UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GÊNESE DO MINÉRIO DE NIQUEL DE SÃO JOÃO
DO PIAUÍ POR ALTERAÇÃO INTEMPÉRICA.**

Rodolfo Dino

Orientador: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Área de Concentração: Geologia Geral e de Aplicação

São Paulo
1984

NÃO CIRCULA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900004846

GÊNESE DO MINÉRIO DE NIQUEL DE SÃO JOÃO
DO PIAUÍ POR ALTERAÇÃO INTEMPÉRICA.

Rodolfo Dino

Orientador: Profa. Dra. Sonia Maria Barros de Oliveira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO EXAMINADORA

	nome
Presidente:	Dr. ^a S.M.B.Oliveira
Examinadores:	Dr. J.J.Trescases
	Dr. A.J.Melfi

ass.

São Paulo
1984

Esta Dissertação de Mestrado é dedicada ao Dr. Jean-Jacques TRESCASES, como reconhecimento à importância de sua participação na minha formação profissional e científica.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiv
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO I - O MEIO FÍSICO	4
1- Posição Geográfica	5
2- Clima	5
a) Temperatura	7
b) Pluviometria	8
c) Oscilações Paleoclimáticas	11
3- Vegetação	12
4- O Quadro Geológico	14
a) Geologia Regional	14
b) Geologia Local	17
5- Solos	22
6- Geomorfologia	24
a) Aspectos Morfológicos Gerais	24
b) Grandes Superfícies Regionais	25
c) Compartimentos Locais	26
d) Interpretação	27
CAPÍTULO II - METODOLOGIA	29
1- Procedimentos de Campo	29
a) Descrição de Poços	30
b) Coleta de Amostras	32
2- Procedimentos de Laboratório	36
a) Britagem e Moagem	36
b) Separações Granulométricas	36
c) Determinação de Umidade e Densidade Aparente	37
d) Análise Mineralógica por Difração de Raios-X	38
e) Lâminas Delgadas	40
f) Identificação Mineralógica por Análise Térmica Diferencial	40
g) Análises Químicas	41

CAPÍTULO III - OS PERFIS DE ALTERAÇÃO	43
1- Considerações Gerais	43
a) Rocha Fresca	43
b) Rocha Alterada	44
c) Saprolito Grosseiro	45
d) Saprolito Argiloso	45
e) Horizonte Superficial	45
2- A Alteração no Platô	46
a) Horizontes de Alteração (Saprolitos)	46
b) Horizonte Superficial	47
c) Características Físicas	48
3- A Alteração nas Vertentes	51
a) Introdução	51
b) Perfis Estudados	51
- Topo das Encostas	51
- Porção Média das Encostas	52
- Base das Encostas	52
- Planície	52
b.1) A Alteração no Topo da Encosta	53
b.2) A Alteração na Posição Média das Encostas	55
b.3) A Alteração na Base das Encostas	58
b.4) A Alteração na Planície	60
c) Características Físicas	63
CAPÍTULO IV - EVOLUÇÃO MINERALÓGICA	65
1- Introdução	65
2- Mineralogia das Fácies de Alteração	65
a) Rocha Fresca	65
b) Rocha Alterada	68
c) Saprolito Grosseiro	69
d) Saprolito Argiloso	71
e) Horizonte Superficial	72
3- Um Exemplo de Perfis Extremamente Silicificados	74
4- As Filiações Mineralógicas	77
5- Conclusões	81

CAPÍTULO V - EVOLUÇÃO GEOQUÍMICA	83
1- Introdução	83
2- Dados Ponderais	83
a) O Comportamento do Níquel	87
b) Nível Silicificado	89
3- Análise das Frações Granulométricas	90
a) Composição Química das Essectitas	96
4- Dados Volumétricos	96
a) Balanço Isovolumétrico do Perfil de Alteração ...	99
b) Perdas e Ganhos por Setor na Topossequência	104
5- Conclusões	108
 CAPÍTULO VI - CONSIDERAÇÕES GERAIS E COMPARAÇÃO COM OU- TRAS JAZIDAS	 112
1- A Evolução da Jazida de São João do Piauí	112
a) Considerações Gerais	112
b) Paisagem	113
c) Perfil de Alteração	113
d) Evolução Mineralógica e Química	114
e) Reconstituição Geral da Evolução	115
2- Fatores de Controle das Jazidas de Níquel	117
3- Comparação com Outras Jazidas de Níquel do Brasil ..	120
3.1 - A Jazida de São João do Piauí	120
3.2 - Comparação Quanto ao Tipo de Minério	121
3.3 - Comparação Quanto à História Evolutiva	123
3.4 - Comparação Quanto ao Grau de Erosão	124
 BIBLIOGRAFIA	 126
APÊNDICE I - Análises Químicas (Amostras Totais)	139
DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA	143

ÍNDICE DAS TABELAS

Tabela 1 - Comparação Química entre os Serpentinitos do Piauí e de Piên (Amostras Frescas)	23
Tabela 2 - Classificação das Amostras por Fácies e sua Posição nas Topossequências	35
Tabela 3 - Variação do Pico a 14 ^o Å após tratamentos	40
Tabela 4 - Padrões Sintéticos	42
Tabela 5 - Dados Físicos do Perfil de Platô	49
Tabela 6 - Dados Físicos do Perfil de Topo da Encosta	55
Tabela 7 - Dados Físicos do Perfil de Meio da Encosta	57
Tabela 8 - Dados Físicos do Perfil de Base da Encosta	59
Tabela 9 - Dados Físicos do Perfil de Planície	62
Tabela 10 - Avaliação Semi-Quantitativa da Composição Mineralógica das Fácies de Alteração	73
Tabela 11 - Composição Química Média (% em Peso) das Fácies de Alteração	85
Tabela 12 - Teores de Níquel das Diferentes Fácies nas Diversas Posições na Topossequência	88
Tabela 13 - Composição Química de uma Amostra de Silexito	90

Tabela 14 - Composição Química das Frações Granulométricas	91
Tabela 15 - Composição Química Representativa das Espectitas	96
Tabela 16 - Composição Química das Fácies de Alteração (Dados Volumétricos)	100
Tabela 17 - Balanço Geoquímico da SiO_2 , MgO e NiO por Setor da Topossequência (% de Ganhos (+) e Perdas (-) em Relação à Rocha Fresca)	105

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura 1 - Mapa de Localização e Acesso à Área	6
Figura 2 - Mapa Pluviométrico do Nordeste	9
Figura 3 - Dados Pluviométricos	10
Figura 4 - Mapa Geológico Regional	18
Figura 5 - Mapa Geológico Local	20
Figura 6 - Mapa Topográfico e de Amostragem	34
Figura 7 - Topossequência I	146
Figura 8 - Topossequência II	146
Figura 9 - Topossequência III	146
Figura 10 - Topossequência IV	146
Figura 11 - Diagrama de A.T.D. dos Serpentiníolos de São João do Piauí	67
Figura 12 - Quadro de Filiações Mineralógicas	82
Figura 13 - Balanço a Isovolum de SiO_2	97
Figura 14 - Balanço a Isovolum de MgO	98
Figura 15 - Balanço a Isovolum de Fe_2O_3	101
Figura 16 - Balanço a Isovolum de NiO	103
Figura 17 - Composição do Minério de Níquel de São João do Piauí	122

A G R A D E C I M E N T O S

Ao concluir a presente dissertação de mestrado, desejo expressar meu agradecimento a todas as pessoas e entidades que, direta ou indiretamente, tornaram possível a realização da mesma.

À Dra. Sônia Maria Barros de OLiveira, pelo convite que originou minha pesquisa na geoquímica, pela orientação, por seu apoio irrestrito, sempre orientando, discutindo resultados, analisando e criticando o texto, além da dedicação e interesse que sempre dispensou e que foram decisivos na fase final deste trabalho.

Ao Dr. Jean Jacques Trescases, pela orientação; por sua diligência em todas as etapas, seja no campo ou no laboratório, aconselhando e ensinando técnicas e pelo seu exemplo como pesquisador.

Ao Dr. Adolpho José Melfi e Dr. Adilson Carvalho do departamento de Geologia Geral do IGUSP pelo apoio, discussões e sugestões sempre muito importantes e valiosas.

À missão ORSTOM no IGUSP, em especial ao Dr. Armand Chauvel, Dr. Boris Volkoff, Dr. Jean-Claude Parisot e ao químico Sylvain Raymond Locati; pela presença constante e solícita nos trabalhos de laboratório e na obtenção de bibliografia.

À empresa Rio Doce Geologia e Mineração S.A., em nome de seus dirigentes e funcionários, pela permissão em pesquisar uma jazida de sua propriedade, colocando a disposição material técnico e humano, meios de transportes, mapas e relatórios internos.

À Cristina, Murilo, Canuto e Tereza, amigos que sempre me incentivaram e apoiaram e que com sua amizade alegraram e tornaram gratificante o período de realização deste trabalho.

À Anália, André, Mário, Cleide, Neide e Cláudio, pelo auxílio nos laboratórios de Geoquímica, Difração de Raios-X e Laminação.

À equipe da Biblioteca do IGUSP, Dna. Ruth, Dulce, Beth, Stela e Terezinha; à equipe da secretaria de Pós-Graduação, Dna. Nair e Madalena, pela simpatia e atenção com que sempre me atenderam.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), cujo apoio financeiro permitiu a realização deste trabalho.

Aos que contribuíram, com dedicação, à realização da forma final deste trabalho: à Elenice Santa pela primorosa datigrafia; Ao Leopoldo Calligaris Neto pela cuidadosa reprodução dos desenhos; ao Prof. Thomaz Pugliesi Di Natale pela revisão do texto e a equipe de impressão gráfica do IGUSP em nome do Sr. Jaime Alves da Silva.

R E S U M O

Neste trabalho é estudada a alteração supérgena das rochas no maciço básico-ultrabásico de São João do Piauí, situado no sudeste do Piauí, Brasil. Trata-se de um maciço do tipo Alpino, com idade presumida entre 1000 - 1800 m.a., constituído de serpentinitos circundados por gabros, gabro-olivínicos e dioritos.

O ambiente em que a alteração se processa caracteriza-se pelo clima semi-árido, com estações térmicas caracterizadas por altas temperaturas durante todo o ano e precipitação média anual de 600mm, concentrada em apenas três meses do ano. O relevo é dominado por uma superfície levemente ondulada correspondente ao embasamento cristalino; ressaltam dessa superfície elevações de rochas sedimentares, na forma de cuevas e chapadas e o maciço de São João do Piauí, com encostas ora íngremes, ora suaves. O solo é raso, muito pouco desenvolvido e pobre; a vegetação é a caatinga.

A alteração forma perfis delgados nas bordas do platô e perfis bastante espessos nas áreas de meia encosta, sopés e planície. O topo do maciço é tabular, sustentado por espesso nível de silcrete, sob o qual desenvolvem-se perfis com até 20 metros de espessura. Esse silcrete é um testemunho de antigos perfis existentes e hoje erodidos.

Nos estágios iniciais, são alterados os minerais mais instáveis (brucita, carbonatos e serpentina II). Nas fácies saprolito, ocorre a alteração total dos três tipos de serpentina

existentes, embora a serpentina II se altere primeiro, seguida da alteração da serpentina I e, finalmente, da alteração da serpentina III. Essa alteração se dá com formação de esmectitas férricas (nontronitas); ainda na fácies saprolito as esmectitas mostram incipiente alteração em goethita.

A cromita e a magnetita são pouco alteradas, motivo pelo qual esses minerais são encontrados em grande quantidade no horizonte superficial.

A fácies horizonte superficial é rica em óxidos e hidróxidos de Fe, Mn, Al e Co, estruturados sob a forma de oólitos e por vezes soldados em crostas; contém ainda quantidades diminutas de esmectitas.

A evolução geoquímica caracteriza-se pela perda acentuada do magnésio e concomitante retenção da sílica e do ferro. A evolução da alteração, além de ocorrer com retenção de sílica, favorece movimentos descendentes da mesma, proveniente do silcrete, provocando intensa silicificação nos perfis de platô, topo e meio das encostas. Essa silicificação, porém, não atinge as baixadas, nem as frentes de alteração dos perfis. Os elementos menores, de uma maneira geral, se comportam como elementos residuais.

O níquel, em particular, praticamente não se concentra no platô e no topo das encostas; os perfis de meio, base das encostas e planície é que são enriquecidos. O enriquecimento em níquel é provocado pela contribuição da alteração dos perfis atuais e pela contribuição do níquel estocado dos antigos perfis.

Em função do balanço geoquímico, calculado através das perdas e ganhos dos teores nas diferentes fácies do perfil de

alteração, os elementos químicos mostram a seguinte escala de mobilidade: $Mg > Ni > Si > Mn, Co > Fe, Al, Cu, Cr$.

O tipo de alteração, interpretado a partir da composição dos principais minerais neoformados pode ser denominado de esmectitização (bissialitização), com uma incipiente evolução a laterização.

A jazida está localizada nas encostas, sopês e planície; os horizontes rocha alterada, saprolito grosseiro e saprolito argiloso constituem minério, que é do tipo silicatado. A jazida possui 20×10^6 t de minério (reserva medida), com teor médio de 1,57% Ni; é uma jazida relativamente pequena no cenário brasileiro.

A B S T R A C T

This work is a study on the weathering of the São João do Piauí Precambrian basic-ultrabasic massif, which occurs in southeast Piauí, Brazil. This massif is of the "Alpine" type and comprises serpentinites surrounded by gabbros, olivinic-gabbros and diorites.

The environment in which weathering occurs is characterized by a semi-aride climate, having high temperatures all the year round and a mean annual rainfall of 600mm concentrated in only three months. The topography is dominated by a gently undulating surface developed upon the crystalline basement; projecting upwards from this surface are sedimentary rocks in form of cuestas and plateaus and the São João do Piauí massif with gentle slopes and some abrupt scarps. The soil is thin and poor; the vegetation is of the caatinga type.

Weathering forms thin profiles at the margins of the plateau and very thick profiles on the middle hillsides, foothills and lower plains. The top of the massif is tabular and sustained by a thick "silcrete" level; beneath the silcrete, thick profiles are developed. This silcrete is an erosional vestige of ancient profiles.

In the first stages, the minerals of lowest stability are weathered (brucite, carbonates and microcrystalline serpentine). In the saprolite facies, the total weathering of the three types of serpentine minerals occurs, microcrystalline serpentine first, followed by fibrous serpentine and finally by vein serpen

tine. The weathering products of these mafic silicates are nontronite, which itself shows incipient weathering to goethite.

The superficial horizon facies is rich in crystalline oxides and hydroxides of Fe, Mn, Al e Co (mainly goethite), structured as oöids and contains small quantities of smectites.

The geochemical evolution is characterized by a pronounced loss of magnesium oxide and by retention of silica and iron. The weathering process also favors downward movement of silica derived from the silcrete and promotes marked silicification in the profiles of the plateau, upperhillsides and middle hillsides. This silicification does not reach the profiles of the foothills and plains nor the weathering front. The minor elements in general, behave like the residual ones.

The plateau and upper hillside profiles are unproductive. However, Ni-ore is found in the profiles of the middle hillsides, foothills and plains. Ni-enrichment is results from a contributions from present weathering and from the Ni stock in the ancient profiles.

As a function of the geochemical balance, calculated throught the proportions of the amount lost in the different facies, the elements show the following mobility scale: Mg > Ni > Si > Mn, Co > Fe, Al, Cu, Cr.

The type of weathering as indicated by the principal neoformed minerals, may be called smectitization (bissialitization), with incipient evolution towards lateritization.

The horizons of, altered rock, coarse saprolite and fine saprolite constitue a Ni-silicate ore with estimated reserves of 20 . 20⁶t and a Ni content of 1.57%.

I N T R O D U Ç Ã O

A dissertação de mestrado ora apresentada é o resultado das pesquisas realizadas no maciço básico-ultrabásico, situado na fazenda Brejo Seco, município de São João do Piauí, sudeste do Estado do Piauí. Trata-se do mais expressivo maciço básico-ultrabásico brasileiro, com alteração supérgena sob clima semi-árido.

O interesse no desenvolvimento de pesquisas no campo da alteração supérgena de rochas ultrabásicas motivou no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo o Projeto Níquel-Ultrabásicas.

Este amplo programa, cuja maioria dos resultados já foram publicados (Trescases e Oliveira, 1978; Melfi et al., 1979; Oliveira, 1980; Schevciw, 1980; Oliveira e Trescases, 1980; Trescases e Schevciw, 1980; Trescases e Oliveira, 1981; Menegotto, 1982, Oliveira e Trescases, 1982 e Bernardelli et al., 1983), visa a uma caracterização da alteração dos maciços ultrabásicos brasileiros em várias condições morfo-climáticas atuais, tendo como objetivo final a história da gênese das jazidas de níquel lateríticas, associadas a esses maciços.

As rochas ultrabásicas podem ser encontradas em quase todos os Estados brasileiros (Berbert, 1977), portanto numa ampla faixa de climas atuais. No domínio semi-árido, numerosos pequenos corpos ultrabásicos são conhecidos, espalhados em alguns Estados brasileiros. Na Bahia, podemos citar as ocorrências em Serra das Marrecas (Bruni et al, 1976), Campo Formoso (Hedlung,

Couto Moreira et al., 1974), Euclides da Cunha (Inda et al., 1976) e em várias outras localidades, como Serrinha, Lucínio de Almeida, Brumado e Contendes-Mirante (Mascarenhas, 1976); em Alagoas, temos Campestre (Farina, 1976); na Paraíba, em Catingueira (Farina, 1969), Soledade e Campina Grande (Moraes, 1935); no Cearã, na área de Baixio e Umari, em Ipaumirim (Abreu, 1973); algumas no Rio Grande do Norte e Pernambuco, citados por Moacir Lisboa e Guimarães de Araújo Oliveira e, no Piauí, em São João do Piauí (Santos, 1974).

Foi este último o escolhido para estudo, por apresentar-se num grau de erosão bastante menor do que os outros e por comportar uma jazida de níquel "laterítica", cujo alvará de pesquisa pertence à Cia. Vale do Rio Doce Mineração S.A. Na maioria das outras ocorrências ultrabásicas da zona semi-árida os efeitos da erosão mecânica ultrapassam os da alteração; os relictos de paleoalterações são escassos e a rocha aflora em geral pouco alterada (Melfi et al, 1979). O maciço de São João do Piauí, ao contrário, e devido a particularidades morfológicas que serão examinadas a seguir guarda, nos seus perfis de alteração, vários testemunhos das paleoalterações, o que ajuda em muito a reconstituição da história supérgena do maciço.

Após a caracterização da área, que é feita no capítulo I, no que diz respeito ao clima, geologia e geomorfologia, a metodologia utilizada é exposta no capítulo II. Os capítulos III e IV tratam da distribuição espacial das fácies de alteração e da evolução mineralógica através dos perfis em cada unidade morfológica. O balanço geoquímico, exportação e importação de material a cada passo da alteração, é assim avaliado no

capítulo V.

Uma interpretação geral da gênese da jazida de níquel é proposta no capítulo VI, além da avaliação da importância econômica dos horizontes mineralizados e comparação com outros depósitos congêneres existentes no Brasil.

C A P Í T U L O I

O MEIO FÍSICO

Fator fundamental no estudo da alteração supérgena é o conhecimento das características físicas do meio, que comandam a evolução desse processo.

A dinâmica supérgena resulta da atuação dos fatores climáticos sobre as rochas expostas na superfície e são estreitas as vinculações e interdependências existentes entre os componentes do meio físico e o desenvolvimento do perfil de alteração. Relevante é o papel do clima e o das rochas, pois o primeiro determina a intensidade da ação intempérica que atua sobre a segunda, que, por sua vez, controla os produtos finais da alteração. Aliados a ambos, o relevo e a drenagem são também importantes no processo, pois vão estabelecer as possíveis evoluções da alteração, condicionadas à topografia e ao volume das águas na rocha e à sua intensidade de movimento.

Outros fatores atuantes são a vegetação e o solo, pois controlam os efeitos da ação erosiva e contribuem com a liberação de ácidos húmicos, que vão atuar nos horizontes superficiais da alteração.

Devido a essa importância, o presente capítulo aborda em detalhe as características do meio físico, bem como as oscilações paleoclimáticas, a fim de bem determinar o papel destes fatores no fenômeno da alteração supérgena.

1. - POSIÇÃO GEOGRÁFICA

O maciço básico-ultrabásico estudado situa-se no local denominado Brejo Seco, distrito e município de São João do Piauí, Estado do Piauí. A uma latitude de $8^{\circ}28'S$ e longitude de $41^{\circ}, 57'W$, dista cerca de 30km em linha reta a sudeste de São João do Piauí (Fig. 1).

São João do Piauí dista 300km de Petrolina e Juazeiro, cidades irmãs, às margens do São Francisco; 500km da capital do Estado, Teresina; 720km de Fortaleza e 800km de Salvador.

O trânsito na região é garantido pelas rodovias BR407, parcialmente asfaltada, PI-5 e PI-6, sem pavimentação asfáltica, e pela estrada de ferro da V.F.F.C.B.. Brejo Seco dista 180km da rodovia asfaltada e 240km da estrada de ferro. O acesso, por via terrestre a partir de São João do Piauí, é feito por 50km de estrada carroçável, intransitável na época das chuvas, que liga esta cidade aos povoados ou vilas de Campo Alegre, Lagoa do Barro, Queimada Nova e à cidade de Afrânio.

Junto ao maciço estudado, a Docegeo construiu uma pista de pouso com 1.100m de extensão, assegurando assim o tráfego aéreo para aviões de pequeno porte.

2. - CLIMA

No sudeste do Piauí, o clima dominante é o semi-árido, correspondendo na classificação de Koeppen a um clima semi-árido quente (Bsh) com chuvas de verão (w).

O relevo da região, um tanto pronunciado, onde as chapadas arenosas atingem cotas da ordem dos 600m, é provavelmente o responsável pelas precipitações anuais entre 600mm e 700mm, va

— MAPA DE LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA —

FIG. 1

lores estes bem superiores em relação a outras áreas do semi-árido. Assim, a semi-aridez da região é caracterizada, não tanto pelo baixo volume das precipitações pluviométricas, mas principalmente pela grande irregularidade das mesmas, aliada às altas temperaturas durante todo o ano.

O clima semi-árido é caracterizado por duas estações distintas: a estação chuvosa, que ocorre no verão (denominada "inverno" pelo sertanejo), caracterizada por um período de chuvas irregulares de dezembro a abril, com temperaturas elevadas e forte evaporação; e a estação seca, apresentando de 6 a 9 meses de estiagem, que na região ocorre geralmente de maio a novembro.

Vale ressaltar ainda, na região, os rios e riachos que são exclusivamente intermitentes, em cujos cursos a água permanece apenas por pouco tempo, na época das chuvas e, mesmo assim, nem todos os anos.

a) Temperatura

O sudeste do Piauí, pela sua própria localização geográfica, fica submetido a intensa radiação solar e, por isso, a temperatura permanece elevada o ano todo, atingindo uma das mais altas médias térmicas anuais do Brasil (entre 24° e 26°C). Também as temperaturas médias mensais são elevadas, situando-se sempre acima de 22°C.

O mês mais quente é novembro, com temperatura média de 28°C. Os meses de temperatura mais amena são os de junho e julho, que representam o inverno na região, com médias entre 22° e 24°C. As temperaturas são elevadas na primavera, verão e outono, e o calor mais intenso ocorre em meados da primavera, nos meses de outubro e novembro, provocando regime de seca na região. Nesses

meses, a média fica entre 26° e 28°C; a média das máximas situa-se entre 34° e 36°C e a temperatura máxima absoluta atinge 45°C.

A amplitude térmica anual é desprezível, não chegando a 5°C, evidenciando a grande homogeneidade da temperatura na região.

b) Pluviometria

Contrastando enormemente com a temperatura, a pluviosidade no Nordeste é extremamente irregular e mal distribuída (Fig. 2).

O sudeste do Piauí apresenta índices pluviométricos muito baixos, 600mm anuais, aproximadamente. O que deve ser evidenciado é que o grande problema pluviométrico da região reside não tanto no fato de os seus totais anuais serem baixos, mas principalmente pelas grandes irregularidades que caracterizam essa pluviometria. As precipitações variam no que diz respeito à quantidade anual, à época em que ocorrem e ainda à própria superfície atingida pelas mesmas.

As chuvas podem ocorrer de novembro a abril, porém os índices máximos ocorrem no verão (janeiro, fevereiro e março). Nesses meses de máximas concentram-se cerca de 85 a 90% das precipitações anuais, sendo março o mês de pluviometria mais elevada, ocasião em que a drenagem, que geralmente é intermitente, torna-se torrencial. As mínimas dão-se no inverno (julho e agosto). Nesse período a seca é bem acentuada na região, pois as chuvas, além de serem raras, são pouco copiosas (Fig. 3).

São, portanto, sete meses (maio a dezembro) praticamente de seca, fazendo com que a deficiência hídrica do solo seja alta, na ordem de 400-600mm anuais.

MAPA PLUVIOMÉTRICO DO NORDESTE

FIG. 2

DADOS PLUVIOMÉTRICOS

COMPILADO DO INV. HIDROGEOLÓGICO
DO NORDESTE - FOLHA Nº 19 - 1971

REGIÃO DE PAULISTANA
MÉDIA EM mm/ANO
546,8

FIG. 3

Como a região possui baixa pluviometria e elevada capacidade de evaporação, o escoamento superficial não excede 10% da pluviometria média anual; também a quantidade infiltrada no solo é pequena, de modo que o maior volume da água precipitada anualmente se perde por evaporação e por transpiração (Leal, 1971).

De acordo com Nimer (1977), o clima atual da região é do tipo quente tropical de zona equatorial, com estação seca de inverno-primavera.

Se tomarmos em consideração a classificação de Gaussen, que é baseada no ritmo das temperaturas e precipitações no decorrer do ano, e que permite verificar a dependência das formas de vida ao fator clima, a região inclui-se na sub-classe climática Bixérico, caracterizada por clima semi-árido, com estação seca de grande duração e comportando uma morfogênese essencialmente mecânica. Ainda de acordo com Gaussen (1955) podemos dizer que a região pertence ao domínio das temperaturas elevadas, na classe dos climas térmicos e tendo como regime pedoclimático dominante o "Ustico Hipertérmico".

c) Oscilações Paleoclimáticas

O paleoclima da região nordeste vem sofrendo oscilações desde, pelo menos, o Terciário, segundo a opinião unânime dos estudiosos do problema.

Tricart (1959), em estudos de sedimentos nos terraços aluviais dos grandes rios nordestinos, observou evidências de alternâncias paleoclimáticas e considera que as mesmas teriam ocorrido entre climas semi-áridos e climas secos, com chuvas concentradas e violentas, sem que houvesse condições realmente áridas, no período que vai do Plioceno ao atual. Ainda, segundo o autor,

essas alternâncias estariam relacionadas a uma periódica melhor distribuição das chuvas e não tanto ao aumento das mesmas.

