

GEOQUÍMICA DA ALTERAÇÃO SUPÉRGENA DAS ROCHAS ULTRAMÁFICAS DE SANTA FÉ (GOIÁS, BRASIL)*

SÔNIA MARIA BARROS DE OLIVEIRA** e JEAN-JACQUES TRESCASES***

ABSTRACT The nickeliferous deposit of Santa Fé (GO) is the product of the weathering of an ultramafic-alkaline massif. The landscape consists of lowlands (Velhas Cycle-Early Quaternary) and hills that are relicts of the South-American surface (Tertiary). Weathering profiles are thick in the lowlands with four layers: altered rocks, coarse saprolite, fine saprolite, and red laterite. Magnesian silicates evolve to goethite and then to hematite.

The geochemical evolution of the lateritic profile in the lowlands leads to leaching of Si and Mg and retention of Fe, Al, Cr, Mn, Cu, and Co. Ni shows an intermediate behavior. Partitioning of elements among minerals is computed here for each stage of weathering. Ni is mainly associated with silicate phases (inherited serpentine and amorphous Si-Fe products).

On the hills, fresh and/or silicified rocks crops out. The silicification event was related to the South American cycle and occurred at the bottom of Tertiary profiles. Later, with the dismantling of the South American surface, the hills emerged capped by the silica layer. The removed weathered products were the source for the red laterite in the lowlands.

The deposit of Santa Fé is compared with other lateritic nickeliferous deposits in the world.

INTRODUÇÃO A alteração supérgena das rochas ultramáficas de Santa Fé conduziu à formação de um manto laterítico enriquecido em Ni. O objetivo deste trabalho é o de caracterizar geoquimicamente as tendências atuais do intemperismo e investigar a natureza dos processos prevalentes no passado, levando, assim, ao esclarecimento da gênese do depósito níquelífero.

A. Localização O maciço de Santa Fé situa-se no sudoeste do Estado de Goiás, a cerca de 250 km a noroeste de Goiânia. Trata-se de um corpo intrusivo de forma elipsoidal com o eixo maior na direção NS, medindo aproximadamente 9,5 km, e o menor na direção EW, com cerca de 6,5 km (área total 38 km²). A região pertence ao domínio fitogeográfico do cerrado e possui clima tropical úmido de inverno seco e verão chuvoso.

B. Geologia As rochas ultramáficas de Santa Fé pertencem à família ultramáfico-alcálica (Grupo Iporá) de idade cretácea (Lessa S^o *et al.*, 1971; Barbour, 1976; e Barbour *et al.*, 1979) e são intrusivas em gnaisses relacionados ao ciclo Brasileiro. O corpo intrusivo é um domo zonado de núcleo dunitico, envolvido por camadas descontínuas e concêntricas de peridotito e piroxenito (Fig. 1). Rochas alcalinas ocorrem como pequenos corpos nas zonas mais periféricas do maciço. A associação dominante é, assim, caracterizada por dunito serpentizado, wehrlito e clinopiroxenito. Os primeiros são as rochas

mais abundantes, constituindo mais de dois terços da área aflorante (26 km²).

No dunito, o padrão textural é definido por um reticulado poliédrico de serpentina fibrosa (serpentina I) em duas bandas justapostas, onde as lamelas do mineral dispõem-se normalmente às paredes, e cujos centros são ocupados ou por cristais remanescentes de olivina magnésiana, ou por serpentina tabular (serpentina II). Cristais de cromita idiomórfica distribuem-se irregularmente por toda a rocha e são muitas vezes circundados por um mineral micáceo de natureza intermediária entre a vermiculita e a clorita. A magnetita xenomorfa dispõe-se entre as duas bandas de serpentina. Ainda ocorrem finas e descontínuas vênulas de carbonato e brucita disseminadas pela rocha.

No clinopiroxenito, o mineral dominante é o diopsídio, raramente serpentizado, associado a opacos e a um filossilicato da família flogopita-vermiculita. Os wehrlitos variam em composição entre os dois extremos acima descritos.

Os três tipos litológicos apresentam-se frequentemente recortados por veios brancos que atingem espessura de alguns milímetros, formados por carbonatos de Mg e Ca, associados ou não à brucita, e por serpentina bem cristalizada (serpentina III).

Do ponto de vista químico (Tab. 1), são rochas magnesianas a calco-magnesianas da sequência sífêmica, cuja feição mais notável é a grande pobreza em álcalis e alumina.

* Trabalho realizado com auxílio da FAPESP e CNPq

** Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Caixa postal 20899 — São Paulo (SP)

*** Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Orstom — Paris, França / Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Caixa postal 20899 — São Paulo (SP)

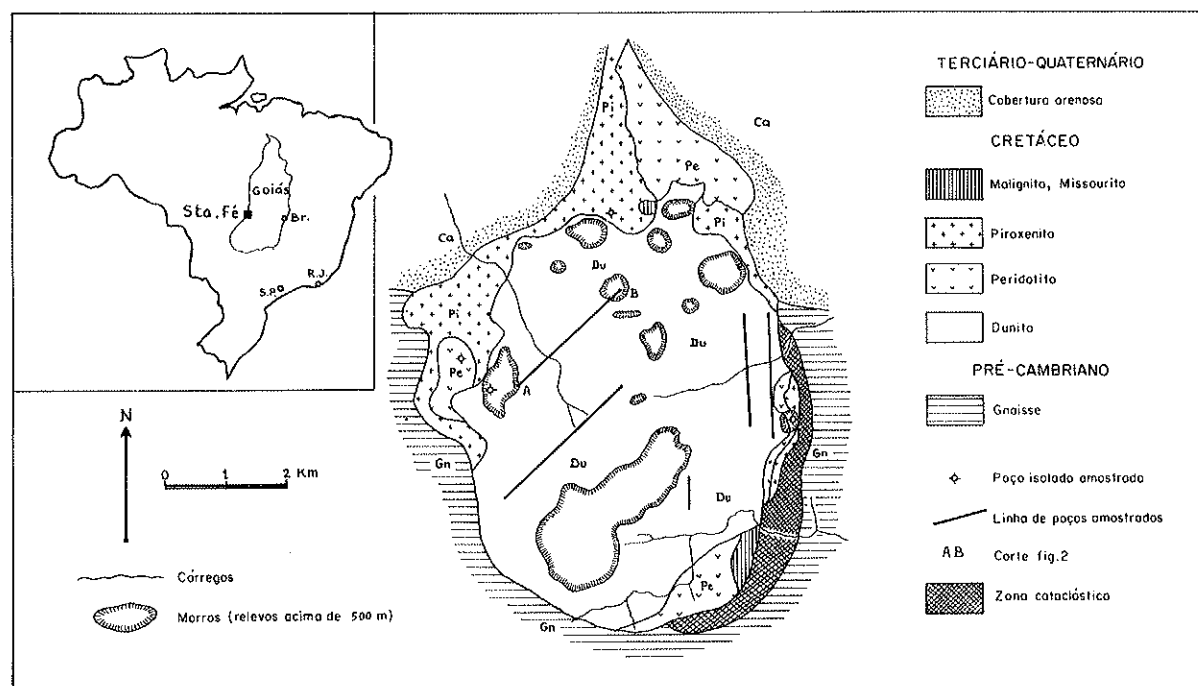


Figura 1 — O maciço de Santa Fé: localização, geologia e pontos amostrados

C. Relevo O maciço destaca-se na paisagem pelos testemunhos de erosão, constituídos por uma dezena de morrotes espalhados ao norte, e por um espigão contínuo ao sul, que emergem de uma superfície aplainada relacionada ao ciclo de erosão Velhas, do Quaternário Inferior (Figs. 1 e 2).

Nos cumes dos morrotes, de altitudes variáveis entre 500 e 570 m, aflora a rocha quase fresca, ou intensamente silicificada. Esses relevos residuais podem ser interpretados como remanescentes da superfície sul-americana, cuja fase de agradação data do Terciário Inferior e que vem sendo desmantelada a partir do Terciário Superior (King, 1956; e Braun, 1970).

Nos flancos dos morrotes começa a desenvolver-se um perfil de alteração que encontra sua expressão mais acabada nas baixadas. Esses sítios, a 450 m de altitude média, ocupam a maior parte da área do distrito (80% da zona dunitica e 87% do maciço) e são recobertos em toda sua extensão por uma camada de laterita vermelha concrecionária, localmente endurecida, formando crostas (canga).

D. Alteração O perfil de alteração típico em região de baixada, sobre dunito, compõe-se de quatro horizontes bem individualizados, desenvolvidos a partir da ro-

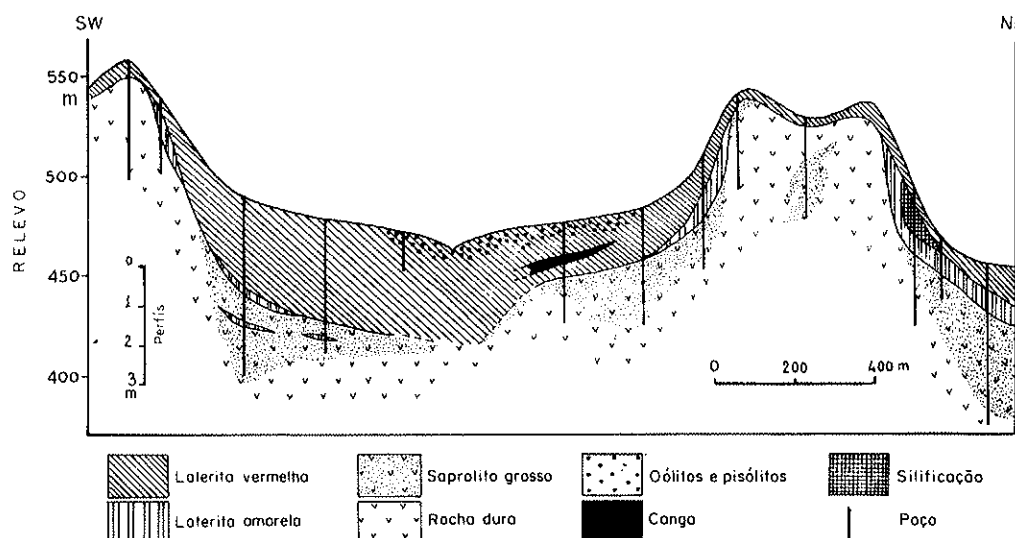


Figura 2 — Distribuição das fácies de alteração

cha fresca (R), de verde-escura a preta de densidade 2,7, que aparece a profundidades maiores que 20 m (Fig. 6A).

