UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**URÂNIO NOS HIDROTERMALITOS POTÁSSICOS
("ROCHA POTÁSSICA") DA MINA OSAMU UTSUMI,
COMPLEXO ALCALINO DE POÇOS DE CALDAS, MG**

MARIA MANUELA GALVÃO MONTEIRO CAPOVILLA

Orientador: Prof. Dr. Johann Hans Daniel Schorscher

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

	Nome	Assinatura
Presidente:	Prof. Dr. Johann Hans Daniel Schorscher
Examinadores:	Prof. Dr. Horstpeter Herberto G. J. Ulbrich
	Prof. Dr. Jean Michel Legrand
	Prof. Dr. Milton Luiz Laquintinie Formoso
	Prof. Dr. Othon Henry Leonardos

SÃO PAULO
2001

ERRATA

ÍNDICE GERAL, linha 5: ...Laboratoriais...
 ÍNDICE GERAL, linha 22: ...Frentes Redox_e....
 ÍNDICE GERAL, linha 30: ..._Geoquímica...
 ÍNDICE DE FIGURAS, 1ª página, linha 4: ...e Gomes...
 ÍNDICE DE FIGURAS, 2ª página, linha 1: ...da mina...
 ÍNDICE DE FIGURAS, 2ª página, linha 2: ...da mina...
 ÍNDICE DE FIGURAS, 2ª página, linha 19: ...Os pontos...
 ÍNDICE DE FOTOS, 1ª página, linha 4: ...mineralizações...
 ÍNDICE DE TABELAS (Anexo I), 2ª página, linha 3: ...Poços...
 ÍNDICE DE TABELAS (Anexo I), 2ª página, linha 7: ...Poços...
 RESUMO, 1ª página, linha 5: ...em brechas...
 RESUMO, 1ª página, linha 13: ...à explosões...
 RESUMO, 1ª página, linha 28: ...à todas...
 Pág. 2, linha 22: ...maior_e, ...
 Pág. 2, linha 23: ...preferencialmente íons complexos de uranila...
 Pág. 10, linha 11: ...neste trabalho...
 Pág. 11, linha 11: ... a elas...
 Pág. 12, linha 8: ...defesa da Tese...
 Pág. 19, linha 6: ...então, desenvolveram-se as frentes redox e com estas...
 Pág. 19, linha 22: ...principalmente, ...
 Pág. 20, linha 2: ...permeabilidade que, portanto, ...
 Pág. 20, linha 4: ...A todas...
 Pág. 20, linha 19: ...da mina indicaram...
 Págs. 24 a 64, cabeçalho: *Petrografia, Mineralogia e Química Mineral*
 Pág. 25, linha 13: ...a pequenas...
 Pág. 26, linha 13: ...illita/sericita...
 Pág. 26, linha 28: ...é de brechas...
 Pág. 27, linha 23: ...leucitas, com preservação magmática...
 Pág. 27, linha 28: ...não identificados...
 Pág. 31, linha 20: ...Ph e NeS...
 Pág. 33, linha 10: ...illita/sericita...
 Pág. 33, linha 13: ...As illita/sericita...
 Pág. 34, linha 21: ...propiciaram, nas rochas afetadas...
 Pág. 36, linha 3: ...entretanto, ativas...
 Pág. 37, linha 18: ...uraninita/pithblenda...
 Pág. 37, linha 23: ...caolinita da...
 Pág. 38, linha 3: ...científica...
 Pág. 38, linha 8: ...reduzidos...
 Pág. 38, linha 29: ...(cf. pág. 20; ...
 Pág. 39, linha 3: ...enriquecimentos...
 Pág. 39, linha 13: ...foto 30b. ...
 Pág. 39, linha 25: ...indígenos...
 Pág. 40, linha 15: ...SiO₂ (2.09-2.96% ...
 Pág. 55, linha 3 da legenda Foto 30: ... (amostra SN/24)...
 Pág. 63, Tabela 1, linha 37, coluna 1: greenockita
 Pág. 65, linha 23: ...uraníferos em...

Pág. 65, linha 25:..., adequadas às finalidades...

Pág. 66, linha 4: ...não-hidrotermalizados...

Pág. 66, linha 12: ...destacar_que...

Pág. 66, linha 13: ...rochas, por técnicas...

Pág. 66, linha 14: ...absolutos,...

Pág. 66, linha 19: ...interferências inter-elementares...

Pág. 72, legenda Figura 9: Distribuição dos Ph e NeS como peralcalinos metaluminosos a peraluminosos no diagrama de Maniar e Piccoli (1989) (parâmetros de Shand (1943)).

Pág. 73, linha 25: ...Por fim, ...

Pág. 74, Legenda Figura 10, linha 8: ...MedFon2. A simbologia utilizada para amostras individuais e médias está representada na Pág. 71.

Pág. 76, linha 21: ...oxidados),...

Pág. 78, linha 18: ...feitos, ...

Pág. 78, linha 19: ...reduzidos, ...

Pág. 79, linha 15: ...(Pb como anglesita)...

Pág. 79, legenda Figura 12: ...elementos traço. Legenda: - AltaMin-Th, - medRed-mi, +- AltaMin-U.

Pág. 80, Tabela 4, legenda, linha 1: ...(Ph e NeS) regionais (MedAlcR)...

Pág. 82, linha 13: ...pirita e, subordinadamente, ...

Pág. 83, linha 15: ...amostragem, ...

Pág. 84, linha 11: ...normalização com valores do manto primordial.

Pág. 86, linha 2: ... oxidada demonstra, ...

Pág. 86, linha 5: ...à FR, apresentam menor...

Pág. 87, linha 2: ...2,2 ppm, ficam próximos à média, sendo Mo...

Pág. 87, linha 3: ...1,3 ppm, ...

Pág. 87, linha 11: ...reduzidas das...

Pág. 87, linha 14: ...Similarmente, também é reprecipitada...

Pág. 87, linha 15: ...própria, ilsemanita (azul de molibdênio: um óxi-hidróxido ou óxi-sulfato hidratado de Mo), de cor azul escuro forte e típica expressão visual em afloramentos e amostras de mão, estável.

Pág. 87, linha 19: ...pirita, são disponibilizados ainda, ...

Pág. 87, linha 20: ...hidrólise...

Pág. 88, linha 2: ...específicos.

Pág. 88, linha 3: ...: Apresenta-se, na zona reduzida, em concentrações...

Pág. 88, linha 4: ...e com enriquecimento...

Pág. 88, linha 5: ... oxidada, ...

Pág. 88, linha 15: ...(paládio):...

Pág. 88, linha 21: ...Fe/OHF...

Pág. 89, linha 3: ...em status...

Pág. 89, linha 13: ...à média...

Pág. 89, linha 14: ...apresenta, na...

Pág. 89, linha 16: ...(**foto 24**)...

Pág. 89, linha 21: ...absolutos, ...

Pág. 89, linha 22: ...textural), preservado...

Pág. 89, linha 24: ...Desta forma, ...

Pág. 92, linha 19: ...e illita/sericita)...

Pág. 93, linha 4: ...pela illita/sericita...

Pág. 93, linha 24: ...(cromo)..

Pág. 94, linha 15: ...supergênica)₂...

Pág. 94, linha 16: ...isomorfia, e se...

Pág. 95, linha 12: ...ETRL, do La...

Pág. 95, linha 15: ...ERTP, do Dy...

Pág. 95, linha 16: ...reduzidas₂ quanto...

Pág. 95, linha 27: ...oxidadas₂...

Pág. 96, linha 13: ...irregularidades (...

Pág. 98, linha 6: ...OHF ocorreriam...

Pág. 98, linha 18: ...eqüidistantes₂ a ...

Pág. 102, linha 20: ...300x) ao Sm...

Pág. 104, linha 29: ...amostra 3₂ da...

Pág. 105, linha 5: ...hipogênicos₂...

Pág. 106, linha 2: ...oxidada₂ essas...

Pág. 106, linha 24: ...próximas à...

Pág. 107, linha 24: ...predominam₂ ...

Pág. 107, linha 25: ...frentes₂ os controles geoquímicos globais dos hidrotermalitos,...

Pág. 107, linha 27: ...rochas₂ desde...

Pág. 107, linha 28: ...magmáticas₂ ou...

Pág. 112, linha 3: ...Foto 27)₂ ...

Pág. 112, linha 4: ...heterogênea₂...

Pág. 112, linha 20: ...oxidada₂ indicando...

Pág. 112, 2º parágrafo: ... A geoquímica global das duas frentes redox de tipo 3 heterogêneas mostra sua ocorrência em hidrotermalitos de fraca mineralização hipogênica. Mostra ainda a seletividade e variabilidade muito fraca da mineralização supergênica, que é restrita na zona reduzida, ao U associado com Cd. Na zona oxidada, a mineralização supergênica de U também é restrita, e associada ao Cd.

Pág. 112, linha 28: ...Cd, a outros..

Pág. 113, linha 1: ...reduzidos, que são também oportunisticamente...

Pág. 113, linha 13: ...Notam-se ainda,...

Pág. 113, linha 28: ...U, Th, Zr...

Pág. 114, linha 7: ...ETRP₂ sem que se note...

Pág. 115, linha 14: Entre estas₂ ...

Pág. 115, linha 16: ...cita-se odo Cd₂.....zona oxidada₂...

Pág. 119, linha 18: ...seculares associadas...

Pág. 119, linha 20: ...regionais e,...

Pág. 120, linha 13: ...OHF caracterizados...

Pág. 120, linha 18: ...repetindo virtualmente...

Pág. 126, linha 12: ...observada₂ desta forma, na população...

Pág. 127, linha 12: ...FR, ou ainda,...

Pág. 127, linha 23: ...FR₂ ocorreu a ...

Pág. 127, linha 25: ...em ilsemanita)...

Pág. 128, linha 21: ...U₂ mas...

Pág. 128, linha 22: ...Assim₂ resultam padrões de ETR₂...

Pág. 128, linha 25: ...,1992) dos processos...

Pág. 128, linha 30: ...definidos₂ do...

- Pág. 128, linha 32: ...integrado₂ todos...
- Pág. 130, linha 3: ...que_são constituintes...
- Pág. 132, linha 3: ...principalmente como micro...
- Pág. 133, linha 8: ...cristalina₂ com...
- Pág. 133, linha 10: ...coprecipitados...
- Pág. 133, linha 14: ...1992)_revelaram...
- Pág. 135, linha 25: ...disseminada₂...
- Pág. 136, linha 6: ...baddeleyta₂ de...
- Pág. 136, linha 9: ...geoquímica₂...
- Pág. 136, linha 13: ...geoquímica); a mineralização...
- Pág. 136, linha 19: ...entretanto₂...
- Pág. 136, linha 21: ...hoje_e responsável...
- Pág. 136, linha 23: ...ciclo...
- Pág. 137, linha 6: ...rica de U₂ ...
- Pág. 137, linha 11: ...*in situ*₂ por...
- Pág. 137, linha 28: ...mineralizaçã₂...
- Pág. 138, linha 12: ...supergênica de U₂...
- Pág. 138, linha 14: ...ocorreu...
- Pág. 138, linha 21: ...típico₂ pode ser citado o Pd₂ ...
- Pág. 138, linha 24: ...detalhes₂...
- Anexo III, pág.5: retirar análise da amostra A2 – P.85/C5 matriz
- Anexo III, pág.6: retirar análise da amostra A5 – P.113/C1 matriz

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**URÂNIO NOS HIDROTERMALITOS POTÁSSICOS ("ROCHA
POTÁSSICA") DA MINA OSAMU UTSUMI, COMPLEXO ALCALINO
DE POÇOS DE CALDAS, MG**

MARIA MANUELA GALVÃO MONTEIRO CAPOVILLA

Orientador: Prof. Dr. JOHANN HANS DANIEL SCHORSCHER

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

SÃO PAULO
2001

DEDALUS - Acervo - IGC

30900006849

ÍNDICE GERAL

1.	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
2.	METODOLOGIA.....	2
2.1.	<i>Trabalhos Preliminares.....</i>	4
2.2.	<i>Trabalhos de Campo.....</i>	4
2.3.	<i>Trabalhos Laboratoriais.....</i>	4
2.3.1.	<i>Tratamentos Preliminares.....</i>	5
2.3.2.	<i>Microscopia Petrográfica e de Minérios.....</i>	5
2.3.3.	<i>Litogeoquímica.....</i>	6
2.3.4.	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</i>	9
2.3.5.	<i>Microsonda Eletrônica (MSE).....</i>	10
2.3.6.	<i>Mineralogia das Piritas e Isótopos Estáveis de $\delta^{34}\text{S}$.....</i>	11
2.4.	<i>Trabalhos Finais.....</i>	12
3.	ESTUDOS GEOLÓGICOS.....	13
3.1.	<i>Geologia Regional.....</i>	13
3.2.	<i>Geologia Local.....</i>	17
3.3.	<i>Geocronologia.....</i>	20
4.	PETROGRAFIA E MINERALOGIA E QUÍMICA MINERAL.....	24
4.1.	<i>Fonolitos e Nefelina Sienitos Não-Hidrotermalizados.....</i>	25
4.2.	<i>Hidrotermalitos e Frentes Redox da Mina de Urânio Osamu Utsumi.....</i>	28
4.2.1.	<i>Hidrotermalitos.....</i>	28
4.2.2.	<i>Frentes Redox Mineralização Supergênica de U.....</i>	34
5.	LITOGEOQUÍMICA.....	65
5.1.	<i>Rochas Não-Hidrotermalizadas da Mina Osamu Utsumi e Regionais.....</i>	65
5.2.	<i>Rochas Hidrotermais da Mina de Urânio: Fonolitos (PH), Nefelina Sienitos (NeS) e Brechas (Br) Reduzidos e Oxidados.....</i>	76
5.3.	<i>Frentes Redox.....</i>	81
5.3.1.	<i>Resultados Analíticos e Tratamentos dos Dados.....</i>	83
5.3.2.	<i>.....Geoquímica das Frentes Redox.....</i>	84
6.	ESTUDOS ISOTÓPICOS DE $\delta^{34}\text{S}$.....	130
7.	CONCLUSÃO E DISCUSSÃO FINAL.....	135
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140

ANEXO I (Dados geoquímicos)

ANEXO II (Listagem de amostras)

ANEXO III (Dados de microsonda eletrônica– análises de WDS)

