessura de 30 cm, aproximadamente constante em toda a toposequência. Trata-se de um solo laterítico, friável, contendo numerosos fragmentos irregulares de quartzo e feldspato em meio a uma matriz argilosa, fortemente pedoturbada. O conteúdo em plagioclásios é muito baixo, até mesmo nulo. Caolinita, quartzo e feldspato potássico são as fases mais abundantes. Goethita é a fase ferruginosa mais importante.

PROGRESSÃO DAS FRENTES DE ALTERAÇÃO INTEMPÉRICA

A análise do conjunto dos perfis re-

vela a existência de três frentes de alteração intempérica e mostra que a ação dos processos de intemperismo estiveram limitados a nfeis não muito profundos. Como resultado, os perfis apresentam horizontes, em geral, pouco evoluídos. O limite da progressão da *frente principal* situa-se no contato entre os horizontes isalteríticos e a "rocha sã". A *frente de alteração dos feldspatos* delimita, grosso modo, a separação isalterita/aloterita. Esta frente progrediu até nfeis mais profundos no perfil sobre gnaiss a jusante, provavelmente em função de condições locais favoráveis (situação do lençol freático?). Apenas a *frente pedológica* mostra uma progressão relativamente uniforme por toda a toposequência.

Dois nfeis iluviais não muito claramente delimitados podem ser mencionados. A eluviação das argilas até esses nfeis está refletida no seu incremento relativo. As zonas inferiores das frentes de alteração principal e pedológica têm relação aparente com esses nfeis iluviais. Esta relação é mais visível nos perfis sobre gnaiss a montante e a jusante, para o caso da frente principal, e nos perfis da trincheira para o caso da frente pedológica.

O material coluvionar não constitui nenhum horizonte importante em qualquer um dos perfis de alteração. Mesmo as acumulações de quartzo na frente pedológica não chegam a revelar a ocorrência de fortes processos de coluvionamento.

Os topos dos horizontes alteríticos inferiores situam-se mais próximos à superfície na parte superior da encosta. Apesar disso, não há, visivelmente, uma relação inequívoca entre a topografia e a posição de tais horizontes. A disposição espacial dos horizontes intermediários e superiores também não parece guardar relação com a topografia, restringindo-se provavelmente às características da rocha-mãe e da progressão local das frentes de alteração. A exceção fica por conta do nível de solo cuja alteração acompanha, mais ou menos invariavelmente, a inclinação atual da encosta.

LIXIVIAÇÃO E FIXAÇÃO DOS ELEMENTOS MAIORES

O estudo geoquímico dos elementos maiores foi conduzido com base nos resultados das análises químicas das amostras coletadas nos horizontes de alteração dos

perfis sobre gnaiss e a montante e a jusante da trincheira. As concentrações dos óxidos desses elementos são mostradas na Tabela 1.

Nota-se que há uma grande similaridade entre a distribuição de teores de Na_2O e CaO ; Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 , tanto no perfil a montante quanto a jusante. Existe também uma estreita e evidente relação entre tais distribuições de teores com a distribuição dos plagioclásios e das fases argilo-(titanio-)ferruginosas (caolinita, goethita, hematita). O mesmo pode ser observado em relação aos teores de SiO_2 e K_2O e as respectivas distribuições do quartzo e feldspato potássico.

No perfil a montante, as concentrações de CaO e Na_2O decrescem de modo aproximadamente linear da base para o topo. No perfil a jusante, ocorre um decréscimo abrupto na passagem do horizonte isalterfítico para o horizonte aloterfítico. A partir daí, os valores conservam-se aproximadamente constantes até o topo. Esses fatos sugerem uma lixiviação mais intensa destes compostos através dos horizontes superiores em direção a jusante. K_2O apresenta comportamento parecido, mas com tendência de se acumular na transição entre os horizontes isalterfíticos e aloterfíticos do perfil a montante. Os óxidos Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 se mantêm fixados e mais concentrados junto aos produtos de alteração argilosos dos horizontes aloterfíticos superiores dos perfis a montante e a jusante.

Nota-se ainda que as concentrações relativas de cada óxido nos dois perfis, em geral, são da mesma ordem de grandeza. Apenas K_2O apresenta teores relativos ligeiramente menores no perfil a jusante, embora na base dos dois perfis seus valores sejam semelhantes.

Em síntese, está claro que o comportamento geoquímico dos elementos maiores é comparável nos dois perfis sobre gnaiss, porém, sua dinâmica lateral, possíveis interferências ou contaminações em direção a jusante, são apenas parcialmente evidentes. Os fatos levantados até o momento sugerem que, ao menos nessa escala de abordagem, as movimentações laterais mais significativas estão limitadas a alguns desses elementos dentro de certos horizontes de alteração.

COMPORTAMENTO DO URÂNIO E DE ELEMENTOS TRAÇO ACOMPANHADORES NA ALTERAÇÃO

Na Figura 4, são apresentadas as curvas de distribuição do U para os perfis de alteração sobre albitito mineralizado e gnaiss estéril a montante e a jusante.

No perfil sobre albitito mineralizado, os teores mais elevados são encontrados junto à base do horizonte isalterfítico. A partir daí, assumem uma tendência decrescente até o nível da transição para o horizonte aloterfítico. Na porção mediana deste horizonte, os teores, novamente elevados, voltam a diminuir até atingirem um valor mínimo junto ao solo.

A curva de distribuição do perfil a montante indica uma redução dos teores de U na base do horizonte isalterfítico e também na porção mediana do perfil, ao nível da transição para os horizontes aloterfíticos. Nestes últimos, os teores de U tendem a manter-se relativamente baixos e estáveis, voltando a diminuir no horizonte de solo.

A curva de distribuição do perfil a jusante mostra um forte enriquecimento em U a partir da transição entre os horizontes isalterfítico e aloterfítico. A partir daí, a tendência é de redução brusca dos teores e, em seguida, a estabilização num patamar baixo.

As razões Th/U

As razões Th/U para o perfil a montante (Tabela 2) situam-se na média, em torno do valor 6, e plotam concordantemente com os valores conhecidos para outros gnaisses da Província de Lagoa Real (Fig. 5). No perfil a jusante, este valor médio cai para cerca de 0,3, um decréscimo aproximado de 17 vezes.

Os teores em U ao longo do perfil a jusante são, em média, cerca de 10 vezes mais elevados que os do perfil a montante. Ao contrário, os teores em Th são até cerca de duas vezes inferiores no perfil a jusante (Tabela 2). Essa variação dos teores entre os dois perfis, juntamente com a queda brutal na relação Th/U, vem confirmar, por um lado, as importantes transferências laterais do U e, por outro, a já conhecida baixa mobilidade geoquímica do Th diante dos processos de alteração.

Elementos traço acompanhadores

Existe um conjunto de elementos traço cujo comportamento apresenta similaridades com os do U e Th. Esse conjunto segue mais ou menos estritamente o U e o Th no

Tabela 1 – Concentrações dos elementos maiores (%). Perfis sobre gnaiss a montante (M) e a jusante (J) da trincheira.