A rocha dura (RD) apresenta os primeiros sinais de alteração supérgena com perda do brilho, queda de densidade (de 1,7 a 2,5) e, ao nível microscópico, pela alteração da olivina por dissolução incongruente. Pode aparecer recortada por vênulas de quartzo e garnierita.

O saprolito grosso (SG) é um material rochoso marrom-amarelado, mais alterado que o anterior, de estrutura conservada e de coesão e densidade reduzidas (de 1,8 a 1,3). Possui espessura de 2 a 4 m. Nessa fácies, a olivina desapareceu, sendo substituída por amorfo silico-ferruginoso; a serpentina da rocha aparece fortemente colorida de amarelo.

A laterita amarela (LA) é um material saprolítico amarelado, de textura mais fina que o SG, menos denso (de 0,6 a 1,2), mas ainda conservando a estrutura da rocha. Ocorre em faixas descontínuas de até 2 m de espessura. A serpentina ainda está presente neste horizonte mas o mineral predominante é a goethita.

A laterita vermelha (LV) representa o último horizonte do perfil com espessura de 1 a 4 m. Nela, o volume do material original não é mais conservado, havendo compactação e possível remanejamento. O material é pulverulento, comportando concreções ferruginosas oolíticas e pisolíticas, eventualmente soldadas em crosta. Nesta fácies, dominam a goethita e a hematita.

Nos topos dos morrotes, não há perfis tão desenvolvidos: a rocha dura é apenas recoberta por cerca de

meio metro de laterita vermelha. É comum a presença de veios de quartzo e garnierita cortando a rocha, chegando, por vezes, a um verdadeiro silcrete.

E. Evolução mineralógica A Fig. 3 resume a hipótese explicativa a respeito da origem e do destino de cada mineral. Os primeiros minerais a se alterarem, carbonatos e brucita, são dissolvidos sem deixar resíduo. Depois altera-se a olivina, da qual resta um resíduo sílico-ferruginoso que acaba evoluindo em quartzo, goethita e hematita. Pode haver neoformação incipiente e transitória de esmectita. Nesse estágio inicial (RD, SG), o retículo de serpentina é fortemente colorido pela adsorção de hidróxidos de ferro e níquel.

Segue-se a dissolução do piroxênio com neoformação de nontronita que, finalmente, resulta na individualização do Fe e do Al como goethita e boehmita.

Por último, altera-se a serpentina (na LA) e dela nada mais resta senão o Fe sob a forma de goethita e hematita. Resistem ao intemperismo e são encontrados nos horizontes mais alterados os opacos parcialmente oxidados e os filossilicatos mistos flogopita-vermiculita-clorita, ligeiramente evoluídos (Oliveira e Melfi, 1979)

Nos veios de carbonatos e serpentina, ocorrem neoformações de filossilicatos niquelíferos da família krolita-pimelita (garnieritas, Brindley e Hang, 1973; e Brindley e Maksimovic, 1974). Esses constituintes são dissolvidos em estágios relativamente precoces da alteração. O quartzo, precipitado um pouco mais tarde, resiste e se conserva nos horizontes mais alterados.

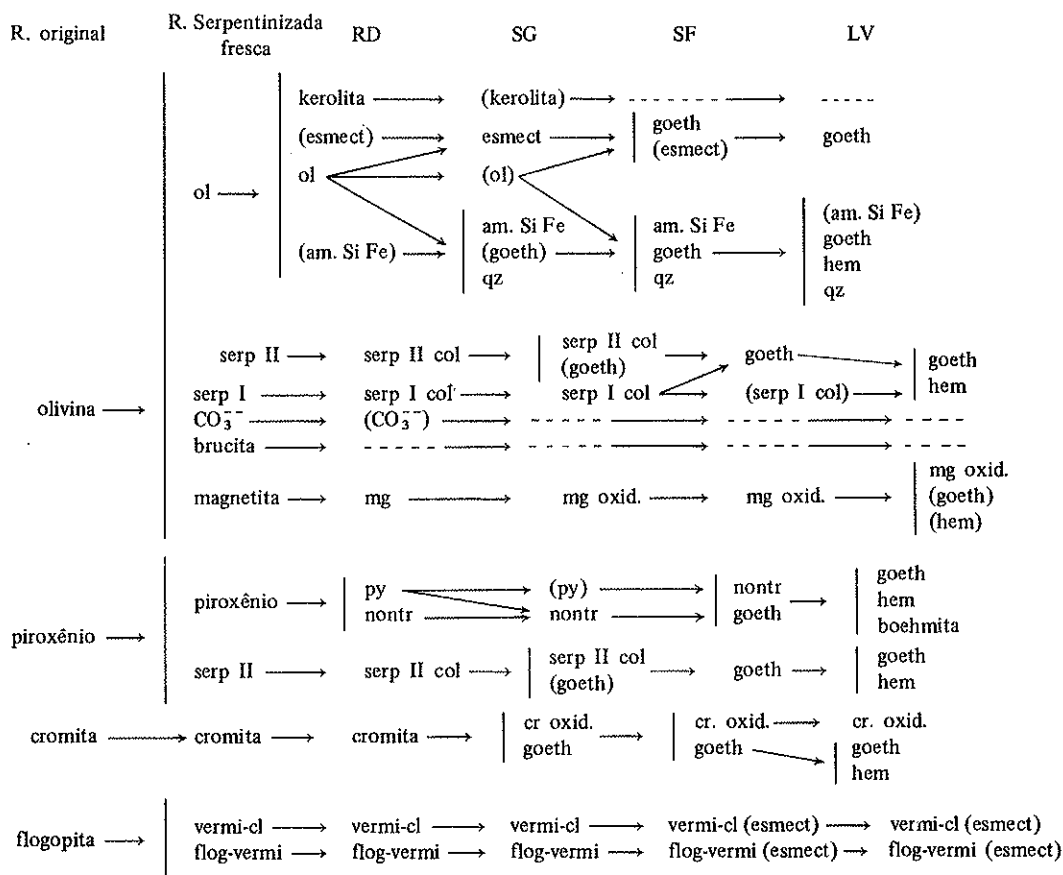


Figura 3 — Filiações mineralógicas

TENDÊNCIAS DA EVOLUÇÃO GEOQUÍMICA NAS BAIXADAS

A. Evolução geral dos elementos Os dados apresentados na Tab. 1 indicam a composição química média de cada fácies de alteração. Evidenciam-se imediatamente três grupos de óxidos:

- Os que se concentram nas fácies menos alteradas (SiO_2 e MgO).
- Os que se concentram nas fácies mais alteradas (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , MnO_2 , CuO e CoO).
- Os de comportamento irregular (H_2O e NiO).

Tabela 1 — Composição química média (% em peso) das fácies de alteração sobre dunito

	R	RD	SG	LA	LV	Canga
SiO_2	39,4	41,0	40,8	30,9	10,1	10,3
MgO	40,2	33,4	28,3	16,4	1,6	0,8
Fe_2O_3^*	9,0	10,4	15,5	34,6	70,8	64,9
Al_2O_3	0,4	0,5	0,7	1,9	3,5	3,2
Cr_2O_3	0,39	0,44	0,64	2,21	6,20	5,26
NiO	0,29	0,33**	0,91	1,72	1,19	1,15
MnO_2	0,22	0,20	0,28	0,44	1,01	2,38
CuO	0,003	0,004	0,005	0,009	0,011	0,006
CoO	0,020	0,024	0,028	0,063	0,145	0,382
$\text{H}_2\text{O} + \text{n}^\circ \text{ amos.}$	9,0	12,8	12,2	11,2	5,2	12,8
densid.	2,75	2,20	1,55	1,05	—	1,90

* Fe total computado como Fe^{3+}

** Excluídos os veios de garnierita

A fim de detalhar esta noção de semelhança e diferença no comportamento químico dos elementos durante o processo de alteração, foram calculados os coeficientes de correlação Pearson entre cada par de oito dos elementos dosados, e o resultado é apresentado na Tab. 2. Fica claro que a classificação dos elementos nos três grupos mencionados é confirmada. Os elementos do primeiro grupo mostram entre si coeficientes de correlação positivos e correlação negativa com os elementos do segundo grupo; estes últimos apresentam entre si correlação positiva. O Ni não apresenta correlação significativa com nenhum outro elemento.