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1:** Esboço geológico da parte centro-leste do Brasil (modificado de Almeida, 1977), mostrando a localização do Complexo Alcalino de Poços de Caldas e outras intrusões alcalinas e de carbonatitos (segundo Ulbrich & Gomes, 1981). Subdivisões tectônicas: (1)-Maciço de Guaxupé; Cinturões Móveis (2)-Ribeira e (3)-Brasília; (4)-Bacia do Paraná (sedimentar com basaltos); (5)-Cráton do São Francisco. Símbolos e abreviações: ● PdC-Complexo Alcalino de Poços de Caldas, ●-complexos alcalinos e ■-complexos alcalinos com carbonatitos, I-infracambrianos, M-mesozóicos; cidades ■ SP-São Paulo, ■ RJ-Rio de Janeiro, ■ BH-Belo Horizonte ... 14
- Figura 2:** Mapa geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas (modificado de Ellert, 1959, e Fraenkel et al., 1985). A principal área de alteração hidrotermal inclui a mina de Urânio Osamu Utsumi... 15
- Figura 3:** Mapa geológico e de amostragem da mina de urânio Osamu Utsumi, na parte SE do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG... 21
- Figura 4:** Perfil esquemático e modelo metalogenético da Mina de Urânio Osamu Utsumi, na parte SE do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG... 22
- Figura 5:** Distribuição dos Ph e NeS no campo dos fonolitos, em diagrama de Le Maitre (1989)... 71
- Figura 6:** Distribuição dos Ph e NeS no campo dos fonolitos, em diagrama de Cox et al. (1979)... 71
- Figura 7:** Distribuição dos Ph e NeS no campo dos fonolitos em gráfico de Winchester e Floyd (1977)... 72
- Figura 8:** Distribuição dos Ph e NeS no campo dos fonolitos e traquitos em gráfico de Winchester e Floyd (1977)... 72
- Figura 9:** Distribuição dos Ph e NeS no campo dos fonolitos no diagrama de Maniar e Piccoli (1989) (parâmetros de Shand (1943))... 72
- Figura 10 a-h:** Variogramas expandidos dos Ph menos alterados da borda NW da mina de U e dos Ph e NeS regionais (Anexo I, Tabela I.4): (a)-todas as

amostras e médias; (b)-todas as médias; (c)-Ph menos alterados a mina (análises FRX) e média MMFRX; (d)- Ph menos alterados a mina (análises ICP-AES) e média MMICP; (e)- NeS regionais – NS1 (Schumann, 1994) e média MedNS1; (f)- Ph regionais NS1 (Schumann, 1994) e média MedFon1; (g)-NeS regionais - NS2 (Schorscher e Shea, 1992) e média MedNS2; (h)- Ph regionais - Ph2 (Schorscher e Shea, 1992) e média MedFon2..... 74

Figura 11 a-b: Variogramas multielementares da composição média dos Ph menos alterados da borda NW da mina de U normalizados pela composição média dos Ph e NeS regionais: (a)-óxidos maiores; (b)-elementos traço.....74

Figura 12: Variogramas multielementares da composição média dos hidrotermalitos reduzidos e de mineralizações ricas hipogênicas (reduzidas) de U e Th, respectivamente, normalizados pela composição média dos Ph e NeS regionais: (a)-óxidos maiores; (b)-elementos traço...79

Figura 13: Variogramas multielementares da composição média dos hidrotermalitos oxidados normalizados pela média dos hidrotermalitos reduzidos: (a)-óxidos maiores; (b)-elementos traço..... 81

Figura 14: Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra PDC-PH-028 (frente redox de tipo 1). O pontos amostrados estão dispostos equidistantemente na abcissa, segundo a sequência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil 1, (b)- perfil 2, (c)- perfil 1 – detalhe e (d)- perfil 2 – detalhe.....91

Figura 15: Variograma dos ETR da amostra PDC-PH-028 (perfil 1) da frente redox de tipo 1, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe.....97

Figura 16: Variograma dos ETR da amostra PDC-PH-028 (perfil 2) da frente redox de tipo 1, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe.....97

Figura 17: Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra M2b (frente redox de tipo 2). O pontos amostrados estão dispostos equidistantemente na abcissa, segundo a sequência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil 1, (b)- perfil 2, (c)- perfil 1 – detalhe e (d)- perfil 2 – detalhe..... 99

- Figura 18:** Variograma dos ETR da amostra M2b (perfil 1) da frente redox de tipo 2, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe... ..103
- Figura 19:** Variograma dos ETR da amostra M2b (perfil 2) da frente redox de tipo 2, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe... ..103
- Figura 20:** Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra SN/15 (frente redox de tipo 3, heterogênea). Os pontos amostrados estão dispostos equidistantemente na abcissa, segundo a sequência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil, (b)- detalhe... ..108
- Figura 21:** Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra U3c (frente redox de tipo 3, heterogênea). Os pontos amostrados estão dispostos equidistantemente na abcissa, segundo a sequência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil, (b)- detalhe... ..108
- Figura 22:** Variograma dos ETR da amostra U3c da frente redox de tipo 3, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe... ..111
- Figura 23:** Variograma dos ETR da amostra SN/15, da frente redox de tipo 3, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe... ..111
- Figura 24:** Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra M2c (frente redox de tipo 4). Os pontos amostrados estão dispostos equidistantemente na abcissa, segundo a sequência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil, (b)- detalhe... ..117
- Figura 25:** Variograma dos ETR da amostra M2c da frente redox de tipo 4, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe... ..117
- Figura 26:** Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra IARF (frente redox complexa). Os pontos amostrados estão dispostos equidistantemente na abcissa, segundo a sequência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil 1, (b)- perfil 2, (c)- perfil 1 – detalhe e (d)- perfil 2 – detalhe... ..124

- Figura 27:** Variograma dos ETR da amostra IARF (perfil 1) da frente complexa, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe125
- Figura 28:** Variograma dos ETR da amostra IARF (perfil 2) da frente redox complexa, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe125
- Figura 29:** Diagramas binários, segundo Bau (1996), das amostras de frentes redox: □- reduzida, ○- oxidada, ●- oxidada rica em Fe, ▲- zona branca. (a)- Y/Ho versus Zr/Hf, (b)- Y versus Y/Ho.....129
- Figura 30 :** Histograma dos resultados das análises isotópicas do S de piratas hidrotermais, supergênicas e sulfatos supergênicos em $\delta^{34}\text{S}$ relativo CDT.....133

ÍNDICE DE TABELAS (texto)

<i>Tabela 1: Síntese da mineralogia dos nefelina sienitos (NeS) e fonolitos (Ph) regionais e hidrotermalitos equivalentes reduzidos (HiRed) e oxidados (HiOx) da mina de urânio (m - constituinte maior >10%-vol.; e - constituinte essencial ≥1% - ≤10%-vol; tr - constituintes em traços: <1%-vol).....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 2: Análises semiquantitativas por MEV-EDS em associações de minerais hidrotermais de urânio de uma amostra de brecha reduzida/piritizada de alta radioatividade da mina Osamu Utsumi (Amostra F4/243-1A, Fotos 8-19).....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 3: Dados litogeoquímicos dos fonolitos menos alterados da borda NW da mina de U (ph-mi) por FRX e ICP-AES e respectivas médias (MMFRX e MMICP), e composições médias de fonolitos e nefelina sienitos regionais (ph-reg e ns-reg) calculadas de dados de FRX de: 1-Schumann (1994), 2-Schorscher e Shea (1992).....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 4: Composições médias integradas dos fonolitos não ou pouco alterados da borda NW da mina de U, em comparação às médias das rochas alcalinas regionais e dos hidrotermalitos reduzidos e oxidados predominantes da mina (dados deste trabalho e de Schorscher e Shea, 1992; Schumann, 1994; Waber et al., 1992).....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 5: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox PDC-PH-028.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 6: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox M2b.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 7: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox SN/15.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabela 8: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox U3c.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 9: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox M2c.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabela 10: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox IARF.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 11: Resultados das análises isotópicas de S de piritas hidrotermais e supergênicas e sulfatos supergênicos.....</i>	<i>131</i>

ÍNDICE DE FOTOS

- Foto 1:** Frentes redox principal e secundárias da mina de urânio Osamu Utsumi. Observamos rochas reduzidas: azuis e oxidadas: marrom alaranjadas e o processo de formação de macronódulos supergênicos a partir de frentes redox secundárias com mineralizações ricas em U... ..23
- Foto 2:** Detalhe do processo de formação de macronódulos supergênicos ricos em U, por “implosão”, isto é, oxidação in situ de volumes de rochas reduzidas mineralizadas e isoladas por frentes redox secundárias em ambiente oxidado... ..23
- Foto 3:** Fonolito não-hidrotermalizado da mina de urânio (amostra A1HT, lâmina A1-1) com microfenocristal de clinopiroxênio zonado, em matriz fina de sanidina, nefelina, aegirina e giannetita (polarizadores X, lado maior da foto = 7mm).Nota-se o núcleo sódio-augítico arredondado por corrosão magmática e supercrescimentos de aegirina-augita a aegirina na borda externa subidiomórfica rica em inclusões poiquilíticas.41
- Foto 4:** Fonolito não-hidrotermalizado da mina de urânio (amostra A1HH, lâmina A1-homo-2). Detalhe de microfenocristal de sanidina com zona de borda rica em inclusões poiquilíticas (polarizadores X, lado maior da foto = 5mm). Ponto 74- análise de WDS, **Anexo III**... ..41
- Foto 5:** Fonolito fracamente hidrotermalizado da mina de urânio (amostra AIM, lâmina A1-2) com microfratura preenchida de fluorita hidrotermal de cristalização grossa (incolor a azul), também fraturada e carbonatos em impregnações disseminadas cripto a microcristalinos (polarizadores X, lado maior da foto = 7mm)... ..42
- Foto 6:** Brechas vulcânicas hidrotermalizadas na parte centro-leste (corpo B) da mina Osamu Utsumi (altura da bancada é de $\pm 3m$)... ..42
- Foto 7:** Mineralização uranífera hidrotermal rica na matriz (cimento) de brecha vulcânica, indicada por medidas cintilométricas (valores em cps) e cortada por fraturamento tectônico posterior (linhas tracejadas com setas de movimento relativo) (amostra F4/243-1A)... ..43
- Foto 8:** Imagem nº M1-001 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra

- F4/243-1A). Os pontos de análise 4 e 5 representam silicatos de Zr com teores de U de até 5,14%.....43*
- Foto 9:** Imagem nº M2-001 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra F4/243-1A). O ponto de análise 9 representa sulfeto de Fe com Zn e Zr e teores de U de até 17,17%.....44*
- Foto 10:** Imagem nº M3-001 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra F4/243-1A). O ponto de análise 1 representa sulfeto de Zn com Zr e Fe e teores de U de até 15,49%.....44*
- Foto 11:** Imagem nº M4-002 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra F4/243-1A). Trata-se de silicato de Zr com Fe e de teores de U de até 16%.....45*
- Foto 12:** Imagem nº U-002 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra F4/243-1A). Os pontos de análises 1 e 2 representam sulfetos de Zn com Fe com teores de U de 21,24 a 38,69%.....45*
- Foto 13:** Imagem nº U-003 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra F4/243-1A). O ponto de análise 1 representa silicato de Ca com inclusões de sulfeto de Zn e Fe com teores de U de 26,69%.....46*
- Foto 14:** Imagem nº U-004 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra F4/243-1A). O ponto de análise 1 representa um sulfeto de Zn com Fe com teores de U muito baixo de 0,65%.46*
- Foto 15:** Imagem nº U-005 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra F4/243-1A). O ponto de análise 1 representa sulfeto de Fe com Zn com*

- teores de U de 21,24 a 38,69%. Os pontos 2 e 3 representam sulfetos de Zn com Zr e Fe com teores de U de 0,44 %.....47
- Foto 16:** Imagem nº U-006 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra F4/243-1A). Os pontos de análises 1, 2 e 3 representam sulfetos Mo com Fe com teores de U de 0,72 a 12,02 %. O ponto 4 representa um sulfeto de Fe com Zr com teores de U de até 2,76 %.....47
- Foto 17:** Imagem nº U-007 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra F4/243-1A). Os pontos de análises 1, 2 e 3 representam silicatos de Zr com Mo e Fe com teores de U de 4,54 a 6,9 %.....48
- Foto 18:** Imagem nº U-009 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra F4/243-1A). Os pontos de análises 1, 2 e 3 representam sulfetos Fe com Mo com teores de U de 4,32 a 36,83 %.....48
- Foto 19:** Imagem nº U-010 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na **Tabela 2** (amostra F4/243-1A). Os pontos de análises 1 e 3 representam sulfetos Fe com Mo, Zr e Zn, o ponto 2 representa sulfeto de Zn com Mo e Zr.....49
- Foto 20:** Ph porfirítico hidrotermalizado reduzido da mina Osamu Utsumi, com fenocristais de sanidina, nefelina e pseudoleucita em matriz fina piritizada (amostra F1/69-1A).....49
- Foto 21:** Ph porfirítico hidrotermalizado oxidado, com caolinização mais forte dos feldspatos e pigmentação da rocha por OHF (amostra F1/1-1.30m). Concentrações maiores de OHF indicam oxidação das piritas em condições insaturadas.....50
- Foto 22:** Frente redox de morfologia irregular em Ph porfirítico com fenocristais de pseudoleucita (redonda branca), sanidina (prismática branca) e nefelina (prismática cinza escura), separando Ph hidrotermalizados reduzidos (cinza azulados) e Ph hidrotermalizados oxidados (marrom avermelhados) (amostra F1-47).....50

- Foto 23:** Frente redox com mineralização secundária de U em brecha magmática. Os micronódulos finos e pretos de pitchblenda ocorrem somente na parte reduzida da rocha, numa zona de até 20 mm de largura adjacente à frente (amostra do corpo B de minério, próximo às coordenadas J/1Z).....51
- Foto 24:** Amostra PDC-PH-028, frente redox de tipo 1, com forte enriquecimento de OHF e indicação de amostragens para ICP-MS51
- Foto 25:** Amostra M2b, frente redox de tipo 2, com zona branca de contato e indicação de amostragens para ICP-MS.....52
- Foto 26:** Amostra SN/15, frente redox de tipo 3, com zonas rítmicas ricas em OHF e indicação de amostragens para ICP-MS.....52
- Foto 27:** Amostra U3c, frente redox de tipo 3, com zonas rítmicas ricas em OHF e indicação de amostragens para ICP-MS.....53
- Foto 28 a:** Amostra M2c, frente redox de tipo 4, com contato nítido e indicação de amostragens para ICP-MS.....53
- Foto 28 b:** Frente redox de tipo 4 em fonolito microxenolítico (amostra SN/21).54
- Foto 29:** Amostra IARF, frente redox complexa e indicação de amostragens para ICP-MS. Ocorrem 2 frentes caracterizadas por zonas enriquecidas em OHF, uma recente na interface com a rocha reduzida e outra fóssil na zona oxidada, separadas por avanço de frente de tipo 4, em condições saturadas e redistribuição homogênea de OHF.....54
- Foto 30:** a-Detalhe de uma frente redox com forte enriquecimento supérgeno de U na forma de micronódulos (pretos) e disseminações finas (tingimentos cinza claros a médios) (amostra SN/21); b-Micronódulos concêntricos e homogêneos (amostra RF1)(tamanho natural).....55
- Foto 31:** a-Microfotografia de luz transmitida (polarizadores //) de micronódulo de U (diâmetro de 10 mm), em Ph com textura fluidal, mostrando crescimento periférico intersticial e a substituição interna dos minerais silicáticos (polarizadores //, lado maior da foto 15 mm) (amostra SN/15, lâmina SN/15); b-Microfotografia de seção polida (luz refletida) de micronódulo de U (diâmetro de 3mm) mostrando o enriquecimento do nódulo em pirita supergênica em relação às piritas hidrotermais na matriz da rocha (amostra SN/21, lâmina SN/21).....56