Prof. (m)	Horizonte	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F.
(M)												
0,10	SF	68,31	13,08	5,12	0,02	0,04	0,19	0,71	5,30	0,51	0,10	5,69
0,60	AAG	60,59	18,20	7,49	0,02	0,04	0,10	0,40	5,37	0,51	0,12	6,94
1,40		62,19	16,75	7,39	0,02	0,03	0,32	1,04	5,69	0,54	0,12	5,77
1,70		62,95	16,17	7,03		0,04	0,40	1,29	5,30	0,52	0,11	5,32
1,95		67,19	14,33	5,44		0,03	0,43	1,45	6,25	0,40	0,13	3,41
2,50	IG	64,87	15,13	6,32	0,07	0,04	0,91	2,17	5,25	0,50	0,13	3,46
3,00		64,93	16,28	5,83	0,07	0,04	1,18	2,65	5,91	0,43	0,13	2,78
3,80		64,28	15,33	6,30	0,06	0,03	0,96	2,15	6,40	0,39	0,13	3,41
4,00		64,55	15,68	5,41	0,06	0,04	1,33	2,57	6,50	0,59	0,19	2,50
(J)												
0,10	SF	69,40	12,75	4,23		0,04	0,22	0,64	4,82	0,40	0,11	6,15
0,60	AAG	65,89	15,85	5,33	0,07	0,04	0,11	0,45	4,26	0,48	0,10	5,83
1,20		67,09	14,83	6,25	0,05	0,04	0,10	0,35	3,74	0,56	0,10	5,46
1,80		66,92	15,81	5,54	0,03	0,04	0,10	0,34	4,07	0,44	0,12	5,83
2,30		67,18	15,43	5,41	0,05	0,02	0,10	0,30	4,16	0,45	0,10	5,75
2,70		69,03	14,38	5,19	0,05	0,04	0,07	0,29	4,12	0,44	0,11	5,30
3,10		70,21	14,06	5,04	0,02	0,03	0,07	0,34	4,41	0,44	0,10	4,86
3,25		68,05	14,91	5,33	0,03	0,03	0,08	0,44	4,83	0,44	0,10	5,15
3,65		75,43	11,03	2,91	0,05	0,02	0,17	0,65	5,37	0,34	0,10	2,59
3,80	IG	63,29	15,88	6,83	0,07	0,06	2,24	3,33	5,66	0,52	0,17	1,31

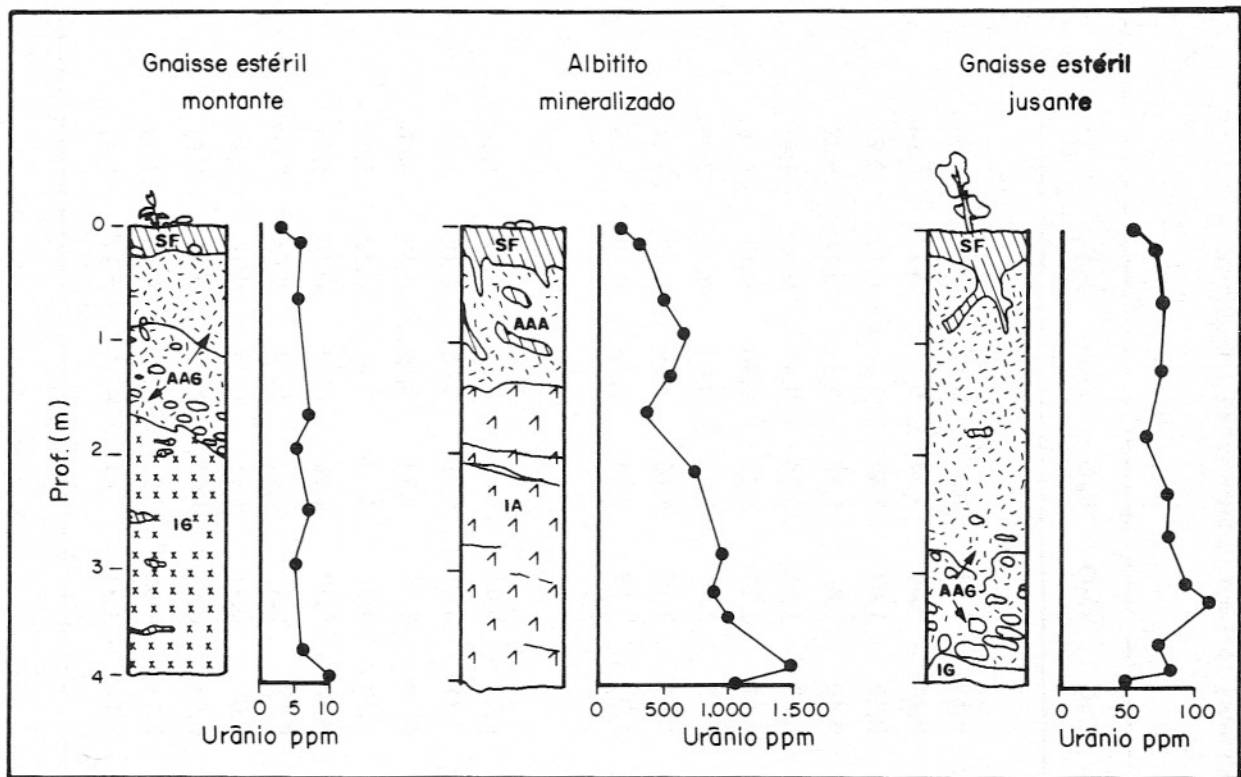


Figura 4 - Distribuição de urânio nos perfis de alteração na jazida de encosta de Laranjeiras. IG: isalterita de gnaiss, AAG: aloterita argilo-ferruginosa de gnaiss, IA: isalterita de albitito, AAA: aloterita argilosa de albitito, SF: solo ferruginoso.

Tabela 2 - Teores de U e Th, e razões Th/U em função da profundidade para os perfis sobre gnaiss estéril a montante (M) e a jusante (J) da trincheira.