Tabela 2 — Coeficientes de correlação Pearson entre os teores de Mg, Fe, Cr, Co, Cu, Si, Al e Ni (284 amostras)

* Fe	-0,85						
* Cr	-0,67	+0,78					
* Co	-0,74	+0,87	+0,68				
* Cu	-0,57	+0,53	+0,40	+0,49			
* Si	+0,59	-0,89	-0,73	-0,78	-0,53		
* Al	-0,53	+0,49	+0,21	+0,45	+0,55	-0,48	
** Ni	0,00	+0,06	-0,09	+0,03	+0,19	+0,04	+0,12
	Mg	Fe	Cr	Co	Cu	Si	Al

* Rejeição da hipótese H_0 (não existe correlação linear entre os pares) para uma probabilidade de 0,001

** Aceitação da hipótese H_0 para probabilidade de 0,001

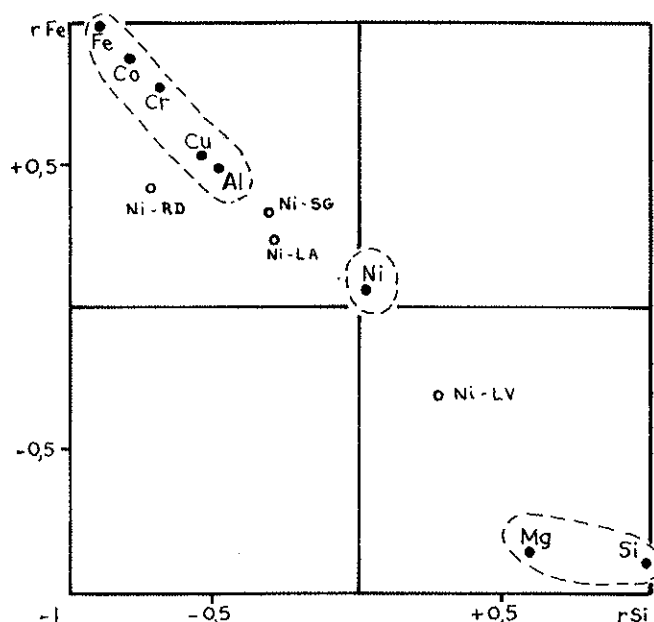


Figura 4 — Representação gráfica dos coeficientes de correlação do Mg, Fe, Cr, Co, Cu, Si, Al e Ni em função dos coeficientes de correlação do Fe e do Si. (Para o Ni, foi também plotado o coeficiente para cada fácies de alteração)

Esses três grupos são bem evidenciados na Fig. 4, em que foram plotados sobre dois eixos ortogonais os coeficientes de correlação de cada elemento com o Fe e o Si. Estes foram escolhidos como referência por apresentar entre si o coeficiente de correlação negativo maior em valor absoluto, isto é, o comportamento mais discrepante. Os coeficientes de correlação do Ni calculados para cada fácies de alteração evidenciam um comportamento solúvel deste elemento na LV e residual nos demais horizontes.

Os dados acima vêm corroborar as conclusões sobre a evolução mineralógica. A perda dos elementos solúveis traz, por si só, como consequência, a relativa concentração dos elementos menos móveis. O Fe, que com o Si e Mg perfaz 90% da rocha, apresenta um comportamento simétrico ao desses dois, isto é, seu teor aumenta à medida que os teores deles diminuem.

O Cr, originalmente na cromita, sofre dissolução incipiente e segue o mesmo comportamento que o Fe. O Al, presente na vermiculita e secundariamente na cromita, permanece, em sua maior parte, retido nesses minerais residuais.

O Mn e o Co não foram encontrados individualizados em minerais. Apresentam comportamento semelhante sendo que o enriquecimento é mais pronunciado para o Co que para o Mn. Encontram-se especialmente concentrados nas crostas ferruginosas. O Cu sofre enriquecimento não muito acentuado no decorrer da meteorização. Sua vinculação mineralógica é desconhecida.

A água, presente originalmente na serpentina, brucita e vermiculita, é também encontrada em quase todos os minerais secundários. Apenas os horizontes de LV são relativamente desidratados como consequência da passagem goethita-hematita. No processo de concrecionamento e formação de crosta há novamente hidratação.

A evolução do Ni é a mais complexa. É liberado do retículo da olivina quando de sua dissolução num meio em que as condições de pH são favoráveis a sua precipitação (junto com o Fe). Daí os teores mais elevados nos níveis de RD e de SG. Pode localmente concentrar-se nas vênulas, associando-se ao Si e Mg (pimelita), mas isso representa apenas uma pequena fração do Ni total, pois sua maior parte está associada ao Fe, colorindo a serpentina herdada, ou aos amorfos sílico-ferruginosos. Quando a serpentina se dissolve, o Ni, tal como o Fe, acumula-se chegando a teores elevados na LA. Com exceção dos raros veios de pimelita, o Ni não forma seus próprios minerais. Sua distribuição e a natureza de sua associação com o Fe serão discutidas adiante. Na LV o declínio dos teores de Ni acompanha a passagem goethita-hematita.

No caso dos piroxenitos e peridotitos, a evolução química é essencialmente a mesma. O Ca, presente no diopsídio, comporta-se de maneira semelhante ao Mg, sendo evacuado à medida de sua liberação.

B. Balanço global da alteração (dunitos) A conservação da estrutura original da rocha durante a alteração até o nível de LA permite calcular a quantidade de cada elemento por unidade de volume e compará-la com a quantidade inicialmente presente no mesmo volume de rocha fresca (balanço isovolumétrico, Millot e Bonifas, 1955). Assim, para cada amostra, os dados das análises químicas ponderais foram multiplicados pelos de densidade aparente, sendo os resultados expressos em g/100 cm³.

A Tab. 3 mostra o balanço global da alteração teórica para os dunitos de Santa Fé, calculado para cada estágio do processo. As perdas são contínuas e fortes para o Mg e, em menor grau, para o Si; esses dois elementos são evacuados em solução, depois de liberados dos minerais hipógenos (olivina e serpentina). A Fig. 5 permite a comparação das velocidades respectivas de lixiviação desses elementos solúveis. A rápida perda inicial de MgO (4% do MgO total) corresponde à dissolução da brucita e dos carbonatos. Em seguida, a evacuação preferencial do MgO demonstra que a hidrólise da olivina deixa um resíduo sílico-(ferruginoso). No SG e na LA, a alteração da serpentina é praticamente uma dissolução congruente.

O Fe, o Al e o Cr permanecem em quantidades mais ou menos constantes até o SG, mas são enriquecidos em valor absoluto nas LA mais evoluídas, provavelmente por consequência de uma iluviação de finas partículas, a partir da LV. O Ni revela enriquecimentos absolutos em todos os níveis de alteração, a não ser na RD, onde ele é apenas conservado.

Na LV, a estrutura da rocha é destruída, o que impossibilita o cálculo isovolume. Uma avaliação grosseira do balanço foi tentada usando a média dos resultados obtidos considerando, sucessivamente, o Fe e o Al constantes na passagem LA-LV. A quase totalidade do Si e sobretudo do Mg iniciais desaparecem na LV. Esse nível tem um pouco menos de Ni que a rocha fresca. Enfim, é provável que a LV tenha um excesso de Cr em relação à LA.

A Tab. 3 mostra a importância da proporção de material evacuado (SiO₂, MgO): no final da alteração (LV), 86% da rocha inicial foram dissolvidos. A proporção de material importado nunca é muito grande.

Portanto a evolução dos perfis de alteração das rochas de Santa Fé pode ser caracterizada como uma laterização. Esses perfis são todos localizados na baixada (superfície Velhas e evolução recente). Por outro lado, a baixada mostra um excedente de Fe, Al e Cr nos horizontes superiores, e de Ni em quase todos os níveis, sem fonte atual para essas acumulações absolutas.

C. Distribuição dos elementos nos minerais (dunitos) As análises químicas sobre amostra total e o cálculo do balanço geoquímico forneceram informações a respeito da evolução geral dos elementos químicos, no decorrer da alteração. É interessante relacionar essa evolução às filiações mineralógicas sucessivas a fim de esclarecer o destino e a repartição dos elementos nas diferentes fases mineralógicas, em cada etapa do processo.

Na rocha fresca, essa abordagem pode ser direta com a análise dos minerais puros separados. Nos horizontes de alteração, os minerais secundários ocorrem, em geral, misturados e são de granulação muito fina, impossibilitando a separação. Neste caso, abordagens indiretas, como análise de frações granulométricas e ataques químicos parciais, são muito úteis.

Tabela 3 — Balanço dos ganhos e das perdas médias em cada horizonte¹

	H ₂ O +	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	Export. ²	Import. ³
LV	- 89	- 95	- 99	+ 48	+ 60	+ 200	- 24	86%	28%
LA	- 53	- 70	- 85	+ 47	+ 80	+ 130	+ 126	68%	15%
SG	- 23,8	- 41,6	- 60,3	- 3	- 5,5	- 7,3	+ 76	41%	0,39%
RD	+ 13	- 16,7	- 33,5	- 7,5	- 4,3	- 9,5	- 7,4	20%	—
R ⁴	24,83	108,32	110,44	24,72	1,15	1,07	0,80	—	—