- Foto 32:** *a*-Macronódulo de uraninita/pitchblenda maciça em amostra de mão com piritas supergênicas em cristais de 0,2-1 mm idiomórficos, e núcleo silicático de rocha reduzida (amostra VII); *b*-Microfotografia de seção polida (luz refletida) de macronódulo com uraninita/pitchblenda botrioidal sobrecrecida às piritas supergênicas idiomórficas e raros restos de piritas hidrotermais finas arredondadas por corrosão/dissolução parcial (amostra SN/24; pol. //, lado maior da 10 mm).....57
- Foto 33:** Imagem de microscopia eletrônica de mineralização supergênica de U, mostrando pitchblenda botrioidal e vermiforme, crescendo sobre minerais silicáticos da matriz e piritas da 2ª geração (amostra SN/24, lâmina sn/24)..... 58
- Foto 34:** Imagem de microscopia eletrônica, mostrando detalhe da foto 33 de superfície de uma pirita de 2ª geração, com início do crescimento de pitchblenda botrioidal, em arranjos finamente zonados. Esta estrutura sugere atividade biogênica (colônia de bactérias) que causam a precipitação e o crescimento de pitchblenda botrioidal (amostra SN/24, lâmina sn/24)..... 58
- Foto 35:** Imagem de microscopia eletrônica mostrando outro detalhe da foto 33, com pitchblenda botrioidal, evidenciando a criptocristalinidade de seus grãos e as estruturas de crescimento zonado (amostra SN/24, lâmina sn/24).....59
- Foto 36:** Imagem de microscopia eletrônica que mostra detalhe de mineralização supergênica de U com pitchblenda criptocristalina vermiforme, crescendo sobre superfícies (fraturas e bordas de grãos) de minerais silicáticos (amostra SN/24, lâmina sn/24)..... 59
- Foto 37:** Imagem de microscopia eletrônica de OHF exógenos, a partir da oxidação da pirita sob sistema de saturação, finamente disseminados na matriz do hidrotermalito potássico (amostra M2c, lâmina M2c)..... 60
- Foto 38:** Imagem de microscopia eletrônica, mostrando cristal idiomórfico de pirita hidrotermal (amostra M2c, parte reduzida, lâmina M2c)..... 60
- Foto 39:** Imagem de microscopia eletrônica de OHF indígena, pseudomorfizando um cristal idiomórfico de py. A falta de OHF fora da pirita indica um sistema de insaturação durante a oxidação da mesma (amostra F1/1-1.30m, lâmina F1/1)..... 61

Foto 40: Imagem de microscopia eletrônica de feldspato potássico da rocha reduzida em estágio inicial de substituição incompleta, por caolinita hidrotermal bem cristalizada (amostra F4/243-1A, lâmina F4/243-1A)..... 61

Fotos 41: Detalhe da foto 40, imagem de microscopia eletrônica mostrando caolinita hidrotermal bem cristalizada (amostra F4/243-1A, lâmina F4/243-1A)..... 62

Foto 42: Imagem de microscopia eletrônica de feldspato alcalino com inclusões de minerais radioativos hidrotermais envolvidos por auréolas de corrosão (amostra F4/243-1A, lâmina F4/243-1A)..... 62

ÍNDICE DE TABELAS (Anexo I)

- Tabela I-1:** Análises por FRX (IGc-USP) de fonolitos da borda NW da Mina de Urânio: (ph-mi) – não a fracamente hidrotermalizados e composição Média, e (ph-mi-alt) – variável e fortemente alterados. L.D. e L.Q. – Limites de Detecção e Quantificação; ¹ – carbonatização fraca; ² – carbonatização forte e piritização; ³ – carbonatização, fluoritização e piritização fortes; ¹¹ – seritização forte; ¹² – argilização intempérica.1
- Tabela I-2:** Análises por FRX de Fonolitos da borda NW da Mina de Urânio: (ph-mi) – não a fracamente hidrotermalizados e composição Média, e (ph-mi-alt) – variável a fortemente alterados, analisados no Laboratório de FRX do Instituto de Mineralogia Aplicada e Geoquímica da T.U. Munique, Alemanha. L.D. – Limites de Detecção; ¹ – carbonatização fraca; ² – carbonatização forte e piritização; ³ – carbonatização, fluoritização e piritização fortes; ¹¹ – seritização forte; ¹² – argilização intempérica.....3
- Tabela I-3:** Análises por ICP-AES (IGc-USP) de Fonolitos da borda NW da Mina de Urânio: (ph-mi) – não a fracamente hidrotermalizados e composição Média, e (ph-mi-alt) – variável a fortemente alterados, analisados no Laboratório de FRX do Instituto de Mineralogia Aplicada e Geoquímica da T.U. Munique, Alemanha. L.D. – Limites de Detecção; ¹ – carbonatização fraca; ² – carbonatização forte e piritização; ³ – carbonatização, fluoritização e piritização fortes; ¹¹ – seritização forte; ¹² – argilização intempérica.....5
- Tabela I-4:** Dados litogeoquímicos comparativos de Fonolitos não-hidrotermalizados selecionados da borda NW da Mina de Urânio (ph-mi) por FRX e ICP-AES e médias (MMXRF e MMICP), assim como de fonolitos e nefelina sienitos regionais (ph-reg e ns-reg): 1- segundo Schumann (1994), 2- segundo Schorscher e Shea (1992) e respectivas médias.....6
- Tabela I-5:** Índice de alcalinidade/agpaicidade de Fonolitos não-hidrotermalizados selecionados da borda NW da Mina de Urânio (ph-mi) por FRX e ICP-AES e médias (MMXRF e MMICP), assim como de fonolitos e nefelina sienitos regionais (ph-reg e ns-reg): 1- segundo Schumann (1994), 2- segundo Schorscher e Shea (1992) e respectivas médias.....11

<i>Tabela I-6 A: Análises por FRX de rochas reduzidas (hidrotermalitos reduzidos) com pirita da mina de U Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas (Projeto Internacional Pó-ços de Caldas; dados extraídos de Waber et al., 1991; 1992) ...</i>	<i>12</i>
<i>Tabela I-6 B: Análises por FRX de rochas oxidadas (hidrotermalitos oxidados) com OHF da mina de U Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas (Projeto Internacional Poços de Caldas; dados extraídos de Waber et al., 1991; 1992) ...</i>	<i>17</i>
<i>Tabela I-7 A: Geoquímica via ICP-MS dos microperfis das frentes redox nas zonas reduzidas ...</i>	<i>19</i>
<i>Tabela I- 7 B: Geoquímica via ICP-MS dos microperfis das frentes redox nas zonas oxidadas.</i>	<i>24</i>
<i>Tabela I-8: Reanálise via ICP-MS e AES* de amostras maiores das frentes redox dos microperfis ...</i>	<i>31</i>

ÍNDICE DE TABELAS (Anexo II)

<i>Tabela II-1: Listagem de amostras.....</i>	<i>1</i>
--	-----------------

ÍNDICE DE TABELAS (Anexo III)

<i>Feldspatos Alcalinos</i>	<i>1</i>
<i>Clinopiroxênios</i>	<i>4</i>
<i>Nefelinas e Feldspatóides</i>	<i>7</i>
<i>Feldspatos Alcalinos Hidrotermais</i>	<i>9</i>
<i>Sericitas Hidrotermais</i>	<i>10</i>

RESUMO

A mineralização de U da mina Osamu Utsumi, no sudeste do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG, de idade mesozóica, foi estudada com métodos geológicos de campo e laboratoriais mineralógico-petrográficos e geoquímicos. É uma mineralização poligenética, formada em fonolitos e nefelina sienitos leuco a hololeucocráticos e brechas magmáticas destes, por processos superimpostos hidrotermais específicos e supergênicos. Os processos hidrotermais mineralizantes ocorreram de forma localizada e causaram a potassificação, argilização e piritização das rochas nefelínicas, transformando-as em hidrotermalitos reduzidos, junto com sua mineralização pobre em U, Th, Zr, ETR, F, Mo, Zn, Pb, Ba, removendo principalmente Na, Ca, Mg e Sr. A mineralização complexa de tipo impregnação disseminada e *stockwork* superimposto é bastante variável, indica fluidos heterogêneos e foi relacionada a explosões magmato-freáticas e à formação de brechas de conduto subvulcânicas. A assinatura geoquímica, incluindo os ETR, relaciona estes processos como pós-magmáticos consangüíneos finais ao magmatismo nefelínico. A mineralização de tipo impregnação disseminada é, em geral, pobre (anomalia geoquímica); mineralização mais rica ocorre nas matrizes e como cimentos das brechas e em fraturas da mineralização *stockwork*. Aí, foram encontradas fases individuais e suas misturas, incluindo sulfetos, óxidos, silicatos e molibdatos, entre outros, com U variando entre 0,65 e 39%-peso; entretanto, um mineral específico de U não pôde ser definido, ocorrendo, provavelmente, uraninita criptocristalina.

Há cerca de 76 Ma cessaram, segundo outros autores, os processos magmáticos na área da mina, iniciando-se o ciclo supergênico, em andamento até hoje, e responsável pela formação do perfil de intemperismo. Os agentes desse ciclo, principalmente águas oxidantes descendentes, sob condições ambientais, promoveram a dissolução oxidante de pirita e demais sulfetos, liberação de ácido sulfúrico e ataques variáveis e específicos a todas as fases minerais dos hidrotermalitos reduzidos/piritizados pré-existentes, transformando-os em hidrotermalitos oxidados com OHF (isentos de pirita e demais sulfetos). Originaram-se assim, frentes redox típicas, separando os hidrotermalitos reduzidos dos oxidados, por interfaces nítidas muito bem definidas. As zonas de frentes redox compreendem faixas de 10-20 cm de largura dos hidrotermalitos reduzidos e oxidados adjacentes às interfaces e são os principais sítios da mineralização supergênica rica de U. Cinco tipos de frentes redox foram definidos por critérios geológicos, mineralógicos e geoquímicos, todos com atividade de tipo frentes rolantes. Os metais disponibilizados em solução nos processos de frentes redox de ataque ácido (desencadeado pela dissolução da pirita) são redistribuídos nas zonas da frente redox, de acordo com suas afinidades geoquímicas. U e Cd (como greenockita), principalmente, são enriquecidos na mineralização supergênica rica, em micro e macronódulos concrecionários de pitchblenda/uraninita criptocristalina; a grande maioria dos demais metais pesados e parte do U e Cd, além de outros metais mais raros e de

origens problemáticas como Pd e W, são enriquecidos e co-precipitados com OHF na zona oxidada da frente; outros metais pesados mais móveis como, por exemplo, Zn, são em parte removidos em solução nas águas do freático e superficiais. Os ETRL fortemente fracionados preservam padrões típicos de rochas e hidrotermalitos alcalinos; os ETR intermediários e ETRP mostram comportamento próprio característico das zonas de frentes redox, incluindo enriquecimentos consideráveis e efeitos tetrádicos, típicos de especiação como íons complexos com ligantes aniônicos em meio aquoso supergênico. Estudos isotópicos do S de piritas hidrotermais e de uma segunda geração de piritas, que ocorrem exclusivamente no interior de nódulos de pitchblenda supergênicos, mostram, para as primeiras, origens de magmas máficos do manto superior e para as segundas, processos biogeoquímicos de fracionamento isotópico por bactérias redutoras de sulfato. Sob aspectos de aplicação, destaca-se o comportamento geoquímico-supergênico conservador de rápida reprecipitação e/ou imóvel de U, Th, ETR, Zr e demais metais pesados, tanto em ambiente redutor quanto oxidante, sendo, no ambiente oxidante, os OHF de baixa cristalinidade as principais fases imobilizantes.

ABSTRACT

The U-mineralization of Osamu Utsumi Mine in the SE part of the Poços de Caldas Alkaline Complex, MG, of Mesozoic age, was studied with field geological and laboratory mineralogical, petrographical and geochemical methods. It is a polygenetic mineralization hosted in leucocratic to hololeucocratic phonolites, nepheline syenites and their magmatic breccias, formed by superimposed processes of a specific hydrothermal event and supergenic alteration. The hydrothermal mineralizing processes occurred on a local scale and caused potassification, argillation and pyritization of the nephelinic rocks, transforming them into reduced hydrothermalites, along with their low-grade mineralization in U, Th, Zr, REE, F, Mo, Zn, Pb, Ba, and removal of mainly Na, Ca, Mg and Sr. The complex mineralization consists of disseminated impregnation and superimposed stockwork types; it is quite variable, thus indicating heterogeneous fluids and is genetically related to magmato-phreatic explosions and to the formation of subvolcanic conduit breccias. The chemical signature, including REE, indicates these processes as of post-magmatic consanguineous origin of final stages of the nephelinic magmatism. The mineralization of the disseminated impregnation type is generally low-grade (geochemical anomaly); a higher-grade mineralization occurs in the stockwork type in the breccias as matrices and cements, as well as fracture fillings. There were identified individual mineral phases and mixtures, including sulphides, oxides, silicates and molybdates, among others, with U-contents varying from 0.6 to 39 weight-%; nevertheless, a specific U-mineral could not be defined, probably there occurs cryptocrystalline uraninite. 76 my ago, according to some authors, the magmatic processes ceased in the area of the mine, the supergenic cycle, responsible for the weathering profile, started and is still going on today. The main agents of this cycle were oxidizing descending waters under environmental conditions, causing the dissolution of pyrite and other sulphides, the liberation of sulphuric acid as well as variable and specific attacks of all the mineral phases of the reduced pyritized hydrothermalites, transforming them into oxidized hydrous ferric oxides (HFO)-bearing hydrothermalites (without pyrite and other sulphides). Thus, typical redox fronts formed, separating the reduced and oxidized hydrothermalites by very well defined interfaces. The redox fronts comprise 10-20 cm-wide zones of the reduced and oxidized hydrothermalites adjacent to the interfaces and they are the main sites of the supergenic rich U-mineralization. Five types of redox fronts could be defined, using geological, mineralogical and geochemical evidence, all acting in a roll front way. The metals released into solution by the roll front processes of acid attack (caused by the pyrite dissolution) are redistributed in the redox front zones, according to their geochemical affinities. Mainly U and Cd (as greenockite) are enriched in the high-grade supergenic mineralization in the reduced front zone as concretionary micro and macronodules of pitchblende/cryptocrystalline uraninite; most of the other heavy metals and part of the U and Cd as well as more rare metals of problematic origins, such as Pd and W, are enriched and co-precipitated

with HFO in the oxidized zone of the redox front; still other more mobile metals, as for instance Zn, are removed in solution in ground and surface waters. The strongly fractionated LREE preserve typical patterns of alkaline rocks and hydrothermalites; intermediate and HREE show distinct behaviour, characteristic of the redox front zones, including considerable enrichments and tetrad-effects, typical of a speciation as complex ions with anionic ligands in aqueous supergenic environment. S isotope studies of hydrothermal pyrites and of pyrites of a second generation that occur exclusively inside the supergenic pitchblende nodules show, for the former, origins of mafic upper mantle derived magmas and for the latter, isotopically light S, indicating biogeochemical fractionation by sulphate reducing bacteria. Under aspects of practical application, the conservative geochemical behaviour of rapid reprecipitation or immobility of U, Th, REE, Zr and other heavy metals in the supergenic reducing and oxidizing environment seems important. HFO are the most efficient metal immobilizing phases in the oxidizing environment.