Prof. (m)	Horizonte	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U
(M)				
0,10	SF	3,49	28,06	3,305
0,60	AAG	5,80	41,31	7,122
1,40		6,35	49,82	7,846
1,70		7,89	42,69	5,411
1,95		6,18	33,28	5,385
2,50	IG	7,95	42,65	5,365
3,00		5,61	39,88	7,110
3,80		6,75	35,03	5,190
4,00		11,74	54,96	4,681
(J)				
0,10	SF	69,16	27,86	0,403
0,60	AAG	76,06	26,98	0,355
1,20		75,74	26,61	0,351
1,80		65,98	25,50	0,386
2,30		78,96	34,34	0,435
2,70		79,60	24,30	0,305
3,10		91,97	26,02	0,283
3,25		111,71	32,38	0,290
3,65		69,26	19,73	0,285
3,80	IG	83,60	31,42	0,376

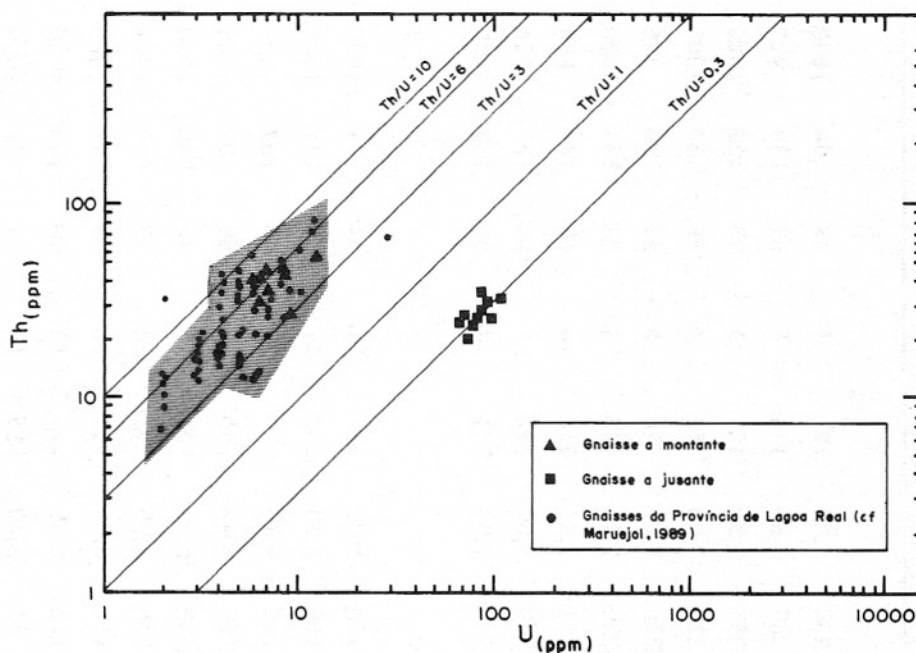


Figura 5 – Diagrama comparativo das razões Th/U dos gnaisses da Jazida de Laranjeiras e de outros gnaisses da Província de Lagoa Real.

desenvolvimento do manto de alteração da Jazida Laranjeiras. Dele fazem parte: Zr, Nb, Ga, Sc, Be, Zn, Cu, TR-Y (Tabelas 3 e 4). São notáveis, por exemplo, as zonas de lixiviação, empobrecidas nesses elementos, presentes de montante a jusante.

Se as identidades de comportamento desses elementos no desenvolvimento da seqüência vertical de alterações estão bastante claras, o mesmo não pode ser dito quanto a sua lixiviação. A elevação significativa dos teores em U a jusante é seguramente uma evidência de sua migração lateral. Apesar de restrito a certos horizontes, o Ce apresenta-se como o mais nítido acompanhador do U nessa mobilização. Os demais elementos, incluindo Th, apresentam teores comparáveis de montante a jusante, indício de uma discreta migração lateral, mais forte para os TR leves, sobretudo nos horizontes aloterfíticos.

EVOLUÇÃO DAS FASES PORTADORAS DE URÂNIO

Através das análises por microsonda eletrônica, foi possível localizar e identificar quimicamente as fases e produtos de alteração portadores de U. Desse modo, a expressão mineralógica do urânio, em face das mudanças composicionais causadas pela alteração, pode ser caracterizada. Os

resultados provêm das investigações sobre minerais essenciais e acessórios, ordinários nestes perfis, e sobre os produtos de alteração característicos.

A presença atual ou pretérita do U junto a minerais ou produtos secundários de alteração é atestada também pela formação de halos radioativos (glóbulos) bem demarcados, identificados nos estudos por microsonda e microscopia ótica.

Urânio nas fases minerais primárias

Uraninita é o único mineral primário de U. Outros minerais primários, essenciais e acessórios, podem conter inclusões de uraninita. As análises de microsonda de rochas frescas de Lagoa Real (Maruejol, 1989) mostram que as uraninitas são homogêneas quanto aos teores de U, desprovidas de Th, ricas em Ca (nos albitos cálcicos), e apresentam, em geral, teores muito variáveis em Y (sempre significativos nas uraninitas pobres em Ca). Os óxidos de Nb, TR-Y e Ti dos gnaisses contêm altos teores de U (1,5 a 5% de U_3O_8) e de Th.

Os seguintes dados sobre as composições de alguns minerais essenciais podem ser destacados (Rocha, op. cit.): Entre os ferromagnesianos analisados, a presença de U foi constatada em piroxênios do perfil sobre albitito. Nas titanitas e zircões não

Tabela 3 – Concentrações dos elementos traço (ppm). Perfis sobre gnaiss a montante (M) e a jusante (J) da trincheira.

Prof. (m)	Horizonte	Ba	Be	Co	Cr	Cu	Ga	Nb	Ni	Rb	Sc	Sr	V	Y	Zn	Zr
(M)																
0,10	SF	1873	2,50	4	6	8	25	39	4	204	5,09	121	7	48	94	1000
0,60	AAG	1937	4,19	4	6	11	36	61	6	233	8,80	118	6	67	138	925
1,40		2094	4,80	4	5	12	32	64	6	238	7,30	151	4	73	129	1000
1,70		1937	5,50	4	5	12	31	31	5	220	7,00	152	4	76	134	1000
1,95		2297	4,50	4	4	10	24	48	4	256	5,00	178	5	53	96	746
2,50	IG	1958	6,50	4	5	12	30	61	4	220	7,30	188	4	73	135	1000
3,00		2210	6,90	5	21	12	31	52	19	251	7,00	218	10	67	149	836
3,80		2313	6,59	4	4	11	32	48	4	249	7,09	212	4	100	160	826
4,00		2228	5,40	49	4	10	29	70	8	249	7,09	221	4	90	169	1000
(J)																
0,10	SF	1878	2,00	4	7	8	21	42	7	173	5,00	121	21	54	91	1000
0,60	AAG	1637	2,20	4	8	8	26	50	6	168	6,50	100	21	53	111	1000
1,20		1421	2,20	4	10	8	24	59	8	146	6,80	87	24	46	107	1000
1,80		1600	2,00	4	10	7	27	32	7	156	6,40	96	17	46	109	1000
2,30		1679	1,70	4	6	5	27	51	4	159	6,50	101	17	42	105	1000
2,70		1613	1,79	4	8	32	28	32	4	156	6,00	95	14	37	108	1000
3,10		1711	2,09	4	8	8	28	33	5	162	6,00	101	16	33	98	1000
3,25		1866	2,90	4	9	7	28	32	5	182	6,09	111	13	40	106	1000
3,65		2107	2,20	4	9	5	20	20	4	183	3,40	135	10	34	72	1000
3,80	IG	2326	7,00	4	4	9	35	64	4	230	9,10	263	6	191	183	1000

Tabela 4 – Concentrações dos elementos terras raras (ppm). Perfis sobre gnaisse a montante (M) e a jusante (J) da trincheira.