¹ Ganhos (+) e perdas (-) em porcentagem da quantidade inicial de cada óxido

² Proporção do material inicial

³ Proporção do material do horizonte

⁴ Quantidades iniciais em g/100 cm³

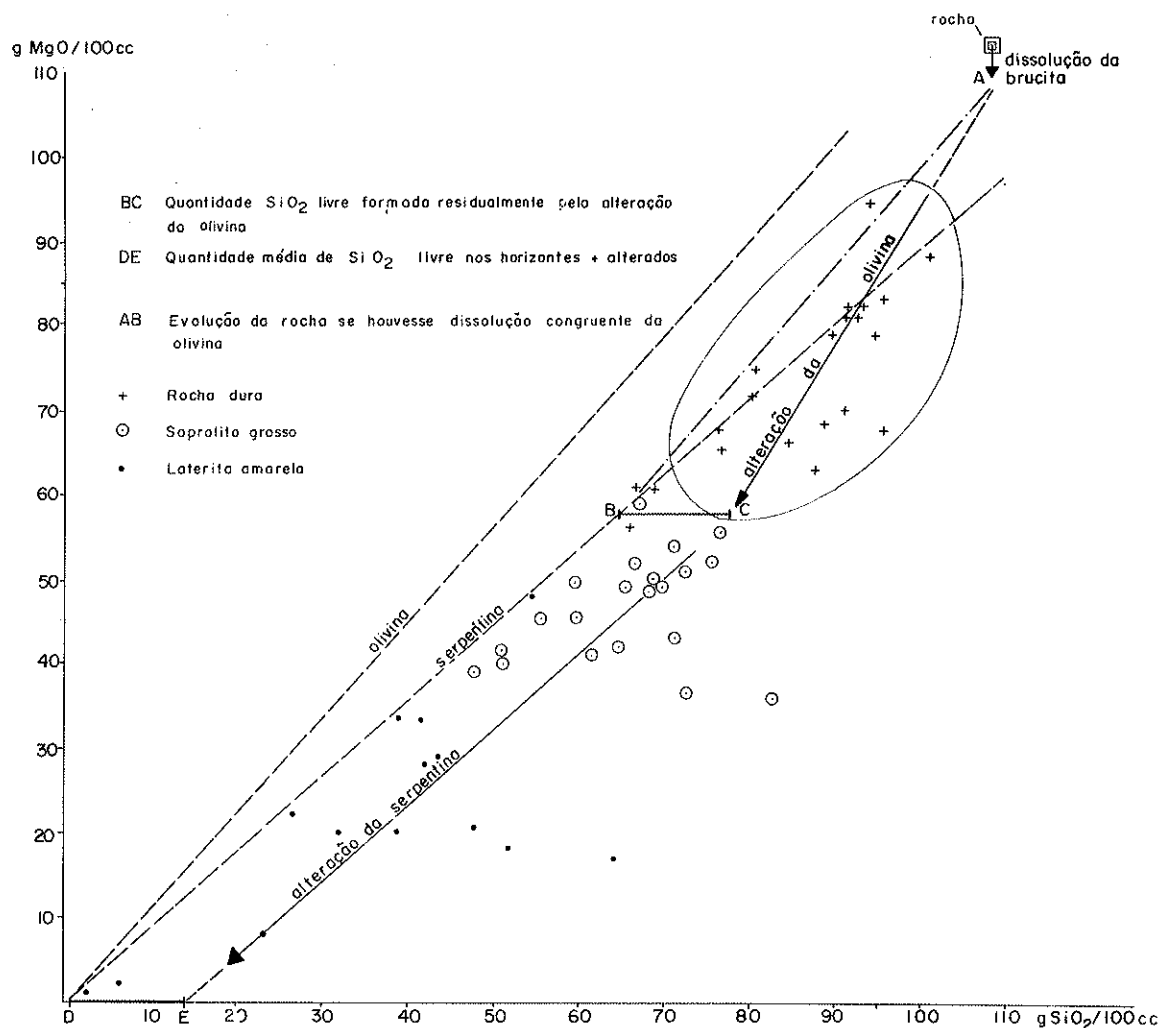


Figura 5 — Evolução dos elementos solúveis na alteração

1. Composição dos minerais hipógenos na rocha fresca

A Tab. 4 fornece a composição e a fórmula estrutural dos minerais hipógenos dos dunitos (olivina, serpen-

tina e vermiculita) e do piroxênio (Souza, 1978; e Oliveira, 1980). A transformação hipógena olivina-serpentina parece ter acontecido com aumento de volume e sem perda de Ni.

Tabela 4 — Composição química (% em peso) e fórmula estrutural dos minerais hipógenos

	H ₂ O+	SiO ₂	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	CoO	CuO	MnO ₂	CaO	TiO ₂	Total
Olivina	0	40,60	45,12	10,71	—	0,24	0,03	0,35	—	—	0,27	0,32	0,01	97,65
Piroxênio	0	51,69	15,45	5,24	—	1,85	0,05	0,06	—	—	0,03	23,12	1,47	98,96
Serpentina	14,0	40,8	36,5	6,40	—	0,20	0,06	0,27	0,01	0,010	0,07	0,08	—	98,40
Vermiculita (em veios)	16,0	35,70	30,85	—	7,80	10,40	0,04	0,08	0,01	0,025	0,04	1,00	—	101,95

Olivina (Mg_{1,69} Fe_{0,23}^{II} Al_{0,01} Ni_{0,01} Mn_{0,01} Ca_{0,01}) Si_{1,01}O₄

Piroxênio (Mg_{0,43} Fe_{0,08}^{II} Ca_{0,46} Ti_{0,02}) (Si_{0,96} Al_{0,04})O₃

Vermiculita (Mg_{0,84} Ca_{0,16}) (Mg_{6,00}) [(Si_{5,31} Al_{1,82} Fe_{0,87}^{II}) O_{19,6}] (OH)₄ · 6H₂O

Serpentina (Mg_{2,60} Fe_{0,26}^{II} Ni_{0,01} Al_{0,01}) Si₂O₅ (OH)₄

2. Avaliação da composição dos produtos secundários

a) Garnierita A análise de várias amostras de composição mineralógica conhecida permitiu avaliar a fórmula estrutural da pimelita, silicato níquelífero exclusivo das garnieritas: $(\text{Mg}_{1,86} \text{Ni}_{1,14}) (\text{Si}_{3,83} \text{Al}_{0,06} \text{Fe}_{0,11}^{\text{III}}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \text{H}_2\text{O}$.

b) Ataques químicos parciais A análise química de dunitos frescos ou alterados, por ataque perclórico, deixa como único resíduo insolúvel o quartzo, que pode assim ser contabilizado separadamente da sílica dos silicatos e da sílica amorfa (conjunto "sílica solúvel").

Também foi dosada, segundo o método Segalen (1968), a proporção de Fe e Ni amorfos ou mal cristalizados em cada horizonte (Tab. 5).

Tabela 5 — Proporção dos óxidos amorfos e mal cristalizados em relação a sua quantidade total na amostra (em %)

	Fe_2O_3	NiO	MgO
LV/LA	60	77	0
LA	68	78	0
SG	92	100	0

A diminuição da proporção de material amorfo em direção ao topo dos perfis confirma que a olivina, e depois a serpentina, é hidrolisada deixando um resíduo (sílico)-ferruginoso-níquelífero amorfo, que passa gradativamente a goethita. Este resíduo amorfo não retém o Mg liberado dos silicatos primários.

c) Análise das frações granulométricas Três frações granulométricas (A: $\phi > 0,25$ mm; B: $0,25$ mm $> \phi > 0,062$ mm; e C: $\phi < 0,062$ mm) dos quatro horizontes de alteração de um perfil foram analisadas (Tab. 6).

Na RD, a fração grosseira predomina. Todas as frações têm composição semelhante e próxima à da R (desagregação mecânica). Ocorre apenas uma perda de Mg levemente maior na fração fina, onde são concentrados os produtos amorfos sílico-ferruginosos da alteração da olivina.

No SG, em que predomina a fração fina, as três frações são nitidamente diferentes. A fração grosseira é basicamente constituída de serpentina mas enriquecida em Fe e sobretudo em Ni; é a "serpentina colorida" descrita na evolução mineralógica. A fração média concentra os grãos de cromita. O teor de Cr na fração fina mostra que começou a alteração deste espinélio. A fração fina (17,8% MgO) contém aproximadamente 50% de serpentina microdividida e 50% do material sílico-ferruginoso-níquelífero amorfo (antigos núcleos de olivina, agora totalmente alterados).

Na LA, as frações mais grosseiras são pouco significativas em quantidade e compõem-se de uma proporção considerável de cromita. Um terço do Cr da amostra total pertence à fração fina, o que indica uma proporção semelhante de cromita alterada (com perda de Mg, Trescases, 1975).

Na LV, as três frações voltam a ser quimicamente parecidas, todas muito ferruginosas, aluminosas e cromíferas (alteração de 50% das cromitas). A dessilicificação da fração fina em relação a mesma fração na LA é mais intensa que a perda de Mg concomitante (dessilicificação dos géis sílico-ferruginosos). O aumento da fração grosseira traduz o início de concrecionamento.

3. Cálculo da repartição dos elementos nos minerais em cada horizonte

a) Distribuição Com base na composição média e na densidade de cada horizonte (Tab. 1), os elementos podem ser distribuídos pelas diferentes fases mineralógicas presentes a cada estágio de alteração, utilizando os resultados do estudo das filiações mineralógicas (Fig. 3), do balanço global da alteração (Tab. 3), dos ataques químicos parciais (Tab. 5) e da análise das frações gra-

Tabela 6 — Análise química das frações granulométricas (% em peso)

	$\text{H}_2\text{O} +$	Qz	$\text{SiO}_2\text{sol.}$	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	Cr_2O_3	NiO	CoO	CuO	MnO_2	CaO	Total
LV	127A (10)*	4,3	7,3	4,3	1,0	63,0	5,8	7,02	0,80	0,239	0,012	1,19	99,4
	127B (44)	2,1	8,4	0,4	1,6	75,3	3,6	6,09	0,79	0,120	0,008	—	99,0
	127C (46)	3,1	8,7	2,3	1,7	74,5	3,3	6,31	0,72	0,068	0,036	—	101,1
LA	124A (3)	10,5	14,8	26,6	20,8	23,3	0,4	1,32	2,39	0,029	0,006	0,27	100,5
	124B (9)	1,6	—	15,44	6,0	51,9	2,0	23,54	1,25	0,076	0,004	0,59	102,4
	124C (88)	11,1	5,3	12,5	6,6	56,5	0,8	0,92	3,37	0,076	0,086	—	97,8
SG	123A (10)	12,3	3,0	34,0	24,6	22,9	0,3	0,31	1,78	0,038	0,004	0,29	100,1
	123B (16)	8,2	3,3	23,2	20,0	34,8	1,1	9,48	1,44	0,041	0,011	0,34	101,9
	123C (74)	13,6	0,9	22,9	17,8	43,0	0,3	0,46	2,51	0,081	0,053	0,60	101,9
RD	122A (70)	12,0	1,2	36,8	34,5	16,5	0,2	0,58	0,46	0,024	0,003	0,21	102,6
	122B (10)	11,8	1,4	39,0	31,6	15,0	1,2	1,62	0,60	0,029	0,003	0,22	102,8
	122C (20)	13,1	1,5	38,3	30,7	15,8	0,8	0,52	0,69	0,058	0,025	0,42	102,4

* Os números entre parênteses correspondem à porcentagem da fração granulométrica considerada

— Não determinado

nulométricas (Tab. 6), segundo o método proposto por Trescases, 1975. Os resultados, sempre para 100 cm³ de amostra (avaliação isoFe-isoAl, para a LV), constam das tabelas seguintes.