Ab'Saber (1969) concorda com Tricart, reconhecendo que as variações paleo-climáticas não foram tão sensíveis e extremas, capazes de provocar desertificações pronunciadas, alternadas com fases úmidas de longa duração, como sugerido por ele em 1956.

Moreira (1977), em estudos sobre o tema, conclui que os climas secos dominaram durante toda a evolução geomorfológica e biogeográfica nordestina, durante o período que vai do Neogeno ao Quaternário.

Em resumo, acredita-se que na região, embora tenha havido fases ora ligeiramente mais secas, ora mais úmidas do que a atual, as variações do paleoclima, no período do Terciário Médio ao Recente, permaneceram restritas ao campo dos climas semi-áridos. Em termos gerais, pode-se afirmar que no nordeste brasileiro houve condições de umidade no início do Terciário; essas condições evoluíram lentamente para a semi-aridez no final do Terciário e a semi-aridez constituiu o regime dominante durante todo o Quaternário até o presente.

3. - VEGETAÇÃO

O nordeste brasileiro apresenta uma grande variedade de vegetação, porém a que predomina e a que o caracteriza é a caatinga.

De acordo com Egler (1951), a caatinga pode ocorrer sob a forma semelhante a uma mata fechada, ou sob forma de moitas baixas e isoladas com uma vasta gama de gradientes entre es

ses dois tipos extremos.

Esse tipo de vegetação está organizada sobretudo para suportar longos períodos de seca, graças às reservas de substâncias nutritivas e hídricas em xilopódios e raízes (Kuhlmann, 1977).

De uma maneira geral, podemos caracterizar a caatinga como sendo composta fundamentalmente de árvores e arbustos espinhentos, que geralmente perdem as folhas no período de estiagem; de plantas espinhosas e suculentas e de plantas herbáceas, que após as chuvas se revigoram de modo surpreendente.

Na região estudada, a vegetação é a caatinga seca e agrupada, de Egler (1951), caracterizada como uma caatinga xerofítica, dada a abundância de cactáceas e bromeliáceas, consequência do clima bastante severo. Essa vegetação, no seu estrato mais alto, é constituída de formações arbóreas e arbustivas, de médio a grande porte, que se desenvolvem principalmente nos vales, encostas de chapadas ou locais com maior umidade ou de solo mais espesso.

A vegetação dominante é a de pequeno a médio porte, constituída também de formações arbóreas e arbustivas, de galhos retorcidos, que se apresentam em agrupamentos ora densos, ora muito abertos, deixando entre si vazios sem vegetação alguma. As formações de médio porte se distribuem rala e esparsamente e em geral sobre o relevo plano-ondulado, talhado nas rochas xistosas e gnaissicas. Já nas serras quartzíticas e chapadas onde dominam solos rochosos ou arenosos, desenvolvem-se as formações de pequeno porte, raquíticas, distribuídas de maneira mais densa.

Não se observam diferenças entre a vegetação que se desenvolve sobre as rochas ultrabásicas serpentinizadas e a de qual

quer outro substrato rochoso.

4. - O QUADRO GEOLÓGICO

a) Geologia Regional

A região se situa na borda SE da bacia do Parnaíba e está inserida na faixa de dobramentos Riacho do Pontal, conforme conceituado por Brito Neves (1975).

A individualização em unidades estratigráficas das rochas do embasamento cristalino da região é muito difícil, devido à intensa movimentação tectônica sofrida pela área, aliada ao grande número de denominações criadas por diversos autores.

No presente trabalho, optou-se pela divisão de Caldasso et al. (1973 "a" e "b"), proposta no Projeto Sudeste do Piauí I e II; e, sempre que possível, é feita a correlação com as denominações dos outros autores.

Caldasso et al. (op. cit.) individualizaram, nas rochas do embasamento cristalino da área, três sequências pré-cambrianas, denominadas de Pré-Cambriano A, B e C. Esta subdivisão foi baseada nos caracteres estruturais, na zoneografia e na posição estratigráfica relativa, sem no entanto precisar a cronologia.

A unidade lito-estratigráfica mais antiga é a Pré-Cambriano C, constituída de rochas intensamente tectonizadas e migmatizadas. Trata-se de migmatitos homogêneos e alguns núcleos de granito de anatexia intercalados, encontrando-se ainda restos de quartzitos recristalizados.

As rochas desta unidade são correlacionáveis às do Grupo Caraíba, de Barbosa (1965), de idade Pré-Cambriana Média a In

ferior.

As rochas da unidade Pré-Cambriana B são constituídas, na sua porção basal, principalmente por quartzitos, com intercalações de faixas de xistos a muscovita-biotita, com granada e estaurolita. Tanto os xistos como os quartzitos desta porção apresentam-se localmente migmatizados, constituindo uma unidade de migmatitos heterogêneos. A porção superior consiste basicamente de muscovita-biotita-estaurolita-xistos, granatíferos e encerra lentes de calcário cristalino.

Barbosa (op. cit.) considera os xistos e quartzitos desta unidade como pertencentes ao Grupo Salgueiro, enquanto que os migmatitos heterogêneos são correlacionáveis ao Grupo Cabrobó de Leal (1971). A idade da unidade Pré-Cambriana B é considerada, com dúvidas, Pré-Cambriano Médio a Superior.

A unidade Pré-Cambriana A constitui-se de quartzitos e quartzo-xistos estruturados, além de clorita-biotita-muscovita-xistos, granatíferos, clorita-sericita-seixos e filitos. Associados, tem-se calcário epimetamórfico e calcoxistos. O que distingue as rochas desta unidade das da unidade B é a fácies metamórfica que, na primeira atinge apenas a fácies xisto-verde e apresenta ocorrência comum de metabasitos. Esses metabasitos se constituem principalmente de anfibólio-xistos e ocorrem em maior concentração entre as cidades de Afrânio e Paulistana.

Barbosa (op. cit.) e Leal (op. cit.) incluem as rochas desta unidade no Grupo Salgueiro; a idade atribuída é a Pré-Cambriano Superior.

As estruturas gerais dessas unidades, na região, apresentam direção geral NNE-SSW.

De idade mais jovem, são encontradas, na região, rochas plutônicas ácidas e básico-ultrabásicas. Um considerável número de maciços graníticos intrusivos e em menor número e tamanho, maciços básico-ultrabásicos também intrusivos ocorrem nos metassedimentos, com direção geral NE-SW. Estes maciços, em certas áreas, encontram-se parcialmente cobertos por sedimentos eluvio-aluvionares arenosos, provenientes das rochas da Bacia do Parnaíba. Os maciços plutônicos ácidos são constituídos principalmente por granitos, sienitos e alcali-granitos a biotita-muscovita ou a hornblenda-biotita. Os corpos básicos constituem-se de anfibolito ou gabro e os ultrabásicos de serpentinito. Caldas et al. (op. cit.) atribuem a esses maciços idade Eo-Cambriano.

As unidades sedimentares presentes são as rochas paleozóicas constituintes da Bacia do Parnaíba, representadas na área pelas formações Serra Grande e Pimenteiras de idade Siluro-Devoniana.

A formação Serra Grande é constituída por arenitos com intercalações locais de siltitos e folhelhos arroxeados, principalmente no topo da formação. Os arenitos são brancos, grosseiros e conglomeráticos, contendo seixos quartzosos de até 20cm de diâmetro, que diminuem da base para o topo. Sua espessura é variável; próximo ao maciço ultrabásico apresenta exposições que atingem os 100m. Seu contato inferior apresenta nítida discordância angular com as rochas metamórficas do embasamento; o superior é concordante com a formação Pimenteiras. Kegel (1956) identificou um ambiente fluvial costeiro na sua deposição e datou-os do Siluriano Superior ao Devoniano Inferior.

A formação Pimenteiras, na região, comporta folhelhos

vermelhos e cinza-escuros, micáceos, com intercalações de arenitos e siltitos brancos a cinza claros. Próximo ao maciço, esta formação apresenta espessuras da ordem de 70 metros. Kegel (op. cit.) identificou um ambiente de mar raso para sua deposição e determinou a idade Devoniano Inferior para seus sedimentos.

Coberturas elúvio-aluviais arenosas e coberturas lateríticas são observadas na região e são consideradas de idade Cenozóica. Estas coberturas se desenvolvem tanto sobre o embasamento, como sobre os sedimentos da Bacia do Parnaíba. Segundo Caldaso et al. (op. cit.), o desenvolvimento das lateritas se dá principalmente nas partes mais altas, provavelmente correspondendo a uma superfície de erosão do Terciário, em que tenha imperado o clima propício.

Além dos depósitos arenosos e crostas limoníticas, observa-se também a presença de crostas de silicificação, principalmente sobre rochas ultrabásicas, destacando-se a do maciço de São João do Piauí.

A Fig. 4 mostra a posição do maciço em relação aos principais elementos geológicos do Nordeste. Observa-se que o maciço se encontra inserido nos sistemas de dobramentos, que, por sua vez, são limitados ao sul pelo Craton de São Francisco e a leste pela Sinéclise do Parnaíba. A unidade Pré-Cambriano C está inserida nos maciços Gnáissico-migmatítico-graníticos, enquanto que as unidades Pré-Cambrianas B e A inserem-se nos sistemas de dobramentos.

b) Geologia Local

Com um formato grosseiramente losangular e tendo a maior dimensão segundo a direção WNW-ESE, numa extensão superior

MAPA GEOLÓGICO REGIONAL

— LEGENDA —

- Coberturas não dobradas Fanerozóicas:
Província Costeira e Bacias Interiores (Pal.-Rec.)
- Coberturas Molássicas Cambro-Ordovicianas
- Coberturas Metassedimentares do Craton e dos Maciços (Pré-Є-Inf.-Sup.)
- Sistemas de Dobramentos (Pré-Є-Sup.)
- Maciços Gnáissico-Migmatítico-Graníticos (Pré-Є-Inf.)
- Falhas Principais
- Complexo Básico-Ultrabásico de São João do Piauí (localização)

AUTOR: Brito Neves-1983

FIG. 4

a 8km, com largura máxima de aproximadamente 4km e área aproximada de 20km², destaca-se, no município de São João do Piauí, o maciço básico-ultrabásico de São João do Piauí, mineralizado em níquel silicatado e amianto.

O maciço está intrudido nos micaxistos, quartzo-filitos e sericita-clorita-xistos da unidade Pré-Cambriana A, equivalente ao Grupo Salgueiro. A oeste, uma apófise serpentínosa do maciço, denominada Morro do Pote, é parcialmente coberta pelos sedimentos das formações Serra Grande e Pimenteiras, tendo seus contatos a norte mascarados por intensa cobertura arenosa eluvial. As rochas do maciço apresentam-se metamorfozadas e num alto grau de alteração meteórica, resultando em espessas capas "lateríticas" que recobrem quase todo o maciço.

No complexo básico-ultrabásico (Fig. 5), pode-se caracterizar, tanto litológica como topograficamente, duas zonas distintas: zona ultrabásica e zona básica. A zona ultrabásica, constituída por serpentinitos, está situada na parte norte do complexo e apresenta uma feição topográfica acentuada, com cotas até 470m, formando a Serra do Bacamarte.

Os contatos do serpentinito com as rochas básicas ao sul são anastomosados, localmente falhados, enquanto que a Leste e Nordeste uma estreita faixa de rochas básicas circunda a zona ultrabásica, apresentando contatos interdigitados em toda a sua extensão (Santos, 1974).

Como resultado da atuação da erosão, observa-se na quase totalidade dessa zona ultrabásica um capeamento coluvial. Apenas em pequenas áreas a sul e a oeste, torna-se possível a observação de afloramentos serpentiniticos.

FIG. 5 — MAPA GEOLÓGICO LOCAL

AUTOR: Santos, 1974

Os serpentinitos apresentam coloração cinza, cinza-esverdeado e amarelo-esverdeado, tendo em geral granulação fina. Em sua maior parte, essas rochas mostram um alto grau de alteração intempérica. Mineralogicamente, predomina a serpentina (crisotila e lizardita), com clorita e opacos (cromita, magnetita, hidróxidos de ferro e manganês) subordinados. Veios anastomosados de sílica (calcedônia) e de amianto (crisotila) cortam todo o serpentinito.

As fibras de crisotila apresentam-se com espessura variável, de milimétricas a até alguns centímetros, possuindo uma coloração amarelo-esverdeada e dispendo-se de modo perpendicular aos contornos dos veios anastomosados.

Em lâmina delgada, dois aspectos texturais distintos evidenciam-se nos serpentinitos. Um deles é o da textura em "grade", bastante semelhante à estrutura dos antigos cristais de olivina. Essa estrutura reticulada é circundada por grãos muito finos de magnetita. A serpentina (lizardita) apresenta-se sob três formas distintas: uma envolvendo os núcleos, bem cristalizada, fibrosa (I), com as fibras dispendo-se perpendicularmente ao retículo; outra compondo os núcleos (II), com granulação menor, na maioria das vezes microcristalina. Espalhados pela rocha, observa-se ainda alguma cromita translúcida e rara clorita, parecendo oriundas de antigos orto-piroxênios. E a serpentina (III) que ocorre como veios fibrosos. Esse tipo de estrutura é comum em rochas serpentinizadas de todo mundo. (Caillère, 1936).

O segundo aspecto textural é definido por microcristais aciculares de serpentina, dispostos caoticamente, dando um aspecto de "tecido". Cristais aciculares grandes de serpentina, dispostos em estrelas e associados com clorita, destacam-se na massa, que apresenta ainda grandes cristais arredondados de cromita.

A escassez de testemunhos de ortopiroxênios demonstra que, antes de ser hidratada, a rocha original devia ser do tipo dunitico. Localmente, foram encontrados anfibólios, possivelmente derivados de clinopiroxênios.

A zona básica é constituída por gabros, gabros olivínicos e dioritos, ocorrendo a sul, leste e nordeste do maciço e formando uma superfície semi-aplainada, com altitudes da ordem dos 300m. Esses tipos rochosos possuem uma coloração esverdeada e apresentam-se também com alto grau de alteração intempérica. Em termos mineralógicos são constituídos basicamente de piroxênios (diopsídio e augita) e feldspatos (plagioclásios).

Santos (1974) identificou três sistemas tectônicos que atuaram no maciço, causando falhamentos de gravidade de direção N-NE, que sucederam dois falhamentos horizontais, um de direção E-W e outro de direção NW. Secundariamente, o maciço acha-se localmente falhado a sul; pequenos diques de diabásio são observados nos contatos entre o serpentinito e as encaixantes.

A Tabela 1 fornece a composição química das amostras menos alteradas que puderam ser encontradas. Comparadas, por exemplo, com a composição dos serpentinitos de Piên (PR), (Schevciw, 1980; Trescases e Schevciw, 1980), são evidentes os sinais de alteração dos serpentinitos do Piauí, em particular pelo alto valor da razão SiO_2/MgO , e por teores já elevados em Fe e Ni.

5. - SOLOS

Os solos da região desenvolvem-se principalmente sobre as rochas metamorfizadas do embasamento, apresentando características argilosas, porém só ocorrem em zonas sem cobertura arenosa,

TABELA 1 - Comparação Química entre os Serpentiníticos do Piauí e de Piên
(Amostras Frescas)

AMOSTRA	PERDA AO FOGO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃ *	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO	CoO	CuO
L ₂	10,2	47,9	27,80	13,05	1,36	0,13	0,11	0,44	0,020	0,01
L ₁₀	12,1	41,0	31,10	11,60	0,57	0,29	0,18	0,55	0,016	0,01
Piên (1)	12,9	39,9	37,30	8,00	1,08	0,15	0,07	0,28	0,010	-
Piên (2)	12,4	40,2	36,35	8,90	1,18	0,28	0,08	0,34	0,010	-

(1) - Serpentinítico ex-dunito (Piên-PR) (Schevciw, 1980)

(2) - Serpentinítico ex-harzburgito (Piên-PR) (Trescases e Schevciw, 1980)

(*) - Fe total em Fe₂O₃

principalmente sobre os xistos. Solos arenosos, alóctones, também ocorrem, e são oriundos das formações sedimentares próximas, podendo, em parte, formar uma cobertura areno-quartzosa nas áreas de planícies.

De uma maneira geral, nas planícies, os solos são constituídos por latossolos e podzólicos vermelhos e amarelos, entróficos e distróficos, apresentando textura média. Nas áreas com material de cobertura têm-se areias quartzosas e solos podzólicos vermelho-amarelos de textura média e em porções desnudadas, predominam os solos brunos não cálcicos e podzólicos vermelho-amarelos. Todos os tipos de solo apresentam-se drenados, medianamente profundos e com baixa fertilidade (Martins et al., 1973).

Nos maciços ultrabásicos, praticamente não se observam solos bem desenvolvidos, pois geralmente apresentam-se com coberturas lateríticas ou arenosas.

A terra é considerada inapta para a utilização agrícola, devido à baixa fertilidade natural e à enorme deficiência hídrica.

6. - GEOMORFOLOGIA

a) Aspectos Morfológicos Gerais

A região situa-se na Depressão Periférica do Médio São Francisco, no domínio das depressões interplanálticas e periféricas semi-áridas, revestidas por caatinga (Ab'Saber, 1972). Essa depressão é de origem erosiva, modelada em terrenos cristalinos, sob clima semi-árido, e é periférica ao Planalto Sedimentar da Bacia do Parnaíba.

A natureza litológica controla em parte o modelado re

gional do relevo; assim, os conjuntos metamórficos tais como xistos e migmatitos, mais facilmente erodíveis, ocorrem nas partes mais baixas de relevo plano-ondulado, formando os aplainamentos das depressões intermontanas. Os conjuntos rochosos mais resistentes, como quartzitos, emergem dos aplainados, formando cristas contínuas orientadas segundo as direções das estruturas, enquanto que as rochas sedimentares formam chapadas, cuevas e mesas testemunho, de escarpas acentuadas, devido às camadas arenosas mais resistentes.

b) Grandes Superfícies Regionais

A plataforma brasileira, após sua consolidação, vem sendo submetida a sucessivos ciclos de erosão e sedimentação; desse modo, a história da evolução da paisagem brasileira está gravada no relevo, através das superfícies de erosão e através da sedimentação, pelos depósitos correlativos aos ciclos de deposição.

Estas superfícies foram identificadas por diversos autores; porém os mesmos não concordam em relação ao número e nem em relação às idades destes níveis. Em termos regionais amplos, podem ser reconhecidas na região três superfícies de aplainamento do nordeste, identificadas por King (1956).

O aplainamento pós-Gondwana, do Cretáceo Superior, com cotas superiores a 1000m, restrito à faixa de ocorrência do arenito Tombador, na Bahia, a sul da área estudada.

A Sul Americana, considerada a superfície a partir da qual todo o relevo brasileiro foi esculpido; é o resto de uma desnudação, que se iniciou no Cretáceo Inferior e terminou no

Terciário Médio, quando foi soerguida e reentalhada. Possui altitudes da ordem de 600m a 850m e está representada, na área, pelas serras do Boqueirão e Dois Irmãos, entre outras.

O ciclo Velhas, que ocupa a maior extensão na área, sucedeu o Sul Americano e atingiu seu nível de base no Terciário Superior. Sem a mesma expressão do anterior, é responsável pelo relevo uniforme da paisagem regional, com cotas entre 340 e 450 metros.

A superfície Paraguassu, a última reconhecida por King (1956) e que domina atualmente a região, não possui qualquer desnível significativo e ainda não atingiu a fase de aplainamento generalizado.

c) Compartimentos Locais

Superfícies de aplainamento podem ser identificadas localmente, tanto nos sedimentos da Bacia do Parnaíba como no maciço básico-ultrabásico. São dois os níveis erosionais que se destacam: um mais antigo, correspondendo a uma superfície bastante aplainada e já em fase de dissecação, com altitudes ao redor de 600-700m, desenvolvido sobre xistos, quartzitos e rochas sedimentares. Neste nível, encontram-se os sedimentos da Formação Serra Grande, adjacentes ao maciço.

O outro nível, mais recente, foi esculpido principalmente sobre as rochas do embasamento e encontra-se a altitudes entre 350-550m; neste nível, encontra-se o maciço básico-ultrabásico. O topo aplainado do maciço encontra-se a uma altitude de 470m e a planície da base aos 350m; porções deprimidas no seu interior são observáveis e suas encostas íngremes ou suaves terminam em áreas de piemont.

Sobre estes níveis, encontram-se depósitos de concreções lateríticas, formados provavelmente no Terciário; esses níveis possuem extensas coberturas arenosas recobrimdo parte das crostas lateríticas das partes mais elevadas (Caldasso et al., 1973).

d) Interpretação

O topo aplainado do maciço encontra-se, aproximadamente, à mesma cota da base dos sedimentos devonianos da Bacia do Parnaíba. Testemunhos de sedimentos (seixos rolados) são encontrados no topo do maciço, sugerindo uma antiga cobertura sedimentar sobre o mesmo. Assim, o topo do maciço pode ter pertencido, no passado, à superfície sobre a qual se assentaram os sedimentos devonianos. Após a remoção parcial da cobertura sedimentar, esta antiga superfície foi exposta, sendo alterada provavelmente no Terciário e ultimamente vem sendo entalhada.

Desse modo, acreditamos que, pelo menos, duas fases erosionais ocorreram na evolução geomorfológica do maciço.

Santos (1974) identifica no maciço uma fase de aplainamento e laterização, seguida de um rejuvenescimento morfológico, correlacionando estes eventos aos ciclo Velhas de King (1956), datado do Terciário Superior.

Melfi et al. (1979) correlacionam a superfície aplainada do topo do maciço ultramáfico com o ciclo Sul Americano, de idade terciária, e a planície com o ciclo Velhas, citando uma evolução recente do relevo entalhando a superfície Velhas (ciclo Paraguassu).

Portanto, acredita-se que o maciço básico-ultrabásico de São João do Piauí sofreu uma primeira geração de alteração, no topo, e pelo menos uma segunda mais recente nas vertentes, no piemont e planície.

Com base nesta interpretação, nos capítulos seguintes serão estudados os mecanismos que se iniciaram primeiramente (provavelmente a partir do Terciário) através dos perfis do topo aplainado e a evolução mais recente das encostas no sistema de topossequência: Topo de Encosta - Meio de Encosta - Base de Encosta - Planície.

C A P Í T U L O I I

METODOLOGIA

Em se tratando de dissertação a nível de mestrado, a metodologia utilizada, tanto no campo, como no laboratório, re veste-se de importância fundamental.

Nesta fase deve ser demonstrado o domínio das técnicas analíticas empregadas, fornecendo, desta maneira, condições para uma avaliação segura de todo o trabalho realizado.

Assim, neste capítulo são abordados os métodos utilizados na obtenção dos dados de campo e laboratório, que constaram de: descrição de perfis de alteração, coleta de amostras, britagem e moagem, cálculos de densidade e umidade, análises granulométricas e químicas, raios-x, análise térmica diferencial e lâminas delgadas. Cada um dos procedimentos é explicado a seguir.

1. - PROCEDIMENTOS DE CAMPO

A Cia. Vale do Rio Doce Geologia e Mineração S/A for neceu informações da área que constaram de: mapas topográficos e geológicos locais, mapa de localização de poços e furos de sondagem abertos nos trabalhos de pesquisa por eles realizados e relatórios internos da companhia.

Os trabalhos de campo iniciaram-se com o reconhecimen to dos contatos litológicos assinalados no mapa geológico local fornecido pela companhia, das estruturas presentes, do reconhecimen to das relações litologia-morfologia e natureza das formações superficiais.

a) Descrição de Poços

Com base no mapa de localização dos poços e furos de sonda, foram observados e descritos sessenta e sete poços e amostrados os que julgamos mais adequados para caracterizar o processo de alteração ocorrido no maciço.

Nesse item serão definidos os significados de alguns termos que serão usados nos capítulos que se seguem, e será fornecida uma descrição geral dos perfis de alteração reconhecidos no campo.

Horizontes Superficiais - O maciço ultrabásico é em parte recoberto por material arenoso, principalmente na área de planície e regiões adjacentes e em parte por solo argiloso marrom escuro a avermelhado, rico em concreções e blocos de rocha; por vezes o material arenoso mistura-se com a cobertura ferruginosa formando um solo areno-laterítico. Essa cobertura arenosa, presente principalmente na parte oriental do maciço, é proveniente da erosão dos sedimentos paleozóicos próximos. Podem ser encontrados, no topo do maciço e ao longo das encostas, seixos de quartzo arredondados, indicando talvez a presença de antiga cobertura arenosa no maciço.

Quanto às fácies de alteração das rochas, seguindo descrições de perfis lateríticos já realizadas (Santos, 1974; Trescases, 1975; Melfi et al., 1979; Oliveira, 1980), adotamos as seguintes denominações com suas respectivas descrições:

Rocha Alterada (R.A.) - Foram caracterizadas como deste tipo, as rochas que apresentam alteração incipiente; geralmente são rochas coesas e densas, de coloração verde ou cinza escuro, de gra

nulação fina. Apresentam-se intensamente fraturadas, cortadas por inúmeros veios de calcedônia verde, branca ou vermelha e raros veios de crisotila.

Saprolito Grosseiro (SG) - O saprolito grosseiro representa a rocha bem alterada, onde se distinguem facilmente a textura e as estruturas originais. A coloração é variada, de um modo geral mais clara, entre verde-claro, amarelo até cinza-claro; o material, apesar de consistente, oferece pouca resistência à fragmentação. O saprolito grosseiro é heterogêneo, um pouco menos denso que a rocha alterada, apresentando ora grande quantidade de matriz argilosa, ora grande quantidade de blocos de rocha, podendo localmente se apresentar silicificado.

Saprolito Argiloso (SA) - Nesse estágio de alteração, o material apresenta-se bastante homogêneo, com uma constituição quase totalmente argilosa; é bastante friável e localmente pode apresentar coesão maior devido à silicificação, porém é sempre muito pouco denso. É de coloração esverdeada, às vezes marrom-avermelhada e/ou amarelo-escura; os níveis esverdeados geralmente aparecem abaixo dos amarronados.

Imersos no saprolito argiloso encontram-se raros blocos de rocha menos alterados; apesar da pequena coesão do material nesse estágio, pode-se identificar perfeitamente vestígios de textura e estrutura da rocha original.

Material Silicificado (Si) - Sob esta denominação, incluimos rochas alteradas e saprolitos que se apresentam intensamente silicificados. Foram desse modo designadas as amostras que apresentaram alto teor em sílica nas análises químicas (geralmente acima

de 55%), baixo teor em óxidos de magnésio e forte pico de quartzo aos raios-x. Na maioria dos casos, a silicificação se traduz por uma densa rede de veios de quartzo, em diferentes graus de cristalização, isolando celas de rocha em vários estágios de alteração. Às vezes a silicificação não é visível, nem em lâminas delgadas, sendo evidenciada apenas pela composição química.

b) Coleta de Amostras

De posse do mapa topográfico do maciço, selecionaram-se poços alinhados ao longo de toposseqüências; isto é, poços situados numa mesma direção, porém em diferentes posições na topografia. Este procedimento é usual em estudos de alteração supérgena, pois assume-se que os perfis de alteração de uma mesma rocha, desenvolvidos sob condições climáticas idênticas, apresentam diferentes características devido à variação do relevo e drenagem. Também podem ser assim evidenciadas as relações entre as diferentes zonas de alteração. Desse modo foram individualizadas quatro toposseqüências, abrangendo a maioria dos 26 poços e 3 furos de sondagem amostrados, para caracterizar a alteração do maciço.