AGRADECIMENTOS

Ao concluir esta Tese de Doutorado, ora apresentada ao Programa de Mineralogia e Petrologia do IGc-USP, aproveito para expressar os meus mais sinceros agradecimentos a diversas pessoas e instituições, cujas colaborações foram decisivas para conclusão deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Hans D. Schorscher, de maneira especial, pela orientação desta tese de doutorado, que me proporcionou uma conduta científica e ética de inestimável valia.

Agradeço também aos meus colegas de pós-graduação, em especial a Peter Davies, pela importante ajuda na edição gráfica desta tese.

Agradeço aos responsáveis técnicos e funcionários dos laboratórios do IGc-USP de Microscopia Eletrônica, FRX, ICP-AES e Microsonda Eletrônica, pela ajuda na obtenção de dados para esta tese.

Agradeço, ainda, ao Prof. Dr. Norbert F. Miekeley e Dra. Carmen C. Porto da Silveira, do Laboratório de Espectrometria Atômica e Nuclear Aplicada – EANA do Departamento de Química da PUC do Rio de Janeiro, pelas análises de ICP-MS, parte importante do acervo de dados desta tese de doutorado.

Agradecimentos são devidos ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudo que viabilizou esta pesquisa.

À minha família, agradeço a presença sempre decisiva, nos momentos mais difíceis, não permitindo meu esmorecimento.

À todos, o meu mais sincero obrigado.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Este projeto de doutorado tem sua área de estudo localizada no Sul do Estado de Minas Gerais, mais especificamente na mina de urânio Osamu Utsumi pertencente à INB – Indústrias Nucleares do Brasil, no Sudeste do Complexo Alcalino de Poços de Caldas (**Figuras 1 e 2**).

O Complexo possui forma circular com aproximadamente 30 km de diâmetro, e é composto predominantemente por nefelina sienitos e fonolitos leucocráticos de idade Mesozóica. Sua evolução é caracterizada por vários estágios magmáticos. Três deles são bem caracterizados: (1)-o magmatismo máfico básico-ultrabásico inicial incluindo ankaratritos (Ellert, 1959); (2)-o magmatismo alcalino intermediário nefelínico, vulcânico a plutônico, que originou as rochas que sustentam o Complexo e (3)-o magmatismo alcalino ultramáfico subvulcânico em enxames de diques, localmente freqüentes, de biotita lamprófiros que cortam o Complexo. Um quarto evento magmático carbonatítico, evidenciado apenas indiretamente por fenômenos de fenitização, brechas magmáticas e pela mineralização de elementos terras raras leves (ETRL), Th e U do Morro do Ferro, em rochas argilizadas sustentadas por um *stockwork* de veios de magnetita e suas possíveis relações genéticas com os estágios anteriores, é ainda assunto de pesquisas.

Este projeto estuda o estágio final do magmatismo nefelínico na região da mina de urânio Osamu Utsumi, representado por um evento hidrotermal-metassomático, que causou mineralizações de baixo teor de U-Th-Zr-ETR-F-Mo-Zn, assim como os processos de alteração supérgena que atuaram sobre as associações hidrotermais. A mineralização hidrotermal foi associada à piritização, transformação potássica e argilização intensa das rochas nefelínicas regionais. A alteração supérgena provocou a oxidação das piritas e o desenvolvimento de frentes redox por processos do tipo *roll-front*, responsáveis pelo enriquecimento secundário forte e localizado de U, iniciado há cerca de 76

Ma, conforme indicam as idades dos diques ultramáficos da mina (Schorscher et al., 1991; Shea, 1992).

O elemento urânio (número atômico 92, peso atômico 128.03 e raio iônico $0.97\text{\AA}$), que é foco dos estudos desta pesquisa, apresenta valências que variam entre +2 e +6. Entretanto, somente as valências +4, +5 e +6 são conhecidas em minerais, com predomínio dos estados de oxidação tetravalente e hexavalente. Em processos hipogênicos, prevalece o urânio tetravalente, e sua geoquímica em magmas, rochas ígneas e seus minerais está intimamente associada à geoquímica do tório (Goldschmidt, 1954; Ahrens, 1965; Taylor, 1979). Segundo Rogers e Adams (1969), o urânio ocorre num grande número de minerais, mas se concentra, caracteristicamente, em poucas espécies de menor abundância, como por exemplo torianita, torita, allanita, monazita, zircão, fluorita, apatita, epídoto e barita, pela facilidade de substituição, na estrutura desses minerais, do Th (r.i. $1.02\text{\AA}$), Ca (r.i. $1.06\text{\AA}$), ETR (r.i. 1.13 a $0.94\text{\AA}$), Y (r.i. $1.06\text{\AA}$), Zr (r.i. $0.8\text{\AA}$), F (r.i. $0.8\text{\AA}$) e Ba ($1.44\text{\AA}$) (Wittaker e Muntz, 1970). O mineral de urânio mais frequente é a uraninita, com variedade de menor cristalinidade pitchblenda. Sua fórmula varia de UO_2 a U_3O_8 em função da oxidação parcial do U^{4+} para U^{6+} durante ou depois da deposição, (proporcionando a transição para pitchblenda), podendo ser encontradas todas as composições intermediárias entre estes dois termos finais.

O urânio, em processos supergênicos, é oxidado para o estado hexavalente, apresentando um grau de mobilidade geoquímica muito maior, e em solução, forma preferencialmente complexos aniônicos de uranila (UO_2^{2+}). Este íon é facilmente mobilizado em águas de superfície e sub-superfície, e incorporado nos minerais supérgenos como carbonatos, fosfatos, vanadatos, silicatos, sulfatos, uranomicas e uranatos (Rogers e Adams, 1969; Dyck, 1978; Mackenzie et al., 1991).

A mina de urânio Osamu Otsumi nos permite, desta maneira, estudar a geologia, mineralogia, petrografia e geoquímica dos processos metalogenéticos e de migração do urânio nas condições hipogênicas - na mineralização

hidrotermal-metassomática - e supergênicas - nas frentes redox e mineralizações secundárias associadas. Pesquisas desta natureza têm relevância não só na área de metalogênese do urânio, mas são muito importantes também nas áreas de ciência e tecnologia ambiental, no que se refere à mineração e meio ambiente, uso e ocupação do solo e como análogos naturais na projeção e análise de riscos de repositórios de rejeitos nucleares em meios geológicos.

Este trabalho tem como objetivo geral a caracterização da metalogênese hipogênica e principalmente supergênica de U, Th, ETR e demais elementos associados e suas características sistemáticas de migração. Os objetivos específicos são contribuições à:

- (1)-pesquisa fundamental sobre a mineralogia, petrografia e geoquímica das reações fluidos-rochas em sistemas abertos uraníferos naturais de temperaturas contrastantes hidrotermais e ambientais, e
- (2)-pesquisa aplicada nas áreas de metalogênese do urânio, mineração e meio ambiente e análogos naturais.

2. METODOLOGIA

2.1. TRABALHOS PRELIMINARES

Os estudos preliminares compreenderam levantamentos bibliográficos regionais, locais e temáticos. Incluíram ainda, a revisão das coleções de amostras, lâminas e dos resultados das etapas anteriores dessa pesquisa, assim como a elaboração do plano específico deste trabalho e a preparação das etapas de campo.

2.2. TRABALHOS DE CAMPO

Os levantamentos geológicos de campo tiveram como enfoque principal a mina de urânio Osamu Utsumi. Foram realizados em várias etapas e incluíram amostragens sistemáticas de rochas na cava da mina a céu aberto e de testemunhos de sondagens cedidos pela Nuclebrás (atual INB-Indústrias Nucleares do Brasil), além de minérios e produtos de intemperismo. Em afloramentos e perfis regionais de reconhecimento, foram realizados estudos e amostragens de fonolitos (Ph) e nefelina sienitos (NeS) não afetados pelos processos mineralizantes uraníferos hidrotermais da mina Osamu Utsumi, para fins de comparação.

2.3. TRABALHOS LABORATORIAIS

Os estudos laboratoriais efetuados com métodos analítico-experimentais multidisciplinares e entre si complementares, representaram a parte principal de aquisição de dados deste projeto.

2.3.1. TRATAMENTOS E ESTUDOS PRELIMINARES

Esta etapa incluiu:

- * Catalogação, descrição macroscópica e de lupa binocular e seleção das amostras para as demais etapas;
- * Definição dos roteiros analíticos individuais e/ou por grupos de amostras;
- * Serragem das amostras em placas para descrições complementares e documentação fotográfica e posterior: (1)-confecção de lâminas delgadas, seções polidas, lâminas delgadas polidas para microsonda, (2)-preparação de fragmentos para microscopia eletrônica de varredura, (3)-preparação de pós-analíticos para estudos geoquímicos múltiplos, e (4)-separações granulométricas e de minerais em grãos para estudos específicos mineralógicos por difração de raios X e de isótopos estáveis.

2.3.2. MICROSCOPIA PETROGRÁFICA E DE MINÉRIOS

Estudos petrográficos qualitativos e semiquantitativos de luz transmitida e refletida foram realizados em lâminas petrográficas, lâminas delgadas polidas, seções polidas, montagens de minerais em grãos e compreenderam também trabalhos microfotográficos de documentação. Incluíram amostras coletadas para este projeto e do Projeto Internacional Poços de Caldas, do qual a doutoranda participou como estagiária em pesquisa.

Estes estudos foram subdivididos em duas etapas: (a) preliminar, para completar e confirmar a seleção das amostras e as etapas laboratoriais, e (b) de detalhe, para caracterização mineralógica, petrográfica e metalogenética pormenorizada dos litotipos de interesse.

2.3.3. LITOGEOQUÍMICA

Estudos litogeoquímicos multielementares por fluorescência de raios X (FRX), espectrometria de emissão atômica e espectrometria de massa com fontes de plasma indutivamente acoplado (ICP-AES e ICP-MS) foram realizados em amostras representativas dos litotipos de interesse: rochas não hidrotermalizadas regionais e da mina de urânio, rochas e minérios hidrotermais, além das expressivas frentes redox de diferentes tipos da mina de urânio.

Os pós-analíticos foram obtidos mediante britagem, homogeneização, quartejamento e moagem (em moinho de bolas de ágata) até a granulometria -200# das amostras previamente selecionadas.

*** FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)**

Estes estudos foram realizados no laboratório de FRX do DMP-IGc-USP, com equipamento Phillips, seqüencial automático, modelo PW 2400, utilizando-se o programa analítico Uniquant®. Foram analisados, em média, 32 elementos/variáveis químicos por amostras, em pastilhas de pó prensadas, em 10 amostras de Ph não-hidrotermalizadas e em 11 hidrotermalitos reduzidos e oxidados da mina. Em função de problemas analíticos, principalmente nos elementos maiores, decorrentes da rotina laboratorial de preparação de pastilhas de pó prensadas, outras alíquotas das mesmas amostras de Ph não-

hidrotermalizados da mina de urânio foram reanalisadas no laboratório de FRX do Instituto de Mineralogia Aplicada e Geoquímica da TU-Munique, Alemanha, com espectrômetro Siemens SRS303, após preparação de pastilhas fundidas e usando-se o programa de quantificação específico do equipamento. Os demais dados de FRX utilizados nesta pesquisa foram analisados em cooperação internacional no Instituto de Mineralogia e Petrografia da Universidade de Berna, Suíça, durante o Projeto Internacional Poços de Caldas, com a participação da doutoranda, usando-se, segundo metodologia internacionalmente convencional, pastilhas fundidas para os elementos maiores e pastilhas de pó prensadas para os elementos traço (Tertian e Claisse, 1982; Gomes e Dutra, 1984; Williams, 1987; Ahmedali, 1989). Dados de comparação foram extraídos da literatura (Schorscher e Shea, 1992; Schumann, 1994).

*** ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÔMICA COM FONTE DE PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO (ICP-AES)**

Estudos de ICP-AES foram realizados no Laboratório de DMP-IGc-USP, determinando-se 24 elementos/variáveis químicas por amostra, em 4 amostras de Ph não-hidrotermalizados e 13 hidrotermalitos reduzidos e oxidados da mina. Estes estudos foram efetuados para complementação dos dados de amostras disponíveis em pequena quantidade e para comparação e verificação da confiabilidade analítica dos métodos por FRX e ICP-AES, uma vez que várias amostras foram analisadas pelos dois métodos.

A rotina laboratorial de ICP-AES adotada no laboratório de IGc-USP foi descrita por Janasi et al. (1995). Consiste basicamente na abertura das amostras por fusão alcalina com mistura de meta e tetraborato de lítio, e diluição final das soluções a 1:1000. Estas são então analisadas em espectrômetro sequencial ARL-3410.

*** ESPECTROMETRIA DE MASSA COM FONTE DE PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO (ICP-MS)**

Análises de ICP-MS foram efetuadas, em cooperação científica no laboratório do grupo de pesquisa de Espectrometria Atômica e Nuclear Aplicada – EANA, sob orientação do Prof. Dr. Norbert F. Miekeley e Dra. Carmen C. Porto da Silveira, do Departamento de Química da PUC do Rio de Janeiro, inicialmente em 49 amostras de frentes redox da mina de urânio, onde foram analisados, em média, 71 elementos por amostra, incluindo todos os ETR, elementos de alta força iônica (HFSE), litófilos de raio iônico grande (LILE), metais nobres e platinóides, U, Th, entre outros. Os pós-analíticos destas amostras foram preparados/extraídos com broca dentária visando as propriedades geoquímicas de detalhe das frentes redox selecionadas. Os resultados foram obtidos por análises com fatores de diluição (Fd) diferentes, baixo (5.000) e alto (50.000), uma vez que a amostragem com esta metodologia muitas vezes produziu material apenas em quantidade limite ou mesmo insuficiente para análise com Fd alto (~100 mg). Em decorrência deste fato, pós-analíticos de 22 amostras complementares, das mesmas frentes redox, foram preparados em maiores quantidades (de aproximadamente 10 g) e reanalisados, também com dois fatores de diluição, baixo (1.000) e alto (10.000). Desta maneira, eliminou-se também uma possível interferência do “efeito pepita” e contaminação pelos metais constituintes da broca dentária.