Prof. (m)	Horizonte	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Lu	La/Yb
(M)												
0,10	SF	63,47	187,79	53,73	11,00	2,98	9,31	8,59	5,02	5,53	0,93	11,50
0,60	AAG	90,07	306,90	72,30	14,01	3,88	12,20	11,09	6,37	6,67	1,07	13,50
1,40		112,90	355,86	90,81	17,40	4,61	15,03	12,56	6,94	6,91	1,06	16,30
1,70		127,32	299,77	99,93	18,69	4,90	16,03	13,79	7,69	7,84	1,21	16,20
1,95		92,46	329,75	70,63	12,77	3,70	11,25	9,15	5,05	4,91	0,72	18,80
2,50	IG	166,44	449,21	133,01	23,55	5,40	18,57	13,95	7,20	7,13	1,13	23,30
3,00		155,11	320,77	122,65	22,49	5,26	17,34	12,50	6,35	6,07	1,03	25,50
3,80		233,39	282,48	180,76	33,01	7,62	24,23	20,50	10,54	10,07	1,49	23,20
4,00		224,85	193,36	167,23	30,94	7,14	21,81	16,75	8,60	8,40	1,43	26,80
(J)												
0,10	SF	68,80	189,03	59,83	12,69	3,31	10,63	9,26	5,12	5,27	0,99	13,00
0,60	AAG	63,19	212,96	58,55	12,73	3,26	10,64	9,33	5,21	5,65	1,04	11,20
1,20		55,08	178,98	51,67	11,13	2,80	9,30	8,40	4,91	5,40	1,02	10,20
1,80		60,52	202,52	52,20	11,00	2,94	9,32	8,05	4,50	4,77	0,82	12,70
2,30		61,87	470,22	53,65	10,89	3,06	11,29	8,18	4,76	5,08	0,92	12,20
2,70		50,72	197,65	43,19	9,38	2,52	8,25	6,96	3,97	4,21	0,78	12,00
3,10		39,58	229,22	34,83	7,32	2,06	6,70	5,63	3,35	3,61	0,64	11,00
3,25		49,34	490,49	41,27	8,40	2,35	9,26	6,62	3,90	3,98	0,71	12,40
3,65		40,93	167,42	31,56	6,64	2,03	6,50	5,67	3,48	3,65	0,71	11,20
3,80	IG	445,16	682,47	492,25	97,31	21,85	66,81	55,31	23,11	20,98	3,31	21,20

metamórficos dos perfis sobre albitito e gnaisse a jusante, o U é completamente ausente. Apenas a análise de zircões do perfil sobre gnaisse a montante revelou a presença discreta de U. As allanitas do perfil sobre albitito apresentam teores em U variáveis de 0 a 8500 ppm. Nas magnetitas do perfil sobre gnaisse a jusante, foram encontrados teores em U de 0 a 900 ppm. Nas ilmenitas do perfil sobre albitito foram encontrados apenas teores discretos de U. Junto às fases denominadas, genericamente, por óxidos e silicatos de metais raros (OSMR), do perfil sobre albitito, foram encontrados teores relativamente elevados de U.

Acerca dessas análises é preciso ressaltar que as fases analisadas são provenientes de um meio alterado e, portanto, os teores de U encontrados podem refletir, em parte, uma "contaminação" por produtos de alteração percolantes adsorvidos. À parte essa observação, os resultados acima servem para reforçar a constatação de que o U não integra as estruturas cristalinas dos minerais essenciais e acessórios dos albititos aos quais está associado, ou seja, não é substitucional. Na verdade, a ocorrência de urânio junto a estes minerais se dá notadamente na forma de inclusões muito finas de uraninita.

Urânio nas fases minerais secundárias

O urânio, pelo seu modo particular e primário de ocorrência (pequenos cristais de uraninita aglomerados ou disseminados), após dissolvido, parece, na sua maior parte, incorporar-se, já desde a base dos perfis, aos produtos de alteração argilosos (caolínicos), e aos oxihidróxidos de Fe mais ou menos titaníferos/cerianos, junto aos quais invariavelmente é encontrado. De acordo com a sua composição, estes produtos de alteração são agrupados em quatro classes: produtos uraníferos, autuníticos/titaníferos; produtos argilo-ferruginosos; produtos titano-argilo-ferruginosos do tipo leucoxênio, com urânio; e produtos argilo-cerianos (produtos argilosos ricos em cério).

Produtos uraníferos (autuníticos/titaníferos)

Produtos de alteração fortemente uraníferos, autuníticos/titaníferos, mais ou menos ferruginosos, são encontrados no

perfil sobre albitito (Tabela 5). Estes produtos ocorrem na base do perfil ("albitito fresco") e nos blocos de albitito pouco alterado que subsistem no interior dos níveis aloterfíticos superiores. O estado incipiente de alteração do albitito e a sua disposição no perfil, indicam que os produtos fortemente uraníferos nele encontrados são derivados, provavelmente, dos primeiros estágios de alteração da uraninita. Estes produtos se apresentam como relíquias de minerais portadores de U, ou como manchas de pontos escuros, ou ainda integrados aos produtos ferruginosos que ocorrem associados com minerais ferromagnesianos semi-alterados, ou revestindo fraturas. Os teores atingem valores da ordem de 65% de UO_2 no albitito fresco e em torno de 50% no córtex ferruginoso (colunas 1 e 3, Tabela 5). A presença de Th não é significativa. Cério pode estar presente em teores de até 3% de Ce_2O_3 . Titânio pode apresentar valores expressivos de até 25% de TiO_2 na região do córtex ferruginoso, indicando assim a sua tendência de incorporar-se aos produtos argilo-ferruginosos. Vanádio, embora mais raramente, também está presente em proporções significativas.

Produtos argilo-ferruginosos

Os produtos argilo-ferruginosos são encontrados em todos os perfis (Tabela 6). A presença sistemática de U nesses produtos, ainda que em teores relativamente baixos, é verificada nos perfis sobre albitito e sobre gnaisse a jusante. Como seria esperado, os teores são mais fortes no perfil sobre albitito, podendo atingir cerca de 0,4% de UO_2 , enquanto no perfil a jusante não ultrapassam 0,2% de UO_2 . No perfil sobre albitito, os teores em Th, Ce e Y, embora variáveis, são relativamente significativos, atingindo valores de 1,5, 0,5 e 0,4 em porcentagem dos respectivos óxidos, e relacionados aos blocos de albitito menos alterados remanescentes nos horizontes alterfíticos.

Produtos titano-argilo-ferruginosos (leucoxênio)

No horizonte isalterfítico do perfil sobre albitito e nos horizontes aloterfíticos do perfil sobre gnaisse a jusante são identificados produtos titano-argilo-ferruginosos do tipo leucoxênio, com urânio (Tabela 7). Possuem o aspecto de compostos ferruginoso-

Tabela 5 – Produtos uraníferos (autuníticos/titaníferos) encontrados em albitito. Análises por microsonda eletrônica (%).