Além dos poços, foram coletadas amostras de afloramento e material de cobertura, abrangendo o serpentinito e as encaixantes.

Alguns poços, não alinhados, foram selecionados, visando-se caracterizar perfis de alteração em posições topográficas particulares e tornar a malha de amostragem melhor distribuída no maciço.

O espaçamento entre os poços é geralmente de 100 me

tros e algumas vezes de 50 metros, e obedecem à malha de pesquisa realizada pela empresa; suas profundidades variam de 3 a 30 metros (Figura 6).

Após a escolha dos poços, iniciou-se a coleta das amostras com a preocupação de amostrar cada mudança faciológica do perfil de cada poço, o que resultou num número variável de amostras para cada poço. As amostras são identificadas pela sigla L e foi adotada uma numeração para cada amostra: o primeiro número indica o poço amostrado, o segundo corresponde à posição da amostra no poço, sendo que este segundo número vai crescendo à medida que a amostra é mais superficial. De modo geral, quanto mais alto este segundo número, maior é o grau de alteração do material no poço. Por exemplo, a amostra L13-1 corresponde a amostra menos alterada do poço de número 13, a amostra L13-2 corresponde a uma amostra mais alterada que a L13-1 e assim por diante.

Foi coletado um total de 96 amostras, representando toda a alteração do maciço, bem como amostras das encaixantes e do solo (Tabela 2).

Após a coleta, as amostras foram descritas em detalhe, macroscopicamente e com auxílio de lupa binocular; a partir desta descrição refinou-se a classificação das fácies de alteração realizada no campo (Fig. 7, 8, 9 e 10). A complementação das informações presentes nas figuras foi obtida com o resultado dos dados de grau de alteração, umidade, densidade aparente, análises químicas e raios-x que foram acrescidos posteriormente; essas figuras encontram-se no final, como apêndice.

FIG. 6 — MAPA TOPOGRÁFICO E DE AMOSTRAGEM

TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS POR FÁCIES E SUA POSIÇÃO NAS TOPOSEQUÊNCIAS

Fácies de Alteração / Posição Topograf.	PLATO	TOPO DA ENCOSTA	MEIO DA ENCOSTA	BASE DA ENCOSTA	PLANÍCIE
HORIZONTE SUPERFICIAL	-	-	L 4-10 L 4-9 L 8-4	L 22-5	L 1 L 6-10 L 6-9 L 16 L 17 L 18 L 27 L 35
SAPROLITO ARGILOSO	L 13-7 L 13-6	-	L 4-8 L 4-5 L 4-7 L 31-2 L 4-6 L 31-1	L 29	L 5 L 36-5 L 36-4 L 36-3
SAPROLITO ARGILOSO (SILICIFICADO)	L 12-4 L 12-1 L 12-3 L 13-5 L 12-2 L 13-4	L 21-3 L 33-2 L 33-1	L 8-3 L 37-5 L 32-2 L 37-4 L 32-1	-	L 6-8 L 6-7 L 24-3
SAPROLITO GROSSEIRO	L 13-1	L 28-2	L 4-4 L 9 L 4-3 L 37-3 L 4-2	L 7-5 L 7-2 L 7-4 L 22-3 L 7-3 L 22-2	L 6-6 L 6-5 L 6-4
SAPROLITO GROSSEIRO (SILICIFICADO)	L 13-2	-	L 4-1 L 14-3 L 14-2 L 14-1	L 22-4	L 6-3 L 36-2 L 24-2 L 36-1 L 24-1
ROCHA ALTERADA	L 13-3	L 15 L 21-2 L 21-1	L 8-2 L 20-2 L 8-1 L 20-1 L 11-3 L 37-2 L 11-2 L 37-1 L 11-1	L 7-1 L 22-1	L 6-2 L 6-1
ROCHA FRESCA	-	-	L 10	L 2	-
ROCHA ENCAIXANTE	-	-	-	-	L 3 L 19 L 23 L 25 L 26 L 30 L 34 L 38

2. - PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO

O material coletado foi submetido aos tratamentos de laboratório que serão, de modo breve, descritos a seguir.

a) Britagem e Moagem

O procedimento inicial no laboratório constou da quarteação da amostra coletada para os trabalhos de britagem e moagem. As amostras friáveis foram desagregadas manualmente, enquanto que as duras tiveram que ser britadas antes do processo de moagem. A moagem foi realizada em moinho de bolas e a granulometria obtida, (após 5 minutos de moagem, em média) foi de aproximadamente 200 mesh.

b) Separações Granulométricas

Na realização de análises granulométricas, obtém-se uma separação na granulometria das rochas em função da alteração, provocando assim, a grosso modo, uma separação mineralógica. Esta separação não se dá ao acaso, pois, à medida que se processa a alteração, ocorre o desagregamento do material que reflete em parte a distribuição dos constituintes mineralógicos, concentrando-os preferencialmente em determinadas frações dependendo da fácies de alteração.

As análises químicas das frações, somadas ao conhecimento da distribuição mineralógica, fornecem uma primeira aproximação das análises químicas dos minerais. Com este propósito, foram selecionadas 26 amostras representativas dos vários estágios de alteração para análises granulométricas.

Aproximadamente 300g de amostra foram colocados em becker com água e deixados para desagregação durante dois dias.

Em seguida, o material foi peneirado sob água corrente em jogo de peneiras com aberturas de 2,00, 0,25 e 0,062mm, secado em estufa (60°C) e pesado.

As frações acima de 2,00mm e entre 2,00 e 0,25mm foram examinadas em lupa binocular para descrição mineralógica. Visando à caracterização e à distribuição dos constituintes mineralógicos em cada fração, foram posteriormente efetuadas análises de raios-x e químicas em cada fração granulométrica.

c) Determinação de Umidade e Densidade Aparente

As determinações das densidades aparentes e umidades relativas ao peso úmido e peso seco foram realizadas na quase totalidade das amostras alteradas (com estrutura conservada), num total de 75 amostras.

No cálculo da umidade, utilizou-se uma balança analítica, onde foi pesada a cápsula de vidro vazia e posteriormente contendo a amostra úmida. A cápsula mais a amostra são secadas em estufa a 100° - 110°C por um período de aproximadamente seis horas e, em seguida, pesadas novamente.

De posse desses dados e através de cálculos simples, obtêm-se as umidades de cada amostra em percentagens relativas à amostra úmida e seca.

A densidade aparente de cada amostra é calculada para finando pequenos pedaços da amostra úmida (Millot e Bonifas, 1955 e Easton, 1972) e pesando-se em balança analítica, com precisão até 0,01g, no ar e na água; assim, conserva-se intacta a estrutura e umidade original da amostra. A densidade aparente é calculada para amostra seca, usando-se o valor da umidade medida, ao

mesmo tempo em que se efetuam as medidas de densidade.

Para cada amostra, determinou-se a densidade aparente em dois pedaços, sendo que para amostras mais alteradas e, por conseguinte de mais fácil desagregação, determinou-se até três vezes a densidade, adotando-se a média dos valores obtidos.

A DOCEGEO, através de seus relatórios internos, forneceu dados de densidade aparente e umidade de algumas amostras, porém esses dados foram utilizados apenas para comparação, não sendo considerados no estudo efetuado.

d) Análise Mineralógica por Difração de Raios-X

As análises de raios-x foram realizadas na maioria das amostras coletadas (83 amostras), bem como nas frações granulométricas (26 amostras). A análise foi feita com o material moído, em suspensão em água destilada, colocado em lâminas de vidro e deixado secar ao ar, obtendo assim uma lâmina com as partículas na sua orientação preferencial.

Foi utilizado um aparelho marca Rigaku Denki, ano de fabricação 1976, com as seguintes condições de operação: 1250V, 35Kv, 15mA, TC = 1, CPS = 1000, velocidade do goniômetro = 1°/min., velocidade do papel = 10mm/min., radiação K α do Cu, filtro de Ni e Varredura - 3° a 60°.

Após essa análise inicial, as amostras que apresentaram um pico a 14 $\text{\AA}$ nos diagramas foram tratadas visando à identificação do mineral ou dos minerais correspondentes a esse pico.

Os tratamentos efetuados nessas amostras visaram: a eliminação da sílica amorfa, com objetivo de melhorar os diagramas; a saturação com ions trocáveis, aliado a glicolação e aque

cimentos com objetivo de identificar os tipos mineralógicos correspondentes ao pico $14\text{\AA}$. Foi tratado um total de 25 amostras.

A eliminação da sílica amorfa é feita adicionando-se à amostra 50 a 100cm^3 de NaOH 0,5N. Agita-se o material até conseguir uma suspensão homogênea e aquece-se a 50°C por aproximadamente 5 minutos (Segalen, 1968; Weber, 1975). Após esse tratamento, as amostras foram submetidas à saturação com cátions de K e Mg. Foram utilizados como eletrólitos soluções 1 N dos cloretos desses cátions. Num becker de 100ml, misturam-se a solução e o material a ser saturado, agita-se mecanicamente 3 vezes por duas horas cada vez, renovando-se o eletrólito a cada etapa da agitação (Walker, 1958 in Lucas et al., 1959). Após as saturações, lava-se o material com água destilada três vezes (centrifugando cada vez) e uma vez com uma mistura em partes iguais de água e álcool. Nessa etapa as amostras saturadas com Mg^{+2} são passadas no raios-X em idênticas condições que as amostras totais e posteriormente são colocadas (por uma semana) em contato com vapores de etileno-glicol em dissecador e finalmente repassados em raios-X.

As amostras saturadas com K^+ são passadas de 3 a 15° nos raios-X nas condições das amostras totais, após aquecimento a 110°C e finalmente após aquecimento a 525°C .

Esses tratamentos (Brown, 1971; Robert e Tessier, 1974), permitem a identificação dos minerais argilosos com pico a $14\text{\AA}$, em função da posição do pico, como é mostrado no quadro a seguir.

TABELA 3 - VARIAÇÃO DO PICO A $14\text{\AA}$ APÓS TRATAMENTOS

Min. Argilosos	K ⁺ Normal	K ⁺ 110°C	K ⁺ 525°C	Mg ⁺² Normal	Mg ⁺² glicol.
Cloritas	$14\text{\AA}$	$14\text{\AA}$	$14\text{\AA}$	$14\text{\AA}$	$14\text{\AA}$
Vermiculita	$14\text{\AA}$	10-12 $\text{\AA}$	10 $\text{\AA}$	$14\text{\AA}$	$14\text{\AA}$
Esmeclita	$14\text{\AA}$	10-12 $\text{\AA}$	10 $\text{\AA}$	$14\text{\AA}$	17 $\text{\AA}$

e) Lâminas Delgadas

Foram confeccionadas 91 lâminas delgadas, visando a uma análise microscópica detalhada do material. As amostras duras foram laminadas sem tratamento prévio. Em muitas amostras, entretanto, foi necessário um pré-cozimento com bálsamo de Canadá, antes da laminação. Outras, ainda, muito friáveis ou com materiais de consistência muito diferente (por exemplo, rocha bastante alterada recortada por material silicoso secundário), necessitaram de um processo de endurecimento por polimerização com resina poliéster (Verbeke, 1969), sendo posteriormente cortadas, reimpregnadas com a resina e finalmente laminadas.

f) Identificação Mineralógica por Análise Térmica Diferencial

Esta técnica de análise mineralógica foi empregada para amostras totais. Em todos os casos, o material foi seco e moído a 200 mesh e compactado em recipiente próprio.

O aparelho utilizado é de marca Rigaku e as condições instrumentais foram:

- Velocidade de aquecimento: 10°C/min.
- Velocidade do papel: 5mm/min.
- Voltagem: 50mV.

g) Análises Químicas

Foram submetidas a análises químicas 101 amostras, sendo que 24 dessas análises referem-se a análises de frações granulométricas.

Todas as análises foram realizadas com ataque perclórico, visando a uma melhor discriminação das formas da sílica presente nas amostras; esse tipo de ataque, também conhecido como ataque seletivo, permite a individualização da sílica dos silicatos e da sílica amorfa de um lado, e do quartzo de outro (Trescases, 1975).

As análises realizadas no presente trabalho se nortearam na metodologia apresentada por Trescases, 1975 e Oliveira, 1980. De acordo com esses autores, o esquema de decomposição é o seguinte:

O resíduo II no caso (alteração laterítica de serpentinitos) é principalmente constituído de quartzo. A sílica solúvel (dos silicatos e amorfa) é obtida através da diferença entre o resíduo do ataque HClO_4 (resíduo I) e do resíduo do ataque NaOH (resíduo II).

Os seguintes elementos, foram dosados na solução I: Al, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn e Ni. O Cr foi dosado também na solução II.

As dosagens foram efetuadas por espectrofotometria de absorção atômica, um aparelho marca Varian Techtron, modelo 1250.

Dois tipos de solução padrão foram utilizados: o padrão D usado para análises de rochas frescas e pouco alteradas e

o padrão L, para análises de rochas bem alteradas. As composições de D e L são mostradas na Tabela 4.

A perda ao fogo de todas as amostras foi calculada partindo-se de 0,1g de amostra, previamente seca a 110°C, e calcinada a 1000°C durante uma hora.

TABELA 4 - PADRÕES SINTÉTICOS

ELEMENTOS	L (ppm)	D (ppm)
Al	160.00	50.00
Co	2.00	1.00
Cr	80.00	20.00
Cu	0.68	0.59
Fe	800.00	430.00
Mg	50.00	350.00
Mn	23.20	6.72
Ni	25.16	30.09

Os dados químicos de cada amostra analisada encontram-se em apêndice (Apêndice I).

C A P Í T U L O I I I

OS PERFIS DE ALTERAÇÃO

1. - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na caracterização dos perfis de alteração foram estudados duas dezenas de poços, a maioria dos quais dispostos em toposequência, cortando topografias onduladas e com desníveis de até 100 metros. Foram analisados os perfis de cada poço, descrevendo as fácies presentes em cada um e, desse modo, identificando sua distribuição espacial.

Além da amostragem dos diferentes horizontes dos perfis de alteração nos poços, foram também amostrados blocos de "box work", solo e amostras de rocha provenientes de afloramentos, visando uma completa caracterização da alteração do maciço.

Após a análise do material, em todas as posições topográficas no maciço, observou-se que as fácies que compõem os perfis de alteração são as mesmas, seja no platô, nas vertentes ou mesmo na planície. As diferenças existentes entre os perfis de alteração nas diferentes posições na topografia prendem-se principalmente às espessuras das fácies e seus teores em níquel.

Os perfis estudados, distribuídos por todo o maciço, apresentam as fácies de alteração, cujas características são definidas como se segue:

a) Rocha Fresca - A denominação da fácies rocha fresca é geralmente dada a rochas cuja mineralogia original está preservada. Nestas condições, após exame microscópico, apenas duas das amosu

tras de rocha puderam ser classificadas nesta fácies. A quase totalidade das amostras de rocha coletadas já apresentavam inequívocos sinais de alteração intempérica; os poços perfurados não chegaram a atingir esta fácies e os únicos representantes são as amostras L 2 e L 10, provenientes de afloramentos no maciço. A rocha fresca é um ex-dunito, fortemente serpentizado, constituído principalmente por serpentina, algum anfibólio e clorita, formados por transformação endógena dos minerais do antigo dunito, além de opacos (magnetita e cromita) e raros carbonatos. Trata-se de um serpentinito homogêneo, cortado por veios milimétricos, compostos principalmente por serpentina criptocristalina, por vezes carbonatos e mais raramente por serpentina fibrosa. A coloração é geralmente verde-clara, porém observam-se também as cores cinza e marrom, com tonalidades variadas, além do verde-escuro. A densidade da rocha fresca situa-se entre 2,31 e 2,42, indicando intensa serpentinação e talvez já um início de alteração supérgena.

b) Rocha Alterada - A passagem da fácies rocha fresca a rocha alterada ocorre de modo gradual e sua individualização no campo nem sempre é possível, já que macroscopicamente as diferenças não são visíveis. A fácies rocha alterada apresenta-se com as mesmas características de coesão e cor da rocha fresca. A densidade é de 1,95 em média, com valores variando entre 1,51 a 2,30, indicando já uma forte alteração intempérica em algumas amostras. As amostras mais alteradas desta fácies apresentam uma coloração amarelada e veios milimétricos de calcedônia e quartzo, inexistentes na fácies anterior.

c) Saprolito Grosseiro - Nesta fácies o material se apresenta bem afetado pela ação intempérica, tornando-se mais poroso e até mesmo friável em algumas porções, porém a estrutura da rocha original permanece intacta. Esta fácies contém numerosos blocos de rocha alterada, que vão se tornando menores e mais escassos em direção ao topo do perfil, e já apresenta algum material argiloso. A coloração torna-se mais clara, os tons amarelos são mais frequentes, predominando as cores amarelo esverdeado e castanho amarelado. A densidade cai ainda mais nesta fácies, chegando ao valor médio de 1,77. Porções nesta fácies apresentam-se fortemente silicificadas, com a presença de quartzo e sílica amorfa cortando o material na forma de veios e agindo como cimento, formando o que denominamos de saprolito grosseiro silicificado.

d) Saprolito Argiloso - Nesta fácies há um predomínio de material argiloso e os blocos de saprolito são mais raros. Trata-se de material saprolítico muito fino, muito pouco coeso e bastante friável; todavia ainda se pode reconhecer a estrutura da rocha. Aqui a ação do intemperismo já modificou, de modo sensível, as características físicas e composicionais do material inicial. A coloração predominante é o marrom avermelhado e marrom amarelado. A densidade atinge o valor médio de 1,63. A exemplo da fácies saprolito grosseiro, esta fácies apresenta porções intensamente silicificadas, com sílica amorfa e quartzo secundário em abundância, na forma de veios e como cimento, dando uma certa coesão ao material que é então denominado de saprolito argiloso silicificado.

e) Horizonte Superficial - Este horizonte representa a fácies

mais evoluída do perfil de alteração; nesta fácies a estrutura da rocha não se conserva, havendo remanejamento e compactação de parte do material. Trata-se de uma cobertura vermelha, ferrugínea com abundantes concreções oolíticas, localmente soldadas em crosta. Imersos neste material argilo-ferruginoso encontram-se seixos, blocos de "box work" silicoso e de silexito. Na planície, este horizonte superficial é também composto por sedimentos arenosos grosseiros, de coloração amarela, que denominamos de cobertura arenosa. Às vezes esta cobertura arenosa mistura-se à cobertura ferruginosa, formando um solo areno-laterítico.

2. - A ALTERAÇÃO NO PLATÔ

No estudo da alteração ocorrida no platô, foram analisados os perfis dos poços 12 e 13, representados na Figura 7, e seu perfil de alteração pode ser caracterizado pelas fácies que serão descritas a seguir. Vale ressaltar que as espessuras fornecidas para os horizontes descritos são um tanto aproximadas, visto que poucos poços foram perfurados no platô e apenas dois apresentaram condições de serem estudados.

a) Horizontes de alteração, com conservação da estrutura da rocha (saprolitos).

São quatro os horizontes saprolíticos presentes:

- Saprolito grosseiro: rocha alterada, pouco argilosa, apresentando pouca silicificação; apenas alguns veios de sílica cortam o horizonte. Nota-se a presença de algumas zonas duras menos alteradas. O nível possui espessura superior a 3 metros.
- Saprolito grosseiro silicificado: rocha bem alterada, pouco

argilosa, e intensamente silicificada; nesse nível nota-se a presença de sílica amorfa secundária cimentando o material, além das vênulas de quartzo e calcedônia. O nível apresenta es pessara de até 3 metros.

- Saprolito argiloso: material argiloso, friável e pouco denso, destituído de blocos e silicificação. Esse horizonte possui 7 metros de espessura.
- Saprolito argiloso silicificado: material argiloso cortado por vênulas de sílica e calcedônia; localmente essa silicificação age como um cimento e dá uma certa coesão ao material. A es pessara desse horizonte é de pelo menos 6 metros.

b) Horizonte Superficial

O horizonte superficial, vermelho-amarelado, contém nu merosos blocos angulares e sub-angulares de rocha silicificada de tamanho decimétrico, e apresenta freqüentemente concreções ferruginosas milimétricas. Tanto essas concreções como os blocos estão imersos numa matriz vermelha de granulometria fina. A es pessara desse nível varia de 2 a 6 metros.

No tocante aos blocos de rocha silicificada, os mesmos se apresentam nos seguintes tipos:

- blocos de serpentinito levemente ferruginizado, cortados por uma "rede" de veios finos de sílica branca (serpentinito sili cificado);
- blocos de serpentinito bastante alterado, restando, apenas bu racos parcialmente preenchidos por material ferruginoso, den tro de uma malha branca de sílica ("Box Work");

- rocha totalmente silicificada, apresentando-se dura, maciça, densa, de coloração marrom-caramelada ("Silexito");
- blocos do tipo acima descritos, juntamente com concreções ferruginosas, cimentados por sílica ou óxido de ferro, formando um aglomerado de blocos ("Canga").

Todos esses tipos de materiais são encontrados misturados numa matriz fina, sendo os dois primeiros tipos (serpentinito silicificado e "box work") os mais freqüentes.

A profundidade total do perfil no poço 13 é de 23 metros, enquanto que no poço 12 o perfil de alteração atinge 12 metros.

c) Características Físicas

A Tabela 5 fornece os valores de umidade, densidade aparente e composição granulométrica das amostras dos perfis de alteração dos poços do platô.

Em relação à umidade, os valores são mínimos para as amostras bastante silicificadas, aumentando consideravelmente nas pouco silicificadas. Os valores de densidade aparente situam-se ao redor de 2,0 no saprolito grosseiro e em torno de 1,0 no saprolito argiloso. Nas amostras silicificadas os valores são bastante variáveis, abrangendo uma faixa de 1,5 a 2,3. A intensa silicificação impede a rápida queda da densidade, habitualmente correlativa da alteração dos serpentinitos (Trescases e Oliveira, 1978).

A análise granulométrica foi efetuada para algumas amostras representativas de cada etapa da alteração. Como resultado da ação intempérica, uma grande diferença se evidencia em

TABELA 5 - DADOS FÍSICOS DO PERFIL DE PLATÔ

AMOSTRAS			FÁCIES	UMIDADE (*)	DENSIDADE APARENTE	SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA			
PROF. (m)	POÇO 12	POÇO 13				$\phi = \text{mm}$	VALORES %		
						$\phi > 2,00$	$2,00 > \phi < 0,25$	$0,25 > \phi < 0,062$	$\phi < 0,062$
04	-	13-7	Saprolito	6,56	1,33	2,6	21,7	22,0	53,7
08	-	13-6	Argiloso	17,69	1,31	-	-	-	-
06	12-4	-	Saprolito Argiloso (Silicif.)	0,68	1,84	-	-	-	-
09	12-3	-		0,33	2,20	-	-	-	-
10	12-2	-		0,63	1,80	-	-	-	-
10	-	13-5		3,88	2,00	51,2	21,1	12,2	15,5
12	12-1	-		0,55	2,10	-	-	-	-
15	-	13-4		5,53	1,55	-	-	-	-
18	-	13-2	Saprolito Grosseiro (Silicif.)	1,73	2,25	-	-	-	-
20	-	13-1	Saprolito Grosseiro	6,38	2,11	51,4	26,2	9,3	13,1
17	-	13-3	Rocha Alterada (Silicif.)	1,21	2,32	-	-	-	-

(*) - % em relação ao peso seco.

tre o saprolito grosseiro, onde as frações maiores predominam e o saprolito argiloso onde predomina a fração fina. Amostras em estágios evolutivos bem diferentes, como o saprolito grosseiro não silicificado da base do perfil (amostra 13-1) e o saprolito argiloso silicificado da parte média do perfil (amostra 13-5), podem apresentar distribuição granulométrica semelhante. Entretanto, no horizonte basal a distribuição granulométrica reflete o início da alteração, com material grosseiro pouco alterado predominante, enquanto que na parte silicificada do perfil, a fração grosseira corresponde principalmente ao material cimentado pela sílica.

As principais características dos perfis de platô podem ser resumidas em 2 pontos:

- O horizonte superficial, com mistura de vários tipos de blocos, é nitidamente remanejado. Veremos a seguir que esse tipo de cobertura é encontrado com espessura variável em quase todo o maciço, incluindo base da encosta e planície. A abundância de blocos bastante silicosos nesse horizonte permite chamá-lo de silcrete, assemelhando-o assim com o horizonte de cobertura descrito nas altas superfícies dos maciços ultramáficos do Brasil Central (Melfi et al., 1979) e do Norte (Bernardelli et al., 1983).
- A zona de alteração, saprolito, com estrutura de rocha conservada, mostra uma parte pouco ou não silicificada na base, dois horizontes muito silicificados em cima e com um horizonte desilicificado no topo. Nessa zona o problema é saber se os dois mecanismos supérgenos, silicificação e alteração, intervieram ao mesmo tempo, ou se um antecedeu o outro e, neste caso, qual

foi a ordem. Essa pergunta será respondida mais adiante com ajuda do estudo micromorfológico e mineralógico realizado no perfil silicificado do platô.

3. - A ALTERAÇÃO NAS VERTENTES

a) Introdução

Neste item é traçada a evolução dos perfis de alteração nas vertentes, mostrando as transformações sofridas pela rocha mãe na topossequência encosta-planície.

A alteração nas encostas está ocorrendo ainda hoje, acompanhando a evolução do processo geomorfológico de entalhamento das vertentes. Esse processo é responsável pela destruição do platô, que é um testemunho da alteração mais antiga ocorrida no maciço.

Para a caracterização da evolução da alteração nas vertentes, foram estudadas 4 topossequências, sendo duas na porção NW e duas na porção SE do maciço. As topossequências a NW foram denominadas T I e T II, com a T I tendo direção N-S (Fig. 7) e a T II direção E-W (Fig. 8). As topossequências a SE foram denominadas T III e T IV, sendo que a T III possui direção N-S (Fig. 9) enquanto a T IV é de direção E-W (Fig. 10).

A localização dos poços está indicada na Figura 6.

b) Perfis Estudados

Os perfis estudados distribuem-se por quatro posições topográficas distintas, cujas características são aqui definidas:

- Topo das Encostas - área de vertentes fortemente inclinadas on

de a rocha pouco alterada e parcialmente silicificada por vezes aflora; possui uma cobertura superficial muito delgada. Um ou outro perfil pode apresentar fácies saprolíticas, porém de maneira geral o perfil de alteração não se desenvolve inteiramente nesta posição topográfica.