A metodologia aplicada se resume a abertura triácida das amostras (com ácidos fluorídrico, nítrico e perclórico), avolumando-as ao final para 25 ml com ácido nítrico a 1%. Esta solução foi então analisada em equipamento Elan 5000A da Perkin Elmer Sciex, usando-se o programa analítico TotalQuant® (Perkin Elmer). Uma solução de calibração com 54 elementos de concentração conhecida (incluindo todos ETR, platinóides e os mais relevantes elementos principais e traço), foi utilizada para atualização dos fatores de resposta

(cps/ppm). Como padrões internos foram utilizados o In e Tl, e a incerteza dos resultados analíticos dos elementos traço é tipicamente entre 10-30%.

2.3.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Estudos de microscopia eletrônica de varredura foram divididos em duas etapas. A primeira foi realizada pelo orientador nos laboratórios da Fábrica da Carl Zeiss, Oberkochen, Alemanha, com o microscópio Gemini DSM 982, de tipo *thermal field emission* (emissão de campo térmico) (Martin et al., 1995), em amostras de frentes redox mineralizadas da mina de urânio.

A segunda etapa foi realizada pela doutoranda, no Laboratório de Microscopia Eletrônica do DPE-IGc-USP, com o microscópio LEO 440i, com canhão eletrônico convencional de filamento de tungstênio, analisador energia-dispersiva (EDS) com detetor de estado sólido silício-lítio (marca Oxford), em amostras de brechas vulcânicas com mineralizações uraníferas hidrotermais de alta radioatividade distantes das frentes redox. As propriedades destas amostras, metalizadas com carbono, permitiram visualização com aumentos de até 10.000 vezes, nas condições de corrente de feixe de 1.0 nA para as imagens e de 4.5 nA para as análises EDS, corrente de filamento de 4.5 A, tensão de aceleração de elétrons (EHT) de 20 kV, distância de trabalho (WD) de 25 mm e detetor de elétrons retroespalhados (QBSD). As análises pontuais EDS permitiram a caracterização química semiquantitativa de diversos minerais uraníferos de interesse do protominério.

2.3.5. MICROSSONDA ELETRÔNICA (MSE)

Os estudos de química mineral por microsonda eletrônica foram realizados no Laboratório de Microsonda Eletrônica do Departamento de Mineralogia e Petrologia do IGc-USP, utilizando-se equipamento JXA - 8600 Superprobe (JEOL) com automação NORAN. Incluíram: (a) análises quantitativas por dispersão de comprimentos de ondas (WDS) com correções de máquina (ruído de fundo/*background* – BG, deriva do filamento/*filament drift* e tempo morto/*dead time* dos contadores) e ZAF (Z – n° atômico, A – absorção, F – fluorescência secundária), sendo nessas condições o erro analítico máximo estimado de $\pm 3\%$ para elementos maiores e, (b) análises qualitativas e semiquantitativas por sistema energia dispersivo (EDS).

Foram analisados, por WDS, neste trabalho o total de 137 pontos em fases minerais magmáticas (feldspatos alcalinos, nefelinas, leucitas, analcitas e clinopiroxênios) e hidrotermais (feldspatos alcalinos e illitas/sericitas) de 10 amostras de Ph não-hidrotermalizados a incipientemente hidrotermalizados, aflorantes na parte NW da mina de urânio Osamu Utsumi (**figura 3**), considerando, sempre que possível, as diferentes gerações texturais e genéticas para cada qual desses minerais (principalmente clinopiroxênios e feldspatos alcalinos) e 43 pontos em fases minerais hidrotermais (caolinitas, rutilos, óxidos de U, piritas, zircões e fluoritas). Análises por EDS (qualitativas e semiquantitativas) foram feitas em 3 amostras de Ph hidrotermalizados reduzidos da mina para auxiliar na identificação de algumas fases minerais.

Dados complementares e de comparação, de estudos WDS e EDS quantitativos anteriores, realizados pelo orientador para o Projeto Internacional Poços de Caldas, no Instituto de Mineralogia e Petrografia da Universidade de Berna, Suíça, utilizando uma microsonda automática ARL-SEMQ (Schorscher, 1991) também foram incluídos neste trabalho.

2.3.6. MINERALOGIA DAS PIRITAS E ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE $\delta^{34}\text{S}$

Estudos mineralógicos específicos das piritas foram desenvolvidos, tendo em vista a constante associação pirita-mineralização de urânio, caracterizando-se gerações texturais e paragenéticas distintas, hidrotermais e supergênicas, além de alterações para sulfatos.

Compreenderam descrições macroscópicas de amostras, microscopia de luz transmitida e refletida, e separações dos minerais de interesse (piritas e sulfatos) em concentrados puros para as análises isotópicas. As amostras selecionadas foram testemunhos de sondagem e amostras de mão da cava da mina com mineralizações hidrotermais de tipo impregnações disseminadas, e *stockwork* concentradas em micro e macro-veios, além de matrizes de brechas, afastadas das frentes redox e próximas à elas, assim como de mineralizações supergênicas de urânio em micronódulos e macronódulos.

Dessas amostras, as piritas foram preparadas/separadas em cristais individuais por catação manual em lupa binocular, após liberação por processos de moagem, peneiramento e separação por líquidos densos (bromofórmio). Assim, foram obtidos concentrados puros (de 95-99%) em várias frações granulométricas (diâmetros de: < 0.1, 0.1 a 0.5, 0.5 a 1.0 e 1.0 a 2.0 mm).

Estes concentrados foram analisados, em cooperação científica internacional, pelo Prof. A. E. Fallick e colaboradores no Scottish Universities Research and Reactor Center - SURCC (East Kilbride/Glasgow, Grã Bretanha), e seguiram metodologias convencionais, internacionalmente em uso, que se encontram detalhadamente descritas na literatura (por exemplo Hall et al., 1987). Constam, de uma maneira geral, na liberação de S na forma de gás SO_2 pela reação do sulfeto com Cu_2O a 1070 °C (Robinson e Kusakbe, 1975); num forno de Cu, que mantém a temperatura a 600 °C, qualquer SO_3 , eventualmente formado, é reduzido para SO_2 . Seguem-se a purificação e determinação/quantificação do SO_2 obtido e, finalmente, a análise isotópica que foi efetuada num espectrômetro de massa modelo ISOSPEC 44 - modificado para SO_2 . O

equipamento foi operado a 110°C, com precisão de $\pm 0.08\text{‰}$ (2σ), ou melhor, reprodutibilidade de $\pm 0.25\text{‰}$ e todos os resultados de $\delta^{34}\text{S}$ expressos como diferença em ‰ relativos ao padrão de Trolilita do Meteorito Canyon Diablo (CDT).

2.4. TRABALHOS FINAIS

Os trabalhos finais desenvolvidos neste projeto compreenderam todas as atividades necessárias para a integração final dos dados, redação, ilustração e apresentação, na forma definitiva para a defesa, da Tese de Doutorado.

3. ESTUDOS GEOLÓGICOS

3.1. GEOLOGIA REGIONAL

O Complexo Alcalino de Poços de Caldas situa-se entre a bacia sedimentar do Paraná a W e a serra de Mantiqueira a S, na porção sudeste do Brasil (**Figura 1**), limítrofe entre os estados de Minas Gerais e São Paulo. Intrude e encobre rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino, constituído por biotita-gnaisses que passam localmente para anateixitos e encontram-se cortados por diques de dolerito (Fraenkel et al., 1985). Possui idade Mesozóica e forma circular com diâmetro de aproximadamente 30 km (**Figura 2**), estando associado à separação das placas Sul Americana e Africana (Almeida, 1977). Foi geologicamente estudado e mapeado por Ellert (1959) e Ellert et al. (1959), estruturalmente analisado por sensoriamento remoto por Almeida e Paradella (1977) e investigado geofisicamente por Araújo (1980), Hamza (1982) e Montes-Lauar (1988). Detalhamentos, principalmente dos NeS, devem-se a Ulbrich, M. (1983), Ulbrich, M. et al. (1984) e Ulbrich, H. (1984).

O Complexo é composto essencialmente por rochas alcalinas intermediárias vulcânicas, subvulcânicas e plutônicas, representadas por Ph e NeS, predominando tipos leucocráticos; subordinadamente ocorrem rochas ultramáficas e ultrabásicas, ankaratritos e biotita lamprófiros em diques e prováveis carbonatitos (Ellert, 1959; Ellert et al., 1959; Bushee, 1971; Schorscher et al., 1991; Schorscher e Shea, 1992, e outros). Sob aspectos geológicos, Ellert (1959) desenvolveu um modelo de evolução tectono-magmática em seis estágios. Neste trabalho será adotado um modelo simplificado de apenas três estágios magmáticos principais, sendo:

(1)-Vulcanismo básico-ultrabásico máfico, incluindo ankaratritos, tidos como as lavas mais antigas do Complexo Alcalino (Ellert, 1959), sendo cortadas pelos Ph e NeS do magmatismo alcalino intermediário nefelínico principal;

Figura 1: Esboço geológico da parte centro-leste do Brasil (modificado de Almeida, 1977), mostrando a localização do Complexo Alcalino de Poços de Caldas e outras intrusões alcalinas e de carbonatitos (segundo Ulbrich & Gomes, 1981). Subdivisões tectônicas: (1)-Maciço de Guaxupé; Cinturões Móveis (2)-Ribeira e (3)-Brasília; (4)-Bacia do Paraná (sedimentar com basaltos); (5)-Cráton do São Francisco. Símbolos e abreviações: ● PdC-Complexo Alcalino de Poços de Caldas, ●-complexos alcalinos e ■-complexos alcalinos com carbonatitos, I-infracambrianos, M-mesozóicos; cidades ■ SP-São Paulo, ■ RJ-Rio de Janeiro, ■ BH-Belo Horizonte.

(2)-Magmatismo alcalino intermediário nefelínico principal vulcânico e subvulcânico, em três estágios:

- Vulcanismo fonolítico inicial, incluindo tufos, lavas e intrusões fonolíticas subvulcânicas, da fase generativa do edifício vulcânico.
- Intrusões dos NeS principais (tipo Pedreira da Prefeitura) freqüentemente com veios pegmatíticos e hidrotermais, moderadamente peralcalinos, portadores de xenólitos dos Ph anteriores e de raros enclaves ultramáficos de piroxenitos alcalinos, formação dos diques anelares descontínuos de Ph subvulcânicos e abatimento fraco a moderado da caldeira, e colocação de diques de Ph subvulcânicos rasos afaníticos microporfíricos, que cortam os NeS principais, inclusive seus veios pegmatíticos e hidrotermais (por exemplo no local tipo da Pedreira da Prefeitura).
- Intrusões de NeS agpaíticos (com abundante eudialita) altamente peralcalinos, de expressão apenas local (Ulbrich, H., 1984) (p.ex.: Pedra Balão, Morro do Serrote e arredores da mina de urânio Osamu Utsumi) e Ph equivalentes, sendo que nos lujauros da Pedra Balão foram encontrados xenólitos dos Ph do dique anelar do Anel Norte.

(3)-Evento magmático subvulcânico final ultramáfico-alcalino, representado pelos enxames de diques de biotita lamprófiro da mina de urânio, entre outros. Um quarto evento magmático, ultrabásico carbonatítico (tipo Morro do Ferro) associado, eventualmente com brechas carbonatíticas (tipo Areião) da parte NW e central do Complexo Alcalino e zonas de fenitização (cf.: Ellert, 1959 e Ellert et al., 1959), e suas relações genéticas e temporais com os demais estágios magmáticos do complexo, continuam assuntos de pesquisas.

A evolução magmática do Complexo incluiu ainda, importantes processos pós-magmáticos. Estes apontam para uma considerável riqueza em voláteis dos magmas de NeS e Ph e podem ser agrupados em duas associações de eventos genética e temporariamente distintas. A primeira é diretamente relacionada ao

magmatismo nefelínico, sendo sempre mais expressiva nos NeS (**Figura 2**), e resultou na formação de veios e mineralizações miarolíticas pegmatíticas a pneumatolíticas e hidrotermais, que ocorrem por todo o Complexo. Causou, entre outros, a precipitação de silicatos de metais raros como, por exemplo, giannettita ou eudialita, além de aegirina fibrosa e reações incipientes de troca de álcalis em feldspatos (no estágio pegmatítico a pneumatolítico), assim como a precipitação de zeólitas, fluorita, hematita e carbonatos (no estágio hidrotermal). A segunda associação de eventos pós-magmáticos, de característica tipicamente hidrotermal e de ocorrência mais restrita, foi responsável pela alteração potássica e pela mineralização de U hipotermal da mina Osamu Utsumi e ocorrências similares em vários outros locais do Complexo, sendo que os principais estudos se devem a Tolbert (1966); Gorsky e Gorsky (1974) e Garda (1990). Este evento causou fortes enriquecimentos principalmente de K, U, Th, Zr, ETR, Mo, Zn, F e S, transformando os NeS e Ph regionais em hidrotermalitos específicos denominados de rochas potássicas (Frayha, 1962; Tolbert, 1966; Garda, 1990; Schorscher e Shea, 1992). Suas características geoquímicas apontam origens consangüíneas com o magmatismo nefelínico regional. Por essas relações geoquímicas e, sendo cortadas por diques de biotita lamprófiro não afetados pelos processos hidrotermais, foram atribuídos à fase final do magmatismo nefelínico, posteriores aos eudialita NeS e anteriores a colocação dos diques de biotita lamprófiro datados em 76 Ma (Shea, 1991, 1982; Schorscher et al., 1991).