Amostra	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	4,46	15,14	3,02	2,19	8,09	3,82	3,86
SeO ₂	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
As ₂ O ₅	0,00	0,03	0,00	0,05	0,02	0,00	0,24
P ₂ O ₅	4,53	2,69	1,17	0,80	0,48	0,77	0,65
MoO ₃	0,00	0,00	0,05	0,00	0,07	0,00	0,00
SO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PbO	0,40	1,13	3,42	1,05	1,59	1,07	1,11
CaO	2,68	1,43	0,46	1,35	1,11	1,35	2,46
UO ₂	65,44	45,34	49,88	60,71	48,11	60,72	57,28
ThO ₂	0,00	0,64	0,00	0,24	0,13	0,31	0,14
ZrO ₂	0,03	0,00	0,00	0,49	0,00	0,57	0,01
Y ₂ O ₃	0,00	0,29	0,00	0,21	0,38	0,21	5,40
Fe ₂ O ₃	1,75	6,39	3,48	2,05	9,33	2,81	4,76
V ₂ O ₅	0,87	12,81	0,73	0,57	1,50	0,77	0,00
Ce ₂ O ₃	0,26	0,83	0,50	1,09	0,50	1,37	3,10
TiO ₂	11,77	0,75	24,90	13,77	10,65	14,36	4,15
BaO	1,78	5,22	1,75	2,58	1,57	2,53	30,19
CuO	0,02	0,11	0,05	0,03	0,01	0,05	0,89
WO ₃	0,00	0,14	0,08	0,00	0,11	0,02	0,00
Total	93,99	92,95	89,49	87,17	83,67	90,73	114,26

sos escuros, gradando, localmente, para o amarelo ou o alaranjado. Nota-se, nesses produtos, uma correlação inversa entre os conteúdos em Fe e Ti, mais nítida sobre albitito. O teor em Ti é, via de regra, muito elevado, podendo ultrapassar 70% em TiO₂. Trata-se seguramente de óxidos de Ti neoformados, oriundos, ao menos em parte, da dissolução de titanita e/ou ilménita, e misturados com goethita e hematita. Os teores médios em U são de 2,5 e 1,5% de UO₂, respectivamente, para os perfis sobre albitito e gnaiss. Tório é praticamente ausente. Nos dois perfis, o conteúdo em V é mais expressivo que os conteúdos em Ce e Y. Para o perfil sobre albitito, o teor médio aproximado dos óxidos desses elementos é de respectivamente: 0,7, 0,1 e 0,4%; enquanto que para o perfil sobre gnaiss têm-se: 0,4, 0,1 e 0,4%. Neste último caso, excluindo-se o valor discrepante de 4,2%, a média cai para 0,1%. O conteúdo médio em Pb no perfil sobre albitito situa-se em torno de 1,5% de PbO e no perfil

sobre gnaiss em torno de 0,15% de PbO. O conteúdo em U no perfil sobre gnaiss representa, portanto, cerca de metade do valor apresentado no perfil sobre albitito. No caso do Pb, essa relação é expressa por um fator 10. Admite-se que tanto U quanto Pb são reduzidos no perfil a jusante, porém em proporções muito distintas. Supondo que a maior parte do Pb seja de origem radiogênica, tem-se como decorrência que o U do perfil a jusante deve ser mais jovem, o que reforça a idéia da sua remobilização a partir de posições superiores na encosta.

Produtos argilo-cerianos

Na porção superior do horizonte isalterítico do perfil sobre albitito encontra-se produtos de alteração particulares, que denominamos argilo-cerianos, por analogia com os produtos argilo-ferruginosos aos quais se assemelham fortemente (Tabela 8). Estes produtos, tipicamente de cor preta, invadem as juntas entre os grãos, preen-

Tabela 6 – Produtos argilo-ferruginosos. 1 a 4: encontrados em albitito, 5 a 10: encontrados nos gnaisses a montante (5 e 6) e a jusante (7 a 10). Análises por microsonda eletrônica (%).

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	30,65	32,24	39,57	31,25	24,01	27,27	26,39	9,63	6,05	2,93
SeO ₂	0,03	0,00	0,00	0,04	0,01	0,07	0,02	0,00	0,01	0,00
As ₂ O ₅	0,06	0,00	0,07	0,01	0,08	0,03	0,08	0,10	0,21	0,13
P ₂ O ₅	0,42	3,84	0,42	0,00	0,03	0,03	0,03	0,42	0,01	0,35
MoO ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00
SO ₂	0,01	0,04	0,31	0,00	0,03	0,02	0,07	0,01	0,00	0,00
PbO	0,09	0,21	0,40	0,00	0,13	0,04	0,13	0,00	0,00	0,26
CaO	0,35	0,56	1,86	0,54	0,15	0,16	0,25	0,03	0,08	0,15
UO ₂	0,15	0,41	0,35	0,02	0,00	0,00	0,03	0,14	0,06	0,19
ThO ₂	0,07	0,36	0,91	1,54	0,39	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00
ZrO ₂	0,08	0,04	2,43	0,00	0,06	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02
Y ₂ O ₃	0,06	0,46	0,42	0,17	0,06	0,02	0,02	0,03	0,00	0,04
Fe ₂ O ₃	24,08	13,64	28,81	28,80	35,32	23,11	26,53	57,26	65,07	68,08
V ₂ O ₅	0,18	0,05	0,05	0,04	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	1,25
Ce ₂ O ₃	0,19	0,06	0,42	0,50	0,02	0,00	0,03	0,01	0,01	0,00
TiO ₂	0,61	1,19	0,52	7,55	0,79	0,53	0,45	1,62	0,04	0,02
BaO	0,05	0,06	0,16	0,15	0,19	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
CuO	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,02	0,02	0,03	0,00	0,04
WO ₃	0,00	0,00	0,02	0,05	0,10	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
Total	57,08	53,21	76,74	70,70	61,46	51,46	54,14	69,35	71,58	73,48

chem os vazios e as fissuras, e traduzem, dessa maneira, a dispersão e a redistribuição do urânio no conjunto dos horizontes de alteração do perfil sobre albitito. Nesses produtos entra uma proporção variável de caolinita. O Fe está sempre presente de modo acessório, com valor médio em torno de 6% de Fe₂O₃. Em contrapartida, os óxidos de Ce são muito abundantes, podendo alcançar valores de até 55% de Ce₂O₃. Nota-se também a ocorrência de teores fortes e variáveis em Pb, de 3 a 21% de PbO. Urânio e V também apresentam teores importantes e comparáveis, em torno de 0,6% de UO₂ e 0,9% de V₂O₅. Esses produtos são quase que inteiramente desprovidos de Ti (0,3% de TiO₂), e neles o Th está normalmente ausente.

MIGRAÇÃO DO URÂNIO NO DECORRER DA ALTERAÇÃO

Os dados de microsonda apresentados

nos itens precedentes permitem, desde já, estabelecer o itinerário básico das transferências locais e redistribuições verticais e laterais do urânio e acompanhadores nos perfis sobre albitito e gnaiss estéril. A síntese dessas interpretações encontra-se retratada na Figura 6.