- Porção Média das Encostas - área com vertentes mais suaves, proporcionando a formação de um espesso perfil de alteração; caracteriza-se por intensa silicificação que se manifesta das seguintes maneiras:
 - disseminada ou na forma de veios nos horizontes saprolíticos;
 - como silexito, envolvendo totalmente o material.
- Base das Encostas - é a posição topográfica abrangida pelo término das encostas e início da planície, possuindo uma certa concavidade. Caracteriza-se por cobertura de material ferruginoso, canga e material coluvial. O perfil de alteração é bem desenvolvido e pouco silicificado.
- Planície - posição de baixada, onde o perfil da zona ultramáfica do maciço se desenvolve numa topografia plana. Nessa área a contribuição de material transportado das encostas é bem menor. Possui, em parte, uma cobertura de sedimentos grosseiros transportados das áreas adjacentes ao maciço. O perfil de alteração é bem desenvolvido.

b.1) A Alteração no Topo da Encosta

(Poços 15, 21, 28 e 33)

O perfil de alteração na posição superior das encostas é pouco desenvolvido e a maior parte do material alterado é transportado por gravidade para níveis topográficos inferiores. Exceção a esse quadro nessa posição topográfica é o poço 28, pois o mesmo situa-se numa ruptura côncava de uma das vertentes e conseqüentemente apresenta um perfil de alteração mais espesso que os demais.

Os horizontes componentes deste perfil são descritos a seguir:

- Rocha Alterada - Esse horizonte possui espessura variável, com mínimo observado de 2 metros. Apresenta fraca silicificação, que diminui ainda mais em direção à base. O material é constituído de serpentina bastante coesa, com núcleos mais alterados, porém a alteração de modo geral é incipiente. Veios de quartzo e de sílica amorfa recortam todo o material.
- Saprolito Grosseiro - Com espessura variando de 0 a 8 metros, esse horizonte apresenta blocos de rocha alterada e um pouco de material argiloso. A massa de serpentina apresenta porções com argila e é cortada por veios de sílica; mostra concentrações de matéria orgânica nas fraturas, além

de Óxido de ferro e de manganês. Esse horizonte é encontrado apenas no poço 28; inexistente nos perfis de poços onde a encosta é mais abrupta.

- Saprolito Argiloso Silicificado - Com espessura variando de 0 a 3 metros, esse horizonte é constituído de um material argiloso; localmente observam-se pequenos blocos de serpentinito pouco alterado e bem silicificado. A pouca serpentina presente está parcialmente alterada em argila, podendo apresentar silicificações na forma de veios e dissemiorada e ainda óxidos de ferro. A exemplo do horizonte saprolito grosseiro, esse horizonte é ausente nos perfis dos poços localizados nas encostas mais inclinadas.
- Horizonte Superficial - Essa cobertura é muito pouco espessa, apesar de excepcionalmente atingir 3 metros no poço 33. Constitui-se de matriz fina, argilosa. Imersos nessa matriz são encontrados os mesmos blocos da rocha do horizonte superficial do platô. Esse horizonte é remanejado, transportado a partir do desmantelamento do platô.

Ficam, desse modo, caracterizados os perfis situados nas porções superiores das encostas, como característicos de sítios onde a erosão predomina sobre a alteração.

TABELA 6 - DADOS FÍSICOS DO PERFIL DE TOPO DA ENCOSTA

POÇOS 15 E 21	POÇO 28	POÇO 33	FÁCIES DE ALTERAÇÃO	UMIDADE (*)	DENSIDADE APARENTE
21-3		33-2	Saprolito	10,00	1,63
		33-1	Argiloso	4,25	1,70
			(Silicificado)	0,63	2,02
	28-2		Saprolito Grosseiro	2,61	2,24
21-2			Rocha Alterada	3,20	1,94
21-1				2,67	1,93
15				4,22	2,10

(*) - % relativa ao peso seco.

b.2) A Alteração na Posição Média das Encostas

(Poços 4, 8, 9, 10, 11, 14, 20, 31, 32 e 37)

O perfil de alteração na porção média das encostas é bem mais desenvolvido que aquele da porção superior. Aqui todos os horizontes de alteração do perfil teórico se fazem presentes e são bem desenvolvidos. Pequenas exceções existem, em função da posição topográfica particular de alguns poços (8, 11 e 20). Esses poços estão em posições de maior declividade, e por isso, apresentam perfis de alteração bem menos desenvolvidos.

Os horizontes componentes dos perfis são descritos a seguir:

- Rocha Alterada - Constitui-se de serpentinito pouco alterado, levemente silicificado, cortado por veios de calcedônia e quartzo, com óxidos de Mn e cromita disseminados.
- Saprolito Grosseiro Silicificado - Com espessuras que chegam até 11 metros, esse horizonte é constituído de serpentinito alterado, mas ainda coeso. O material apresenta veios

verdes de crisoprásio, veios de quartzo recristalizado e impregnações de óxidos de Fe e Mn. Todo o nível encontra-se bastante silicificado, e nota-se que a silicificação aumenta de intensidade em direção à base.

- Saprolito Grosseiro - Com espessura variando de 0 a 5,0 metros, esse horizonte é constituído de serpentinito alterado que apresenta zonas relativamente coesas e zonas mais alteradas com matriz fina e argilosa. Nas zonas coesas observam-se veios de sílica amorfa, impregnações de óxido de Fe e Mn e grãos de cromita.
- Saprolito Argiloso Silicificado - Esse horizonte chega a possuir até 12 metros de espessura; é constituído de serpentinito ora pouco, ora muito argiloso, e sempre bastante silicificado. Esse horizonte desaparece a montante, nos locais onde a encosta é mais íngreme.
- Nível de Silexito - O perfil de alteração na porção média das encostas apresenta um nível de silexito, que não chega a se constituir num horizonte contínuo. Esse silexito se faz presente nos poços 9 e 37 com até 4 metros de espessura, sob forma de bolsões lenticulares.
- Horizonte Superficial - Esse horizonte possui espessura variável de 2 a 9 metros. Constitui-se de matriz fina, argilosa, com concreções ferruginosas, seixos quartzosos e blocos de silexito e "box work". Nesse horizonte as concreções são abundantes e observa-se também que parte do material sofreu remanejamento e compactação.
- Nível de Canga - A presença de canga foi detectada em ape

TABELA 7 - DADOS FÍSICOS DO PERFIL DE MEIO DE ENCOSTA

Poco 4	Poco 8	Poco 9 10	Poco 11	Poco 14	Poco 20	Poco 31	Poco 32	Poco 37	Fácies de Alteração	Umidade (*)	Densidade Aparente	GRANULOMETRIA			
												$\phi = \text{mm}$	Val. %		
												$> 2,00$	$2,0-0,25$	$0,25-0,075$	$< 0,062$
4-10									HORIZONTE SUPERFICIAL			62,9	17,9	13,3	5,9
4-8									SAPROLITO ARGILOSO	4,77	1,35	15,9	20,1	29,9	34,1
4-7										12,99	1,52	7,2	19,3	24,7	48,8
4-6										7,12	1,63	6,4	34,6	17,1	41,9
4-5						31-2				12,32	1,65	6,2	35,7	19,9	38,2
						31-1				8,50	1,58				
										2,77	1,65				
	8-3						32-2		SAPROLITO ARGILOSO (SILICIFICADO)	4,22	2,12	45,0	24,0	14,4	16,6
							32-1			2,95	1,93				
								37-5		3,79	1,90				
								37-4		4,01	1,82				
										7,01	1,63				
4-4									SAPROLITO GROSSEIRO	24,22	1,55	38,2	24,4	19,5	17,9
4-3										10,55	1,35	35,2	27,1	19,4	18,3
4-2		9						37-3		6,08	1,80	43,0	30,7	12,7	13,6
4-1				14-3					SAPROLITO GROSSEIRO (SILICIFICADO)	4,06	2,06				
				14-2						5,98	1,62				
				14-1						1,28	2,31				
										0,54	2,30				
	8-2								ROCHA ALTERADA	3,76	2,14				
	8-1									2,62	2,30				
		10								1,97	2,31				
			11-3							8,80	2,00				
			11-2							7,23	1,68				
			11-1							3,20	2,20				
				20-2						6,99	2,04				
				20-1						7,42	2,00				
								37-2		5,03	1,64				
								37-1		4,00	1,51				

(*) - % relativa ao peso seco.

nas dois poços (4 e 8) com espessura de até 0,8 metros, não chegando a se constituir num horizonte contínuo. Constituiu-se de núcleos silicificados de diferentes materiais (serpentinito, silexitto, etc.) na forma de concreções, soldados em crosta por cimento ferruginoso.

A presença de grande quantidade de sílica nesta posição topográfica sugere que parte desse material silicoso seja proveniente da dissolução do material a montante.

b.3) A Alteração na Base das Encostas

(Poços 2, 7, 22 e 29)

O perfil de alteração na base das encostas possui uma espessa cobertura superficial, formado em parte pela contribuição coluvial dos níveis superiores. Compõem-se dos seguintes horizontes:

- Rocha Alterada - Serpentinito pouco silicificado, contendo argilas nas fraturas além de óxidos de Mn, cromita e magnetita. Esse horizonte não foi atingido nos poços 7 e 29, pois a perfuração foi efetuada apenas até o horizonte saprolítico. No poço 22 atingiu pelo menos 4 metros de espessura.
- Saprolito Grosseiro Silicificado - De espessura variável entre 0 e 3 metros, esse horizonte é constituído de saprolito, coerente, silicificado e com óxidos de Mn nas fraturas. Minerais argilosos são encontrados abundantemente e, disseminados nessa massa, ocorrem magnetita e cromita.
- Saprolito Grosseiro - Com espessura entre 7 e 9 metros nos poços 7 e 22, e completamente ausente no poço 29, este hori

TABELA 8 - DADOS FÍSICOS DO PERFIL DE BASE DE ENCOSTA

Afl. 2	Poço 7	Poço 22	Poço 29	Fácies de Alteração	Umidade (*)	Densidade Aparente	GRANULOMETRIA			
							$\phi = \text{mm}$			Val. %
							> 2,0	2,0 + 0,25	0,25 + 0,062	< 0,062
	7-5		29	SAPROLITO ARGILOSO	13,65 9,74	1,31 1,45	15,0	13,4	29,0	42,6
	7-4				10,67	1,29	30,0	16,0	20,0	34,0
	7-3				13,65	1,57	70,6	16,2	4,4	8,8
	7-2			SAPROLITO	8,07	1,80				
	7-1			GROSSEIRO	9,32	1,68				
		22-3			11,45	1,54	33,3	36,1	8,9	21,7
		22-2			17,96	1,51				
		22-4		SAPROLITO GROSSEIRO SILICIFICADO	0,76	2,32				
2		22-1		ROCHA ALTERADA	1,34 9,72	2,42 1,75				

(*) - % relativa ao peso seco.

zonte é constituído de serpentinito bastante alterado, apresenta-se ora pouco, ora bem argiloso, sem sinais de silicificação. Impregnações de óxidos de Fe e Mn, além de grãos de cromita disseminados, são observáveis.

- Saprolito Argiloso - Horizonte com espessura variável entre 0 e 7 metros, constituído de material argiloso e não silicificado. O material saprolítico contém cromita disseminada e concentrações de óxidos de Fe e Mn.
- Horizonte Superficial - Sua espessura varia de 2 a 7 metros. A constituição aqui é idêntica à das coberturas lateríticas dos perfis das porções médias da encosta.
- Nível de Canga - Em todos os poços situados na base das encostas temos a presença de canga, com espessuras de até 1 metro e sempre acima do horizonte superficial.

Nos perfis de base de encostas, evidencia-se a presença de um horizonte de canga que o diferencia dos outros perfis. Outro fator de destaque é a presença de fraca silicificação na zona de alteração, ao contrário do observado nos outros perfis onde ela é intensa.

b.4) A Alteração na Planície

(Poços 6, 24 e 36)

Nos perfis de planície é grande a contribuição de material aluvionar. Parte importante da área da planície é coberta pelos arenitos da Formação Serra Grande, transportados da Bacia do Maranhão.

Os horizontes componentes do perfil de alteração na

planície são:

- Rocha Alterada - A espessura desse horizonte é estimada em pelo menos 3 metros. Trata-se de serpentinito levemente alterado, cortado por grandes veios de calcedônia, quartzo recristalizado e serpentina fibrosa. Disseminados na rocha temos óxidos de Fe e Mn, além de magnetita e cromita.
- Saprolito Grosseiro Silicificado - Esse horizonte possui espassura variável de 5 a 10 metros e é constituído de serpentinito, parcialmente alterado em argila; é cortado por grandes veios de sílica amorfa, e impregnado de óxido de Mn e Fe. De todo o perfil de alteração, este horizonte é o que se apresenta mais silicificado.
- Saprolito Grosseiro - Com espessura variando entre 2 e 8 metros, esse horizonte é constituído de serpentinito bastante alterado. Blocos desse material acham-se imersos em argila. Grandes veios de sílica amorfa com impregnações de Mn e Fe recortam o material mais coeso e rochoso desta fácies.
- Saprolito Argiloso Silicificado - Material argiloso, algo silicificado. O saprolito é todo cortado por veios de calcedônia e contém concentrações localizadas de óxidos de manganês e alguma cromita. Este horizonte possui espessura máxima de 3 metros.
- Saprolito Argiloso - Horizonte com espessura compreendida entre 2 e 13 metros. Constitui-se de material totalmente argiloso e de constituição idêntica ao horizonte anterior, porém não se apresenta silicificado.
- Horizonte Superficial - Com espessura variável entre 4 e 11

TABELA 9 - DADOS FÍSICOS DO PERFIL DE PLANÍCIE

Poço 6	Poço 24	Poço 36	Fácies de Alteração	Umidade (*)	Densidade Aparente	GRANULOMETRIA			
						$\phi = 118\mu$ > 2,0	2,0 + 0,25	0,25 + 0,062	Val. % < 0,062
6-10			HORIZONTE SUPERFICIAL			44,0	29,8	10,3	15,9
		36-5	SAPROLITO	14,14	1,60	6,6	18,8	25,2	49,4
		36-4	ARGILOSO	11,82	1,60	6,2	23,7	26,7	43,4
		36-3		7,87	2,09	9,0	23,0	37,5	30,5
6-8			SAPROLITO	11,92	1,52	23,0	0,7	30,0	40,0
6-7			ARGILOSO SILICIFICADO	9,80	1,40				
6-6			SAPROLITO	4,26	1,83	66,2	18,3	12,8	2,7
6-5			GROSSEIRO	8,56	1,75				
6-4				13,51	1,51	58,1	24,1	5,1	12,7
6-3	24-3		SAPROLITO	8,31	1,53				
	24-2		GROSSEIRO	15,00	1,22				
	24-1		SILICIFICADO	12,66	1,78	19,5	24,0	31,1	25,4
		36-2		12,41	1,80				
		36-1		12,31	1,77				
				2,60	1,70				
6-2			ROCHA	6,14	1,73	56,3	23,6	17,7	2,4
6-1			ALTERADA	4,31	2,03				

(*) - % relativa ao peso seco

metros, esse horizonte é constituído em parte por cobertu
ra superficial idêntica à do perfil da porção média das en
costas e em parte pela cobertura arenosa.

- Nível de Canga - Também no perfil de planície temos um ní
vel de canga, em alguns poços. Esse nível aqui está geral
mente contido no horizonte laterítico, e sua constituição é
a mesma dos perfis anteriormente descritos.

Esse perfil é desenvolvido em área plana, onde ocorre
uma quebra na energia de transporte e conseqüentemente um menor
aporte de material do maciço.

Quanto à silicificação, nesse perfil a zona de altera
ção é mais silicificada que a observada no perfil da base das en
costas, porém menos que a encontrada nos perfis de topo e de
meio das encostas.

c) Características Físicas

As Tabelas 6, 7, 8 e 9, fornecem os valores de umida
de, densidade aparente a análises granulométricas dos perfis nas
vertentes, em função das fácies de alteração.

Em termos de umidade, de uma maneira geral, os valores
médios mostram um discreto aumento de teor em direção aos hori
zontes mais alterados, evidenciando que mesmo nas fácies menos
alteradas os minerais constituintes são bastante hidratados.

Os valores médios de densidade aparente, ao inverso da
umidade, mostram uma queda à medida em que a alteração progride;
algumas amostras excessivamente silicificadas não obedecem este
padrão. Esta queda nos valores de densidade evidencia uma perda
de massa do material com o avanço da alteração.

Quanto aos valores da distribuição granulométrica, observa-se claramente uma concentração do material mais alterado nas frações mais finas, contrapondo-se à concentração nos grosseiros do material nos estágios iniciais da alteração. Nas fácies silicificadas, devido à formação de blocos, ocorre concentração nas frações grosseiras de todo o material existente, alterado ou não.

Na fácies "côbertura superficial" ocorre uma concentração acentuada nas frações grosseiras, devido principalmente ao concrecionamento do material.

C A P Í T U L O I V

EVOLUÇÃO MINERALÓGICA

1. - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feito o estudo da evolução mineralógica, com o objetivo de evidenciar as transformações sofridas pelos minerais da rocha original durante o processo de alteração intempérica.

Essa evolução foi traçada a partir de dados obtidos de análises à lupa binocular, estudos de lâminas delgadas ao microscópio e de difratometria de raios-X. Desse modo, foram detalhadas as características de cada mineral, tanto os que constituem a rocha original como os produzidos pela alteração. Conclusivamente foi esboçado um quadro evolutivo que sintetiza as filiações mineralógicas, descrevendo a trajetória de cada mineral desde a rocha mãe até a fácies mais superficial.

2. - MINERALOGIA DAS FÁCIES DE ALTERAÇÃO

Após acurada análise da mineralogia das amostras provenientes de todos os perfis de alteração estudados no maciço, constatou-se que não ocorrem variações significativas na composição mineralógica de cada fácies, nas diferentes posições da topossequência. Assim, a mineralogia de cada horizonte fica caracterizada como se segue:

- a) Rocha Fresca - Serpentinito originado provavelmente de retromorfose de dunitos. Sua textura pode apresentar aspecto de ma

lha, muito comum em serpentinitos, ou mostrar-se estruturada em cristais aciculares, formando um "tecido". No primeiro caso, distinguem-se três variedades de serpentina. Serpentina I, que forma malhas da textura reticulada, dispondo-se em duas bandas adjacentes à semelhança de pequenos veios, por vezes fibrosos. Serpentina II que compõe os centros de malha reticulada, geralmente microcristalina (Foto 1). Serpentina III que ocorre como veios fibrosos de crisotila, muito bem cristalizada. As análises ao microscópio polarizante, bem como as de Raios-X não são conclusivas no tocante à identificação do tipo da serpentina. De acordo com Zeissink (1969), Faust e Fahey (1962) mostraram que as curvas de A.T.D. podem ser aplicadas para diferenciar a antigorita e o par crisotila-lizardita, não diferenciável. Para a antigorita o mínimo do pico endotérmico encontra-se entre 790° - 802°C ; para o par crisotila-lizardita este pico mínimo ocorre entre 637° e 715°C . Além disso, para o par crisotila-lizardita, observa-se um pico exotérmico 83° a 145°C acima da temperatura do endotermico. Para Deer, Howie e Zussman (1962) o par crisotila-lizardita possui o pico endotérmico entre 680° e 750°C , apresentando, em seguida, o exotérmico entre 800° e 820°C .

De acordo com a Fig. 11, que mostra os diagramas de A.T.D. de três amostras de serpentina de São João do Piauí, pode-se afirmar que os principais minerais de serpentina do maciço são a crisotila e a lizardita, caracterizados por um forte pico endotérmico entre 655 e 685 e um exotérmico entre 795 e 800°C . A magnetita está entre os minerais acessórios presentes na rocha. Apresenta-se na forma de grãos muito pequenos, geralmente arredondados, esparsos no corpo de serpentina e na forma de pe

quenos veios entre as bandas da mesmas. A gênese da magnetita está ligada ao processo de serpentinização. Segundo Ashley, 1975 (in Moody, 1976) o ferro das olivinas pode ser redistribuído durante a serpentinização, associando-se à estrutura da serpentina ou da brucita, ou formando fases opacas isoladas, tais como magnetita e awaruita. Observações petrológicas (Page, 1967a; Wicks, 1969) mostraram que a magnetita é produzida pela serpentinização dos dunitos. A clorita se faz presente espalhada ao acaso na rocha e em quantidades muito baixas, apresentando aspecto foliar. Ao microscópio caracteriza-se por ter coloração cinza-esverdeada e apresentar baixa birrefringência. A gênese da clorita também deve estar relacionada ao processo de serpentinização (Foto 2).

Os carbonatos estão presentes sob a forma de pequenos veios na rocha, em quantidades pequenas; aos raios-X foram identificados como magnesita e dolomita. A brucita ocorre em raros e pequenos veios recortando o serpentinito e, assim como os carbonatos, são minerais formados durante a fase de serpentinização.

A cromita, único mineral primário presente na rocha serpentinizada, ocorre na forma de pequenos cristais idiomórficos, com dimensões da ordem de 0,6mm, dispersos por toda a rocha.

b) Rocha Alterada - Com aspecto macroscópico semelhante ao da rocha fresca, diferencia-se aqui a rocha alterada através da microscopia, com o aparecimento de minerais supérgenos em pequena quantidade.

A serpentina microcristalina do interior dos reticulados da malha (serpentina II) já sofre os efeitos do intemperismo nesta fácies, passando para um mineral argiloso, esverdeado, identificado aos raios-X como esmectita. A massa de serpentina da

textura em "tecido", também pode apresentar-se algo alterada, porém em pequenas porções e em muito menor grau. A serpentina I, das bordas do reticulado, resiste mais a alteração, porém pode apresentar uma alteração parcial e incipiente nas rochas mais intemperizadas desta fácies. Essa alteração caracteriza-se por um aumento na birrefringência e aparecimento de pequenos depósitos de óxidos de ferro com coloração avermelhada. A serpentina III, fibrosa, dos veios, não apresenta sinais de alteração. Os cristais de cromita, nos contatos com a serpentina, apresentam-se ocasionalmente com óxidos de ferro nas bordas e por vezes mostram pequenos sinais de corrosão. Os cristais maiores de magnetita passam a apresentar leves sinais de oxidação e hidratação nas bordas, com o aparecimento de manchas avermelhadas de óxidos e hidróxidos de ferro. A clorita não se altera. Os carbonatos são, em parte, solubilizados, pois sua presença, detectada anteriormente em pequenas quantidades na rocha fresca, diminui ainda mais na rocha alterada.

A brucita, a exemplo dos carbonatos, sofre dissolução, diminuindo substancialmente nesta fácies. A presença de anfíbolios não é tão evidente; não foi detectada nos representantes da rocha fresca e na fácies rocha alterada aparece como traço em algumas amostras.

c) Saprolito Grosseiro - Nesta fácies os minerais supérgenos crescem de importância em relação aos minerais herdados da rocha mãe. A quantidade de serpentina decresce enquanto aumenta a quantidade de esmectita. No estudo das lâminas delgadas observa-se que a serpentina dos núcleos do reticulado (serpentina II) deram lugar à esmectita. Permanecem apenas algumas "ilhas" de serpenti

na que aparecem impregnadas de óxidos de ferro nas bordas. Em porções onde a ação intempérica é mais eficiente, dentro da mesma fácies, o interior das "celas" é muitas vezes preenchido por sílica amorfa (calcedônia) ou óxido de ferro ou ainda por quartzo recristalizado, diminuindo a quantidade de esmectita. Nas porções com textura em "tecido" ocorrem substituições mineral a mineral; são observados cristais aciculares de esmectita substituindo cristais aciculares de serpentina. As outras formas de serpentina, os tipos que constituem as bordas da malha (serpentina I) e a dos veios fibrosos (serpentina III), ainda mantêm-se parcialmente preservados; dentre essas duas formas a que mais resiste é a serpentina III, pois a serpentina I, por vezes, desaparece por completo dando lugar às esmectitas ou, numa fase mais avançada da ação intempérica, surge em seu lugar um reticulado muito resistente constituído por óxidos ou hidróxidos de ferro.

A esmectita aparece nessa fácies em quantidades razoáveis. É um mineral de difícil precisão: aos raios-X, a partir de material previamente separado (fração argila) e tratado, os picos apresentados mostram, sem dúvida, características de argilas expansivas do tipo das esmectitas. Pelo que se pode deduzir de sua composição química (ver análises químicas), trata-se de uma esmectita ferruginosa, do tipo nontronita. Nesse estágio outro mineral que aparece é a goethita. Formada a partir do ferro liberado pela hidrólise da esmectita, esse mineral se tornará mais claramente presente nos estágios seguintes. Aqui se apresenta preenchendo cavidades, em veios e impregnando a massa de serpentina.

A magnetita continua a aparecer em igual quantidade, mas os sinais de oxidação são cada vez mais intensos, caracteri

zados pelo aparecimento de franjas avermelhadas ao redor dos grãos. O quartzo aparece como produto de neoformação a partir de soluções oriundas principalmente da capa silicificada do platô, precipitado nos núcleos da estrutura reticulada ou formando veios. A fácies saprolito grosseiro apresenta setores particularmente muito silicificados (Foto 3).

Os carbonatos nesse estágio são dissolvidos ainda mais e tendem a desaparecer. A clorita permanece sem alteração. A brucita desaparece. Óxidos de manganês ocorrem ao longo de veios de serpentina e por vezes em aglomerados; esse óxido torna-se particularmente abundante na interfácies saprolito grosseiro e saprolito argiloso. A cromita permanece no saprolito grosseiro nas mesmas proporções que na fácies anterior e com praticamente as mesmas características, isto é, pequenos cristais dispersos com indícios de corrosão nas bordas e algo oxidados.

d) Saprolito Argiloso - Nesse estágio, muito pouco de serpentina se faz presente e, em grande parte, impregnada por óxidos de ferro e manganês (Foto 4). A nontronita é o mineral predominante, porém nas fases mais avançadas de alteração desta fácies, tende a desaparecer dando lugar a goethita. A magnetita praticamente se mantém, um pouco mais oxidada. Os carbonatos desaparecem totalmente. A clorita permanece inalterada. A goethita nesse estágio se distribui de modo igual à fácies anterior, porém em quantidades levemente maiores.

A sílica livre é abundante também nessa fácies, embora menos que na anterior e se apresenta igualmente na forma de quartzo e calcedônia, em veios ou preenchendo cavidades e soldando o material argiloso. Os óxidos de ferro e manganês são abundantes

e apresentam-se sob forma de acumulações concentradas em zonas bastante alteradas ou em finos veios disseminados na massa nontronítica. A cromita ocorre como nos estágios anteriores, porém bem mais corroída e em grãos menores.

e) Horizonte Superficial - É a fácies que representa o estágio final da alteração e apresenta-se parcialmente remanejada. Nesse estágio a serpentina desaparece totalmente, mas as argilas nontroníticas ainda podem subsistir. Essa fácies é caracterizada pela maior abundância dos óxidos e hidróxidos de ferro, sendo a goethita o principal mineral. Também a sílica livre é abundante nessa fácies, seja como cimento da matriz argilosa, seja como formadora de núcleos das concreções. A magnetita e a cromita ainda estão presentes, como minerais individualizados e formando concreções. A clorita não é observada nessa fácies, desaparecendo sem deixar resíduos.