3.2. GEOLOGIA LOCAL

A jazida de U da mina Osamu Utsumi é um produto de processos superimpostos magmáticos, de alteração hidrotermal e supérgena (NUCLEBRÁS/INB - Relatórios Internos; Fraenkel et al., 1985; Waber et al., 1992; entre outros), constituindo-se numa associação de intrusões mútuas de Ph

subvulcânicos e NeS hipoabissais, cortados por diques de Ph e corpos tabulares de brechas vulcânicas, todos hidrotermalmente transformados em rochas potássicas com mineralizações de U-Th-Zr-ETR-Mo-F principalmente (**Figuras 3 e 4**). No contexto maior do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, os eventos hidrotermais uraníferos foram superimpostos aos eventos hidrotermais regionais de forma sempre localizada, mais fortes e com características físico-químicas distintas, afetando indiscriminadamente e com intensidade igual todos os Ph e/ou NeS do local (Tolbert, 1966; Gorsky e Gorsky, 1974; Garda, 1990, entre outros). Na mina, estas mineralizações hidrotermais, mineralógica e quimicamente análogas em Ph, NeS e brechas, são mais ricas nas brechas, concentrando-se na matriz. A alteração hidrotermal potássica, piritização e mineralização de U de baixo teor disseminada nos Ph e NeS, assim como a formação e mineralização das brechas são cogenéticas, sendo as brechas produtos de explosões magmato-freáticas tardias do evento hidrotermal. A alteração hidrotermal das rochas alcalinas nefelínicas regionais para rochas potássicas causou a transformação dos álcali-feldspatos magmáticos (ortoclásios pertíticos, sanidinas) em feldspatos potássicos (triclínicos) puros, da nefelina em pseudomorfos de illita e caolinita e do clinopiroxênio em misturas de minerais finos incluindo fases titaníferas semiopacas, argilominerais e pirita, além da piritização generalizada fina e disseminada, e da precipitação intergranular/intersticial de zircão – às vezes intercrescido com baddeleyita, de monazita e outros minerais de ETR, esfalerita, molibdenita, jordisita e fluorita, entre outros (Garda, 1990; Schorscher e Shea, 1992).

À segunda associação de processos hidrotermais, seguiu-se na mina de urânio Osamu Utsumi, um evento magmático final subvulcânico de enxames de diques de biotita lamprófiros ultramáficos ultrapotássicos. Estes representam uma mudança drástica do magmatismo nefelínico, cortando todas as litologias locais; incluem xenólitos destas e não sofreram a alteração hidrotermal-mineralizante uranífera. Um destes diques foi datado em 76 Ma por Ar-Ar em

flogopitas de fenocristais e da matriz (Shea, 1992) e apresenta, ainda, apatitas com idades de traços de fissão concordantes (Schorscher et al., 1991), indicando resfriamento rápido para temperaturas abaixo de 100°C, mesmo no nível hoje exposto na mina, ou seja, que na superfície do Complexo Alcalino há 76 Ma, as condições ambientais já eram de intemperismo.

Desde então se desenvolveram as frentes redox e com estas a mineralização secundária de tipo *roll front* de U, essencialmente pura - no que difere da mineralização hidrotermal rica em Zr, Th e ETR principalmente - por processos de intemperismo e alteração supergênica (de baixas temperaturas) e com a participação de processos biogeoquímicos bacterianos, estando relacionada à oxidação da pirita e à formação de OHF (Schorscher et al., 1991, 1997; Schorscher e Osmond, 1992; Waber et al., 1992). Sob aspectos geológicos extremos distinguem-se dois tipos genéticos principais de frentes redox:

- Frentes redox estruturalmente controladas (ou advectivas) seguem sistemas de falhas e fraturas de alto ângulo e penetram profundamente dentro da zona dos hidrotermalitos reduzidos/piritizados, formando corpos de rochas oxidadas de tipo quilhas, afinando com a profundidade até o desaparecimento (**Figura 4**) e, seguem também, sistemas de juntas de alívio, horizontais a subhorizontais, originando então, zonas estreitas e irregulares de rochas oxidadas correspondentes.

- Frentes redox litologicamente controladas dependem, face à similaridade químico-mineralógica dos hidrotermalitos reduzidos, principalmente dos parâmetros físicos de porosidade e permeabilidade dessas rochas e avançam de cima para baixo com a infiltração dos fluidos intempéricos oxidantes seguindo as bordas dos grãos.

A realidade geológica da mina de urânio resultou da interação desses fatores controladores: (1)-uma frente redox principal e contínua por toda a área da jazida de morfologia fortemente irregular dada por avanços diferenciais mais fortes em zonas mais fraturadas e/ou de rochas mais porosas e permeáveis, e (2)-várias frentes redox secundárias, locais, sendo superfícies de oxi-redução

que envolvem e isolam volumes de rochas hidrotermais reduzidas/piritizadas de baixa porosidade e permeabilidade, que, portanto sobreviveram temporariamente em condições instáveis de dissolução mais lenta, em meio à zona de rochas já oxidadas (**Fotos 1 e 2**, pág. 23). À todas essas frentes redox, associam-se mineralizações secundárias supergênicas de U de desenvolvimento e teores variáveis.

O avanço médio da frente redox principal foi estudado e estimado/datado com métodos de desequilíbrios radioativos em poucos mm/1.000 anos, por Schorscher e Osmond (1992), usando um modelo de progressão contínua. Entretanto, resta a questão da influência das variações climáticas nos últimos 76 Ma do Terciário e Quaternário, sobre a migração e propagação desta e das demais frentes redox da mina.

3.3. GEOCRONOLOGIA

Datações geocronológicas indicam que a atividade ígnea no Complexo deve ter começado por volta de 89 Ma com ankaratritos (Bushee, 1971), ou antes, produzindo NeS já há 92 Ma (Kawashita et al., 1984). Shea (1992) determinou idades Sm-Nd de 78 Ma para NeS regionais e idades Rb-Sr de 76 Ma para NeS hidrotermalmente alterados da mina de urânio; as razões iniciais do Sr e Nd dos NeS e Ph regionais e equivalentes hidrotermalmente alterados da mina, indicaram ainda a derivação astenosférica de seus magmas parentais e dos fluidos hidrotermais.

Shea (1992) datou ainda diques de biotita lamprófiros ultramáficos ultrapotássicos, também da mina de urânio, que cortam a mineralização hidrotermal e representam, regionalmente, a manifestação magmática mais recente, com idade Ar-Ar de 76 Ma.

Os trabalhos de datação sugerem, em geral, que o magmatismo alcalino nefelínico principal (de Ph e NeS) persistiu regionalmente por mais de 10 Ma e

Figura 4: Perfil esquemático e modelo metalogenético da Mina de Urânio Osamu Utsumi, na parte SE do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG.

Foto 1: Frentes redox principal e secundárias da mina de urânio Osamu Utsumi. Observamos rochas reduzidas: azuis e oxidadas: marrom alaranjadas e o processo de formação de macronódulos supergênicos a partir de frentes redox secundárias com mineralizações ricas em U.

Foto 2: Detalhe do processo de formação de macronódulos supergênicos ricos em U, por "implosão", isto é, oxidação in situ de volumes de rochas reduzidas mineralizadas e isoladas por frentes redox secundárias em ambiente oxidado.

4. PETROGRAFIA, MINERALOGIA E QUÍMICA MINERAL

Foram estudados os principais grupos litológicos e as mineralizações uraníferas da mina Osamu Utsumi (**Figura 3**): fonolitos (Ph) e nefelina sienitos (NeS) diversos, brechas vulcânicas (Br), mineralizações hidrotermais e frentes redox. Sendo na mina de urânio, as rochas nefelínicas não-hidrotermalizadas restritas à um único tipo de Ph porfirítico e, portanto, sub-representadas em relação às variedades hidrotermalizadas, foram incluídos em estudos comparativos diversos tipos de NeS e Ph regionais e dados da literatura (**Figura 2 e Anexo II**).

Na lavra, predominam amplamente Ph, NeS e Br hidrotermalizados, genericamente denominados de rochas potássicas. São preservados como hidrotermalitos reduzidos/piritizados mineralizados em U (protominérios) nas partes mais profundas da cava e como hidrotermalitos oxidados/com OHF (saprolitos de intemperismo incipiente) depauperados em U, nas partes superficiais. As frentes redox separam os hidrotermalitos oxidados/com OHF dos equivalentes reduzidos/piritizados e compreendem, em suas partes oxidadas, as zonas de mobilização do U solúvel e nas partes reduzidas as zonas de reprecipitação e principal enriquecimento supergênico de U.

Certo destaque foi dado aos Ph porfiríticos não hidrotermalizados da borda NW da cava da mina (**Figura 3**), que apresentam a única transição contínua conhecida para equivalentes hidrotermalizados. Esta transição é bastante brusca, passando, num intervalo de cerca de 1 metro, de rochas de preservação magmática para hidrotermalitos reduzidos, totalmente transformados mineralologicamente, entretanto, com perfeita conservação estrutural e textural. A observação específica desse caso é confirmada pelos demais hidrotermalitos da mina que também preservaram suas características estruturais e texturais magmáticas, a despeito das transformações mineralógicas hidrotermais, o que permite correlações confiáveis com litotipos regionais equivalentes não hidrotermalizados.

4.1. FONOLITOS E NEFELINA SIENITOS NÃO-HIDROTHERMALIZADOS

Petrografia e Mineralogia

Os dados mineralógicos e petrográficos de Ph e NeS regionais e da mina Osamu Utsumi são resumidos na **Tabela 1**. De um modo geral, ressaltam sua variabilidade bastante restrita. Os Ph não-hidrotermalizados da mina foram ainda estudados por microsonda eletrônica, com análises WDS (**Anexo III**).

Entre os NeS e Ph predominam tipos hololeucocráticos a leucocráticos, sendo raros os tipos mesocráticos. Rochas máficas e ultramáficas ocorrem apenas como xenólitos nos NeS, Ph e fragmentos nas Br, sendo piroxenitos alcalinos variavelmente arredondados por resorção magmática. Sua composição é de $\geq 95\%$ modais de aegirina-augita e aegirina, além de minerais de minérios e apatita.

As diferenças mineralógicas qualitativas das rochas regionais consistem essencialmente nos tipos de feldspato alcalino, sanidina nos Ph e ortoclásio pertítico nos NeS, e nos constituintes menores típicos das rochas agpaíticas e miasquíticas. As diferenças quantitativas são limitadas à pequenas variações percentuais nas composições modais (**Tabela 1**). As principais diferenças petrográficas são de natureza estrutural/textural, distinguindo-se nos Ph tipos desde afaníticos (vulcânicos a subvulcânicos rasos) a faneríticos médios ('tinguaítos') equigranulares, de outros, fortemente porfiríticos a xenolíticos (transicionais para brechas magmáticas). Os NeS variam de tipos médios a grossos equigranulares a inequigranulares, às vezes xenolíticos, até tipos muito grossos pegmatíticos em veios e mobilizados miarolíticos, homogêneos ou zonados.

Os Ph não-hidrotermalizados da mina de urânio são tipos microporfiríticos leucocráticos de matriz muito fina, que perfaz 80 a 90% modais, sendo constituída por feldspato alcalino - sanidina (0.01 a 0.1 mm), clinopiroxênio aegirina-augita (0.05 a 0.1 mm), nefelina (0.01 a 0.03 mm) parcialmente alterada para cancrinita, cada qual com 10 a 15% modais. Como minerais raros e acessórios ocorrem giannettita (1-3% modais), aenigmatita (<1%) e outras espécies menos comuns não identificadas, além de titanita, zircão e apatita. Os microfenocristais são de clinopiroxênios zonados (0.3 a 3 mm), feldspato alcalino-sanidina (0.5 a 2 mm), nefelina (0.5 a 2 mm) parcialmente

alterada para cancrinita e outros minerais criptocristalinos e, mais raramente, pseudoleucita, que, porém, pode apresentar granulação muito grossa (de até 10 mm). Os clinopiroxênios zonados (**Foto 3**) variam de núcleos sódio-augíticos a bordas de aegirina-augita e aegirina, e como os microfenocristais de sanidina (**Foto 4**), também apresentam zonas de crescimento externas heteradcumuláticas muito ricas em inclusões poiquilíticas. Argilominerais, principalmente caolinita em quantidades diminutas, fluorita, carbonatos e zeolitas (natrolita entre outras) em microfraturas e veios são produtos de alteração autohidrotermal (**Foto 5**).

Nas zonas de transição para os hidrotermalitos reduzidos adjacentes e encaixantes, desaparecem, inicialmente, os minerais raros giannettita, aenigmatita e outros, por transformação em misturas criptocristalinas de argilominerais e óxi-hidróxidos de Fe e Mn; as nefelinas são transformadas progressivamente, até a substituição total, em pseudomorfos de ilita/sericita e caolinita; os clinopiroxênios são substituídos por misturas de argilominerais e minerais opacos e semiopacos (óxi-hidróxidos de Fe e Mn), e os feldspatos alcalinos são reequilibrados cristaloquimicamente para espécies triclinicas potássicas puras com argilização/caolinização incipiente associada. As pseudoleucitas sofreram transformações equivalentes aos feldspatos alcalinos e nefelinas magmáticos livres. Os minerais opacos, predominando hematita nas rochas de preservação magmática, são substituídos por pirita. Os minerais magmáticos mais resistentes às transformações hidrotermais são os feldspatos alcalinos, em primeiro lugar, e os clinopiroxênios, em segundo. Dos acessórios, apenas o zircão não sofre transformações, ocorrendo inclusive a neoformação de zircão hidrotermal intercrescido com baddeleyita.

Além dos Ph e NeS, foram estudadas ainda brechas magmáticas regionais não-hidrotermalizadas. Estas pertencem a dois tipos distintos. As brechas de tipo mais comum são constituídas como matriz de Ph finos a afaníticos microporfíricos e microxenolíticos e contém fragmentos, em geral, angulosos de NeS e demais Ph regionais. O segundo tipo é brechas especiais, de ocorrência mais restrita e, em geral, ricas em fragmentos ultramáficos. Por vezes, ocorrem fragmentos de rochas carbonáticas, incluindo possivelmente carbonatitos. Mais comuns e freqüentes são xenocristais idiomórficos até centimétricos de flogopitas individuais ou em 'livrinhos'.

Às brechas deste tipo, associam-se aureólas de fenitização, que são consideradas de origens carbonatíticas e não serão mais aqui tratadas.

Química Mineral

As fases minerais magmáticas (feldspatos alcalinos, clinopiroxênios, nefelinas, leucitas, analcitas) dos Ph não-hidrotermalizados da mina de urânio foram estudadas por microsonda eletrônica-WDS (**Anexo III**). Foram consideradas as características texturais, distinguindo-se fenocristais de cristais da matriz, e as características cristaloquímicas de cristais individuais, como por exemplo, o zoneamento composicional do centro para a borda, principalmente de feldspatos alcalinos e clinopiroxênios.

Os feldspatos alcalinos apresentam composições pouco variáveis. Nos fenocristais, o zoneamento composicional é fraco e não-sistemático; em poucos casos foram observados fenocristais e/ou porções de fenocristais/exsoluções(?) albiticas. Em comparação, os feldspatos alcalinos da matriz apresentam tendência clara de enriquecimento em ortoclásio e também em Fe_2O_3 .

Os fenocristais de clinopiroxênios, com zoneamento microscópico mais freqüente e nítido (**Foto 3**), apresentam núcleos que variam de augita sódica, com teores mais altos de Ti, Al, Mg, Ca e mais baixos de Si, Fe, Na, Zr, à aegirina-augitas (com teores intermediários de todos esses elementos), e bordas de aegirina-augitas a aegirinas virtualmente puras com os teores mais elevados de Si, Fe, Na, Zr e mais baixos de Ti, Al, Mg e Ca.