Rocha fresca: Tab. 7 (composição estimada para os carbonatos e cromita).

Rocha dura: Tab. 8 (a garnierita não foi considerada por ser muito rara, principalmente na baixada).

Saprolito grosso: Tab. 9. O material não pertencente aos minerais primários é distribuído entre o gel Si-Fe — ex-olivina — e os produtos niquelífero — ferruginosos que colore a serpentina, conforme as análises das frações granulométricas (esses produtos Fe-Ni são absorvidos nos defeitos da malha de serpentina nas clivagens, no canal central, etc. (Trescases, 1975 e 1979).

Laterita amarela: Tab. 10. A quase totalidade da serpentina constante da fração fina é muito desagregada e não deve reter grande quantidade de produtos Fe-Ni.

Tabela 7 — Distribuição dos elementos por minerais na rocha fresca (D = 2,75)

g/100 cm ³	H ₂ O + CO ₂	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃ (1)	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	Total (2)
Olivina	—	46,56	51,73	13,64	0,275	0,027	0,38	112,61
Serpentina	21,01	61,27	54,81	10,67	0,302	0,08	0,41	148,55
Carbonato	3,60	—	3,27	—	—	—	—	6,87
Vermiculita	0,22	0,50	0,41	0,11	0,137	—	—	1,38
Cromita	—	—	0,22	0,30	0,44	0,96	—	1,92
Total	24,83	108,32	110,44	24,72	1,15	1,07	0,80	271,33

(1) Fe total como Fe₂O₃

(2) Peso de cada mineral em g/100 cm³ de rocha

Tabela 8 — Distribuição dos elementos por minerais na rocha dura (D = 2,2)

g/100 cm ³	H ₂ O	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃ (1)	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	Total (2)
Olivina	—	16,23	18,04	4,75	0,10	0,01	0,14	39,27
Serpentina	21,04	61,27	54,81	10,67	0,302	0,08	0,41	148,55
Vermiculita	0,22	0,50	0,41	0,11	0,137	—	—	1,38
Cromita	—	—	0,22	0,30	0,44	0,96	—	1,92
Gel Si-Fe	6,93	10,2	—	8,90	0,17	0,02	0,25	26,47
Quartzo	—	2	—	—	—	—	—	2
Total	28,16	90,2	73,48	24,72	1,15	1,07	0,80	219,59

(1) Fe total como Fe₂O₃

(2) Peso de cada mineral em g/100 cm³ de amostra

Tabela 9 — Distribuição dos elementos por mineral no saprolito grosso (D = 1,55)

g/100 cm ³	H ₂ O	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃ (1)	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	Total (2)
Vermiculita	0,22	0,50	0,41	0,11	0,137	—	—	1,38
Cromita	—	—	0,20	0,27	0,40	0,86	—	1,73
Serpentina	16,6	48,35	43,26	8,40	0,24	0,07	0,32	126,14
+ Resíduo Fe-Ni	—	—	—	8,0	0,18	0,07	0,69	
Gel Si-Fe	2,1	11,5	—	8,0	0,19	0,07	0,44	
Quartzo	—	3	—	—	—	—	—	3
Total	18,91	63,24	43,87	24,72	1,15	1,07	1,41	154,55

(1) Fe total Fe₂O₃

(2) Peso de cada mineral em g/100 cm³ de amostra

Tabela 10 — Distribuição dos elementos por minerais na laterita amarela (D = 1,05)

g/100 cm ³	H ₂ O	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃ (1)	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	Total (2)
Vermiculita	0,22	0,50	0,41	0,11	0,137	—	—	1,38
Cromita	—	—	0,15	0,21	0,29	0,64	—	1,29
Serpentina	6,38	18,60	16,64	3,24	0,09	0,03	0,12	45,10
Gel Si-Fe	3,06	9,38	—	16,39	0,74	0,83	1,13	31,53
Goethita	2,06	—	—	16,39	0,74	0,82	0,56	20,57
Quartzo	—	4	—	—	—	—	—	4
Total	11,72	32,48	17,20	36,34	2,00	2,32	1,81	103,87

(1) Fe total como Fe₂O₃(2) Peso de cada mineral em g/100 cm³ de amostra

Tabela 11 — Distribuição dos elementos por minerais na laterita vermelha

g/100 cm ³	H ₂ O	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃ (1)	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	Total (2)
Vermiculita	0,22	0,50	0,41	0,11	0,137	0,48	—	1,38
Cromita	—	—	0,11	0,15	0,22	—	—	0,96
Serpentina	0,11	0,34	0,30	0,06	—	—	—	0,81
Quartzo	—	3,5	—	—	—	—	—	3,5
Gel Si-Fe	0,52	0,87	—	3,78	0,17	0,19	0,26	5,79
Goethita	1,83	—	—	14,58	0,66	1,25	0,35	18,67
Hematita	—	—	—	17,82	0,61	1,27	—	19,70
Total	2,68	5,21	0,82	36,50	1,80	3,19	0,61	50,81

(1) Fe total como Fe₂O₃(2) Peso de cada mineral num volume de amostra resultante da evolução de 100 m³ de rocha fresca; esse volume foi avaliado pela média dos cálculos a ferro e alumínio constantes

Laterita vermelha: Tab. 11. A goethita foi considerada idêntica à da LA, e o gel Si-Fe também, com exceção de uma dessilicificação parcial.

As quantidades absolutas de cada mineral em 100 cm³ de cada fácies de alteração são representadas na Fig. 6B, verticalmente distribuídas em função da densidade. É assim evidenciada a evolução mineralógica quantitativa dos dunitos. Esse "perfil" pode ser facilmente relacionado à sucessão vertical dos horizontes no perfil de alteração (Fig. 6A). A Tab. 12 resume as porcentagens ponderais médias de cada mineral a cada etapa da alteração.

Tabela 12 — Composição mineralógica média de cada horizonte de alteração (% em peso)

	OI	Se	Ca	Ve	Cr	Gel Si-Fe	Qz	Go	He
LV	0	1,6	0	2,7	1,9	11,4	6,9	36,7	38,8
LA	0	43,4	0	1,3	1,2	30,3	3,8	19,8	—
SG	0	81,6	0	0,9	1,1	14,4	2,0	—	—
RD	17,9	67,65	0	0,63	0,87	12,95	—	—	—
R	41,7	54,6	2,5	0,5	0,7	—	—	—	—

OI — Olivina
Se — Serpentina
Ca — Carbonato
Ve — Vermiculita

Cr — Cromita
Qz — Quartzo
Go — Goethita
He — Hematita

b) Composição dos produtos de alteração da olivina e da serpentina A composição calculada dos produtos de alteração da olivina e da serpentina (Tab. 13A) mostra que o gel Si-Fe, resíduo da hidrólise da olivina, é sempre rico em Ni mas tem teores elevados em Cr e Al apenas nos horizontes mais evoluídos. Os produtos Fe-Ni de impregnação da serpentina são muito ricos em Ni e têm composição próxima à da hematita (em parte transformação magnetita-hematita?). A goethita possui Al, Cr e Ni, e a hematita (LV), apenas os dois primeiros elementos.

A razão Fe/Si (Tab. 13B) aumenta regularmente com a alteração, com a evolução da olivina e com a evolução dos géis Si-Fe: o mecanismo de alteração é de tipo laterítico.

A razão Fe/Ni aumenta da rocha para a LV e dos silicatos hipógenos para os óxidos ferruginosos (goethita, hematita), mas mostra valores mínimos no SG, na LA e nos produtos secundários, o que evidencia importação de Ni nesses materiais.

c) Distribuição do níquel A Tab. 14 fornece a distribuição do Ni nos diferentes minerais de cada horizonte, expressa em porcentagem do Ni total do horizonte. Fica claro que este elemento tem uma ligação predominante com os óxidos de Fe apenas na LV. Na LA, cerca de