A Tabela 10 fornece uma avaliação semi-quantitativa da mineralogia de cada fácies da alteração. A serpentina, abundante no início da alteração, é paulatinamente alterada e termina por desaparecer completamente nas porções superiores do perfil. Comportamento exatamente oposto apresenta o produto de alteração da serpentina, isto é, o argilo-mineral nontronita, completamente ausente no início e mais abundante à medida que o processo de alteração progride, diminuindo no horizonte superior. Os opacos como cromita e magnetita estão presentes em todo o perfil, em pequenas quantidades, conservando-se até na fácies mais alterada, devido ao fato de apresentarem grande resistência ao intemperismo. A clorita se mantém, em pequenas quantidades, em todo o perfil de alteração, a menos do horizonte superficial. A goethita é

TABELA 10 - AVALIAÇÃO SEMI-QUANTITATIVA DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA
DAS FÁCIES DE ALTERAÇÃO

Fácies de Alter. / Mineralogia	Serpentina	Clorita	Anfibólios	Opacos (Cromita + Magnet.)	Esmectitas (nontronita)	Óxidos de Fe.	Óxidos de Mn.	Sílica Amorfa	Quartzo (veios; recrist.)	Brucita	Carbonatos
Horizonte Superficial	-	-	-	*	*	***	*	**	**	-	-
Saprolito Argiloso	(*)	(*)	-	*	***	**	***	**	**	-	-
Saprolito Grosseiro	**	(*)	(*)	*	**	**	***	**	***	-	(*)
Rocha Alterada	***	*	(*)	*	*	*	*	*	(*)	(*)	(*)
Rocha Fresca	***	*	(?)	*	-	(*)	(*)	(*)	-	*	*

*** - Abundante
 ** - Frequente
 * - Escasso
 (*) - Traços
 - - Ausente.

cada vez mais abundante em direção às fácies mais alteradas. Os óxidos de manganês se concentram residualmente até o saprolito argiloso, para a partir daí diminuírem no horizonte superficial. A sílica concentra-se na porção média do perfil, onde é nítida a presença de zonas intensamente silicificadas, com os veios de quartzo e a sílica amorfa chegando, em alguns casos, a representar até 85% do material existente. O horizonte superior do saprolito argiloso e o inferior do saprolito grosseiro apresentam uma diminuição acentuada dessa sílica livre. A brucita e os carbonatos, sempre em pequenas quantidades, são eliminados do perfil já nos estágios iniciais da alteração.

3. - UM EXEMPLO DE PERFIS EXTREMAMENTE SILICIFICADOS

A silicificação se manifesta de maneira intensa na maioria dos perfis de alteração, tanto no platô quanto nas encostas, atingindo principalmente os saprolitos. Neste item serão analisados dois perfis situados no platô para exemplificar a silicificação presente e para explicar as relações entre a silicificação e a alteração.

Trata-se de perfis intensamente silicificados, nos quais a presença da serpentina é insignificante; a sílica livre, sob várias formas, toma o papel principal e muito secundariamente temos esmectitas, clorita, óxidos de ferro, óxidos de manganês, cromita e magnetita.

As rochas frescas, das quais derivaram as amostras do poço 13, são as do tipo granulação fina, textura em "tecido", como a amostra L2; as do poço 12 se originaram da alteração das rochas tipo "malha", como a amostra L10.

As amostras L 13-4 e L 13-5 apresentam-se em avançado estado de alteração; notam-se apenas resquícios da serpentina alterada e faixas com restos da textura em "tecido" onde a serpentina passa a esmectita. A rocha toda apresenta-se impregnada de uma rede difusa de sílica amorfa ou opala, que penetra nas palhetas de esmectitas e que progressivamente vai "digerindo-as". Nesse material silicificado, mais coerente, houve certa lixiviação das partes mais argilosas, deixando buracos. Estes vazios estão parcialmente preenchidos por calcedônia geódica, às vezes com quartzo microcristalino no centro.

No poço 12 não ocorre mais a serpentina e grande parte dos seus produtos de alteração (esmectita) foram lixiviados, restando principalmente sílica sob várias formas e óxido de ferro.

A sequência L 12-1, L 12-2, L 12-3, L 12-4 ilustra nítidamente a progressão da silicificação. Em L 12-1 ainda a estrutura reticulada da rocha é reconhecível, a antiga malha é epigenizada por material ferruginoso vermelho e os antigos núcleos de serpentina estão preenchidos de material ferruginoso marrom escuro no centro, bordejado de quartzo microcristalino. Além do quartzo, os raios-X indicam a presença de goethita e de esmectita. As fissuras abertas foram tardiamente preenchidas, ora com quartzo bem cristalizado, ora com calcedônia geódica como as amostras L 13-4 e L 13-5 (Foto 6).

Em L 12-2 o quadro é comparável, a não ser pela falta dos grandes veios secundários de quartzo cristalino. A estrutura celular da rocha é menos nítida; a sílica (calcedônia ou massa amorfa sílico-ferruginosa) parece progredir a custo tanto dos núcleos como do próprio retículo ferruginoso (goethita).

Em L 12-3 tanto os núcleos como a estrutura reticulada são constituídos quase que exclusivamente por sílica. A rocha toda é atravessada por densa rede de filões de quartzo secundário, constituindo-se num verdadeiro "box work". Apenas traços de esmectita são observados (raios-X). O ferro aparece em "nódulos" (goethita) envolvendo grãos de cromita e se acumulando na parte central dos antigos núcleos do retículo de serpentina.

A amostra L 12-4 representa uma fácies comparável a "box work" quartzoso, onde as partes menos endurecidas pelo quartzo foram esvaziadas por lixiviação. Desaparecem os minerais argilosos.

Assim, analisando o perfil como um todo, constata-se que o perfil de alteração na sua porção mais basal, abaixo do saprolito grosseiro silicificado, apresenta um saprolito grosseiro alterado em esmectita e não silicificado. A partir desse nível, em direção ao topo do perfil, a rocha apresenta-se cada vez mais alterada e observa-se uma forte silicificação no material saprolítico esmectitizado (Foto 5). O saprolito argiloso silicificado do poço 13 (L 13-4 e L 13-5) mostra um progressivo aumento da silicificação, de cima para baixo, ocorrendo no material esmectítico. A porção superior do perfil (saprolito argiloso) encontra-se em grande parte dessilicificado.

A forte silicificação nos níveis saprolíticos, com a presença constante de veios de quartzo tardio nas fissuras, indicam um enriquecimento muito grande em sílica, como será constatado pelas análises químicas, nas porções médias dos perfis. Assim, apenas a dessilicificação ocorrida nas porções superiores do perfil, como mostrado no poço 13, não é suficiente para su

prir toda a sílica existente nos horizontes imediatamente abaixos do perfil. Portanto, grande parte dessa sílica é proveniente da cobertura silicosa hoje parcialmente remanejada e com blocos de "box work" (esses blocos de "box work" contêm alguma esmectita e apresenta dissolução parcial de sílica).

A partir do quadro acima exposto e de observações na distribuição espacial das fácies a relação alteração - silicificação pode ser interpretada como segue: em um estágio antigo, os perfis de alteração do topo do maciço eram caracterizados por um horizonte muito silicificado, na base, que pode ser chamado de silcrete. Numa fase posterior esse silcrete foi em parte erodido e remanejado; concomitantemente progrediu para baixo a alteração, dentro do "bedrock" serpentinoso. Essa alteração, recente a atual, transforma a serpentina em esmectita ferrífera (nontronita); também aparece nontronita dentro dos blocos de "box work" e do horizonte superior de alteração. Superpondo-se a essa alteração, há simultaneamente uma lenta migração descendente, por dissolução, da sílica existente no silcrete e na parte superior do perfil, precipitando nos saprolitos das porções média e baixa, sem atingir a frente de alteração.

Esses fatos sugerem que o processo de silicificação ocorre concomitantemente à alteração.

4. - AS FILIAÇÕES MINERALÓGICAS

A matéria prima original, provavelmente um dunito, submetido ao processo de serpentinição passou por transformações mineralógicas, tendo como produto final um serpentinito com a seguinte mineralogia: serpentina bem cristalizada que forma o arcaço

bouço reticulado da rocha (serpentina I). Serpentina microcristalina que ocupa as partes centrais das "celas" do reticulado e da massa em "tecido" (serpentina II). Serpentina fibrosa dos veios, muito bem cristalizadas, desenvolvida principalmente nas diaclases da rocha (serpentina III). Alguma clorita; carbonatos; brucita e os minerais opacos cromita e magnetita.

A ação do intemperismo, atuando nesse serpentinito é identificada, macroscopicamente, nos seus estágios iniciais, através do aparecimento de um córtex na rocha fresca. O córtex mostra uma debilitação da rocha; é de constituição frágil, poroso, evidenciando início de perda de massa; é o início da formação dos saprolitos. As serpentinas são parcialmente atacadas; mineralogicamente elas se mantêm, porém nota-se leve alteração em argilo-minerais tipo esmectita.

Dependendo do seu grau de cristalização, as serpentinas podem apresentar maior ou menor resistência aos processos supérgenos. A serpentina II se altera mais rapidamente e se transforma, por pseudomorfose, em argilo-minerais esmectíticos, de composição nontronítica (ver análises químicas), liberando óxidos de ferro e sílica. A nontronita neoformada, por sua vez, se altera em goethita e deixa como resíduo óxidos sílico-ferruginosos. Os produtos sílico-ferruginosos provenientes, tanto da hidrólise das serpentinas quanto das nontronitas, sofrem dessilicificação, individualizando o ferro e a sílica. A sílica liberada vai formar, por precipitação, quartzo que pode ser posteriormente, em parte, dissolvido e reprecipitado sob diferentes formas (quartzo, calcedônia, sílica amorfa). O ferro liberado, vai dar origem a goethita que permanece no perfil, cimentando a matriz

superficial, formando crostas, canga ou ainda concreções oolíticas.

A serpentina I resiste um pouco mais que a II, porém em função da ação intempérica, segue o mesmo caminho, formando nontronita e com tendência final a formação de goethita, que aparece nos estágios finais da alteração. A serpentina III, bem mais resistente, também se altera, porém seus produtos de alteração são de difícil observação; tende a desaparecer nos estágios finais da alteração sem deixar resíduos visíveis.

A clorita é muito resistente à alteração supérgena; permanece praticamente intacta até os estágios mais avançados da ação intempérica; provavelmente sofre dissolução, pois não é encontrada no horizonte superficial.

A magnetita e a cromita também se conservam, sofrendo apenas oxidações e corrosões parciais, liberando algum hidróxido de ferro. Ambas se concentram residualmente nos estágios mais alterados, pois são encontrados como minerais residuais no solo (principalmente junto à areia aluvionar da planície); parte provavelmente forma núcleos das concreções oolíticas, tão comuns no horizonte superficial.

Os carbonatos e a brucita sofrem rápida dissolução, desaparecendo já no início da alteração.

O quartzo, na forma cristalina, microcristalina e amorfo, sofre dissolução e reprecipitações; aparece preenchendo fraturas e fissuras da rocha e é formado por neogênese a partir de: hidrólise de serpentinas e nontronitas; a partir de soluções provenientes do platô; e dos horizontes a montante. Essas soluções silicosas são responsáveis também pela formação de "box work",

que chega a permanecer (juntamente com o silexito) residualmente até o horizonte superficial.

Ao se comparar a evolução supérgena das rochas ultrabásicas de São João do Piauí com as rochas ultrabásicas de outras regiões do Brasil e do mundo, em climas semelhantes ou não, observa-se que a formação de esmectitas através da alteração supérgena de rochas ultrabásicas é um processo predominante em climas pouco agressivos, como descrito por De Kimpe e Zizka, 1973, no depósito de Asbestos (Canadá).

Em climas tropicais com estações contrastadas o processo geral, dominante na alteração dos maciços ultrabásicos é a laterização, como verificado:

- no Brasil como por exemplo o Estado de Goiás: (Godoy 1968, Andrade e Botelho 1974, Berbert 1977 e 1978, Vasconcelos et al. 1973); Niquelândia (Pecora 1944, Pecora e Barbosa 1944, Araújo et al. 1972, Barbosa 1968, Costa 1970, Schmaltz et al. 1976); Barro Alto (Figueiredo et al. 1972 e 1975, Melfi 1974, Souza 1973, Stache 1974); Santa Fé (Barbour 1976, Lessa Sobrinho et al. 1971, Lages et al. 1976, Oliveira 1980); Serra Água Branca (Lages et al. 1976, Justo 1973) e Morro do Engenho (Chaban e Santos 1973, Lages et al. 1976); em Minas Gerais: Morro do Níquel (Griffon e Richfer 1976, Langer 1969, Santivanez 1965, Trescases e Oliveira 1978); Liberdade e Ipanema (Ferran 1974, Lages et al. 1975 e 1976, Esson e Santos 1978).

- em outras partes do mundo: Cuba (De Vletter, 1955); Venezuela (Jurkovic, 1963); Etiópia (Clark, 1978); Porto Rico (Schellmann, 1976); África do Sul (De Waal, 1971); Austrália (Zeissink, 1969 e 1971); Nova Guiné (Bonifas e Millot, 1955; Davies, 1969; Perci

val, 1964); Filipinas (Santos-Ynigo, 1964) e Madagascar Schellmann, 1976).

Sob climas tropicais a formação de nontronitas, como em São João do Piauí, é possível, porém apenas em meios mal drenados e restrita às porções basais dos perfis, como em Bornéu (Eswaram e Sys, 1972); na Indonésia (Kühnel et al., 1978); Nova Caledônia (Trescases, 1975) e em outras localidades.

O tipo de alteração que ocorre em São João do Piauí, não encontra semelhanças entre as alterações citadas, devido as condições climáticas extremas (de aridez) a que foi submetida.

A Figura 12 sintetiza a trajetória e o destino principal de cada mineral no decorrer da alteração supérgena.

5. - CONCLUSÕES

Do estudo da evolução mineralógica nas fácies de alteração, podemos concluir que:

- Toda serpentina se altera em nontronita.
- O quartzo é supérgeno; ocorrem silicificações descendentes que chegam a constituir níveis de silexito nos saprolitos, principalmente na porção média das encostas.
- Parte desse quartzo é originário do silcrete.
- A cimentação de óxidos de ferro nos blocos transportados para as partes baixas da topossequência levam a formação de canga.
- A mineralogia de cada fácies não depende da posição na topossequência; as diferenças entre os perfis nas diferentes posições topográficas restringem-se a: silicificação variável e desenvolvimento maior ou menor de cada fácies.

FIG. 12 - QUADRO DE FILIAÇÕES MINERALÓGICAS

ROCHA FRESCA	ROCHA ALTERADA	SAPROLITO GROSSEIRO	SAPROLITO ARGILOSO	HORIZONTE SUPERFICIAL
SERPENTINA	I + Serpentina I+(Óxido de Fe)	Serpentina I + Oxido de Fe+(Esmectita)	[Esmectita Quartzo (Goethita)	+ Goethita + Quartzo
	II + Serpentina II +(Ox. de Fe)+(Esmectita)	(Serpentina II)+Quartzo +Esmectita+(Ox.de Fe)	+ Esmectita + Quartzo (Goethita)	+ Goethita + Quartzo
	III+ Serpentina III	+ Serpentina III	+ ----	+ ----
CLORITA	+ Clorita	+ Clorita	+ Clorita	+ ----
BRUCITA	+ ----	+ ----	+ ----	+ ----
MAGNETITA	+ Magnetita	+ Magnetita (oxidada)	+ Magnetita (oxidada)	+ Magnetita (oxidada)
CROMITA	+ Cromita	+ Cromita (corroída)	+ Cromita (corroída)	+ Cromita (corroída)
CARBONATOS	+ (Carbonatos)	+ (Carbonatos)	+ ----	+ ----
	Quartzo	+ Quartzo	+ Quartzo	+ Quartzo

C A P Í T U L O V

EVOLUÇÃO GEOQUÍMICA

1. - INTRODUÇÃO

Neste capítulo a evolução da alteração é abordada do ponto de vista químico. Os dados obtidos através das análises químicas são apresentados e interpretados nas formas de porcentagens ponderais e porcentagens volumétricas, métodos usuais e amplamente utilizados na bibliografia especializada (Millot e Bonifas, 1955; Trescases, 1975; Oliveira, 1980).

Os dados ponderais exprimem os valores percentuais dos óxidos dos elementos na amostra e permitem avaliar a evolução de cada elemento no decorrer da alteração. Essa avaliação, no entanto, só é possível em termos relativos, pois o aumento de teor de um elemento de uma determinada fácies de alteração para outra não é necessariamente devido a um ganho real do elemento, pois pode refletir apenas a consequência da perda de um outro (efeito da soma constante). Os dados volumétricos, obtidos através da multiplicação dos dados ponderais pela densidade aparente, indicam as variações absolutas dos teores dos elementos por unidade de volume. A análise e interpretação destes dados mostram as perdas e ganhos reais de elementos entre uma amostra e outra e permitem estabelecer uma escala de mobilidade absoluta dos elementos.

2. - DADOS PONDERAIS

Os dados ponderais foram obtidos através das análises

químicas de amostra total e de frações granulométricas representativas das diferentes fácies de alteração. Foram dosados SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , NiO , MnO_2 , CoO e CuO . Na Tabela 11 são apresentados os valores que indicam a composição química média de cada fácies de alteração. Os valores correspondentes à fácies "horizonte superficial", foram fornecidos pela Cia. Vale do Rio Doce S.A., sendo aqui utilizados apenas em termos comparativos, pois desconhecemos como foram obtidos.

A hidratação, representada pela perda ao fogo, apresenta valores em torno de 11% na rocha fresca, conservando este teor até a fácies saprolito grosseiro. Na passagem para a fácies saprolito argiloso ocorre leve aumento de teor, para a partir daí sofrer forte queda na fácies horizonte superficial. Tal comportamento é explicado pela presença de H_2O^+ já nos minerais da rocha fresca, serpentina e brucita e encontra-se também nos principais minerais de origem supérgena como a esmectita e a goethita. De difícil explicação é a forte queda de teor de H_2O^+ na cobertura superficial, já que parece não ocorrer neste nível a passagem goethita-hematita verificada por Oliveira, 1980, nas alteritas niquelíferas de Santa Fé. Porções dos saprolitos que se apresentam intensamente silicificadas também mostram acentuada queda nos teores médios de água.

A sílica apresenta uma quase conservação relativa ao longo do perfil de alteração, pois partindo de teores médios de 41% na rocha, passa a 42% nos saprolitos, concentrando-se na fácies cobertura superficial, onde atinge teores médios de 53%. As fácies saprolíticas possuem porções bastante silicificadas, com teores médios de 70%, mostrando fortes concentrações de sílica

TABELA 11 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA (% EM PESO) DAS FÁCIES DE ALTERAÇÃO

FÁCIES	Perda ao fogo	Sílica Total	Sílica		MgO	Fe ₂ O ₃ *	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO	CoO	CuO	Nº de Amostras
			Quartzo	Solúvel									
Horizonte Superficial	6,3	52,7	-	-	0,9	27,6	-	-	-	0,53	0,10	0,15	05
Saprolito Argiloso	12,1	41,7	2,5	39,2	6,7	24,0	12,59	0,50	0,47	1,60	0,06	0,09	12
Saprolito Argiloso (Silicif.)	6,4	72,2	18,0	54,2	3,3	13,3	2,73	0,58	0,15	1,04	0,03	0,07	16
Saprolito Grosseiro	11,1	42,8	3,6	39,2	17,0	21,1	5,08	0,61	0,33	1,98	0,05	0,09	16
Saprolito Grosseiro (Silicif.)	6,3	68,0	15,8	52,2	9,3	13,0	2,22	0,56	0,15	0,41	0,02	0,03	11
Rocha Alterada	11,6	41,0	2,1	38,9	31,6	13,6	1,72	0,32	0,15	0,82	0,02	0,03	17
Rocha Fresca	11,2	42,1	1,2	40,9	32,8	13,4	0,97	0,21	0,15	0,50	0,02	0,01	02

(*) - Fe total como Fe₂O₃

em zonas localizadas do perfil de alteração. O grande acúmulo de sílica mascara o comportamento relativo dos outros elementos que se apresentam com teores inexpressivos nestas zonas silicificadas.

Quanto ao MgO , é perfeitamente caracterizável sua lixiviação e conseqüente perda relativa. Apresenta acentuada diminuição do teor já na passagem da rocha alterada para o saprolito grosseiro, que continua até os horizontes mais superficiais, onde atinge valores médios de 0,9%.

A intensa e contínua lixiviação do MgO ocorrendo paralelamente a quase conservação da sílica, faz com que a razão SiO_2/MgO aumente com o progresso da alteração. De acordo com Pedro e Bittar (1966) essa razão é um parâmetro indicativo das condições de drenagem, sendo que, o aumento da razão SiO_2/MgO , como acontece aqui, indica que a alteração ocorreu em condições de drenagens restritas.

O Fe_2O_3 mostra nítida concentração relativa nas passagens das rochas para os saprolitos e destes para a cobertura superficial, evidenciando seu forte caráter residual. O enriquecimento é maior nos estágios iniciais, passando de 13% na rocha para 22% no saprolito. Os maiores teores, encontrados na cobertura superficial, atingem valores de 27%.

A alumina sofre, de um modo geral, um pequeno enriquecimento relativo; porém, em algumas partes do perfil observam-se valores anormalmente altos para o tipo de rocha mãe existente. A alumina, com valores da ordem de 1% nas rochas, atinge valores da ordem de 5% no saprolito grosseiro e 12% no saprolito argiloso. Esses altos valores poderiam ser explicados por possível pre

sença de um tipo diferente de rocha mãe, com porções feldspáticas ou com clinopiroxênios, ou migração do Al a partir do material a montante e posterior acumulação em determinados níveis. O conteúdo mais elevado do Al em amostras que concomitantemente contêm anfibólios favorece a primeira hipótese, já que porções de rochas gabróides podem aparecer disseminadas na massa serpentina (relatório da companhia).

O óxido de cromo sofre enriquecimento relativo, provavelmente devido à maior estabilidade da cromita face aos processos supérgenos. De 0,25% na rocha alterada, chega a 0,60% em média nos saprolitos; os teores caem levemente em direção ao topo do perfil, porém este elemento se faz presente até o horizonte superficial.

O MnO_2 comporta-se residualmente, partindo com teores médios de 0,15% nas rochas, passa a 0,33% no saprolito grosseiro, atingindo teores máximos no saprolito argiloso com até 0,47%.

Os óxidos de CoO e CuO apresentam comportamentos semelhantes ao do MnO_2 , isto é, forte caráter residual, com concentrações máximas no horizonte superficial.

a) O Comportamento do Níquel

A Tabela 12 mostra os teores médios de níquel nas diferentes fácies em cada posição na toposequência.

O NiO sofre um processo de acumulação relativa contínuo à medida que a alteração avança, apresentando aproximadamente a mesma tendência dos óxidos dos elementos residuais.

Os teores se apresentam relativamente altos já na rocha alterada, valores médios de 0,50%, que de um modo geral au

TABELA 12 - TEORES DE NÍQUEL DAS DIFERENTES FÁCIES NAS
DIVERSAS POSIÇÕES NA TOPOSSEQUÊNCIA

Posição Fácies Top.	PLATÔ	TOPO	MEIO	BASE	PLANÍCIE
Horizonte Superficial	-	-	0,39-1,30	-	0,25
Saprolito Argiloso	0,28-0,62	-	1,04-2,72	0,84	1,23-1,45
Saprolito Argiloso (Silicif.)	0,10-0,51	0,26-0,88	0,42-5,41	-	0,48-0,96
Saprolito Grosseiro	0,54	0,37	1,41-2,15	1,03-6,04	0,94-1,39
Saprolito Grosseiro (Silicif.)	0,67	-	0,15-0,25	0,28	0,29-1,33
Rocha Alterada	0,41	0,24-0,30	0,38-1,72	0,41-3,56	0,56-0,85
Rocha Fresca	-	-	0,55	0,44	-

mentam ainda mais nos saprolitos, para a partir daí mostrar ac
tuada queda no horizonte superficial.

No platô e no topo das encostas do maciço, o níquel, apesar de mostrar essa tendência geral de acumulação, permanece com teores baixos, chegando a apresentar valores ainda menores que os da rocha fresca.

Os maiores teores em níquel são encontrados nas encos
tas. Na posição de meio de encosta, as maiores concentrações si
tuam-se nos saprolitos onde os teores atingem valores de até 5,4% NiO. Na base das encostas as concentrações niquelíferas "descem" um pouco mais no perfil: as fácies mais enriquecidas relativamen
te são a rocha alterada e o saprolito grosseiro, onde os teores chegam a atingir 6,0%.

Na planície, a exemplo dos perfis de meio da encosta, as maiores concentrações situam-se nos saprolitos, porém os teo
res apresentados são em geral mais baixos, com um máximo de 1,4% no saprolito argiloso.

b) Nível Silicificado

O perfil de alteração na porção média das encostas apresenta bolsões lenticulares de material extremamente silici
ficado (silexito), localizado imediatamente abaixo do horizonte superficial (Fig. 7). As análises químicas deste tipo de mate
rial foram separadas da análise do perfil como um todo, por se
tratar de um nível incomum em perfis de alteração de serpentin
itos. A Tabela 13 mostra a composição química de uma amostra re
presentativa dos silexitos.

TABELA 13

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE UMA AMOSTRA DE SILEXITO

FÁCIES	P.F.	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO	CoO	CuO	Σ
Silexito	0,8	80,6	0,8	14,7	1,13	0,79	0,17	0,30	0,02	0,04	99,35

Trata-se de um nível constituído por material sapro lítico intensamente silicificado. Os elementos principais que compõem este material são a sílica, que contribui com cerca de 80%, e o ferro que contribui com cerca de 15%. O restante dos elementos presentes possuem teores muito baixos.

3. - ANÁLISE DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

A partir da análise das frações granulométricas, podemos obter informações a respeito dos constituintes mineralógicos do perfil e de suas respectivas composições químicas (ver Capítulo II).

À medida em que o processo de alteração se desenvolve, os minerais menos resistentes sofrem fragmentação mecânica e vão se acumular nos finos, ou sofrem alteração química e então seus neoformados é que irão compor as frações menores. Já os minerais mais resistentes vão se concentrar nas frações mais grosseiras.

Para o estudo das frações granulométricas, foram realizadas análises químicas de 4 frações (A - $\phi > 2,0\text{mm}$; B - $2,0\text{mm} < \phi < 0,25\text{mm}$; C - $0,25\text{mm} < \phi < 0,062\text{mm}$; D - $\phi < 0,062\text{mm}$) das amostras L 6-2, L 7-4, L 6-8 e L 13-5, representativas de 4 estágios de alteração. As composições químicas e granulométricas destas amostras são apresentadas na Tabela 14.