Perfil sobre albitito

No albitito fresco, o principal portador de urânio é a uraninita, presente em inclusões muito finas, em particular, dentro das titanitas encontradas neste perfil. Esses minerais primários são destruídos a partir da base dos primeiros horizontes de alteração, dando origem imediata a produtos com forte conteúdo uranífero. Paralelamente, formam-se produtos argilosos de caráter mais ferruginoso, toríferos, com pouco ou nenhum urânio. Estes últimos se distribuem amplamente por todo o perfil. A destruição dos primeiros produtos uraníferos prosse-

Tabela 7 – Produtos titano-argilo-ferruginosos (leucoxênio). 1 a 6: encontrados em albitito, 7 a 19: encontrados em gnaïsse a jusante. Análises por microsonda eletrônica (%).

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	5,71	10,67	19,71	9,94	8,21	5,83	7,06	15,57	3,83	2,61
SeO ₂	0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,02	0,06	0,00	0,01
As ₂ O ₅	0,15	0,06	0,05	0,09	0,06	0,03	0,07	0,05	0,04	0,07
P ₂ O ₅	0,80	0,33	0,16	0,56	0,53	0,49	0,19	0,27	0,19	0,32
MoO ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,10	0,00	0,04
SO ₂	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PbO	1,35	1,80	1,28	1,56	1,15	1,23	0,22	0,04	0,14	0,24
CaO	0,16	0,22	0,36	0,20	0,16	0,08	0,03	0,06	0,32	0,04
UO ₂	3,50	2,81	0,98	2,86	2,22	3,27	2,19	1,32	2,11	2,19
ThO ₂	0,01	0,26	0,01	0,02	0,00	0,00	0,02	0,08	0,03	0,08
ZrO ₂	0,35	0,20	0,45	0,00	0,03	0,04	0,10	0,00	0,01	0,02
Y ₂ O ₃	0,26	0,50	0,41	0,48	0,23	0,57	0,97	0,01	0,00	4,25
Fe ₂ O ₃	12,11	14,04	25,30	14,51	24,47	12,62	8,44	12,87	8,24	10,68
V ₂ O ₅	0,66	0,54	0,34	0,69	0,48	0,88	0,45	0,24	0,42	0,48
Ce ₂ O ₃	0,06	0,52	0,00	0,00	0,06	0,12	0,09	0,07	0,11	0,18
TiO ₂	64,49	57,74	31,57	55,32	44,40	62,89	69,23	44,27	69,42	73,62
BaO	0,30	0,59	0,24	0,49	0,45	0,46	0,33	0,11	0,34	0,43
CuO	0,04	0,00	0,02	0,00	0,00	0,06	0,04	0,00	0,06	0,00
WO ₃	0,02	0,13	0,18	0,17	0,00	0,04	0,01	0,03	0,00	0,21
Total	89,98	90,40	81,08	86,92	82,45	88,67	89,57	75,17	85,25	95,48

Amostra	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO ₂	14,99	8,57	12,70	4,42	5,78	5,65	5,47	20,66	3,86
SeO ₂	0,03	0,01	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00	0,02	0,00
As ₂ O ₅	0,04	0,03	0,06	0,01	0,08	0,06	0,10	0,01	0,05
P ₂ O ₅	0,03	0,06	0,02	0,13	0,29	0,16	0,06	0,22	0,31
MoO ₃	0,00	0,06	0,00	0,00	0,14	0,00	0,03	0,00	0,03
SO ₂	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
PbO	0,20	0,13	0,13	0,18	0,17	0,19	0,04	0,06	0,26
CaO	0,29	0,18	0,06	0,25	0,27	0,22	0,06	0,16	0,17
UO ₂	0,99	0,41	0,51	0,75	2,25	1,58	1,24	1,61	1,90
ThO ₂	0,00	0,10	0,05	0,12	0,00	0,00	0,08	0,08	0,11
ZrO ₂	0,03	0,00	0,06	0,00	0,00	0,05	0,16	0,00	0,00
Y ₂ O ₃	0,06	0,04	0,03	0,00	0,00	0,01	0,06	0,05	0,04
Fe ₂ O ₃	12,23	24,65	5,82	10,29	6,65	18,86	13,28	8,71	10,74
V ₂ O ₅	0,25	0,25	0,29	0,56	0,50	0,33	0,44	0,37	0,43
Ce ₂ O ₃	0,13	0,14	0,13	0,16	0,10	0,09	0,04	0,16	0,18
TiO ₂	45,60	40,74	47,51	69,97	76,39	56,71	68,50	61,82	71,85
BaO	0,34	0,11	0,41	0,29	0,38	0,29	0,27	0,25	0,29
CuO	0,03	0,03	0,04	0,00	0,04	0,04	0,01	0,05	0,00
WO ₃	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
Total	75,25	75,55	67,83	87,14	93,07	84,23	89,87	94,22	90,31

Tabela 8 – Produtos argilo-cerianos encontrados em albitito. Análises por microsonda eletrônica (%).

Amostra	1	2	3
SiO ₂	2,89	6,91	11,19
SeO ₂	0,00	0,00	0,00
As ₂ O ₅	0,04	0,04	0,09
P ₂ O ₅	1,18	0,42	0,84
MoO ₃	0,00	0,00	0,00
SO ₂	0,07	0,04	0,05
PbO	11,03	21,51	3,33
CaO	0,06	0,02	0,09
UO ₂	0,64	0,64	0,39
ThO ₂	0,00	0,00	0,12
ZrO ₂	0,00	0,26	0,00
Y ₂ O ₅	0,02	0,02	0,05
Fe ₂ O ₃	7,25	4,45	6,30
V ₂ O ₅	1,05	0,69	1,01
Ce ₂ O ₃	45,92	15,31	55,04
TiO ₂	0,18	0,13	0,70
BaO	0,25	0,11	0,13
CuO	0,04	0,01	0,02
WO ₃	0,06	0,00	0,04
Total	70,69	50,54	79,41

gue ainda na base dos horizontes isalterfíticos. Os principais portadores de urânio são aqui os plamas do tipo leucoxênio, ricos em anatásio e silfício, contendo 1,0 a 3,5% de UO₂ e traços de Pb. Uranofânio, o único mineral secundário de urânio observável, também é encontrado neste nível. Ele preenche as fraturas das zonas fortemente mineralizadas e parece ser de formação sobretudo recente (contemporâneo da alteração). Estas duas fases secundárias portadoras de U, leucoxênio e uranofânio, parecem, em todo caso, resultar de uma redistribuição muito local do urânio.

Nos horizontes aloterfíticos, os plamas leucoxênios subsistem somente no estado de vestígios. Aqui, os principais portadores de urânio são os produtos argilo-cerianos. A composição desses argilo-cerianos evolui regularmente nesses horizontes: na base, esses produtos são muito escuros, muito ricos em Ce e Pb, e também, relativamente, em U e V; à medida que se

sobe no perfil, tornam-se cada vez mais claros, a caolinita torna-se preponderante, e os teores em Ce caem drasticamente para níveis inferiores a 5% de Ce₂O₃. Urânio e Pb também acompanham essa redução.