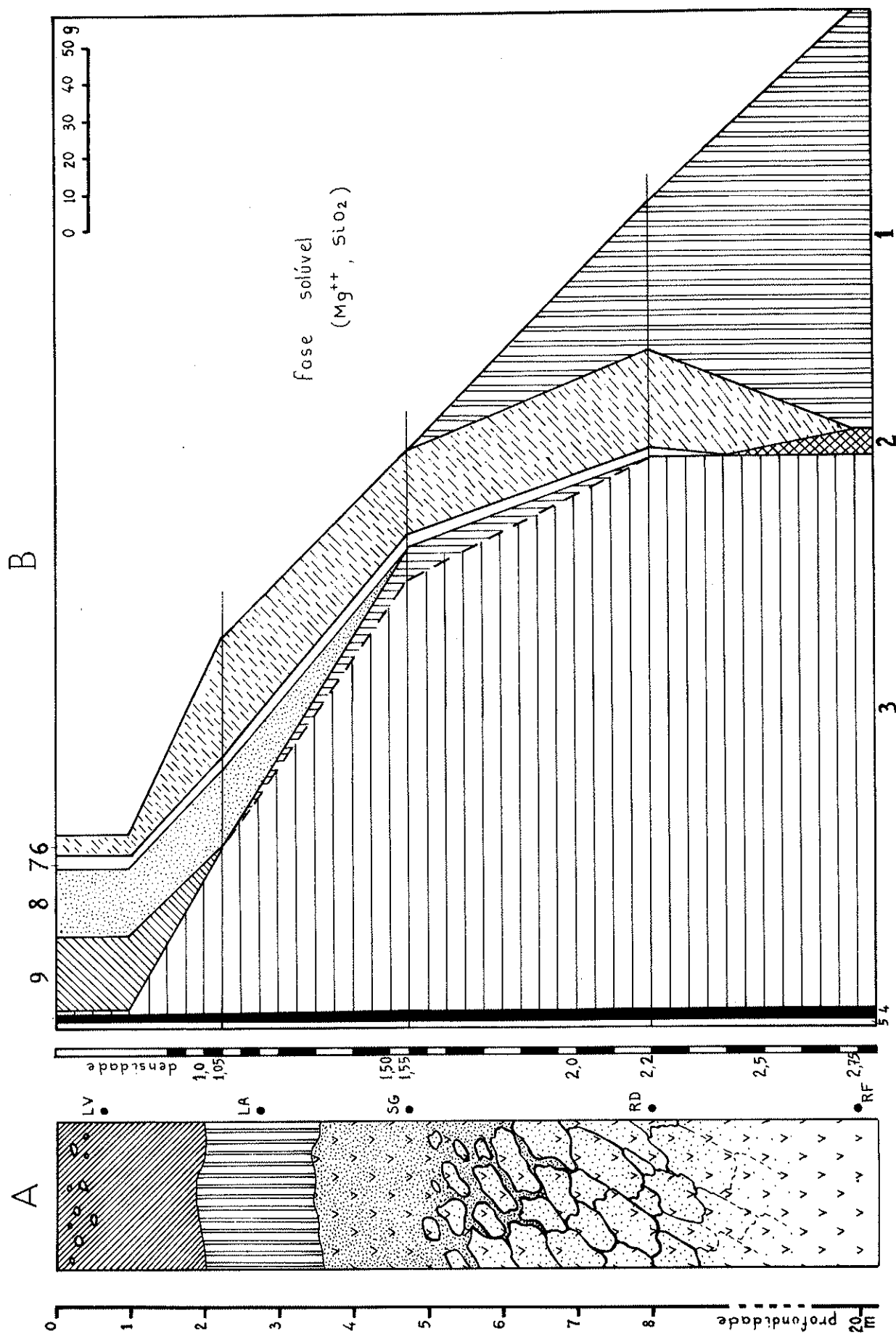


Figura 6 — A. Perfil de alteração na baixada. B. Evolução mineralógica quantitativa em função da alteração. 1. Olivina; 2. carbonatos; 3. serpentina; 4. cromita; 5. vermiculita; 6. géis Si-Fe; 7. quartzo; 8. goethita; e 9. hematita

Tabela 13 — A. Composição calculada dos produtos de alteração da olivina e da serpentina

		H ₂ O	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO
Laterita vermelha	Hematita	—	—	90,5	3,1	6,4	—
	Goethita	10,0	—	78,1	3,54	6,69	1,87
	Gel Si-Fe	9,0	15	65,27	2,94	3,30	4,49
Laterita amarela	Goethita	10,0	—	79,68	3,60	3,99	2,72
	Gel Si-Fe	9,70	29,75	52,0	2,34	2,63	3,58
	Fe-Ni assoc.	—	—	90	2	0,75	7,25
Saprolito grosso	c/serpent.	—	—	—	—	—	—
	Gel Si-Fe	9,4	51,5	35,9	0,85	0,31	1,98
Rocha dura	Gel Si-Fe	26,2	38,53	33,62	0,64	0,07	0,94

B. Razões Fe/Si e Fe/Ni nos horizontes, nos minerais hipógenos e nos produtos de alteração

	Fe/Si	Fe/Ni		Fe/Si	Fe/Ni		Fe/Si	Fe/Ni
LV	7,0	59,5	Gel Si-Fe	4,35	14,5	Goethita	—	41,7
LA	1,12	20,0	Gel Si-Fe	1,75	14,5	Goethita	—	29,3
SG	0,38	17	Gel Si-Fe	0,70	18	res. Fe-Ni	—	12,4
RD	0,28	35	Gel Si-Fe	0,87	35,8	c/serpent.	0,17	26
R	0,23	31	Olivina	0,29	34	Serpentina	0,17	26
Amostra total			ol. e prod. de alter.			serp. e prod. de alt.		

Tabela 14 — Distribuição do níquel nos diferentes minerais em cada horizonte (em % do níquel total do horizonte)

	Olivina	Serpentina (+prod.alter.)	Gel Si-Fe	Goethita
LV	—	—	40	60
LA	—	6,6	62,4	30,9
SG	—	68,80	31,20	—
RD	17,50	51,25	31,25	—
R	47,50	51,25	—	—

dois terços do Ni têm ligação silicatada, principalmente com o gel sílico-ferruginoso. No SG, um terço do Ni pertence ao gel Si-Fe e dois terços ocorrem sob forma oxidada, junto com o Fe, adsorvidos nos defeitos do retículo da serpentina hipógena. Portanto, neste horizonte, a totalidade do Ni apresenta um ou outro tipo de ligação silicatada, embora fraca, como mostraram os ataques parciais.

Em Santa Fé, as formas de ocorrência do Ni na estrutura dos minerais (goethita e pimelita, Schellmann, 1978; e Kuhnel *et al.*, 1978) não predominam.

EVOLUÇÃO GEOQUÍMICA AO NÍVEL DA PAISAGEM

É nas áreas de baixada (87% da área total do maciço, Fig. 2) que se encontram os perfis de alteração mais plenamente desenvolvidos. Mas, para completar o quadro geoquímico, é preciso também considerar a evolução dos outros setores da topossequência.

A. Alteração nos morrotes Muitas vezes, no topo dos morrotes, abaixo de uma delgada cobertura de LV, aflora rocha silicificada. Esta silicificação pode ser discreta, constando apenas de filões de quartzo que preenchem diáclases da rocha pouco alterada (sobretudo no plano horizontal), associados ou não a veios de garnierita. Quando é mais intensa, chega a um verdadeiro **silcrete**: a rocha transforma-se num *boxwork* de quartzo e calcedônia, preenchido e envolvido por material laterítico. A ausência de silicificação na rocha fresca e a correlação dos topos silicificados a uma mesma superfície (que corresponderia à superfície sul-americana) não deixam dúvida quanto à origem supérgena deste fenômeno.

A composição química de amostras de um perfil bem silicificado consta da Tab. 15A. A análise das frações

granulométricas indica que o quartzo e a calcedônia constituem um arcabouço (fração grosseira) preenchido por material saprolítico laterizado (fração fina). A composição desse material foi avaliada, recalculando os dados da análise química para 100%, com exclusão da sílica. A Tab. 15B mostra que se trata de uma laterita bem evoluída (70% Fe_2O_3).

O cálculo isovolume para as amostras deste perfil (Tab. 15C) evidencia a conservação (e mesmo o ganho absoluto) da sílica no silcrete e a perda praticamente total do Mg. A discrepância observada no comportamento do Fe é explicada pela Tab. 15D: na base do perfil, o ganho de Fe é devido à iluviação da goethita; nos horizontes superiores, as perdas de todos os componentes,

Tabela 15 — A. Composição química dos horizontes muito silicificados e alterados, no topo de um morro (% em peso)

Pr. (m)		PF	SiO_2	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	Cr_2O_3	NiO	CoO	CuO	MnO_2	Total
0	Am. tot.	2,2	84,9	1,0	9,5	0,9	0,58	0,64	0,049	0,005	0,43	100,3
2	Am. tot.	2,4	78,6	0,3	15,3	0,5	0,66	0,29	0,025	0,004	0,15	98,2
	$\phi > 250\mu$	3,0	73,9	0,5	20,2	0,7	0,33	0,37	0,100	0,007	0,37	100,1
6	$250\mu > \phi > 62\mu$	6,1	43,4	1,0	41,7	3,6	2,38	0,78	0,050	0,046	0,26	99,3
	$\phi < 62\mu$	6,8	28,4	1,2	51,7	3,6	3,66	0,81	0,067	0,021	0,32	96,5
9	Am. tot.	5,1	56,4	0,7	34,7	1,6	1,23	0,73	0,081	0,009	0,38	100,9

B. Composição recalculada da fração não silicosa dessas amostras

Prof. (m)		Fe_2O_3	MgO	NiO
0	Am. tot.	63	6,6	4,2
2	Am. tot.	72	1,4	1,4
	$\phi > 250\mu$	77	1,9	1,4
6	$250\mu > \phi > 62\mu$	74	1,8	1,4
	$\phi < 62\mu$	72	1,7	1,1
9	Am. tot.	79	1,6	1,6

C. Balanço: ganhos e perdas em proporção das quantidades iniciais e óxidos na amostra (em %)

Prof. (m)	SiO_2	MgO	Fe_2O_3
0	+48	-99	-26
2	+1	-100	-13
9	+1	-99	+183

salvo a sílica, na mesma proporção (cerca de dois terços), refletem o esvaziamento mecânico das cavidades do *boxwork* silicoso de seu conteúdo laterítico.

Assim, o estudo dos perfis de alteração dos topos dos morrotes sugere que nesses sítios as rochas evoluíram pelas etapas seguintes:

- Silicificação da rocha pouco alterada e consequente formação de um denso reticulado de quartzo e calcedônia.
- Alteração laterítica levando à evolução dos núcleos rochosos em LV.
- Esvaziamento mecânico das cavidades do *boxwork* na parte superior do perfil e iluviação do material laterítico para a base do perfil.

B. Perdas e ganhos na topossequência. Integração dos dados ao nível da paisagem Integrando os dados relativos aos perfis de topo pouco desenvolvidos e os perfis lateríticos das baixadas (Tab. 16), conclui-se que o Mg e o Si são evacuados para fora do maciço à medida que a alteração prossegue. Apenas os topos de alguns morrotes indicam retenção ou acumulação de Si (Tab. 15C).