As nefelinas apresentam-se pouco variáveis com em torno de 16 e 6 %-de peso, respectivamente, de Na_2O e K_2O , e cerca de 1 %-de peso de Fe_2O_3 . As leucitas com preservação magmática homogêneas são mais raras e variam de 8-8,5 %-de peso de Na_2O , com 9,5 %-de peso de K_2O e cerca de 1,5 %-de peso de Fe_2O_3 . As analcitas são raras e virtualmente puras.

As demais fases analisadas foram:

- minerais opacos e semi-opacos não-identificados microscopicamente, que ocorrem livres na matriz e em inclusões diminutas nos clinopiroxênios;
- produtos de alteração da nefelina;

- fluorita e outros minerais hidrotermais em massas criptocristalinas preenchendo fraturas.

São todas análises semiquantitativas a qualitativas, de valor apenas para uma primeira orientação cristaloquímica e /ou geoquímica.

4.2. HIDROTERMALITOS E FRENTES REDOX DA MINA DE URÂNIO OSAMU UTSUMI

4.2.1. HIDROTERMALITOS

Petrografia e Mineralogia

Os Ph, NeS e as Br hidrotermalizados da mina de urânio apresentam a mesma variabilidade estrutural/textural observada nos equivalentes regionais não-hidrotermalizados, permitindo reconstruir a mineralogia magmática original das rochas transformadas. Analogamente às rochas não-hidrotermalizadas, apresentam entre si, também, grande similaridade mineralógica. Desta maneira, serão aqui tratadas em conjunto, distinguindo-se apenas entre hidrotermalitos reduzidos/piritizados e oxidados/com OHF.

Os Ph hidrotermalizados, reduzidos/piritizados e oxidados/com OHF, são as rochas mais abundantes na mina Osamu Utsumi, formando corpos subvulcânicos de gerações estruturais, texturais, composicionais-mineralógicas e de idades diferentes (**Figura 3**). Na ordem da abundância e idade relativa decrescente, ocorrem: (1)-Ph faneríticos de granulação média equigranulares a subequigranulares ('tinguaítos') subvulcânicos, em sua maioria hololeucocráticos, sendo que subtipos algo mais máficos foram denominados de clinopiroxênio fonolitos por Waber et al. (1992); (2)-pseudoleucita (Plc) Ph fortemente porfiríticos com abundantes fenocristais de Plc muito grossos (>2 - ≥ 10 cm) que chegam até a predominar em volume sobre a matriz de granulação média, também subvulcânicos, e (3)-Ph afaníticos a faneríticos muito finos fracamente porfiríticos (com fenocristais esparsos de Plc até centimétricos) comumente com estrutura fluidal, vulcânicos a subvulcânicos rasos. Variedades subordinadas destes Ph incluem tipos tufisíticos a ultra-fluidais fortemente microvesiculares e ricos em

xenólitos angulosos (de Ph e NeS), que por vezes, gradam para os corpos de brechas magmáticas. A mineralogia global dos Ph hidrotermalizados reduzidos e oxidados é sumarizada na **Tabela 1**, em comparação às rochas equivalentes de preservação magmática (não-hidrotermalizadas).

Os hidrotermalitos reduzidos e oxidados de NeS são subordinados em abundância, e também não apresentam alterações estruturais e/ou texturais em relação aos equivalentes regionais, exceção feita às microtexturas de pseudomorfização hidrotermal (**Tabela 1**). São rochas hololeucocráticas a, mais raramente, leucocráticas, grossas, por vezes algo inequigranulares até com megacrístais de feldspato alcalino (ortoclásio variavelmente pertítico reequilibrado estrutural e quimicamente para feldspato potássico puro triclinico). São ainda xenolíticas, com fragmentos de Ph subvulcânicos e vulcânicos, dos estágios magmáticos anteriores, arredondados por resorção magmática, sendo que, no local da mina de urânio, os NeS seguiram-se aos Ph subvulcânicos da primeira geração ('tinguaitos') e foram sucedidos pelos PlcPh (com Plc muito grossas) e pelos Ph afaníticos a faneríticos muito finos finais.

As brechas hidrotermalizadas (Br) são o terceiro grupo em abundância (**Foto 6**), sendo as brechas reduzidas o principal sítio da mineralização uranífera hidrotermal. Os fragmentos observados são de Ph e NeS diversos, além de brechas. Esses fragmentos não se distinguem quanto ao tipo de alteração hidrotermal das rochas não-brechadas da mina, entretanto, é geneticamente notável que a intensidade da alteração hidrotermal de fragmentos associados possa variar. Dessa forma, ocorrem, inclusive em uma única amostra de mão, fragmentos de Ph e/ou NeS totalmente hidrotermalizados junto com outros incipientemente transformados ou mesmo isentos de alteração hidrotermal (com nefelina e/ou aegirina preservada). A mineralização uranífera hipogênica ocorre principalmente na matriz das Br cimentando os fragmentos (**Foto 7**).

As principais transformações mineralógicas hidrotermais e supergênicas depreendem-se da **Tabela 1**. A seguir são dados alguns detalhamentos dos processos petro-metalogenéticos hidrotermais.

→ A substituição drástica envolvendo modificação composicional e estrutural dos feldspatos alcalinos magmáticos predominantes, sanidinas nos Ph e ortoclásios pertíticos nos NeS, para microclínios virtualmente puros de triclinicidade máxima (Waber et al., 1992). Nesse processo de interação fluido-rochas, a troca de álcalis de

Na⁺ do retículo cristalino dos feldspatos por K⁺ da solução é acompanhada, ainda, pela formação de inclusões fluidas, caolinização incipiente e piritização interna fina e esparsa, provavelmente a partir dos teores de Fe originais dos feldspatos alcalinos magmáticos (**Anexo III**; cf. M. Ulbrich et al., 1984) e S²⁻/HS⁻ do fluido hidrotermal redutor.

→ A substituição completa da nefelina por caolinita, illita/sericita e pirita disseminada gera pseudomorfos com zoneamento mineralógico nem sempre muito regular, compostos, no centro das antigas nefelinas, de caolinita e pirita, com illitas/sericitas micro-idioblásticas esparsas a abundantes como constituinte adicional apenas nas bordas. A caolinita apresenta tipicamente granulometria média $\leq 2 \mu\text{m}$ (cristais em 'livrinhos' mais grossos são muito raros), enquanto que a illita/sericita é micro-idioblástica e sempre consideravelmente mais grossa, na faixa de 15-50 μm , crescendo sobre a pirita (que permanece como inclusões) e substituindo a caolinita.

Illita/sericita forma-se pela substituição progressiva da caolinita, sob atividade crescente de K⁺ no fluido; a pirita é originada a partir dos teores originais de Fe da nefelina magmática (**Anexo III**; cf. M. Ulbrich et al., 1984), em analogia ao que ocorre nos feldspatos alcalinos.

→ A substituição das pseudoleucitas (Plc) ocorre pelos dois processos supradescritos, participando proporcionalmente em função da composição das Plc.

→ O clinopiroxênio idiomórfico a hipidiomórfico é pseudomorfizado por agregados criptocristalinos de óxidos e/ou silicatos de Ti e eventualmente Fe associados a argilominerais, caolinita, esmectita e pirita.

→ Como minerais acessórios mais comuns dos Ph e NeS regionais, ocorrem em proporções variáveis, totalizando até 1.5-2% vol., titanita, zircões e apatitas eudrais. Destes, a titanita e a apatita desaparecem no processo hidrotermal; o zircão magmático nada sofre, sendo afetado apenas por supercrescimentos hidrotermais de zircão intercrescido com baddeleyita; essa associação ocorre também como fase independente de precipitação hidrotermal intersticial, sendo sempre e tipicamente relacionada aos processos mineralizantes uraníferos.

→ Os minerais raros magmáticos e pós-magmáticos, como giannettita, eventualmente eudialita e todos os demais (lamprofilita, goetzenita, aenigmatita, etc.) (Atencio et al.,

1996, 1999; Gualda e Vlach, 1996, 1998) desaparecem por dissolução nos processos hidrotermais, restando apenas óxi-hidróxidos de Fe e Mn com altos teores de ETR, Zr, U e Th co-precipitados e em solução.

→ A fluorita ocorre como preenchimento intersticial na matriz, em fraturas e cavidades, intercrescida com carbonatos, pirita, zircão e microclínio. Sua granulação varia de <0.2 mm a >10 mm. É, em geral, incolor a amarelada, entretanto, comumente apresenta centros de cor azul-lilás, que podem ser abundantes tingindo cristais inteiros.

→ A barita aparece como um mineral raro, em cristais finos preenchendo fraturas ou interstícios; as evidências texturais apontam para uma origem hidrotermal tardia.

→ Carbonato varia de fase muito rara a abundante formada nos processos hidrotermais tardios. Ocorre principalmente nas matrizes/cimentos das Br e, eventualmente, nos Ph e NeS em fraturas, veios e impregnações laterais decorrentes, relacionadas aos processos finais das brechas. Acompanha sempre a fluorita como constituinte em geral subordinado, porém, típico.

→ As piritas são os principais minerais opacos-metálicos, e ocorrem finamente disseminadas por toda rocha, na matriz, nas bordas dos grãos e no interior dos minerais magmáticos pseudomorfizados (feldspatos alcalinos, nefelinas e clinopiroxênios); ocorrem também como preenchimento de cavidades miarolíticas e em fraturas, nesses casos em cristais maiores idiomórficos até centimétricos.

→ Nos Ph e N, os minerais de urânio e uraníferos formaram-se junto com outras fases da mineralização, durante todo o evento hidrotermal, e aparecem disseminados e enriquecidos em fraturas, veios, porosidades e micromiárolos. São associados a sulfetos, principalmente pirita, subordinadamente esfalerita, molibdenita, jordisita (MoS amorfo) e mais raramente, galena, calcopirita, pirrotita, pentlandita, fluorita roxa, minerais complexos de U, Th, ETR, Ti e Zr, entre estes zircão hidrotermal intercrescido com baddeleyita ('caldasito'), monazita, cheralita, crandalita, florencita, gorceixita, goyazita, brannerita. Um mineral específico de U, indicado em autorradiografias, provavelmente uraninita micro a criptocristalina, não foi confirmado oticamente pela granulação muito fina (< 1µm).

→ Nas brechas, como principal sítio da mineralização uranífera hidrotermal, todos esses minerais ocorrem em diferentes gerações texturais e cronológicas com variações

composicionais. Distinguem-se assembléias ‘pré-brechas’ nos fragmentos de Ph e NeS, variavelmente hidrotermalizados; ‘sin-brecha’ e ‘pós-brecha’ como veios de piritização e argilização, cortando as brechas (matriz e fragmentos). Os cimentos ‘sin-brecha’ apresentam as mais elevadas concentrações de minerais uraníferos/radioativos (**Foto 7**). Algumas das amostras mineralizadas mais ricas foram selecionadas para estudos por MEV - EDS (**Fotos 8 a 19, Tabela 2**).

Os hidrotermalitos oxidados (de Ph, NeS e Br) da mina de urânio apresentam essencialmente a mesma mineralogia principal dos equivalentes reduzidos, quanto às fases silicáticas. Certa exceção diz respeito ao feldspato potássico hidrotermal, que se apresenta algo mais fortemente caolinizado e pigmentado por OHF da oxidação das inclusões de pirita (**Fotos 20 e 21**). Entretanto, o seu desaparecimento abrupto ocorre tão somente na transição das rochas oxidadas para a zona de ‘solos lateríticos’, excluída desta pesquisa. As principais características dos processos supergênicos e dos hidrotermalitos oxidados residem nos constituintes menores, sendo:

- oxidação e dissolução até o desaparecimento total da pirita e demais sulfetos;
- formação abundante de OHF pela oxidação das piritas e outros sulfetos de Fe;
- formação subordinada e mais irregular de minerais secundários de Mo, por exemplo ilsemanita, pela oxidação da molibdenita e jordisita;
- desaparecimento por dissolução da fluorita;
- desaparecimento por dissolução dos carbonatos;
- dissolução parcial dos minerais uraníferos, sendo a radioatividade residual relacionada a minerais resistentes aos processos supergênicos com U em pequenas concentrações (p.ex. zircão, baddeleyita, minerais de ETR), assim como aos OHF por adsorção e/ou coprecipitação.

As observações mineralógico-petrográficas desse trabalho complementam e confirmam no essencial as descrições da literatura (cf. Ellert, 1959; Ulbrich, M., 1983; Ulbrich, M. et al., 1984; Ulbrich, H., 1984; Garda, 1990; Schorscher e Shea, 1992; Waber et al., 1992; entre outros).

Química Mineral

Estudos de MEV-EDS semiquantitativos foram realizados para caracterizar os minerais de urânio e uraníferos primários hidrotermais, ainda não definidos na literatura. Os resultados identificaram diversas fases individuais e misturas dessas, incluindo sulfetos, óxidos, silicatos e niobatos, entre outras, onde o urânio aparece, em muitos casos, como elemento maior, com teores (de U) de 0.65 – 39 %-peso (**Fotos 8 a 19; Tabela 2**). Entretanto, um mineral específico de U, embora indicado, não pode ser definido por limitações operacionais, podendo tratar-se de uraninita e/ou pitchblenda micro a criptocristalinas.

As fases minerais hidrotermais representadas por feldspatos alcalinos reequilibrados e ilitas/sericitas da matriz e que pseudomorfizam nefelinas, foram analisadas por microsonda eletrônica-WDS (**Anexo III**). Os feldspatos alcalinos (matriz e fenocristais, centros a bordas) apresentam-se virtualmente homogêneos, com teores de K_2O de 15.5-16.1%, e de Na_2O de 0.2-1%. As ilitas/sericitas que pseudomorfizam fenocristais de nefelina são algo mais ricas em Fe_2O_3 (1.9-3.2% em peso) em relação aos cristais da matriz (0.8-3.9% em peso), o inverso acontecendo com os teores de K_2O e MgO .

Outras fases hidrotermais, como caolinitas, zircões, fluoritas, rutilos, piritas e minerais de U foram estudadas pelo orientador (Schorscher, 1991); alguns destes dados encontram-se reproduzidos no **Anexo III** e abaixo comentados.

As caolinitas apresentaram dificuldades e alguns problemas analíticos em decorrência de sua granulometria muito fina e instabilidade sob o feixe de elétrons, além de contaminações com Pb dos discos de polimento. As análises obtidas nos cristais em 'livrinhos' mais grossos (10-30 μm) apresentaram como única impureza química mais freqüente e sistemática teores de FeO de 0.4-0.6 %-peso; valores eventuais de Na_2O (<0.1 %-peso) e MgO (<0.3 %-peso) podem ser desconsiderados. Os zircões hidrotermais, tipicamente associados às mineralizações uraníferas hipógenas, indicaram teores de U e Th apenas esporadicamente. As fluoritas apresentam composições virtualmente puras, com teores de K_2O e Na_2O sempre <1%-peso, podendo estar correlacionados aos fluidos de inclusões fluidas; U e Th não foram detectados, e a presença de Y está relacionada mais tipicamente às variedades com

centros de cores azuis (violetas a roxas). Os rutilos, prováveis produtos de alteração dos clinopiroxênios (aegirina-augitas), apresentam teores de Si, Al e Fe, além de Nb e Y. Por fim, as piritas são minerais muito puros, apenas com traços de As e Pb, este último, por contaminação com os discos de polimento.