TABELA 14 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS (% EM PESO)

FÁCIES	FRAÇÕES	H ₂ O ⁺	SÍLICA TOTAL	S Í L I C A		MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO	CoO	CuO	MnO ₂ /CoO	Σ
				Qz	SOL										
SAPROLITO ARGILOSO SILICIF.	L13-5 A - (51)*	6,1	68,7	5,9	62,8	6,6	14,5	2,91	0,29	0,24	0,62	0,05	0,01	4,8	100,02
	L13-5 B - (21)	7,6	51,1	3,8	47,3	6,2	24,3	7,43	1,73	0,52	1,18	0,11	0,03	4,7	100,70
	L13-5 C - (12)	10,9	43,2	1,4	41,8	8,7	30,0	4,68	0,78	0,28	1,68	0,06	0,03	4,6	100,31
	L13-5 D - (16)	11,8	41,8	1,0	40,8	12,8	27,7	3,78	0,16	0,13	1,62	0,03	0,03	4,3	100,03
	L13-5 TOTAL	8,1	57,6	4,1	53,5	7,8	20,2	4,31	0,63	0,29	1,02	0,06	0,02	4,8	100,29
SAPROLITO ARGILOSO	L 6-8 A - (23)	7,2	60,5	1,8	58,7	8,7	18,6	4,08	0,44	0,16	0,82	0,03	0,06	5,3	100,59
	L 6-8 B - (07)	8,6	56,9	4,7	52,2	6,6	20,2	5,40	0,54	0,20	1,23	0,04	0,08	5,0	99,79
	L 6-8 C - (30)	9,5	50,3	12,5	37,8	3,4	28,0	5,02	1,36	0,27	1,96	0,05	0,09	5,4	99,95
	L 6-8 D - (40)	10,6	48,3	8,5	39,8	4,4	32,3	0,98	0,27	0,20	2,09	0,04	0,10	5,0	99,28
	L 6-8 TOTAL	9,3	52,3	7,9	44,4	5,2	32,3	3,21	0,65	0,21	1,90	0,04	0,08	5,2	99,81

TABELA 14 (Cont.)

FÁCIES	FRAÇÕES	H ₂ O ⁺	SÍLICA TOTAL	S Í L I C A		MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO	CoO	CuO	MnO ₂ /CoO	Σ
				Qz	SOL										
SAPROLITO GROSSEIRO	L7-4 A - (30)	5,8	42,2	0,6	41,6	20,8	26,0	3,40	0,93	0,13	1,05	0,02	0,05	6,5	100,38
	L7-4 B - (16)	11,7	39,9	0,9	39,0	20,3	21,1	4,31	1,45	0,20	1,08	0,03	0,04	6,6	100,11
	L7-4 C - (20)	11,1	43,8	0,9	42,9	20,5	17,0	4,53	1,54	0,26	1,33	0,04	0,05	6,5	100,15
	L7-4 D - (34)	11,4	42,5	0,2	42,3	20,5	20,3	1,83	0,27	0,18	1,58	0,03	0,06	6,0	98,65
	L7-4 TOTAL	9,7	42,2	0,6	41,6	20,5	21,4	3,23	0,91	0,18	1,29	0,03	0,05	6,0	99,49
ROCHA ALTERADA	L6-2 A - (56)	10,1	49,8	2,6	47,2	21,9	13,3	3,93	0,24	0,10	0,48	0,01	0,08	10,0	99,94
	L6-2 B - (14)	10,2	33,9	2,5	31,4	29,2	18,6	5,02	0,32	0,29	0,76	0,04	0,06	7,2	98,39
	L6-2 C - (08)	12,0	40,2	1,2	39,0	24,2	15,4	4,15	1,05	0,23	0,84	0,03	0,07	7,6	98,17
	L6-2 D - (22)	12,0	42,3	1,2	41,1	21,6	21,0	2,15	0,19	0,12	0,73	0,03	0,10	4,0	100,22
	L6-2 TOTAL	10,6	45,1	2,1	43,0	23,0	15,9	3,70	0,30	0,13	0,60	0,02	0,08	6,5	99,43
ROCHA FRESCA	L - 2 TOTAL	10,2	45,1	1,2	43,9	31,8	13,1	1,36	0,12	0,11	0,44	0,02	0,01	5,5	102,26

* - Os números entre parêntesis correspondem à porcentagem da fração granulométrica considerada.

A distribuição dos minerais nas diferentes frações no decorrer da alteração é a seguinte: as serpentinas são constituintes de todas as frações, apresentando-se mesmo nas frações mais finas, extremamente fragmentadas. O quartzo, sob as mais variadas formas, concentra-se nas frações maiores e tende a desaparecer nas frações finas. A goethita, magnetita e cromita estão concentradas nas frações intermediárias e finas, associadas à serpentina ou, predominantemente, como fragmentos minerais independentes. As argilas esmectíticas compõem principalmente as frações menores e praticamente inexistem nas frações acima de 2,0mm.

A amostra L 6-2 é de rocha alterada, um tanto evoluída, constituída em sua maior parte por fração grosseira, porém com contribuição de 30% de fração fina. A fração grosseira apresenta composição semelhante à da rocha fresca (L 2), enquanto que as frações menores, apesar de serem quimicamente parecidas, apresentam conteúdo em ferro um pouco maior. O teor em NiO, bem como de alguns elementos residuais (Al, Cu e Cr), já é bem mais elevado do que na rocha fresca, principalmente nas frações C e D. O MnO_2 e o CoO apresentam comportamento correlacionável, sofrendo leve concentração em relação à rocha fresca.

A amostra 7-4, representante da fácies saprolito grosso, é pouco evoluída, apresentando teores de MgO ainda relativamente altos. As frações se apresentam distribuídas de maneira mais igual, com as duas frações mais grosseiras representando 50% da amostra, evidenciando acentuada ação mecânica, visto que, as quatro frações são quimicamente muito parecidas e ainda de composição semelhante às amostras de rocha fresca e alterada. Destacam-se ainda nesta fácies a correlação entre os óxidos de

Mn e Co, intimamente associados e o comportamento do NiO, que além de se apresentar fortemente concentrado em relação às rochas frescas e alteradas em todas as frações, apresenta ganhos ainda maiores nas duas frações mais finas. O NiO associado às frações grosseiras representa níquel associado às serpentinas, enquanto que o níquel presente nas frações finas está associado às esmectitas.

O saprolito argiloso, representado pela amostra L6-8 é bem evoluído. Nota-se nesta fácies que a fração grosseira diminui sensivelmente em quantidade, refletindo o avanço da alteração. As frações apresentam diferenças bem mais sensíveis entre si; o teor em MgO cai drasticamente em relação à fácies anterior, resultado da destruição das serpentinas e as frações menores são ainda mais pobres. Sua presença em teores da ordem de 3% na fração mais grosseira deve-se provavelmente às serpentinas ainda não alteradas; nas mais finas o magnésio está associado à pouca serpentina que resta e às esmectitas. As frações C e D apresentam teores bem mais altos em ferro, porque nelas se concentram as nontronitas; podem conter serpentina em pequenas quantidades. A sílica está sempre presente, com leve concentração nas frações grosseiras. O comportamento dos óxidos de Mn e Co, também nessa fácies, apresenta fortes semelhanças, com concentração preferencialmente nas frações B e C. O NiO continua apresentando teores elevados e as frações menores são as mais enriquecidas. Nas frações grosseiras a presença desse elemento está ligada principalmente à serpentina; nas frações finas está associada essencialmente à nontronita, abundante nesta fácies.

A amostra L13-5 representa a fácies saprolito argiloso

silicificado. O conteúdo argiloso encontra-se cimentado por fi na "rede" de sílica, de modo que 51% do material é encontrado na fração acima de 2,0mm. Nas frações intermediárias e finas concentram-se as argilas esmectíticas; os difratogramas de raio-x indicam predominância de esmectita e pequenas quantidades em goethita e serpentina. A análise das frações granulométricas dessa amostra sugerem, à primeira vista, uma inversão na tendência geral da alteração, pois as frações mais grossas têm menos MgO. Isso é devido ao fato dessas frações concentrarem a sílica livre e, desta forma, o teor de todos os outros elementos parece sempre muito baixo e tanto mais baixo quanto mais silicificado é a amostra. O Fe_2O_3 é encontrado em quantidades significativas em todas as frações, mostrando enriquecimento nas frações menores. Nas frações mais grossas aparece compondo as serpentinas e principalmente na magnetita. Nas frações finas está associado principalmente aos argilo-minerais esmectíticos e à pouca goethita presente.

Quanto aos elementos menores, o Al e o Cr se concentram nas frações intermediárias, B e C, de todas as fácies, representando o tamanho dos grãos de cromita e das concreções. Nas frações finas ambos estão associados à goethita e, principalmente o Al, às esmectitas. Os óxidos de Mn e Co mostram correlação em todas as frações, em todas as fácies. Isso indica que desde o início da alteração eles estão associados aos mesmos minerais. Ambos concentram-se nas frações B e C, correspondentes ao tamanho das concreções. Liberados do retículo da serpentina, compõem concreções de asbolito que são estáveis até os níveis superiores do perfil.

a) Composição Química das Esmeclitas

Na análise da composição química das frações finas de todas as fácies de alteração e em especial da fácies mais alterada (saprolito argiloso), observa-se que nessas frações, cujo mais importante componente mineralógico é a esmeclita, a composição química é constituída de altos teores em ferro e níquel. Aliado a esses dados, analisando-se a composição química da amostra L4-8, um saprolito argiloso composto essencialmente de esmeclita (Tabela 15), nota-se que sua composição possui baixos teores de MgO, altos teores de SiO₂ e Fe₂O₃, e alto teor em níquel. Assim, conclui-se que o principal produto da alteração supérgena dos serpentinitos de São João do Piauí é uma nontronita níquelífera.

TABELA 15

COMPOSIÇÃO QUÍMICA REPRESENTATIVA DAS ESMECLITAS

FÁCIES	AMOSTRA	H ₂ O ⁺	SiO ₂ TOTAL	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	MnO ₂	Σ
Saprolito Argiloso	L 4-8	10,5	35,1	7,7	36,1	6,60	0,90	2,64	0,33	99,87

4. - DADOS VOLUMÉTRICOS

Nas amostras alteradas em que a estrutura da rocha original é conservada, é possível calcular a quantidade, em peso, de cada óxido, por unidade de volume e compará-la com a quantidade correspondente no mesmo volume de rocha fresca. Esses dados, expressos em gramas de óxido por 100 cc de amostra, permitem avaliar as perdas e ganhos reais nas diferentes fácies de alteração de um perfil, em relação à rocha fresca. Desse modo, obtém-se o balanço geoquímico da alteração.

Fig. 13 — BALANÇO A ISOVOLUME DE SiO_2

Fig. 14 — BALANÇO A ISOVOLUME DE MgO

a) Balanço Isovolumétrico do Perfil de Alteração

As Figuras 13, 14 e 15 apresentam as variações dos teores absolutos dos elementos maiores, Si, Mg e Fe, dado em gramas do óxido por 100 cc, em função de um parâmetro indicativo do grau de alteração, que é a densidade aparente. Entre os outros elementos dosados, por ser objeto deste estudo, o NiO também será discutido em detalhe (Fig. 16). Na Tabela 16 são apresentadas as quantidades absolutas médias de todos os elementos dosados em cada uma das fácies de alteração.

O MgO apresenta uma evolução caracterizada por perda rápida e contínua, passando de teores da ordem de 70g/100 cc na rocha fresca a valores de 6g/100 cc no saprolito argiloso silicificado. Nos níveis silicificados dos saprolitos grosseiro e argiloso, teores baixos de MgO, indicando estágio avançado de alteração, correspondem a densidades aparentes elevadas, causadas pela silicificação (Fig. 14).

A sílica apresenta perda menos acentuada que o MgO. A quantidade absoluta de sílica na rocha fresca é da ordem de 107g/100 cc e seus teores médios mais baixos, presentes na fácies saprolito argiloso, não são inferiores a 65g/100 cc. Os perfis, de uma maneira geral, apresentam perda mais acentuada de sílica na passagem da rocha fresca para a rocha alterada e menos acentuada no saprolito grosseiro e saprolito argiloso. Os níveis de saprolito grosseiro e saprolito argiloso silicificados evidenciam forte importação de SiO₂, que não pode ser explicada apenas pelas perdas discretas dos níveis imediatamente superiores. Assim, parece que o silcrete dos topos é a principal fonte para essas concentrações.

TABELA 16 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DAS FÁCIES DE ALTERAÇÃO
(DADOS VOLUMÉTRICOS)

	Sílica Total	Sílica		MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO	CoO	CuO	Nº de Amostras
		Quartzo	Solúvel									
Saprolito Argiloso	65,0	3,6	61,4	10,8	37,4	19,67	0,77	0,79	2,54	0,09	0,14	12
Saprolito Argiloso (Silicif.)	130,8	36,0	94,8	6,0	21,3	4,71	1,04	0,28	1,93	0,06	0,13	16
Saprolito Grosseiro	71,3	6,5	64,8	28,1	31,6	8,61	0,91	0,49	3,21	0,07	0,15	14
Saprolito Grosseiro (Silicif.)	134,5	34,7	99,8	17,1	25,0	4,27	1,77	0,27	0,78	0,04	0,07	11
Rocha Alterada	79,2	4,3	74,9	60,8	26,6	4,24	0,32	0,26	1,52	0,03	0,05	17
Rocha Fresca	106,8	2,9	103,9	70,3	31,5	2,31	0,48	0,34	1,16	0,05	0,02	02

Fig. 15— BALANÇO A ISOVOLUME DE Fe_2O_3

A concomitante perda intensa de MgO e menos acentuada perda de sílica no decorrer da alteração, reflete a dissolução incongruente da serpentina com formação da nontronita.

A importação maciça de sílica nos perfis não acontece em jazidas lateríticas. No depósito do Vermelho, Carajás, por exemplo, embora exista também um poderoso nível de silcrete capeando o topo do maciço, que evidencia um processo pretérito de concentração de sílica análogo ao de São João do Piauí, os perfis subjacentes mostram total dessilicificação (Bernardelli et al., 1983).

Os teores absolutos de Fe_2O_3 permanecem aproximadamente constantes ao longo do perfil de alteração, com discreto incremento nas fácies saprolito grosseiro e saprolito argiloso, atingindo ganhos máximos da ordem de 50%. Esse enriquecimento absoluto é, provavelmente, devido à iluviação da goethita a partir dos níveis superiores. Uma certa compactação observada na fácies saprolito argiloso pode também dar conta desse enriquecimento absoluto.

O níquel apresenta um comportamento paralelo ao do ferro: enriquecimento absoluto nas fácies saprolito grosseiro e saprolito argiloso e relativa constância na passagem rocha fresca a rocha alterada.

O paralelismo entre o comportamento do NiO e do Fe_2O_3 , sugere uma íntima associação desses elementos e dá suporte à hipótese do níquel estar no retículo da goethita. No entanto, os diagramas mostram um enriquecimento absoluto maior para o NiO que para o ferro. Esse excedente de níquel que não pode ser explicado apenas pela iluviação da goethita deve-se, provavelmente,

Fig. 16 — BALANÇO A ISOVOLUME DE NiO

te, à contribuição de soluções descendentes ricas em níquel. O alumínio apresenta enriquecimentos absolutos enormes, passando de 2,31g/100 cc na rocha fresca para teores de 19,67g/100 cc no saprolito argiloso; ganhos de tal monta corroboram a hipótese da existência de variações litológicas. Os óxidos dos elementos Mn e Co mostram forte correlacionamento e apresentam enriquecimentos absolutos na fácies saprolito argiloso. Nessa fácies tornam-se frequentes as concreções de asbolitos, ricas em Mn e Co; provavelmente o CuO está associado às concreções, pois esse elemento também se concentra no saprolito argiloso.

b) Perdas e Ganhos por Setor na Topossequência

Nesse item é analisado o comportamento dos elementos que apresentam alguma mobilidade no perfil de alteração (SiO_2 , MgO e NiO), em cada setor da topossequência, visando obter informações a respeito das contribuições laterais e verticais. Assim, foram calculadas as perdas e ganhos desses elementos nos 5 sítios topográficos anteriormente definidos: platô, topo de encosta, meio de encosta, base de encosta e planície (Tabela 17).

A sílica sofre acentuado ganho no platô, onde, em praticamente todo o perfil, o balanço é claramente favorável à importação de sílica, apesar de os estágios iniciais da alteração apresentarem leve perda. No topo das encostas, predominam ganhos discretos em sílica. No meio e na base das encostas ocorre importação de sílica. Na planície a evolução se dá por perdas discretas de sílica. Em um computo geral, ocorre importação intensa de SiO_2 no platô, no meio e na base das encostas.

Considerando-se que no decorrer da alteração grande

TABELA 17

BALANÇO GEOQUÍMICO DA SiO_2 , MgO E NiO , POR SETOR DA TOPOSSEQUÊNCIA
(% DE GANHOS (+) E PERDAS (-) EM RELAÇÃO À ROCHA FRESCA)

	PLATÔ	TOPO	MEIO	BASE	PLANÍCIE
SA	-43	-	-40	-42	-33
SA (SI)	+37	+28	+32	-	-27
SG	+8	+5	-39	-44	-33
SG (SI)	+63	-	-46	+35	+1
RA	+31	-28	-30	-38	-21

 SiO_2

	PLATÔ	TOPO	MEIO	BASE	PLANÍCIE
SA	-95	-	-84	-94	-75
SA (SI)	-97	-95	-87	-	-82
SG	-50	-51	-74	-54	-48
SG (SI)	-80	-	-81	-66	-72
RA	-32	+2	-8	-36	-28

 MgO

	PLATÔ	TOPO	MEIO	BASE	PLANÍCIE
SA	-48	-	+202	+5	+103
SA (SI)	-43	-5	+345	-	-14
SG	-1	-28	+155	+306	+68
SG (SI)	+30	-	-62	+44	-19
RA	-17	-51	+34	+190	+13

 NiO

parte da sílica dissolvida das serpentinas vai compor as nontro-
nitas neoformadas, a sílica excedente do processo da alteração
não é suficiente para explicar o enorme ganho em sílica apresen-
tado nesses perfis. Portanto, é necessário outra fonte de sílica
além dos próprios perfis de alteração, para suprir esse exceden-
te. Essa fonte é o silcrete, produto residual dos antigos per-
fis de alteração já removidos, existentes no platô e que susten-
ta a topografia. As águas meteóricas, penetrando nesse silcrete
que é poroso, saturam-se de sílica, descem e vão por percolação
enriquecer os perfis do platô, topo e meio das encostas, atingin-
do parcialmente a base das encostas, mas não os perfis de planí-
cie. Esse é um fenômeno de silicificação atual, concomitante com
a esmectitização. A silicificação não atinge nem os setores mais
baixos da topossequência, nem as frentes de alteração dos per-
fis, com exceção do caso dos perfis de topo.

O MgO sofre perda violenta em todos os setores; anali-
sando a topossequência como um todo, observa-se que as diferen-
ças nas perdas absolutas de setor a setor são muito pequenas, po-
rém nas baixadas a perda é um pouco menos acentuada devido à me-
nor movimentação das águas.

Quanto ao níquel, no platô o balanço é nitidamente de
perda, apesar de apresentar pequeno ganho na base do perfil, pró-
ximo à frente de alteração. No topo das encostas ocorre intensa
perda de níquel em todas as fácies. O pouco desenvolvimento do
perfil, causado pela ação erosiva devida à forte inclinação das
vertentes, impossibilita a acumulação do níquel, favorecendo seu
movimento descendente para sítios topograficamente inferiores.
No meio das encostas as fácies saprolíticas são extremamente ri-

cas em níquel. A Tabela 17 mostra que o enriquecimento absoluto é substancialmente maior na fácies saprolito argiloso, onde mesmo as porções silicificadas são ricas em níquel. A base das encostas também apresentam forte enriquecimento, porém o níquel concentra-se nas fácies saprolito grosseiro e rocha alterada. Na planície os enriquecimentos absolutos são menos expressivos e o níquel se distribui por todo o perfil.

Na análise global da topossequência, observa-se que as perdas em níquel predominam no platô e no topo das encostas; os ganhos predominam no meio, base das encostas e na planície. Esse quadro mostra muito bem os movimentos laterais do níquel, sendo transferido dos níveis a montante para os níveis a jusante. No entanto, os ganhos apresentados parecem ser bem maiores que as perdas, o que sugere a hipótese de o enriquecimento nas encostas não se dar apenas a partir do níquel dos perfis atuais, a montante, mas também dos antigos perfis acima do silcrete e hoje erodidos.

A partir da análise dos dados volumétricos obtidos para cada óxido, temos condição de propor a seguinte escala de mobilidade relativa dos elementos do perfil de alteração desenvolvido em São João do Piauí: $Mg > Ni > Si > Co, Mn > Fe, Al, Cu, Cr$.

A escala aqui obtida não coincide exatamente com aquela apresentada por Trescases (1969) e Schevciw (1980) para alteração de rochas ultramáficas da Nova Caledônia e Piên (PR), respectivamente, que é a seguinte: $Ca(?) > Mg > Si \gg Ni > Mn, (Co?) > Al > Fe, Cr$. Também não é idêntica à escala proposta por Oliveira (1980), para a alteração das rochas ultramáficas de Santa

Fé (GO): $Mg > Si > Ni > Mn > Co, Al, Fe, Cr$.

Assemelhanças entre a escala aqui apresentada e as desses autores, reside na posição extrema do Mg de um lado (móvel) e do grupo, Fe, Al, Cr (residuais), do outro. A principal diferença é a inversão na ordem de mobilidade entre o Si e o Ni. Nas condições morfoclimáticas de evolução dos perfis no SE do Piauí a sílica apresenta caráter residual, mantendo-se no perfil. O Ni passa assim a ser o elemento mais móvel depois do Mg.

5. - CONCLUSÕES

Através dos dados obtidos no estudo geoquímico foi de finido o comportamento de cada elemento nos vários estágios da alteração, nas diferentes posições na topossequência.

Os cálculos das médias percentuais de cada fácies de alteração, mostram claramente o comportamento quantitativo de cada óxido, como segue:

- O magnésio apresenta caráter de alta mobilidade, com teores de crescentes em altas taxas com o avanço da alteração.
- A sílica apresenta-se com teores médios da ordem de 40% em todas as fácies, da rocha fresca ao saprolito argiloso. Os níveis silicificados do saprolito grosseiro e do saprolito argiloso mostram teores de sílica da ordem de 70%.
- Os elementos Fe, Cu, Co, Mn, Al e Cr apresentam caráter residual, ou seja, teores crescentes à medida que a alteração progride.
- O níquel apresenta comportamento mais complexo, com concentrações em diferentes níveis da alteração, dependendo da posição na

topossequência; porém a grosso modo mostra a mesma tendência dos óxidos dos elementos residuais.

Além disso, os dados ponderais mostram que a jazida em São João do Piauí, localiza-se nas encostas, sendo o platô e o topo não mineralizados.

As análises químicas das frações granulométricas, além de possibilitarem o detalhamento da distribuição dos elementos nos minerais, forneceram subsídios para a identificação da composição química do principal produto da alteração, as esmectitas. Trata-se de esmectitas ricas em ferro e com níquel, ou seja, de nontronitas níquelíferas.

Os cálculos isovolumétricos possibilitaram a quantificação das perdas e ganhos absolutos dos elementos no perfil e o estabelecimento de uma escala relativa de mobilidade. Assim, o magnésio é o elemento que apresenta maior perda, enquanto que aproximadamente 50% da quantidade inicial de sílica fica retida no perfil, combinada com o ferro, sob a forma de nontronita. Essa retenção de sílica e a evacuação intensa de MgO , ocorre em todos os sítios topográficos, do platô à planície.

Dentro do saprolito grosseiro e do saprolito argiloso, há níveis que evidenciam aporte absoluto de sílica proveniente, pelo menos em parte, do silcrete que capeia os perfis de platô.

- Os elementos residuais, Fe, Cu, Al e Cr não são mobilizados, permanecendo concentrados nos topos dos perfis, eventualmente compondo crostas. Podem sofrer transporte mecânico em direção aos sítios topograficamente inferiores e como constatado por Oliveira (1980) nos depósitos de Santa Fé, se acumulando nas

baixadas por coluvionamento.

- O ferro permanece no meio de alteração onde é liberado pela hidrólise dos minerais hipógenos. Parte substancial do ferro liberado numa primeira fase vai recombinar com a sílica, principalmente para a formação das nontronitas. Com a incipiente alteração das nontronitas, o ferro vai compor a goethita.
- O níquel apresenta-se relativamente móvel: é lixiviado dos níveis a montante e concentrado nos níveis a jusante. Nas fases iniciais da alteração o níquel encontra-se associado às serpentinas, nas fases mais avançadas está associado às nontronitas e à goethita.
- O níquel contido nos perfis mais baixos na toposseqüência é proveniente de:
 - níquel transportado proveniente dos antigos perfis pré-existents e já erodidos;
 - níquel trazido por aporte lateral, através de soluções aquosas, originário dos perfis localizados no platô e no topo das encostas;
 - níquel acumulado por aporte vertical, através da alteração do próprio perfil.

A escala de mobilidade dos elementos pode ser ordenada do seguinte modo: $Mg > Ni > Si > Co, Mn > Fe, Al, Cu, Cr$.

A análise conjunta dos dados geoquímicos permite estabelecer uma história evolutiva para o maciço de São João do Piauí. Assim, postula-se uma evolução supérgena em duas fases, iniciada pelo estabelecimento de perfis de alteração com forte acumulação de sílica na base, a exemplo do que teria acontecido

em grande parte dos maciços ultrabásicos brasileiros, como por exemplo, em Santa Fé (Oliveira, 1980), Carajás (Bernardelli et al., 1983), Barro Alto (Trescases e Oliveira, 1981) e Niquelândia (Oliveira e Trescases, 1982). Essa camada de silcrete assim formada protegeu o maciço da erosão e permitiu que ele se conservasse como relevo residual. Um segundo processo de alteração, controlado por condições climáticas sub atuais a atuais, estabeleceu-se sob o silcrete e nas bordas sem capeamento do maciço. Esse processo caracteriza-se por dois fenômenos: 1) hidrólise incongruente com formação de nontronita; 2) evolução lenta e incipiente da nontronita à goethita.

Concomitantemente a esses processos ocorre dissolução da sílica do silcrete do platô, transporte lateral e acúmulo nos níveis saprolíticos dos perfis das encostas sob forma de quartzo e calcedônia.

Assim a conservação e mesmo o acúmulo de sílica, aliado a teores de Fe_2O_3 não ultrapassando 50% nas fácies mais evoluídas, são dados que evidenciam a não ocorrência do processo de lateritização tão comum na evolução intempérica nos climas tropicais (Trescases, 1975 e Oliveira, 1980).

C A P Í T U L O V I

CONSIDERAÇÕES FINAIS E COMPARAÇÕES COM OUTRAS JAZIDAS

Neste capítulo serão retomados os principais aspectos relacionados aos dados mineralógicos e químicos e serão evidenciadas as características mais importantes da alteração. Considerações a respeito dos fatores que controlam a alteração supérgena de ultrabásicos serão efetuadas, bem como será estabelecida uma hipótese sobre a cronologia dos eventos, desde o "emplacement" do maciço até a elaboração dos perfis atuais enriquecidos em nontronitas níquelíferas.

Finalmente serão evidenciadas as particularidades que individualizam o depósito em relação a outros congêneres existentes no Brasil.