O Fe, Cr e Al comportam-se sempre de maneira estritamente residual. Pode haver um certo deslocamento mecânico desses elementos por iluviação em direção aos

D. Balanço das perdas na amostra de profundidade de 2 m em relação à amostra de profundidade de 9 m (% da quantidade de óxidos na am. profunda)

H_2O	SiO_2	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	Cr_2O_3	NiO	CoO	CuO	MnO_2
-67	-2	-70	-69	-80	-63	-72	-75	-69	-72

Tabela 16 — Balanço geoquímico por setor da topossequência (% da quantidade inicial de óxido na rocha)

A. Magnésio

	Topo	Encosta	Sopé	Baixada
LV	n.d.	n.d.	n.d.	-99
LA	—	-78	-86	-84
SG	-59	-60	-59	-66
RD	-34	-39	-39	-40

B. Silica

	Topo*	Encosta	Sopé	Baixada
LV	n.d.	n.d.	n.d.	-95
LA	—	-68	-72	-71
SG	-35	-44	-39	-44
RD	-15	-23	-19	-27

C. Níquel

Densidade aparente	Topo**	Encosta	Sopé	Baixada
LV	n.d.	n.d.	n.d.	-24
0,6-1,0	—	+133	+70	+314
1,1-1,5	-22	+11	+155	+436
1,6-2,0	-22	+6	-9	+373
2,1-2,7	+9	+8	+2	+45

* Excluindo o silcrete

** Excluindo os veios de garnierita

— Não foi amostrado

n.d. Não determinado

horizontes inferiores do perfil. Apesar disso, a espessa LV das baixadas mostra um excedente de Fe, Cr e Al em termos absolutos (Tab. 3).

O balanço do Ni é fracamente negativo apenas no topo, quando o cálculo é feito excluindo os veios de garnierita, e fortemente positivo nos demais níveis, principalmente na baixada. O leve déficit de Ni encontrado na LV do topo não basta para compensar o excedente, que se verifica por toda a paisagem, em relação a uma acumulação puramente residual.

Assim, a paisagem ultramáfica de Santa Fé apresenta uma distribuição paradoxal dos elementos: solúveis concentrados a montante (Si) e residuais (Fe, Cr, Al) a jusante. Isso é contrário à lógica da distribuição dos elementos na paisagem (Polynov, 1956), comparada por Tardy (1969) a um processo cromatográfico. Outro problema a ser esclarecido é a ausência de fontes para as acumulações absolutas. Todas essas anomalias podem ser compreendidas levando em consideração a dimensão temporal do processo de alteração.

A evolução laterítica do *boxwork* silicoso e a alteração prevalecente nas baixadas estão em equilíbrio com

as condições climáticas atuais, que não favorece neoformações sílico-magnesianas nem silicificação. A estrita associação dos horizontes silicificados com os testemunhos da antiga superfície sul-americana leva à hipótese de que este fenômeno foi contemporâneo daquela superfície. Antigas silicificações são também descritas em outro maciços ultramáficos brasileiros (Santos, 1974; Trescases e Olivieira, 1978; e Melfi, 1979). A LV acumulada nas baixadas não pode resultar apenas da evolução última da LA subjacente mas deve ser, em parte, produto da erosão dos antigos perfis de topo (superfície sul-americana) depositados nas áreas mais baixas.

CONCLUSÕES

A. Interpretação geoquímica espaço-temporal e gênese da jazida A intrusão ultramáfica-alcalina de Santa Fé, relacionada à reativação wealdeniana (K sup.), depois de parcialmente serpentinizada, foi exumada por ocasião da peneplanização generalizada ocorrida no continente (fase de agradação do ciclo erosional sul-americano, no Terciário Inferior).

A sequência de mecanismos supérgenos que ocorrem desde então é resumida a seguir.

Durante um período de certa estabilidade, no Terciário Inferior e Médio, quando o relevo já estava bem aplainado, e em condições de clima seco a semi-árido, o intemperismo conduziu à formação de uma cobertura de alteração não-laterítica, com intensa silicificação na base dos perfis sobre dunito, na forma de um *boxwork* silicoso envolvendo núcleos de rocha pouco alterada.

Posteriormente, sob clima mais úmido, ocorreu laterização generalizada, com concentração residual do Ni, Fe, Cr, Al etc., evacuação intensa do Si e Mg da rocha ultramáfica alterada e conservação da malha silicosa do *boxwork*.

Um novo levantamento do continente por arqueamento, no Terciário Superior, trouxe como consequência a retomada da erosão (ciclo Velhas). A superfície sul-americana foi sendo dismantelada e entalhada mais profundamente onde a silicificação era menos intensa ou inexistente, resultando na emergência de relevos sustentados pela camada de sílica (silcrete). No Quaternário Inferior, a fase de agradação do ciclo Velhas elaborou uma nova superfície de aplainamento (baixada atual). Nessa fase, nos testemunhos de superfície sul-americana (morros), uma parte do Ni concentrado residualmente nos antigos perfis de alteração migrou em solução, verticalmente para baixo, dando os veios de garnierita nas fraturas e no *boxwork* silicoso; uma parte migrou também em solução, lateralmente, em direção aos novos perfis lateríticos que começaram a se desenvolver na baixada.

Mas pouco a pouco, até hoje, toda a cobertura laterítica (Fe, Cr, Al, Ni) desses testemunhos foi erodida e deslocada mecanicamente para a baixada, só ficando nos morros a rocha pouco alterada, eventualmente com alguns veios de garnierita, um pouco de LV e, de vez em quando, o antigo silcrete mais ou menos esvaziado. Na baixada, pelo contrário, a alteração laterítica recente aprofunda cada vez mais os perfis. Nestes, a alteração começa pela dissolução da olivina que abandona

um resíduo amorfo sílico-ferruginoso-niquelífero; a serpentina resiste à hidrólise e fixa em suas clivagens e defeitos uma parte do Fe e do Ni, insolúveis sob forma de hidróxido, devido às condições alcalinas de pH (RD e SG *pro parte*). Depois (SG *pro parte* e principalmente LA), a serpentina também é dissolvida, os géis Si-Fe-Ni são parcialmente dessicificados, a cromita é progressivamente corroída e todos os hidróxidos residuais começam a cristalizar em goethita aluminosa, cromífera e niquelífera. No fim (LV), a estrutura da rocha é destruída, uma parte do Ni é levemente lixiviada para baixo em direção à LA e a goethita é parcialmente desidratada em hematita. A toda essa evolução *in situ* das baixadas vêm-se juntar o aporte lateral do Ni dissolvido dos relevos (do início do desmantelamento da superfície sul-americana até hoje) e o aporte lateral mecânico de material laterítico (Fe, Al, Cr, Ni...) erodido dos antigos perfis sul-americanos. O esquema geoquímico global (espacial e temporal) da jazida de Santa Fé consta da Fig. 7. O comportamento levemente solúvel do Ni deve ter como consequência uma certa evacuação desse elemento dos perfis atuais das baixadas em direção à orla piroxenítica do maciço e às encaixantes.

B. A jazida de Santa Fé comparada com outras jazidas lateríticas de níquel do mundo A comparação da jazida de Santa Fé com as outras jazidas de Ni do Brasil (Pecora e Barbosa, 1944; Andrade e Botelho, 1974; e Melfi *et al.*, 1979) mostra que sua gênese e características são comparáveis às das demais. Apenas pode ser diferenciada a evolução recente (pós-Velhas) no domínio semi-árido do nordeste (jazida de São João do Piauí, onde esta evolução não é mais a laterização mas a esmectitização), e pode ser notado, no caso de Santa Fé, um grau mais adiantado de desmantelamento da superfície sul-americana e, talvez, de laterização na superfície Velhas.

As características principais das jazidas de Ni laterítico do Brasil podem ser assim resumidas:

- Correlação com dois ciclos de aplainamento: Terciário Inferior a Médio e Terciário Superior-Quaternário.
- Silicificação (antiga) nos relevos.
- Laterização nas baixadas mas ainda limitada (quando não ausente como no nordeste).
- Tamanhos e teores médios, ora por causa de um clima não mais suficientemente agressivo (nordeste).