Perfil sobre gnaiss a jusante

O gnaiss a biotita, estéril, que constitui a rocha mãe do perfil a jusante, contém também titanitas, mas estas são desprovidas de inclusões uraníferas. Essas titanitas são também destruídas desde a base dos horizontes isalterfíticos, e formam produtos do tipo leucoxênio. Estes produtos contêm de 0,5 a mais de 2,0% de UO₂ mas, neste caso, são desprovidos de Pb. No alto do perfil, a partir do topo dos horizontes isalterfíticos, os oxihidróxidos de Fe, encontrados desde a base do perfil, tornam-se o principal portador de urânio, mas os teores são constantemente fracos, da ordem de 0,2% de UO₂. O urânio parece, portanto, introduzido e fixado no perfil a jusante pelos oxihidróxidos de Fe e pelos produtos titaníferos. São os produtos titaníferos mal cristalizados do tipo leucoxênio, presentes na transição entre os horizontes de gnaiss pouco alterado e isalterfíticos, que parecem constituir o sítio principal de fixação do U.

CONCLUSÕES

Os dados mineralógicos e geoquímicos da topossequência revelam que o manto de alteração sobre a Jazida Laranjeiras é de natureza pouco evoluída. Os perfis comportam, na sua estruturação básica, uma sequência padrão pouco espessa de horizontes de alteração. A individualização desses horizontes relaciona-se à progressão das frentes de alteração: rocha-sã/isalterita, isalterita/aloterita (alteração de feldspatos), aloterita/solo laterfítico.

Pode-se imaginar a evolução dos perfis de alteração da topossequência a partir de um estado inicial onde os corpos de albitito encaixados no gnaiss expunham-se ao intemperismo numa zona de encosta vinculada a uma unidade dinâmica do relevo: um platô elevado em permanente recuo (Schmitt et al., 1989; 1992). Em tal contexto geomórfico, as condições climáticas recentes ou atuais podem ser admitidas entre os fatores que provocaram a alteração intempérica dessas rochas. A ação dos processos de intemperismo sobre esta encosta pouco íngreme foi, como era de se esperar,

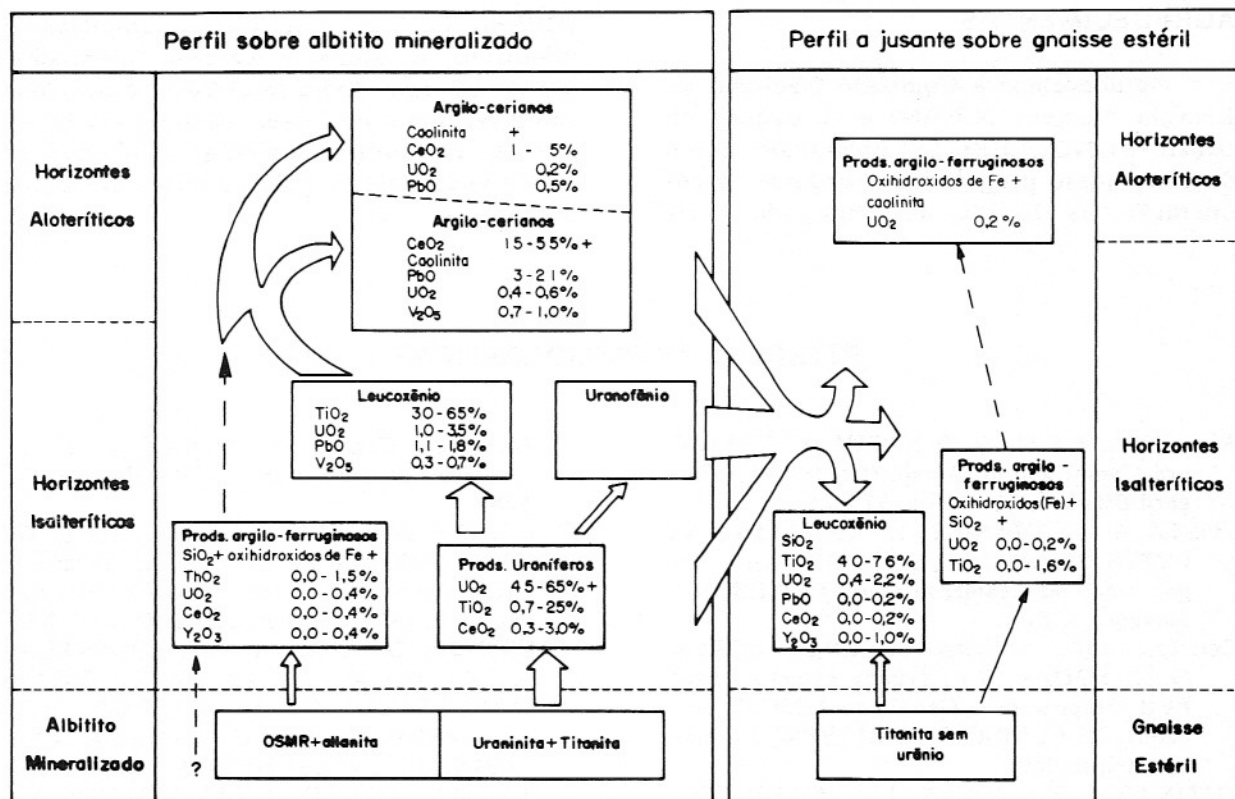


Figura 6 – Quadro ilustrativo das transferências locais e redistribuições verticais e laterais do urânio e acompanhadores no manto de alteração da Jazida Laranjeiras.

limitada em profundidade e levou ao desenvolvimento de horizontes de alteração pouco evoluídos. A progressão das frentes de alteração levou à formação, tanto nos perfis sobre gnaisse quanto albitito, de horizontes isalterfíticos de base sobrepostos por horizontes aloterfíticos. Estes últimos, marcados pelas transformações feldspáticas e por fortes acumulações argilo-(titano-) ferruginosas. No desenvolvimento das formações superficiais surgiu um horizonte pouco espesso de solo laterfítico alimentado de modo restrito por componentes (sobretudo quartzosos) coluvionares. O aprofundamento da atuação dos processos de alteração, e a conseqüente maturação dos perfis, será tanto mais intenso quanto mais tempo perdurar a superioridade de tais processos em relação à dinâmica da própria paisagem.