1. - A EVOLUÇÃO DA JAZIDA DE SÃO JOÃO DO PIAUÍ

a) Considerações Gerais

O complexo básico-ultrabásico de São João do Piauí encontra-se intrusivo no embasamento cristalino, mais especificamente na faixa de dobramentos do Riacho do Pontal, definido por Brito Neves (1975). Trata-se de um maciço do tipo alpino, de acordo com a classificação de Berbert (1977); pertence ao grande "serpentine belt" definido por Almeida (1967) e possui idade presumida entre 1000 - 1800 m.a. (Melfi et al., 1979). Sua constituição é basicamente de gabros e dioritos que envolvem um núcleo de dunitos fortemente serpentinizados. Com área ultrabásica de aproximadamente 6km², reservas estimadas da ordem de 2000010³t de minério e com teores médios de níquel da ordem de 1,57% (M.M.E., 1978), São João do Piauí é considerado no contexto brasileiro co

mo uma jazida de níquel laterítico de médio porte.

b) Paisagem

No sudeste do Piauí o maciço básico-ultrabásico destaca-se na paisagem, dominando o relevo aplainado das rochas encaixantes do embasamento cristalino. Com altitudes da mesma ordem do maciço estão presentes também as rochas sedimentares, formando cuestas e chapadas.

Topograficamente sua forma é de um morro ou domo único pouco dissecado. Seu topo é tabular, formando um platô que é cappeado por um nível extremamente silicificado de alguns metros de espessura, constituindo um verdadeiro silcrete. Esse silcrete encontra-se, atualmente, em parte alterado e em parte remanejado. As encostas apresentam-se ora íngrimes ora suaves, contendo áreas parcialmente deprimidas. As encostas suaves terminam em áreas de planície relativamente bem desenvolvidas. É sob a cobertura do silcrete, nas bordas erodidas do platô (encostas convexas e piemont) e na planície circunjacente que desenvolveram-se os perfis de alteração que hoje constituem a jazida.

c) Perfil de Alteração

Como pode ser observado na Figura 7, no platô, abaixo do silcrete que possui espessura variável de 2m a 6m, o perfil desenvolvido chega a possuir 20 metros de espessura e é extremamente silicificado. Nas áreas de topo das encostas os perfis são pouco espessos e também muito silicificados. Os perfis mais bem desenvolvidos são os situados a partir do meio das encostas, em direção à planície, onde chegam a atingir mais de 30 metros de espessura, constatados através de furos de sondagem, aprofundan

do alguns poços. A silicificação atinge as porções saprolíticas dos perfis de meio e base das encostas, não atingindo os perfis de planície. O perfil representativo de São João do Piauí é o seguinte:

- Rocha Fresca ou Pouco Alterada: serpentinito, duro, cinzento ou verde escuro.
- Rocha Alterada: serpentinito, coeso, pouco ou sem silicificação.
- Saprolito Grosseiro: friável, argiloso, com impregnações silicosas localizadas.
- Saprolito Argiloso: muito argiloso, com impregnações silicosas localizadas.
- Horizonte Superficial: nível remanejado, parcialmente coluvionar, contendo blocos de silcrete imersos numa matriz pulverulenta marrom-avermelhada.
- Silcrete: horizonte que capeia o platô, fortemente silicoso e endurecido; geralmente com blocos angulosos de tamanho variável (centimétricos-decimétricos), envolvidos por fino material ferruginoso e pulverulento marrom-avermelhado.

d) Evolução Mineralógica e Química

Quando se instala o processo de alteração, a rocha fresca, constituída essencialmente de minerais de serpentina, transforma-se em material nontronítico que se torna abundante a partir da passagem da fácies saprolito grosseiro a saprolito argiloso. Com o avanço do processo, ocorre uma discreta evolução das nontronitas em goethita, mineral que surge na passagem da fácies

saprolito grosseiro a saprolito argiloso e aumenta levemente em direção ao horizonte superficial.

Essas alterações mineralógicas ocorrem, quimicamente, com grande perda de magnésio que sofre forte diminuição já na fácies saprolito grosseiro e praticamente desaparece nos estágios finais da alteração; com permanência do ferro, que se acumula residualmente nas fácies mais alteradas e com acumulação absoluta de sílica em certos níveis saprolíticos. A sílica, que sofre dissolução através das águas meteóricas que penetram no silcrete do platô, vai precipitar na forma de quartzo e calcedônia nos horizontes saprolíticos dos perfis do platô, topo e meio das encostas. Com a lenta alteração das serpentinas, o níquel é liberado e vai associar-se às nontronitas; quando da discreta evolução destas para goethita, parte do níquel se associa a esse mineral. Entretanto, somente um processo de concentração relativa de Ni não é capaz de explicar os teores da ordem de 1,5-2,0% que o níquel apresenta nos níveis nontroníticos, dado que a passagem serpentina-nontronita se dá com eliminação apenas moderada de matéria.

e) Reconstituição Geral da Evolução

A semelhança das características do depósito de São João do Piauí com outros depósitos brasileiros (relevo, presença e posição do silcrete) permite imaginar que este maciço teve uma história evolutiva comparável à dos demais (Melfi et al., 1979), que é resumida como se segue.

Com o soerguimento do continente sul-americano no Cretáceo Superior, estabeleceu-se um longo período de erosão que ni

velou a paisagem brasileira sob a forma de um imenso peneplano, que foi designado por King (1956) como superfície Sul Americana. O relevo atual foi esculpido a partir dessa superfície, da qual subsistem vários testemunhos.

No Terciário Inferior, durante a fase de agradação da superfície Sul-Americana, a alteração meteórica das rochas ultrabásicas de São João do Piauí, conduziu à formação de perfis de alteração fortemente silicificados na base. Sobreveio um período mais úmido, ou, pelo menos, com melhor distribuição anual da precipitação (Braun, 1971; Moreira, 1977), sob influência do qual o processo de alteração foi mais intenso, tendo provavelmente até atingido características lateritizantes. Esta suposição é suportada pela existência de solos lateríticos terciários na região (Braun, 1971). Como resultado desse processo, o níquel concentrou-se nos perfis. Um novo levantamento do continente, no Terciário Superior, deu ensejo à retomada da erosão que desmantelou a superfície Sul Americana, tendo o nível de silcrete exercido um papel de protetor com relação à erosão. Assim, quando no Quaternário Inferior, a fase de agradação do ciclo Velhas elaborou uma nova superfície, a parte ultramáfica do maciço de São João do Piauí escapou ao nivelamento e restou como relevo residual, mais ou menos erodido nas bordas. A pequena planície que começa a se desenvolver ao redor do núcleo ultrabásico, bem como as áreas de base das encostas, apresentam restos erodidos do silcrete.

A alteração meteórica a partir do ciclo Velhas formou novos perfis, porém condicionados pelos climas sub-atuais a atuais de tendência semi-árida. Nesse tipo de clima, a erosão

predomina sobre a alteração; no entanto, em São João do Piauí, graças ao silcrete, o relevo foi mantido, permitindo assim a formação de perfis de alteração relativamente espessos sob o próprio silcrete, nas encostas e planície. Essa alteração desenvolvida sob clima semi-árido e, portanto, com restrita circulação de águas, não apresenta tendência laterítica, mas caracteriza-se pela formação de nontronitas. Essas nontronitas apresentam acumulação absoluta de níquel proveniente da redistribuição por migração vertical do estoque acumulado nos perfis Sul Americanos. Sem um episódio anterior de concentração do níquel que forneceu uma fonte adicional desse elemento, os saprolitos argilosos dos perfis atuais não seriam minério, pois a eliminação moderada de matéria não poderia conduzir a acumulações importantes.

2. - FATORES DE CONTROLE DAS JAZIDAS DE NÍQUEL

São vários os fatores que controlam a formação de jazidas lateríticas de níquel (Lelong et al., 1976).

Neste item serão discutidos alguns desses fatores e como os mesmos atuaram em São João do Piauí.

- Rocha-Mãe - Os processos intempéricos desenvolvem concentrações econômicas de níquel apenas em rochas que possuem teor inicial alto desse elemento, ou seja, as rochas ultrabásicas. A partir da rocha-mãe adequada, duas de suas características são importantes na formação dos depósitos: o grau de serpentinização e o grau de fraturamento. Quanto ao grau de serpentinização, a literatura mostra que a formação das jazidas supérgenas de níquel é favorecida em rochas medianamente serpentinizadas, pois permite uma defasagem na alteração dos minerais que contém níquel

(olivina e serpentina), favorecem a formação de armadilhas para o níquel e propiciam o desenvolvimento de um horizonte silicatado na base dos perfis que serve como fonte de captação do níquel anteriormente solubilizado. O grau de fraturamento favorece o enriquecimento do níquel, na medida em que, quanto maior é o fraturamento, mais rápida é a alteração e conseqüente liberação do níquel, além de favorecer a migração do mesmo, em solução, através das linhas de fraturas, em direção à base dos perfis e a precipitação do níquel ao longo das fraturas na forma de garnieritas "sensu stricto" (silicatos niquelíferos neoformados a partir da precipitação de soluções descendentes ricas em Ni).

Em São João do Piauí, apesar da existência de rocha mãe apropriada, a formação da jazida não foi favorecida pelos fatores grau de serpentização (que é total) e grau de fraturamento (que é baixo); porém a ação conjunta dos outros fatores condicionaram a concentração econômica do níquel. No Piauí o minério de níquel não se encontra na forma de garnieritas (s.s.); o termo garnierita utilizado pelos geólogos de campo é dado para as nontronitas niquelíferas de coloração esverdeada.

- Clima - O clima mais apropriado para a formação de jazidas de níquel laterítico é o clima tropical a sub-tropical com estações contrastadas, pois esse tipo de clima favorece a alteração dos minerais portadores de níquel (olivina e serpentina, principalmente) e permite a conservação transitória das serpentinas que funcionam como armadilhas para o níquel solubilizado. É a formação desses horizontes silicatados que vai reter a maior parte do níquel, formando depósitos ricos (efeito de acumulação absoluta). Os climas equatoriais, muito agressivos, não alteram dife

rencialmente os minerais como no caso anterior. Esse tipo de clima faz com que todos os minerais sejam dissolvidos rapidamente, os horizontes silicáticos praticamente não se desenvolvem e parte do níquel é perdido; a acumulação só ocorre residualmente e na forma oxidada; conseqüentemente os depósitos se empobrecem (efeito de acumulação relativa).

Nos climas temperados, ou excessivamente secos, como é o caso de São João do Piauí, o intemperismo atua de forma muito lenta e a alteração não progride além do estágio esmectítico, isto é, não ocorre suficiente evacuação de matéria para que ocorram importantes acumulações relativas. Esse fato corrobora a hipótese de que se não tivesse ocorrido um primeiro episódio de alteração que pré concentrou o níquel, dificilmente haveria jazida.

- Tempo - O efeito do tempo está muito ligado ao tipo de clima reinante. Climas excessivamente úmidos provocam uma rápida ação intempérica formando horizontes niquelíferos bem desenvolvidos, porém a lixiviação dos materiais é igualmente rápida e com o tempo os depósitos vão se empobrecendo. Por outro lado, climas secos propiciam uma alteração mais lenta e uma lixiviação menos intensa e, nestes casos, a ocorrência de concentrações econômicas requer grande período de tempo.

Fatores como presença de vegetação e dimensões do corpo ultrabásico também influem, pois depósitos sem nenhuma cobertura vegetal tendem a ser mais facilmente erodidos; já corpos muito grandes propiciam que o níquel liberado permaneça no corpo ultrabásico e vá se concentrando cada vez mais, passando de uma armadilha a outra, formando ricas jazidas.

Se aceitarmos a hipótese de Melfi et al. (1979), na interpretação geral da evolução dos jazimentos níquelíferos brasileiros, observaremos que a formação da jazida em São João do Piauí, bem como nas outras jazidas brasileiras, iniciou-se no Terciário e que esse tempo foi suficiente, no Brasil, para a ocorrência de dois ciclos de erosão e que propiciaram o enriquecimento dos depósitos.

- Relevo e Atividade Tectônica - De modo geral, a formação de importantes depósitos níquelíferos é favorecida por uma atividade tectônica moderada, pois em maciços sem nenhuma atividade tectônica a lixiviação e remobilização do níquel é pequena e as concentrações são baixas; quando a atividade tectônica é muito intensa, o relevo passa a ser fortemente dissecado e a concentração níquelífera é erodida. Um tectonismo moderado permite que a alteração se efetue, provoca um rejuvenescimento no relevo e o níquel anteriormente acumulado pode ser remobilizado para os novos perfis, enriquecendo os depósitos.

A acumulação de níquel se dá em posições topográficas preferenciais; geralmente os perfis associados a superfícies aplainadas ou suaves são os mais espessos e mais ricos. Nas encostas íngremes a erosão prevalece sobre a alteração e os perfis não se desenvolvem.

Em São João do Piauí esses fatores foram preponderantes, pois somente com o rejuvenescimento do relevo e conseqüente retomada da erosão, pode haver o enriquecimento absoluto dos perfis.

3. - COMPARAÇÃO COM OUTRAS JAZIDAS DE NÍQUEL DO BRASIL

3.1. - A Jazida de São João do Piauí

Como foi descrito no Capítulo V, a jazida está localizada nas encostas, sopés e planície, desenvolvidas sobre o núcleo de ultrabásicas. Esse núcleo com dimensões aproximadas de 6km² e coberto em cerca de 2km² por uma capa de silcrete, perfaz 30% de todo o maciço básico-ultrabásico.

A partir das análises globais realizadas nas quatro toposequências, Figuras 7, 8, 9 e 10, pode-se afirmar que os horizontes enriquecidos são os seguintes:

- Rocha alterada, na posição de base de encosta, com espessura entre 1 e 3 metros e teores entre 0,41 e 3,56% de NiO.

- Saprolito grosseiro, nas posições de meio e base das encostas e na planície, com espessuras entre 3 e 8 metros e teores entre 0,94 e 6,04% de NiO.

- Saprolito argiloso, nas posições de meio das encostas e planície, com espessuras entre 3 e 12 metros com teores de 1,04 a 2,72% de NiO.

Assim, os três horizontes constituem minério, pois o limite de teor para o aproveitamento econômico em jazidas supergenas é de cerca de 1% em níquel. O horizonte de rocha alterada na posição de meio de encosta pode se tornar interessante economicamente, já que possui espessura média de 4 metros e teores médios da ordem de 0,80% de NiO; o mesmo ocorre com o saprolito argiloso da base das encostas, que possui espessura de 3 metros e teores médios de 0,84%. As zonas mineralizadas situam-se prefe

rencialmente nas porções médias a baixas dos perfis de alteração.

A avaliação das reservas de minério de níquel de São João do Piauí, de acordo com os dados da companhia e publicados no Balanço Mineral Brasileiro, fornece um valor de 20×10^6 t como tonelagem de minério (reserva medida) com teor médio de 1,57%Ni.

Quando comparada com importantes jazidas brasileiras em Goiás e Carajás que possuem teores da ordem de:

Barro Alto	- 73 milhões de toneladas
	- teor médio de 1,67% Ni (M.M.E., 1978)
Niquelândia	- 60 milhões de toneladas
	- teor médio de 1,40% Ni (M.M.E., 1978)
Santa Fé	- 60 milhões de toneladas
	- teor médio de 1,50% Ni (Lages et al., 1976)
Vermelho	- 40 milhões de toneladas
	- teor médio de 1,56% Ni (Bernardelli et al, 1983)

Conclui-se que São João do Piauí é uma jazida relativamente pequena no cenário brasileiro.

3.2. - Comparação Quanto ao Tipo de Minério

Nas jazidas lateríticas distinguem-se, geralmente, dois tipos de minério: o silicatado e o oxidado.

O silicatado caracteriza-se por alto conteúdo em sílica e baixo teor em ferro; enquanto que o oxidado, ao contrário, caracteriza-se por baixo teor em sílica e alto teor em ferro.

A Figura 17, que mostra a composição das amostras com mais de 1,20% de níquel, em termos de seus principais constituintes.

Fig. 17 - COMPOSIÇÃO DO MINÉRIO DE NÍQUEL
DE SÃO JOÃO DO PIAUÍ.

tes, SiO_2 , MgO e Fe_2O_3 , indica que todo o minério situa-se no polo silicatado, sendo que nenhuma amostra possui mais que 45% de Fe_2O_3 . Assim, todo o minério existente em São João do Piauí é do tipo silicatado, na forma de nontronitas niquelíferas.

As principais jazidas niquelíferas do Brasil possuem os dois tipos de minério, com predominância do tipo silicatado. As jazidas de Goiás, como: Barro Alto (Melfi, 1974) possui 70% de minério silicatado; Niquelândia (Oliveira e Trescases, 1982) contém 80% de minério na forma silicatada e Santa Fé (Oliveira, 1980) possui 50% de minério silicatado. No Estado de Minas Gerais, as jazidas de Morro do Níquel (Trescases e Oliveira, 1978) e Liberdade (Esson e Santos, 1978) contém 100% de minério na forma silicatada. Em Carajás a jazida de Vermelho (Bernardelli et al., 1983) possui 50% de minério na forma silicatada.

Pelo tipo de minério apresentado (predominantemente silicatado) e pela mineralogia do minério (nontronita niquelífera), os depósitos de Barro Alto e Niquelândia são os que mais se aproximam da jazida de São João do Piauí.

3.3. - Comparação Quanto à História Evolutiva

Melfi et at. (1979) realizaram detalhado estudo sobre a gênese dos principais depósitos de níquel laterítico do Brasil. Com base comparativa nesse trabalho, observa-se que a evolução da alteração em São João do Piauí foi, na sua primeira fase de desenvolvimento, em tudo, comparável à alteração ocorrida nos outros maciços brasileiros economicamente interessantes. Ou seja, a similaridade da alteração propiciou a formação e posterior conservação de um silcrete sustentando a topografia e dando con

dições à formação de uma segunda etapa de alteração. Esse silcrete se faz presente na grande maioria dos topos tabulares dos maciços brasileiros. A espessura desse nível de silcrete é bastante variável; em Barro Alto, Niquelândia e Santa Fé, é de alguns metros, porém chegam a atingir mais de 20 metros em alguns casos, como em Morro do Níquel e Vermelho. São João do Piauí, com silcrete de espessura entre 2 e 6 metros, assemelha-se aos primeiros depósitos citados.

Por vezes, com a dissecação do platô, o silcrete é parcialmente erodido, fragmentado, tornando-se poroso, permitindo acentuados movimentos descendentes de sílica, dando lugar a um horizonte parcialmente remanejado com material ferruginoso, pulverulento contendo blocos de silcrete; é o que acontece em São João do Piauí.

As diferenças surgem na segunda fase de desenvolvimento dos depósitos, devido às condições climáticas particulares do sudeste do Piauí que conduziram a alteração para a formação de esmectitas, isto é, a alteração se dá com bissialitização, enquanto que nos outros maciços brasileiros a evolução da alteração caminha para a laterização.

3.4. - Comparação Quanto ao Grau de Erosão

Os maciços de Morro do Níquel e Vermelho são topograficamente semelhantes ao de São João do Piauí, pois são constituídos de um morro único, coberto por um horizonte de silcrete; possuem dimensões comparáveis, Vermelho com 4km² e Morro do Níquel com 0,5km². No entanto, esses maciços se apresentam bem menos erodidos, sem área de planície desenvolvida; isto provavelmente se deve à maior espessura do horizonte de silcrete em seus

topos que teria dificultado a erosão, a despeito das condições climáticas mais agressivas que em São João do Piauí.

Já os maciços de Santa Fé e no setor norte de Niquelândia, encontram-se num avançado estágio de erosão; as partes altas, relacionadas à superfície Sul Americana, já foram bastante erodidas, de modo que na paisagem atual dominam as baixadas. Provavelmente a menor espessura do silcrete, bem como suas maiores dimensões (Santa Fé com 38km² e Niquelândia com 100km²), são os fatores responsáveis por este quadro.

Nos maciços maiores e mais erodidos, a transferência lateral do níquel das zonas altas para as zonas baixas levou à formação de perfis muito enriquecidos nas baixadas. Em Santa Fé, por exemplo, o essencial da jazida ocupa este sítio topográfico. Nos maciços menores a jazida está restrita aos topos e encostas do domo. Em São João do Piauí, situação intermediária, a jazida ocupa as encostas e a planície circunjacente ao domo.

B I B L I O G R A F I A

- AB'SABER, A.N. - 1969 - Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do Nordeste Brasileiro, USP, Geomorfologia (19), 38p.
- AB'SABER, A.N. - 1972 - Participação das Depressões Periféricas e superfícies aplainadas na compartimentação do Planalto Brasileiro, USP, Geomorfologia (28), 38p.
- ABREU, S.F. de - 1973 - Recursos Minerais do Brasil - 2. ed. São Paulo, E. Blucher/Ed. Univ. São Paulo; Rio de Janeiro, Instituto Nacional de Tecnologia, Vol. 2, 254p.
- ALMEIDA, F.F.M. de - 1967 - Origem e evolução da plataforma brasileira. Brasil. Bol. DNPM/DGM (241) 36p.
- ANDRADE, M.R. & BOTELHO, L.C. - 1974 - Perfil Analítico do Níquel - Bol. DNPM (33) - Rio de Janeiro. 90p.
- ARAÚJO, V.A. de; MELLO, J.C.R. de, & Oguino, K. - 1972 - Projeto Niquelândia. Relatório Final - Convênio D.N.P.M./C.P.R.M. - Goiânia, 224p.
- BARBOSA, O. - 1965 - Geologia das Folhas Remanso-Sento Sé, Bahia. Petrópolis, PROSPEC/Rio. Est. Rec. Nat..
- BARBOSA, A.L.M. - 1968 - Ambiente Geológico de Jazidas Niquelíferas de Niquelândia, GO. Bol. SICEG - Ouro Preto, 6: p. 79-89
- BARBOUR, A.P. - 1976 - Geologia do Maciço Ultramáfico de Santa Fé (GO) - Tese de Livre Docência - IGUSP, 138p.

- BERBERT, C.O. - 1977 - Rochas básico-ultrabásicas no Brasil e suas potencialidades econômicas. Bol. II SEG - Paraná - CEGEP - UF Paraná, p. 1-51.
- BERBERT, C.O. - 1978 - Depósitos de Níquel do Brasil Central. Aula proferida no I.G. UNESP (mimeografado). 15p.
- BERNARDELLI, A.; MELFI, A.J.; OLIVEIRA, S.M.B. & TRESCASES, J.J. - 1983 - The Carajás Nickel deposits - Lateritisation Processes - Printed in the Instituto Astronômico e Geofísico - University of São Paulo - Brasil. p. 107-118.
- BRAUN, O.P.G. - 1971 - Contribuição à Geomorfologia do Brasil Central - Revista Brasileira de Geografia - Ano 32, vol. 3. p. 3-39.
- BRITO NEVES, B.B. de - 1975 - Regionalização Geotectônica do Precambriano Nordeste - TESE DE DOUTORAMENTO - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - inédito. 198p.
- BRITO NEVES, B.B. de - 1983 - O Mapa Geológico do Nordeste Oriental do Brasil, Escala 1/1.000.000 - TESE DE LIVRE DOCÊNCIA - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - inédito. 177p.
- BROWN, G. - 1971 - The X-Ray identification and crystal structures of clay minerals - Mineralogical Society of London - Clay Minerals Group - 544p.
- BRUNI, M.A.L.; ROCHA, A.J.D.; SANTOS, E.J. dos; ALMEIDA, J.T. de; BATISTA, J.J.; SÁ, V.R. de - 1976 - Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo; folha Brasília (SC-23). Texto explicativo,

Brasília, DNPM, 226p.

CALDASSO, A.L. da S.; COSTA, A.C. da; MARANHÃO, C.M.L.; LOPES JÚNIOR, I.; HORIKAWA, Y. - 1973a - Projeto Sudeste do Piauí I. Recife, CPRM (Relatório final integrado, Convênio DNPM-CPRM). 75p.

CALDASSO, A.L. da S.; COSTA, A.C. da; MARANHÃO, C.M.L.; LOPES JÚNIOR, I.; HORIKAWA, Y. - 1973b - Projeto Sudeste do Piauí II. Recife, CPRM (Relatório final integrado, Convênio DNPM-CPRM). 103p.

CAILLÉRE, S. - 1936 - Contribution a l'étude des minéraux des serpentines - Bull. Soc. Franç. Miner. - vol. 59 - p. 163-326.

CHABAN, N. & SANTOS, J.F. dos 1973 - Intrusiva do Morro do Engenho (GO): considerações sobre geologia e pesquisa. XXVII Congr. Bras. Geol. Aracajú - Resumos 1. p. 57-58.

CLARK, A.M.S. - 1978 - Chemical and mineralogical development of the Sidamo nickeliferous serpentinites (Ethiopia). Mineralium Deposita, 13 (2): p. 221-234.

COSTA, J.L.G. - 1970 - Jazidas de níquel do maciço de São José do Tocantins- Notas sobre a geologia econômica e pesquisas pela Cia. Níquel Tocantins. XXIV Congr. Brás. Geol. Brasília - Bol. Esp. 1:140-141.

- DAVIES, H.L. - 1969 - Notes on Papuan Ultramafic Belt Mineral Prospects. Papua and New Guinea. Record nº 1969/67. Bureau of Min. Res. Geol. and Geophysics - Austrália - 20p.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. - 1962 - Rock Forming Minerals - vol. 3 - Longmans, Greens and Co. Ltd. v. 2. 270p.
- DE KIMPE, C.R. & ZIZKA, J. - 1973 - Weathering and clay formation in a dunite deposit at Asbestos - Can. J. Earth Sci, 10 (10): p. 1533-1540.
- DE VLETTER, D.E. - 1955 - How Cuban ore was formed: a lesson in lateritic genesis - Eng. and Min. Journal, New York. 156(10): p. 84-87.
- DE WAAL, S.A. - 1971 - South African nickeliferous serpentinites - Miner. Sc. Engineering, Pretoria 3(2): p. 32-45.
- EASTON, A.J. - 1972 - Chemical analysis of silicate rocks. Elsevier Publishing Company - 258p.
- EGLER, W.A. - 1951 - Contribuição ao estudo da caatinga pernambucana. Rev. Bras. Geogr. 13(4): p. 577-590.
- ESSON, J. & SANTOS, L.C.S. dos - 1978 - The occurrence, mineralogy and chemistry of some garnierites from Brazil - Bull. BRGM, Sect. II, 3: p. 263-274.
- ESWARAN, H. & SYS, C. - 1972 - Clay mineralogy of soils on ultrabasic rocks from Sabah, Borneo. Int. Clay Conf., Madrid, I: p. 125-225.