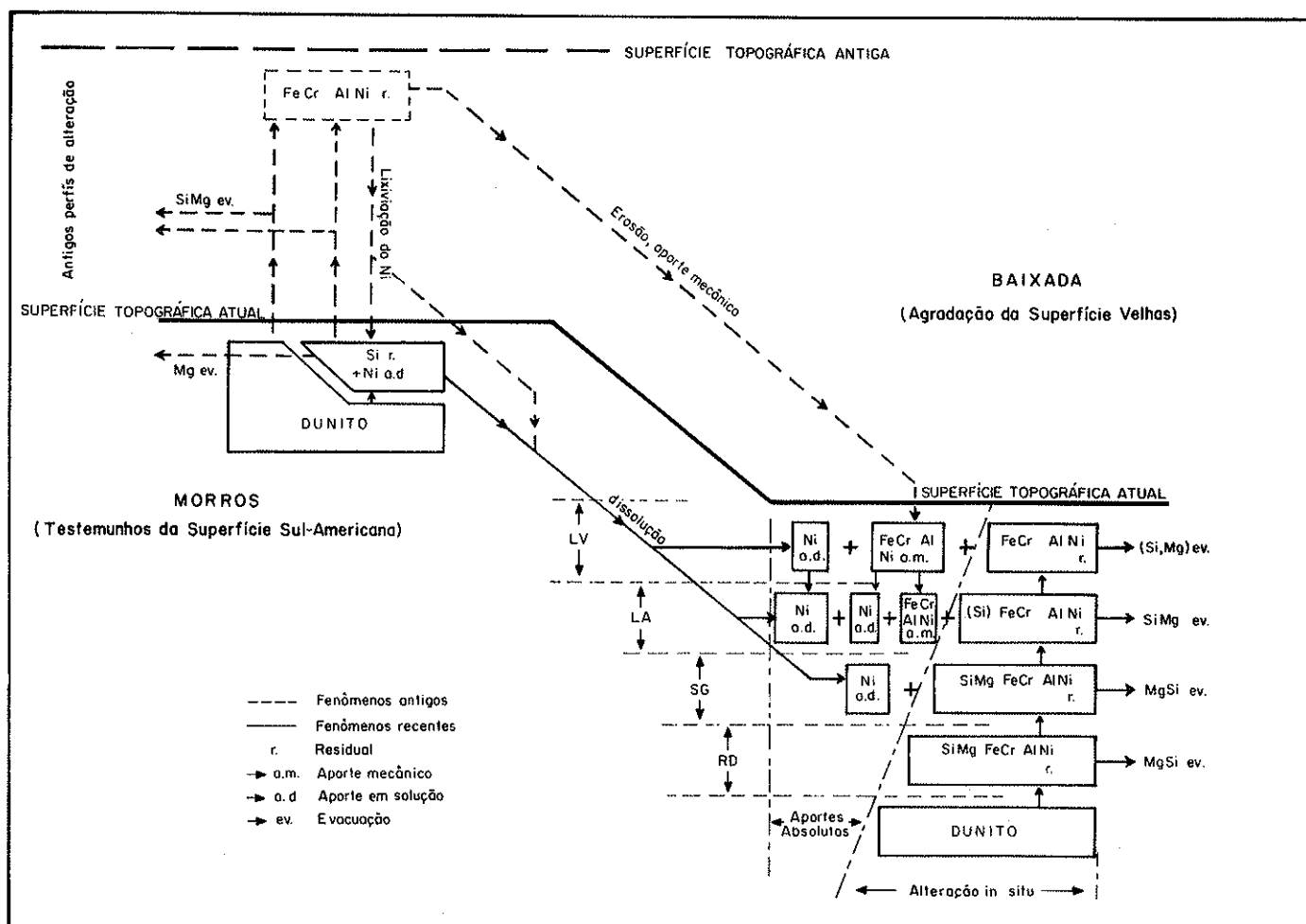


Figura 7 — Esquema geoquímico da jazida de Santa Fé

ora por causa da pouca duração do processo recente de laterização (Goiás).

- Acumulação preferencial do Ni nas baixadas.
- Acumulação preferencial do Ni na parte média dos perfis de alteração.
- Predominância dos minérios de tipo silicatado sobre os tipos oxidados.

As principais jazidas do mundo (De Vletter, 1955; Bonifas, 1959; Jukovic, 1963; Santos-Ynigo, 1964; Hotz, 1964; Trescases, 1975; e Lelong *et al.*, 1976) mostram também correlação com ciclos de aplainamentos terciários ou terciário-quaternários. Mas, à exceção das jazidas ou ocorrências descritas na Austrália (Zeissink, 1969) ou na África do Sul (De Waal, 1971), as outras

não mostram silicificações tão desenvolvidas como aqui; nelas, a localização do Ni é diferente ao nível da paisagem (as zonas altas são melhores), ao nível dos perfis de alteração (a base é, em geral, mais enriquecida) e ao nível do minério (o tipo oxidado predomina na maioria das lateritas niquelíferas). É interessante notar a estrita localização no hemisfério sul do que poderia ser chamado de "Tipo Brasileiro" de laterita niquelífera.

Nota Este artigo é, em parte, o resumo de alguns capítulos a tese de doutoramento apresentada ao Instituto de Geociências da USP por Sônia Maria Barros de Oliveira em março de 1980.

BIBLIOGRAFIA

- ANDRADE, M. R. e BOTELHO, L. C. — 1974 — Perfil analítico do Níquel. Bol. DNPM-33, Rio de Janeiro, 90 pp.
- BARBOUR, A. P. — 1976 — Geologia do maciço ultramáfico de Santa Fé (GO), Tese de Livre-Docência IG-USP, 138 pp.
- BARBOUR, A. P.; GIRARDI, V. A. V.; KAWASHITA, K.; e SOUZA, A. M. S. de — 1979 — Geocronologia do complexo máfico-ultramáfico alcalino de Santa Fé, Goiás. Bol. IG-USP 10: 11-18.
- BONIFAS, M. — 1959 — Contribution à l'étude géochimique de l'altération la ténitrique. Mem. Cart. Geol. Als. Lorr., Strasbourg 17, 159 pp.
- BRAUN, O. P. G. — 1970 — Contribuição à Geomorfologia do Brasil Central. Rev. Bras. Geogr. ano XXXII 3: 3-40.
- BRINDLEY, G. W. e HANG, P. T. — 1973 — The nature of garnierites — I. Structures, chemical composition and color characteristics. Clay and Clay Min. 21: 27-40.
- BRINDLEY, G. W. e MAKSIMOVIC, Z. — 1974 — The nature and nomenclature of hydrous Ni-containing silicates. Clay minerals 10: 271-277.
- DE VLETTER, D. R. — 1955 — How Cuban ore was formed: a lesson in lateritic genesis. Eng. and Min. Journal 156 (10): 84-87.
- DE WAAL, S. A. — 1971 — South African nickeliferous serpentinites. Miner. Sc. Engineering, Pretoria 3 (2): 32-45.
- HOTZ, P. E. — 1964 — Nickeliferous laterites in Southwestern Oregon and Northwestern California. Ec. Geology 59 (3): 335-396.
- JURKOVIC, I. — 1963 — Some geochemical aspects about the genesis of the nickel deposit Loma de Hierro (Venezuela). Geoloski Vjesnik 17: 103-112.
- KING, L. C. — 1956 — A geomorfologia do Brasil Oriental. — Rev. Br. Geogr. 2: 147-265.
- KUHNEL, R. A.; ROORDA, H. J.; e STEENSMA, J. J. S. — 1978 — Distribution and partitioning of elements in nickeliferous laterites. Bull. BRGM, sec. II, 3: 191-206.
- LELONG, F.; TARDY, Y.; GRANDIN, G.; TRESCASES, J. J.; e BOULANGE, B. — 1976 — Pedogenesis, chemical weathering and processes of formation of some supergene ore deposits. In Handbook of strata-bound and stratiform deposits, R. H. Wolf (ed.), Elsevier, Amsterdã, 3: 93-173.
- LESSA S^a, M.; ANDRADE, R. S. de e BERBERT, C. O. — 1971 — Projeto Jussara — Geologia das quadriculas de Britânica, Santa Fé, Araguapaz e Jussara, Estado de Goiás. DNPM (Executado pela CPRM), Goiânia (inédito).
- MELFI, A. J.; TRESCASES, J. J.; e OLIVEIRA, S. M. B. de — 1979 — Les laterites nickélifères du Brésil. Apresentado no Int. Sem. on Lat. Processes. Trivandrum, Índia. Cah. ORSTOM sér. Geol. (no prelo).
- MILLOT, G. e BONIFAS, M. — 1955 — Transformation isovolumétrique dans les phénomènes de latérisation et de bauxitisation. Bull. Serv. Cart. Geol. Als. Lorr. 8 (1): 3-20.
- OLIVEIRA, S. M. B. de e MELFI, A. J. — 1979 — Considerações sobre a origem das esmectitas nos níveis de alteração dos piroxênitos de Santa Fé (GO). Bol. IG-USP 10: 91-96.
- OLIVEIRA, S. M. B. de — 1980 — Alteração intempérica das rochas ultrabásicas de Santa Fé (GO) e gênese do depósito niquelífero. Tese de Doutorado apresentada ao IG-USP, 216 pp.
- PECORA, W. T. e BARBOSA, A. L. M. — 1944 — Jazida de níquel e cobalto de São José do Tocantins, Estado de Goiás. Bol. DNPM-DFPM 64, 69 pp.
- POLYNOV, B. B. — 1956 — Geochemical landscapes (em russo). Selected papers, Akad. Nank SSSR.
- SANTOS, J. F. dos — 1974 — Fatores de controle na concentração do níquel laterítico condicionado pela evolução geológica e geomorfológica do complexo básico-ultrabásico de São João do Piauí (PI). An. XXVIII Congr. Br. Geol. 6: 25-32.
- SANTOS, Y. L. — 1964 — Distribution of iron, alumina and silica in Puja, da Laterite of Mati, Davao Province, Mindanao — Island (Philippines) XXII Int. Geol. Congress New Delhi, sect. 14: 126-141.
- SCHHELLMANN, W. — 1978 — Behavior of nicked, cobalt and chromium in ferruginous lateritic nickel ores. Bull. BRGM, sect. II, 3: 275-282.
- SEGALEN, P. — 1968 — Note sur une méthode de détermination de produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Péd., 6 (1): 105-125.
- SOUZA, A. M. S. de — 1978 — Mineralogia e petrologia do complexo ultramáfico e alcalino de Santa Fé, Goiás. Tese de Mestrado, Univ. Fed. do Pará, 122 pp.
- TARDY, Y. — 1969 — Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Mem. Serv. Cart. Geol. Als e Lorr 31, 199 pp.
- TRESCASES, J. J. — 1975 — L'évolution géochimique supergène des roches ultrabásiques en zone tropicale. Formation de gisements nickélifères de Nouvelle-calédonie. Mem. ORSTOM 78, 259 pp., Paris.
- TRESCASES, J. J. e OLIVEIRA, S. M. B. de — 1978 — Alteração dos serpentinitos de Morro do Níquel (MG). An. XXX Congr. Br. Geol. 4: 1655-1669.
- TRESCASES, J. J. — 1979 — Remplacement progressif des silicates par les hydroxydes de fer et de nickel dans les profils d'altération tropicale des roches ultrabásiques. Accumulation résiduelle et Epigénie. Sciences Géologiques, Strasbourg (no prelo).
- ZEISSINK, H. E. — 1969 — The mineralogy and geochemistry of a nickeliferous laterite profile (Greenville, Queensland, Australia). Miner. Deposita 4 (2): 132-152.

Recebido em 4 de agosto de 1980.