O U redistribuído no interior do manto de alteração provém dos agregados de uraninita e também das finas inclusões desse

mineral contidas em certas fases acessórias dos albititos, particularmente em allanitas, titanitas e em certos óxidos e silicatos de metais raros ainda mal identificados. Nos primeiros estágios da alteração, com a destruição das fases portadoras primárias, parte do U liberado vai compor os produtos fortemente uraníferos, enquanto outra parte vai ser adsorvida nos argilo-minerais e oxihidróxidos de Fe, denominados genericamente produtos argilo-ferruginosos. Com o prosseguimento da alteração, as fases secundárias portadoras de U passam a ser, na seqüência: os plasmas constituídos por produtos amorfos ricos em oxihidróxidos titaníferos (tipo leucoxênio), juntamente com uranofânio; e os produtos argilo-cerianos. O U que migra vertente abaixo vai ser fixado, principalmente, pelos produtos titaníferos presentes junto aos primeiros horizontes de alteração, e, secundariamente, pelos produtos argilo-ferruginosos, sobretudo nos horizontes alterfíticos superiores.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Urânio do Brasil (ex-NUCLEBRÁS) pelo amplo apoio dado ao nosso programa de pesquisa. À cooperação da Escola de Minas de Paris

(ENSMP-CGGM) nos planos analítico e científico. E, ainda, à Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - (Convênio CNPq/ORSTOM) - pelo suporte financeiro da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. de & HASUI, Y. (1984) O pré-Cambriano no Brasil. (Coords.) Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 378p.
- COSTA, P.H.; VIANNA, I.; ANDRADE, A.; LOPES, G.; SOUZA, S. (1983) Projeto Lagoa Real. Mapeamento Geológico 1:50000, Salvador, CBPM.
- COSTA, P.H.; ANDRADE, A.R.F.; LOPES, G.A.; SOUZA, S.L. (1985) Projeto Lagoa Real. Mapeamento Geológico 1:25000, Salvador, NUCLEBRÁS/CPM/CBPM, 1 - texto e mapas, 98p.
- FUZIKAWA, K.; ALVES, J.V.; MARUEJOL, P.; CUNEY, M.; KOSTOLANYI, C.; POTY, B. (1988) The Lagoa Real Uranium Province, Bahia State, Brazil: some petrographic aspects and fluid inclusion studies. *Geochim. Brasil.*, 2(2): 109-118.
- GEISEL SOBRINHO, E.; RAPOSO, C.; ALVES, J.V.; BRITO, W. de; VASCONCELOS, T.G. (1980) O Distrito Uranífero de Lagoa Real, Bahia. In: Congr. Bras. Geol., 31, Camboriú, 1980. Anais... Camboriú, SBG, 3: 1499-1512.
- INDA, H.A.V. & BARBOSA, J.F. (1978) Mapa Geológico do Estado da Bahia. Escala 1:1000000. Texto Explicativo... Salvador, SME/CPM, 137p.
- KOGLER, K.; BIANCONI, F.; BÜTTNER, W. (1983) Geochemical behaviour of uranium in lateritic profiles in Southern Tanzania. In: Uranium Exploration in Wet Tropical Environments, IAEA, Vienna, p. 119-136.
- LANGMUIR, D. (1978) Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. In: Kimberley, M.M. (ed.) Short Course Handbook. Mineralogical Association of Canada, 3: 17-56.
- LOBATO, L.M. & FYFE, W.S. (1990) Metamorphism, metasomatism and mineralization at Lagoa Real, Bahia, Brazil. *Economic Geology*, 85(5): 968-989.
- MARUEJOL, P. (1989) Metasomatose alcaline et mineralisations uraniferes: les albitites du gisement de Lagoa Real (Bahia, Brésil) et exemples complémentaires de Xihuashan (SE Chine), Zheltorechensk (Ukraine) et Chhuling Khola (Népal central). These de Doctorat, Centre de Recherches sur la Géologie de l'Uranium - CREGU, Nancy, 428p.
- MOGÉ, B.; SAMAMA, T.C.; VALENCE, G. (1987) Behavior of uranium in ferrallitic environments - the case of the Kenieko occurrences (Mali). *Uranium*, 3(2/4): 117-130.
- MOUTINHO DA COSTA, L.A.; PORTELA, A.C.P.; NILSON, A.A.; VALE, C.R.O.; MARCHETTO, C.M.L.; SANTOS, E.L. dos; MENEGUESO, G.; INDA, H.A.V.; STEIN, J.H.; MARCHETTO, M.; BATISTA, M.B.; FRATIN, O.; MOSSMANN, R.; OLIVEIRA, T.F. de; SILVA, W.G. da (1976) Projeto Leste do Tocantins/Oeste do Rio São Francisco (LETOS). Relatório Final, Petrópolis, DNPM/CPRM/PROSPEC, v. Ia, Ib, 558p.
- NIMER, E. (1977) Clima. In: Geografia do Brasil. Região Nordeste, IBGE, 2: 47-84.
- OLIVEIRA, A.G. de; FUZIKAWA, K.; MOURA, L.A.M.; RAPOSO, C. (1985) Província Uranífera de Lagoa Real, Bahia. In: Principais Depósitos Minerais do Brasil. Brasília, DNPM/CVRD, I: 105-120.
- RAMOS, J.R. de A. & MACIEL, A.C. (1974) Prospecção de urânio no Brasil 1970/1974. Rio de Janeiro, CNEN, Boletim 4, 129p.
- RAPOSO, C. & MATOS, E.C. de (1982) Distrito Uranífero de Lagoa Real. A história de um exemplo. In: Congr. Bras. Geol., 32, Salvador, 1982, Anais... Salvador, SBG, 5: 2035-2048.
- RAPOSO, C. & MATOS, E.C. de (1983) Projeto Lagoa Real. Relatório de Síntese da Jazida Laranjeiras, Belo Horizonte, NUCLEBRÁS, 103p.
- ROCHA, E.B. (1991) Dispersão e redistribuição de urânio e acompanhadores em mineralizações uraníferas submetidas a alteração late-ritizante: exemplo da Jazida Laranjeiras. Província Uranífera de Lagoa Real, Bahia. Tese de Doutorado, IAG/USP, São Paulo, 150p.
- ROCHA, E.B. & SCHMITT, J.-M. (1990) Redistribuição lateral de l'uranium au sein du manteau d'altération: exemple d'une anomalie de pente du secteur de Lagoa Real (Brésil). In: Seminaire Organisation et Fonc-

- tionnement des Altérites et des Sols, Bondy, France, ORSTOM, Resumés, p. 28.
- SAMAMA, T.C. (1984) Uranium in lateritic terranes. In: Surficial Uranium Deposits. IAEA/TECDOC-322, Vienna, p. 53-60.
- SCHMITT, J.-M.; ROCHA, E.B.; MELFI, A.J. (1989) Geomorphic studies as a help to uranium exploration in laterite covered areas: example of the Lagoa Real (Bahia - Brazil) uranium province. In: XII International Geochemical Exploration Symposium. Workshop "Uranium Geochemistry and Exploration in Humid Tropical Terrains", Rio de Janeiro, AEG/SBGq, Abstracts, p. 15-17.
- SCHMITT, J.-M.; ROCHA, E.B.; MELFI, A.J. (1992) Landscape evolution and uranium redistribution during weathering under tropical climate (Lagoa Real, Bahia, Brazil). In: 2nd Meeting of IGCP 317: (UNESCO/UISG)/4^a Reunion Argentina de Sedimentologia, La Plata, Argentina, Actas, Tomo III, p. 193-200.
- TURPIN, L.; MARUEJOL, P.; CUNEY, M. (1988) U-Pb, Rb-Sr and Sm-Nd chronology of granitic basement, hidrothermal albitites and uranium mineralization (Lagoa Real, South Bahia, Brazil). Contrib. Mineral. Petrol., **98**: 139-147.