- FARINA, M. - 1969 - Ultrabasitas níquelíferos de Catingueira - Paraíba. Recife, SUDENE (Série Geol. Econômica, 7). 76p.
- FARINA, M. - 1976 - Quantificação dos depósitos de Asbestos de Campestre - Alagoas. Recife, SUDENE (Série Geol. Econômica, 6). 37p.
- FAUST, G.; FAHEY, J.J. - 1962 - The serpentine-group minerals. Prof. Pap. U.S. Geol. Surv. 384A, p. 1-92.
- FERRAN, A. de - 1974 - Panorama do Ni no Brasil. Geol. e Met., IV Simp. Mineração, 1ª parte, 35: p. 103-124.
- FIGUEIREDO, A.N. de; SOUZA, E.P. de & MELLO, J.C.R. de - 1972 - Projeto Goianêsia - Barro Alto - Relatório Final - Convênio DNPM/CPRM - Goiânia - 129p.
- FIGUEIREDO, A.N. de; MOTTA, J. & MARQUES, V.J. - 1975 - Estudo comparativo entre os complexos de Barro Alto e do Tocantins, Goiás. Rev. Bras. de Geociências - vol. 5, p. 15-29.
- GAUSSEN, H. - 1955 - Determination des climats par la méthode des courbes ombrothermiques. C.E. Acad. Sci., 236: p. 1075.
- GODOY, A.C. - 1968 - Mapa das ocorrências minerais do Estado de Goiás, com a localização dos principais maciços básicos e/ou ultrabásicos. An. XXII Congr. Bras. Geol., Belo Horizonte: p. 223-229.
- GRIFFON, J.C. & RICHTER, H. - 1976 - Geologia, mineração e tratamento do minério de níquel do Morro do Níquel - MG. Geol. Met., VII Simp. Br. Mineração, 4: p. 387-405.

- HEDLUNG, D.C.; COUTO MOREIRA, J.F. de; PINTO, A.C.F.; SILVA, J. C.G. da; SOUZA, G.V.V. - 1974 - Stratiform chromite at Campo Formoso, Bahia, Brazil. U.S. Geol. Survey, Jour. Research, Denver, Co. 2(5): p. 551-562.
- INDA, H.A.V. - 1976 - Projeto Rochas Básicas e Ultrabásicas de Euclides da Cunha. Relatório Final. Convênio SME-CPM/PROSPEC. 19 vol.
- JURKOVIC, I. - 1963 - Source Geochemical Aspects about the Genesis of the Nickel Deposit Loma de Hierro (Venezuela) - Geoloski Vjesnik - 17: p. 103-112.
- JUSTO, L.J.E.C. - 1973 - Maciço ultramáfico de Água Branca, Goiás: um corpo tabular. XXVII Congr. Bras. Geol. Aracaju. Resumos, 1: p. 56-57.
- KEGEL, W. - 1956 - As inconformidades na Bacia do Parnaíba e zonas adjacentes - Bol. DGM/DNPM, 160: Rio de Janeiro. 60p.
- KING, L.C. - 1956 - A Geomorfologia do Brasil Oriental. Rev. Bras. Geogr. - Rio de Janeiro, 18 (2): p. 147-265.
- KUHLMANN, E. - 1977 - Vegetação. In: Fundação IBGE, Rio de Janeiro - Departamento de Geografia - Geografia do Brasil, Região NORDESTE. Rio de Janeiro - Vol. 2, p. 85-110.
- KÜHNEL, R.A.; ROORDA, H.J. & STEENSMA, J.J.S. - 1978 - Distribution and partitioning of elements in nickeliferous laterites. Bull. BRGM, Sect II, 3: p. 191-206.

- LAGES, S.M.; ANDRADE, M.K. de & OLIVA, L.A. - 1975 - Níquel - Encontro Nacional sobre minérios de metais não ferrosos - Goiânia - GO. Rel. DNPM para XXIX Congr. Bras. Geol. - Belo Horizonte. 48p.
- LAGES, S.M.; ANDRADE, M.R. & OLIVA, L.A. - 1976 - Economia mineral do níquel. XXIX Congr. Bras. Geol. - Ouro Preto - Resumos: p. 394-395.
- LANGER, E. - 1969 - Die Nickellagerstätten des Morro do Níquel in Minas Gerais, Brasilien. Ihr Anfschuss, ihre Bemusterung und Bewertung. Clausthaler Hefte zur Lagerstättenkunde und Geochimie des Miner. Rohstoffe Heft 8 - Gebrüder Barntraeger - Berlin - Stuttgart - 64p.
- LEAL, A.S. - 1971 - Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste. Folha 19 - ARACAJU - SUDENE - SÉRIE HIDROGEOLOGIA - 33 - 140p.
- LELONG, F.; TARDY, Y.; GRANDIN, G.; TRESCASES, J.J. & BOULANGÉ, B. - 1976 - Pedogenesis, chemical weathering and process of formation of some supergene ore deposits - Handbook of Strata-Bound and Stratiform ore deposits - chapter 3 - p. 97.173.
- LESSA, S⁹, M.; ANDRADE, R.S. de & BERBERT, C.O. - 1971 - Projeto Jussara - Geologia das quadriculas de Britânia, Santa Fé, Araguapaz e Jussara, Estado de Goiás. DNPM (Executado pela CPRM), Goiânia - Inédito.
- LUCAS, J.; CAMEZ, T. & MILLOT, G. - 1959 - Determination pratique aux rayons x des minéraux argileux simples et interstra

- tifiés - Bull. Serv. Cart. Geol. Als. Lorr. 12(2): p. 21-31.
- MARTINS, J.S.; VIEIRA, L.S.; PERES, R.N. - 1973 - Solos in: Projeto Radam - vol. 1, p. III/1 - III/79.
- MASCARENHAS, J. de F. - 1976 - Estruturas do tipo "Greenstone Belt" no leste da Bahia. XXIX Congr. Bras. Geol. - Ouro Preto - Resumo das Comunicações.
- MELFI, A.J. - 1974 - Características geoquímicas e mineralógicas dos estágios iniciais de alteração superficial das rochas ultrabásicas de Barro Alto (GO). Bol. IGUSP, 5: p. 117-128.
- MELFI, A.J.; TRESCASES, J.J. & OLIVEIRA S.M.B. - 1979 - Les latérites nickélifères du Brésil. International Seminar on Laterisation Processes - Trivandrum - Índia - Cahiers ORSTOM-Ser. Géologie. Vol. XI - nº 1. p. 15-43.
- MENEGOTTO, E. - 1982 - Alteração Intempérica de Rochas Ultrabásicas em Clima Subtropical. (Evolução mineralógica e geoquímica em alguns maciços ultrabásicos do Rio Grande do Sul - Brasil). Tese de Doutorado - Instituto de Geociências na Universidade Federal do Rio Grande do Sul - inédito - 356p.
- MILLOT, G. & BONIFAS, M. - 1955 - Transformation isovolumétrique dans des phénomènes de latérisation et de bauxitisation - Bull. Serv. Carte Geol. Als. Lorr., 8 (1): p. 3-20.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - 1978 - Balanço Mineral Brasileiro. Brasília. 212p.

- MOODY, J.B. - 1976 - Serpentinization: a review - *Lithos*, vol. 9 - n^o 2. p. 125-138.
- MORAES, L.J. de - 1935 - Nickel no Brasil - Boletim do DNPM n^o 9 - 165p.
- MOREIRA, A.A.N. - 1977 - Relevo. In: FUNDAÇÃO IBGE, Rio de Janeiro - Departamento de Geografia. Geografia do Brasil; região Nordeste. Rio de Janeiro - vol. 2. p. 1-45.
- NIMER, E. - 1977 - Clima. In: Fundação IBGE, Rio de Janeiro - Departamento de Geografia. Geografia do Brasil; Região Nordeste - Rio de Janeiro - vol. 2. p. 47-84.
- OLIVEIRA, S.M.B. de - 1980 - Alteração intempérica de rochas ultrabásicas de Santa Fé (GO) e gênese do depósito niquelífero - Tese de Doutorado - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo - inédito. 216p.
- OLIVEIRA, S.M.B. de & MELFI, A.J. - 1979 - Considerações sobre a origem das esmectitas nos níveis de alteração dos piroxênitos de Santa Fé (GO). Bol. IGUSP, (10): p. 91-96.
- OLIVEIRA, S.M.B. de; TRESCASES, J.J. - 1980 - Geoquímica da alteração supérgena das rochas ultramáficas de Santa Fé (Goiás, Brasil). Rev. Bras. Geoc., 10(4): p. 243-247.
- OLIVEIRA, S.M.B. de; TRESCASES, J.J. - 1982 - Estudo mineralógico e geoquímico da laterita niquelífera de Niquelândia (GO). Anais XXXII Congr. Bras. Geol., Salvador, Bahia, 3: p. 1183-1190.

- PAGE, N.J. - 1967a - Serpentinization at Burro Mountain, California. Contr. Mineral. Petrol. 14. p. 321-342.
- PECORA, W.T. - 1944 - Nickel silicate and associated nickel-cobalt-manganese oxide deposits near São José do Tocantins, Goiaz, Brasil. U.S. Geological Surv. Bull. (935 E) p. 247-305.
- PECORA, W.T. & BARBOSA, A.L.M. - 1944 - Jazidas de níquel e cobalto de São José do Tocantins, Estado de Goiás - Bol. DNPM - DFPM, (64) 69p.
- PERCIVAL, F.G. - 1964 - The lateritic iron deposit of Conakry - Trans. Inst. Min. Metallurgy, 74, part 8: p. 429-462.
- ROBERT, M. & TESSIER, D. - 1974 - Méthode de préparation des argiles des sols pour des études mineralogiques - Ann. Agron. 25(6): p. 859-882.
- SANTIVANÉZ, A.O. - 1965 - As serpentinitas niquelíferas do Morro do Níquel em Pratápolis, MG - Eng. Min. Met. XLII (248): p. 61-65.
- SANTOS, J.F. dos - 1974 - Fatores de controle na concentração de níquel laterítico condicionados pela evolução geológica e geomorfológica do complexo básico-ultrabásico de São João do Piauí - PI - Anais do Congr. Bras. Geol. XXVIII, vol. 6 - p. 25-32.
- SANTOS-YNIGO, L. - 1964 - Distribution of iron, alumina and silica in Pujada Laterite of Mati Davao Province, Mindanao Island (Phillippines). XXII Int. Geol. Congress New Delhi, sect. 14: p. 126-141.

- SCHELLMANN, W. - 1971 - Über Beziehungen lateritischer Eisen, Nickel, Aluminium und Manganze zu Ausgangsgesteinen. Mineral Deposita, Berlin, vol. 6, nº 4. p. 275-291.
- SCHELLMANN, W. - 1976 - Distribution, fixation and chemical mobilization of nickel in iron-rich lateritic nickel ores. Concluding report, Federal Institute of Geosciences and Raw Materials. Unpublished Report.
- SCHEVCIW, F.G.P. - 1980 - Alteração intempérica dos termos ultramáficos do Complexo de Piên (PR). Estudo mineralógico e geológico. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo - São Paulo - 172p.
- SCHMALTZ, W.H.; FIGUEIREDO, A.M. de & CUNHA, C.A.B.R. - 1976 - Pesquisa de sulfetos de Cu-Ni no maciço de Niquelândia - XXIX Congr. Bras. Geol. - Ouro Preto. Resumo: p. 263.
- SEGALEN, P. - 1968 - Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certaines sols à hydroxydes tropicaux - Cahier ORSTOM, série Pédol., VI, p. 105-126.
- SOUZA, A. de - 1973 - Geologia e Geocronologia do Complexo Barro Alto, Goiás - Tese Dout. FFCL - Rio Claro (SP).
- STACHE, G.A. - 1974 - Untersuchen zur Geologie, Petrographie, Metamorphose und genese des basich-ultrabasichen Massivx von Barro Alto, Goiás. (Brasilien) These T. U. Claustal. 198p.
- TRESCASES, J.J. - 1969 - Géochimie des altérations et des eaux de surface dans le massif ultrabasique du Sud de la Nouvelle -

Calédonie. Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., 22(4): p. 329-354.

TRESCASES, J.J. - 1975 - L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie. Mem. ORSTOM, 78, Paris. 259p.

TRESCASES, J.J. & OLIVEIRA, S.M.B. de - 1978 - Alteração dos serpentinitos do Morro do Níquel (MG) - An. XXX Congr. Bras. Geol., 4: p. 1655-1669.

TRESCASES, J.J. & OLIVEIRA, S.M.B. de - 1981 - A jazida de níquel de Barro Alto. Ata do I Simpósio de Geologia do Centro-Oeste - p. 519-538.

TRESCASES, J.J. & SCHEVCIW, F.G.P. - 1980 - Mineralogia e Geoquímica da alteração meteórica das rochas ultrabásicas de Piên, Paraná, Brasil. Anais XXXI Congr. Bras. Geol., Balneário Camboriú, 4: p. 2357-2367.

TRICART, J. - 1959 - Divisão morfoclimática do Brasil Atlântico Central. Boletim Paulista de Geografia, nº 31, 47p.

VANCONCELLOS, J.B. et al. - 1973 - Ocorrências minerais das folhas Goiás e Goiânia. DNPM - 6ª distr. Goiânia (inédito).

VERBEKE, R. - 1969 - Sur un procédé de fabrication de lames minces dans des roches peu cimentées et des sols. Bull. Soc. Géol. de France (7), XI - p. 426-433.

WEBER, F. - 1975 - Technique de preparation des mineraux argileux en vue de l'analyse aux rayons-X - Centre de sédimento

logie et géochimie de la surface - Section méthodes minéralogiques - C.N.R.S. - Strasbourg.

WICKS, F.J. - 1969 - X-Ray and optical studies of serpentine minerals. D. Phil. Dissertation, Oxford University, Oxford, England.

ZEISSINK, H.E. - 1969 The mineralogy and geochemistry of a nicheliferous laterite profile (Greenvale, Queensland - Austrália) - Miner.Deposita, 4(2): p. 132-152.

ZEISSINK, H.E. - 1971 - Trace elements behavior in two nickeliferous laterite profiles. Chem. Geol., 7(1): p. 25-36.

APÊNDICE I

ANÁLISES QUÍMICAS - AMOSTRAS TOTAIS

AMOSTRAS	H ₂ O ⁺	SÍLICA TOTAL	S Í L I C A Q. SOL	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO	CoO	CuO	Σ	
2	10,2	45,1	1,2	43,9	31,8	13,1	1,36	0,12	0,11	0,44	0,02	0,01	102,26
4-1	3,7	76,5	1,9	74,6	1,7	14,6	1,03	0,81	0,13	0,25	0,03	0,02	98,77
4-2	9,5	41,1	2,6	38,5	7,7	35,0	5,09	1,10	0,25	1,41	0,04	0,07	101,26
4-3	9,0	42,3	2,0	40,3	8,1	30,4	6,07	1,32	0,49	1,69	0,08	0,12	99,57
4-4	6,6	48,4	2,4	46,0	7,0	28,9	6,60	0,50	0,55	1,65	0,09	0,09	100,38
4-5	12,0	41,0	1,8	39,2	9,5	20,4	13,22	0,14	0,30	2,72	0,03	0,09	99,40
4-6	10,2	42,7	1,9	40,8	8,9	28,6	6,84	0,82	0,31	2,32	0,06	0,12	100,87
4-7	10,0	38,2	1,4	36,8	8,4	33,6	6,84	1,25	0,46	2,58	0,10	0,14	101,57
4-8	10,5	35,1	3,3	31,8	7,7	36,1	6,60	0,90	0,33	2,64	0,07	0,14	100,08
4-9	4,6	56,2	-	-	0,8	24,0	-	-	-	0,39	0,04	0,07	86,11
4-10	6,2	46,4	-	-	0,8	30,7	-	-	-	0,46	0,19	0,14	84,90
6-1	9,6	42,0	4,0	38,0	29,4	16,4	3,21	0,31	0,12	0,56	0,02	0,06	101,68
6-2	7,1	46,5	3,7	42,8	24,1	16,3	4,56	0,31	0,24	0,85	0,03	0,07	100,06
6-3	9,4	58,2	5,2	53,0	14,5	13,8	3,43	0,47	0,15	0,43	0,02	0,04	100,44
6-4	9,6	46,5	4,7	41,8	17,0	17,6	6,41	0,64	0,31	0,94	0,04	0,05	99,09
6-5	18,0	41,0	2,5	38,5	19,2	12,9	7,08	0,06	0,46	1,39	0,01	0,02	100,12
6-6	12,4	40,2	5,0	35,2	27,4	16,1	2,98	0,34	0,14	1,09	0,02	0,05	100,72
6-7	7,2	56,9	7,6	49,3	6,6	21,1	5,66	0,58	0,21	0,96	0,05	0,08	99,34
6-8	10,0	56,3	7,4	48,9	8,7	19,8	4,53	0,67	0,20	0,70	0,05	0,08	101,03
6-9	6,9	54,2	-	-	0,6	28,6	-	-	-	0,24	0,04	0,10	90,68
6-10	7,0	55,6	-	-	0,9	30,5	-	-	-	0,25	0,06	0,09	94,40

AMOSTRAS	H ₂ O ⁺	SÍLICA TOTAL	S Í L I C A Q. SOL	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO	CoO	CuO	Σ	
7-1	9,6	37,7	1,9	35,8	32,3	14,3	2,87	0,88	0,40	3,56	0,07	0,05	101,73
7-2	10,7	45,4	2,9	42,5	23,6	13,9	2,66	1,03	0,19	3,79	0,08	0,28	101,63
7-3	10,4	37,7	4,6	33,1	30,3	15,9	2,11	0,37	0,70	4,77	0,06	0,12	102,43
7-4	7,4	41,6	6,2	35,4	28,2	17,9	1,85	0,30	0,47	1,26	0,02	0,04	99,04
7-5	7,1	38,7	3,2	35,5	17,4	25,9	4,87	1,62	0,32	6,04	0,11	0,23	102,29
8-1	11,9	38,8	1,4	37,4	34,9	12,9	3,02	0,19	0,13	0,81	0,02	0,02	102,69
8-2	11,6	40,8	2,1	38,7	34,3	11,8	1,03	0,32	0,13	0,81	0,01	0,03	100,83
8-3	3,3	87,7	39,6	48,1	4,4	0,9	0,11	0,03	0,01	3,27	0,01	0,09	99,82
8-4	6,7	51,3	-	-	1,2	24,3	-	-	-	1,30	0,18	0,34	85,32
9	9,4	43,9	2,3	41,6	9,4	30,5	4,78	0,73	0,30	1,76	0,05	0,10	100,92
10	12,1	39,0	1,2	37,8	33,7	13,6	0,57	0,29	0,18	0,55	0,02	0,01	100,02
11-1	12,5	40,3	0,4	39,9	36,1	10,4	0,45	0,07	0,06	0,41	0,01	0,01	100,31
11-2	11,5	39,3	0,9	38,4	31,9	14,3	0,74	0,10	0,07	0,84	0,01	0,01	98,77
11-3	11,7	39,2	0,7	38,5	28,2	17,2	0,81	0,09	0,08	1,16	0,01	0,01	98,46
12-1	5,5	64,1	0,9	63,2	0,1	23,1	6,19	0,67	0,06	0,39	0,01	0,05	100,13
12-2	7,9	61,8	0,8	61,0	0,1	22,3	6,30	0,48	0,04	0,63	0,01	0,07	99,63
12-3	2,0	86,8	48,8	39,7	0,1	8,6	0,89	0,75	0,03	0,10	0,01	0,02	99,76
12-4	0,8	88,5	30,8	56,0	0,1	10,4	0,75	0,45	0,04	0,13	0,01	0,01	100,64
13-1	10,0	54,9	1,1	53,8	16,7	16,6	0,85	0,26	0,18	0,54	0,03	0,02	100,12
13-2	2,7	77,5	32,9	44,6	6,1	11,1	1,38	0,58	0,04	0,67	0,02	0,03	100,15
13-3	1,8	60,3	2,0	58,3	20,5	15,7	0,81	0,22	0,08	0,41	0,01	0,02	99,91

AMOSTRAS	H ₂ O ⁺	SÍLICA TOTAL	S Í L I C A Q. SOL	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO	CoO	CuO	Σ	
13-4	2,2	80,9	1,2	79,7	2,7	12,6	0,57	0,48	0,08	0,51	0,01	0,01	100,02
13-5	6,6	77,9	5,5	72,4	2,9	10,9	0,62	0,53	0,17	0,36	0,02	0,01	100,06
13-6	16,1	47,6	1,7	45,9	2,3	18,6	14,16	0,04	0,03	0,62	0,02	0,02	99,44
13-7	13,5	44,6	2,1	42,5	2,4	22,3	16,52	0,04	0,06	0,28	0,01	0,04	99,76
14-1	0,9	87,0	47,9	39,1	1,5	8,2	0,42	0,17	0,16	0,15	0,01	0,02	98,53
14-2	6,4	74,7	31,5	43,2	7,7	10,6	0,28	0,16	0,11	0,22	0,02	0,01	100,20
14-3	6,0	58,5	11,5	47,0	17,1	12,0	4,63	0,03	0,17	0,22	0,02	0,02	98,69
15	7,3	38,9	4,2	34,7	41,5	10,4	2,05	0,34	0,09	0,24	0,01	0,05	100,88
20-1	14,5	36,7	1,2	35,5	34,4	14,1	1,47	0,50	0,14	0,51	0,01	0,02	102,35
20-2	13,4	37,4	1,5	35,9	35,2	12,9	1,99	0,59	0,13	0,38	0,01	0,02	102,02
21-1	20,3	33,6	3,6	30,0	37,1	9,3	0,92	0,27	0,11	0,30	0,01	0,03	101,94
21-2	15,7	42,9	4,5	38,4	29,9	10,8	0,94	0,21	0,14	0,32	0,02	0,02	100,95
21-3	2,8	84,8	61,7	23,1	1,2	9,8	0,68	0,88	0,17	0,26	0,03	0,03	100,65
22-1	16,3	43,9	2,6	41,3	24,1	14,5	1,44	0,41	0,16	0,41	0,02	0,07	101,31
22-2	16,0	36,8	2,9	33,9	14,9	17,0	11,80	0,45	0,15	1,03	0,03	0,08	98,24
22-3	16,9	38,6	3,6	35,0	13,6	15,9	14,70	0,44	0,16	1,86	0,04	0,04	102,30
22-4	8,0	62,0	34,7	27,3	10,2	13,4	7,08	1,01	0,10	0,28	0,02	0,07	102,16
24-1	10,2	66,7	2,0	64,7	10,3	11,8	1,88	0,70	0,10	0,36	0,02	0,04	102,10
24-2	12,6	51,2	4,1	47,1	16,0	17,2	1,98	1,09	0,27	1,33	0,02	0,08	101,77
24-3	15,8	57,0	22,2	34,8	7,3	11,4	7,31	0,32	0,37	0,48	0,05	0,03	100,06
28-2	15,3	50,1	9,2	40,9	15,5	16,1	2,74	0,04	0,34	0,37	0,02	0,01	100,52

AMOSTRAS	H ₂ O ⁺	SÍLICA TOTAL	S Í L I C A Q. SOL	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	NiO	CoO	CuO	Σ	
29-1	17,9	42,9	1,9	41,0	2,9	14,1	20,30	0,04	0,24	0,84	0,06	0,07	99,35
31-1	9,9	43,9	0,9	43,0	4,9	26,1	10,38	0,79	0,85	2,18	0,21	0,17	99,38
31-2	11,3	42,4	1,6	40,8	2,3	26,1	13,22	0,62	1,29	1,04	0,03	0,11	98,41
32-1	5,3	68,7	11,7	57,0	5,4	16,1	1,79	0,97	0,20	1,37	0,03	0,17	100,03
32-2	5,2	69,2	38,6	30,6	7,7	10,6	1,08	0,47	0,18	5,41	0,09	0,33	100,26
33-1	6,3	72,4	3,9	68,5	2,1	13,1	2,62	0,77	0,26	0,88	0,07	0,06	98,56
33-2	15,6	70,5	2,1	68,4	2,4	6,3	2,76	0,26	0,26	0,78	0,02	0,04	98,96
36-1	4,5	64,3	0,9	63,4	12,4	14,9	1,15	0,41	0,14	0,30	0,02	0,03	98,15
36-2	5,3	71,6	0,9	70,7	4,4	15,8	1,21	0,75	0,17	0,29	0,02	0,02	99,56
36-3	13,2	38,6	4,0	34,6	8,9	20,6	15,10	0,08	1,29	1,23	0,02	0,07	99,09
36-4	10,6	40,0	1,3	38,7	13,5	24,1	8,97	0,84	0,30	1,35	0,03	0,07	99,77
36-5	10,3	43,4	8,3	35,1	7,3	17,3	18,88	0,39	0,21	1,45	0,06	0,01	99,30
37-1	10,6	40,9	1,1	39,8	33,2	12,5	1,76	0,31	0,15	0,57	0,02	0,01	100,02
37-2	11,7	38,0	0,7	37,3	30,0	16,8	1,10	0,33	0,23	1,72	0,02	0,02	99,92
37-3	9,0	38,5	3,2	35,3	16,6	26,2	6,61	0,54	0,29	2,15	0,04	0,16	100,09
37-4	5,6	72,4	4,5	67,9	1,7	16,1	1,74	1,03	0,15	0,42	0,02	0,03	99,19
37-5	0,8	80,6	3,7	76,9	0,8	14,7	1,13	0,79	0,17	0,30	0,02	0,04	99,35

DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA

FOTO 1 - Amostra L15 - L.N., aumento aproximado 120 X.

Rocha Alterada: serpentinito formando reticulado (serpentina I), isolando núcleos (serpentina II) que formam os centros de malha, por vezes impregnados de óxidos de ferro. Marcam o reticulado grãos de magnetita e óxidos de manganes.

FOTO 2 - Amostra L8-1 - L.P., aumento aproximado 300 X.

Rocha Alterada: cristal de clorita, inalterado, em contato com serpentina levemente alterada e colorida, em parte, por material ferruginoso.

FOTO 3 - Amostra L31-1 - L.N., aumento aproximado 80 X.

Saprolito Grosseiro: malha de serpentina parcialmente epigenizada por esmectita, quartzo microcristalino e material ferruginoso; cortada por um grande veio de quartzo bem cristalizado.

Fig. 3

Fig. 2

Fig. 1

FOTO 4 - Amostra L31-1 - L.N., aumento aproximado 80 X.

Saprolito Argiloso: serpentinito tipo reticulado, totalmente alterado em esmectita, porém com conservação da estrutura da rocha original. Grãos de magnetita e óxidos de manganês marcam, por vezes, o reticulado.

FOTO 5 - Amostra L37-5 - L.N., aumento aproximado 80 X.

Saprolito Argiloso Silicificado: serpentinito tipo reticulado totalmente alterado; com a serpentina pseudomorfizada por esmectita. Os núcleos do reticulado estão ocupados por material ferruginoso e quartzo microcristalino.

FOTO 6 - Amostra L12-1 - L.N., aumento aproximado 80 X.

Saprolito Argiloso Silicificado: porção da rocha apresentado fantasmas de serpentina preenchidos por quartzo microcristalino, material ferruginoso e alguns buracos, nos centros e bordas da malha.

Fig. 6

Fig. 5

Fig. 4

TOPOSSEQUÊNCIA I

Fig. 07

TOPOSSEQUÊNCIA II

Fig. 08

Des. L. Colligaris Netto.

TOPOSSEQUÊNCIA III

Fig. 09

TOPOSSEQUÊNCIA IV

Fig. 10