4.2.2. FRENTES REDOX E MINERALIZAÇÃO SUPERGÊNICA DE U

Petrografia e Mineralogia: Frentes Redox

As frentes redox são feições de destaque, resultantes dos processos supergênicos relacionados ao lençol freático, e enfoque principal dessa pesquisa. São zonas estreitas, em geral não excedendo aos 20-30 cm, excepcionalmente atingindo até 2 metros de largura, bem definidas, e evidenciadas no campo pela mudança drástica na coloração das rochas, de cinza azuladas para marrom avermelhadas (**Fotos 22, 23**). Nessas frentes ocorre, geologicamente, a transformação, por oxidação, dos hidrotermalitos reduzidos/piritizados para oxidados/com OHF associada à formação da principal mineralização uranífera, em conjunto com o desaparecimento das piritas e demais sulfetos e a liberação de ácido sulfúrico. A oxidação das piritas ocorre em geral em um intervalo de poucos milímetros na zona de saturação do lençol freático. Todavia, algumas piritas em dissolução persistem ainda por vários centímetros na rocha oxidada, mais freqüentemente em frentes redox desenvolvidas em zonas insaturadas. Assim, a disposição em relação ao lençol freático, as variações do nível do lençol freático e as condições de oxi-redução (Eh) em função da difusão de O₂ nas águas da zona de saturação e nas respectivas reações fluídos-rochas, propiciaram nas rochas afetadas frentes redox com propriedades mineralógicas e expressão macroscópica-fisiográfica variáveis em função das condições supra locais.

A petrografia macroscópica de detalhe, em amostras de mão, permitiu identificar cinco tipos principais de frentes redox, além de combinações destes em frentes complexas:

(1)-no primeiro tipo ocorrem na rocha oxidada, no contato com a rocha reduzida, fortes enriquecimentos de OHF em zonas ferruginosas sem restos de pirita, de espessuras variáveis, milimétricas a centimétricas, sendo lateralmente contínuas

acompanhando a frente redox; essas zonas tem contato brusco com as rochas reduzidas na interface da frente redox e gradacional, por diminuição de OHF, com a continuação das rochas oxidadas (**Foto 24**);

(2)-o segundo tipo é caracterizado por uma zona branca milimétrica (até 1-2 cm) sem OHF e com apenas algumas piratas metaestáveis em restos corroídos de dissolução incompleta, que separa as rochas oxidada (homogênea quanto à distribuição de OHF, sem pirita) e reduzida (não-alterada quanto ao teor e a distribuição de piratas hidrotermais) (**Foto 25**);

(3)-o terceiro tipo é definido pela precipitação/distribuição dos OHF na rocha oxidada em alternâncias rítmicas de zonas finas milimétricas mais e menos ferruginosas, podendo ocorrer restos de pequenos cristais de pirita corroídos, metaestáveis, de dissolução incompleta, em diminutas quantidades nas bandas menos ferruginosas (**Fotos 26 e 27**);

(4)-o quarto tipo é representado por um contato direto por interface nítida muito bem definida, separando as rochas reduzidas (inalteradas) e oxidadas (homogêneas quanto a distribuição e tingimento por OHF) sem qualquer zoneamento e/ou outra irregularidade adicional nova relacionada ao desenvolvimento dessas frentes (**Foto 28**).

(5)-o quinto tipo é mais variável quanto às distribuições/tingimentos de OHF nas rochas oxidadas, que podem ser homogêneas até heterogêneas-irregulares; é caracterizado principalmente pela ocorrência associada (nas rochas oxidadas) de OHF concentrados em agregados virtualmente puros, de tamanhos e estruturas diferentes, ora preenchendo pequenos cubos, que são pseudomorfos de piratas hidrotermais pretéritas, idiomórficas em cristais individuais esparsos, ora pseudomorfizando concreções maiores policristalinas de pirita, de formas irregulares e tamanhos variáveis, milimétricos a centimétricos, comumente ainda com alguma pirita metaestável preservada em restos de oxidação incompleta (**Foto 21**).

Esses tipos representam:

(1)-Frentes redox imersas na zona de saturação, estagnadas (inativas e imóveis) por redução/deficiência do potencial redox na água desta zona, aliado, ainda, ao rebaixamento do nível do lençol freático. Assim, ocorreria, ao longo da interface da frente redox estagnada e imóvel, a concentração dos colóides de OHF em suspensão na

parte oxidada do freático, acima da frente redox, por efeitos combinados de decantação e filtração acompanhando o rebaixamento do nível do freático;

(2)-Frentes redox também imersas na zona de saturação, entretanto ativas, ainda que em progressão lenta, retardada pelo rebaixamento do lençol e redução do volume do freático, aliado à redução moderada do potencial de oxi-redução nas águas do freático. Essas condições causariam, na zona da frente, simultaneamente Eh menor e maiores concentrações de H_2SO_4 , que impediriam a formação de OHF, originando assim a zona branca fina, virtualmente isenta de pirita e demais sulfetos, uraninita/pitchblenda, e sem OHF, onde estariam presentes essencialmente sulfatos di e trivalentes de Fe em equilíbrio e em solução bastante concentrada (na água do freático). A formação e precipitação de OHF ocorreria apenas após diluição e hidrólise dos sulfatos trivalentes de Fe, à certa distância da interface com as rochas reduzidas, definindo a largura da zona branca (de 1-2 mm a 1-2 cm) e condicionando a sua passagem para as rochas oxidadas típicas com OHF.

Frentes redox imersas no freático com zona de saturação pouco espessa, ativas sob influências cíclicas e rítmicas das condições dos tipos 1 e 2, ou 2 e 4, eventualmente, retratando mudanças sazonais das condições climáticas.

(4)-Frentes redox mais ativas, imersas no freático, com zona de saturação de volume expressivo, atenuando, assim, as influências de eventuais variações de curta duração sobre as condições de Eh e pH do lençol. Portanto, em progressão sob condições de equilíbrio/desequilíbrio de constância secular considerando: avanço da frente, potencial redox, acidez, rebaixamento e alimentação/recarga do freático.

(5)-Frentes redox caracterizadas na rocha oxidada pela substituição pseudomórfica direta das piritas pretéritas, por precipitação *in situ* de OHF indígenas, comumente com a preservação metaestável de piritas corroídas em restos de substituição incompleta, indicando, claramente, condições predominantes de oxidação das piritas ao ar, na zona de insaturação acima do nível médio do freático. A escassez de fluídos (água do freático) temporária a permanente, neste horizonte do perfil de alteração supergênica por oxi-redução, impediu a dissolução das piritas e decorrente exportação e redistribuição do Fe na forma de OHF dispersos, condicionando a substituição pseudomórfica das piritas *sur place*.

Variações seculares nas condições físico-químicas, durante o desenvolvimento geológico do perfil de alteração supergênica por oxi-redução e variações associadas do lençol freático, durante os últimos 76 Ma (Schorscher e Shea, 1992; Shea, 1992; Schorscher e Osmond, 1992), reforçadas por processos/condições locais da evolução estrutural e morfológica, deixaram seus registros em intervalos por vezes restritos, centimétricos a decimétricos, desse perfil, na forma de frentes redox denominadas de frentes complexas (**Foto 29**). Trata-se, de fato, de sucessões temporais de frentes redox de tipos distintos desenvolvidas, ora em sucessões espaciais estreitas, ora mesmo em superposição espacial, quando a tectônica local de blocos e/ou subidas mais duradouras do lençol freático causaram a reinundação de frentes redox anteriores/fósseis pela zona de saturação do lençol freático.

De um modo geral, constatou-se que as zonas reduzidas das frentes redox resumem-se aos próprios hidrotermalitos reduzidos, com algumas particularidades quanto à formação e distribuição da mineralização supergênica rica de U com pirita associada, também supergênica (ver item a seguir). Essas peculiaridades, assim como heterogeneidades hidrotermais-primárias, que também consistiam, via de regra, em concentrações locais maiores, principalmente de pirita, além de outros sulfetos e uraninita/pitchblenda, causaram efeitos locais, como maiores concentrações de H_2SO_4 que inibiam a precipitação de OHF na zona saturada, ou ainda, proporcionavam a preservação de pirita metaestável na zona insaturada, superimpostos a qualquer tipo de frente redox, simples ou complexa.

Na zona oxidada, os OHF formados da oxidação da pirita são, além de argilominerais – principalmente caolinita, da decomposição intempérica dos feldspatos alcalinos – os principais minerais neoformados. Os OHF apresentam uma sequência progressiva de alteração e desidratação para espécies de maior cristalinidade, de OHF amorfos → OHF de cristalinidade baixa e irregular → goethita (e eventualmente lepidocrocita) → hematita, o que ocorre ao longo do perfil geológico, onde os OHF de mais baixa cristalinidade se encontram próximos às frentes (principalmente quando de desenvolvimento mais recente), e goethita e hematita predominam nos solos lateríticos superficiais (Waber et al., 1992). Os OHF de baixa cristalinidade são fases geoquimicamente muito ativas e fixam, por adsorção e/ou co-precipitação, metais pesados como Cu (Veiga et al., 1991), Cd, Zn (Spark et al., 1995) e, principalmente, U

e seus radionuclídeos (Edghill, 1991; Waite et al., 1994; Bruno et al., 1995; Murakami et al., 1997; Bruno et al., 1998; De Putter et al., 1999; entre outros). Os OHF representam assim, um grupo de minerais de eminente importância científica fundamental e de aplicação em metalogênese, tecnologia e ciências ambientais.

Petrografia e Mineralogia: Mineralização supergênica rica de U

A mineralização supergênica rica de U é restrita à uma faixa centimétrica, em média de 10-15 cm, eventualmente mais larga, ou mesmo ausente, na zona de hidrotermalitos reduzidos imediatamente adjacente à frente redox. Uma largura máxima de até 2m foi observada numa frente redox da parte NW da cava da mina (**Figura 3**). Entretanto, mesmo na ausência de uma mineralização de qualquer significado econômico, sempre há anomalias geoquímicas típicas do enriquecimento supergênico de U nessas zonas.

A mineralização supergênica rica predominante ocorre em micronódulos de diâmetro milimétrico a centimétrico, ora homogêneos, ora com estruturas concêntricas de cor preta, dada pelas altas concentrações de uraninita/pitchblenda associada às disseminações finas também de uraninita/pitchblenda criptocristalina (**Fotos 30 a, b**). A formação desses nódulos inicia-se ao longo das bordas dos grãos, na continuidade do crescimento intergranular, envolvendo e dissolvendo todos os minerais silicáticos e gerando porosidades preenchidas em sequência, progressivamente, pela precipitação principalmente de uraninita/pitchblenda (**Fotos 31 a, b**). Um segundo tipo de mineralização supergênica rica é representado por concreções macronodulares arredondadas a botrioidais, com dimensão máxima observada de ~20 cm e peso de até ≥ 1 kg de pitchblenda/uraninita maciça que envolvem sempre um núcleo silicático das rochas reduzidas (**Fotos 32 a, b**). Essas concreções resultaram da oxidação e colapso *in situ* ("implosão"), por frentes redox secundárias, de volumes maiores (dezenas de m³) de rochas reduzidas com mineralização hipogênica de U, isoladas, por suas propriedades estruturais, de porosidade e permeabilidade específicas e de maior resistência a alteração supergênica, em meio às rochas predominantes já oxidadas pelo avanço da frente redox principal (cf. pág. 19; **Fotos 1 e 2**, pág. 23). Tanto nos micro

quanto nos macronódulos observou-se ainda, a formação de uma segunda geração de piritas (**Fotos 31 a, b e 32 a, b**) assim como do sulfeto de Cd – greenockita.

Um outro tipo de enriquecimentos supergênico de U é observado ainda, nas frentes redox de tipo 1, que têm como característica principal o forte enriquecimento de OHF, originando verdadeiras zonas ferruginosas na rocha oxidada, no contato com a frente (**Foto 24**). Estas zonas ferruginosas também são caracterizadas por altos teores de U, acima de 1000 ppm (**tabela 5**, pontos 028-3, 028-4, 028-5 e 028-8).

Microscopia Eletrônica e Química Mineral

Esses estudos complementam as informações e ilustram com detalhes os processos supra descritos. A **foto 33** mostra a mineralização supergênica rica de U, com pitchblenda botrioidal e vermiforme crescendo sobre os minerais silicáticos da matriz e piritas da segunda geração, no caso de um macronódulo de uraninita/pitchblenda maciça, sendo uma visão geral de MEV da amostra da foto 21b. A **foto 34** detalha a superfície e o início do crescimento da pitchblenda sobre uma face da pirita da segunda geração, em arranjos finamente zonados e ornamentados, sugerindo a atuação de atividade biogênica. A **foto 35** evidencia, na mesma amostra, a criptocristalinidade da pitchblenda botrioidal e seu crescimento zonado. Uma outra forma de mineralização supergênica rica é representada por uraninita/pitchblenda criptocristalina, finamente disseminada, crescida com textura vermiforme intersticial, sobre fraturas e bordas de grãos dos minerais silicáticos da matriz (**Foto 36**).

Os OHF exógenos disseminados na rocha oxidada (**Foto 37**) são provenientes da dissolução oxidante das piritas hidrotermais (**Foto 38**), em ambiente de saturação do lençol freático, com decorrente homogeneização e diluição do Fe^{3+} em solução, até a sua precipitação dispersa como OHF exógenos por toda a rocha. Já a precipitação de OHF indígenas que pseudomorfizam o cristal de pirita (**Foto 39**), acontece sob condições de insaturação em relação ao lençol freático, predominando a oxidação ao ar, face à falta de fluidos (i.e. água do freático).

Os estudos de MEV incluíram ainda, algumas observações complementares das fases silicáticas e radioativas nas rochas reduzidas. A **foto 40** mostra um feldspato potássico da rocha reduzida em estágio inicial de substituição, ainda incompleta, por caolinita

hidrotermal bem cristalizada (**Fotos 40 e 41**), contendo inclusões de minerais radioativos hidrotermais envolvidos por auréolas de corrosão (**Foto 42**). Tais auréolas se devem à radiação α (alpha) de U e/ou Th e subsequente dissolução do mineral silicático (feldspato potássico) nas partes onde o seu retículo cristalino foi danificado pela radiação. Os minerais radioativos, neste caso, não foram identificados com precisão em função de suas dimensões pequenas (**foto 42**); em geral predominam zircão por vezes intercrescido com baddeleyita e monazita (cf. Waber, 1990).

Estudos de microsonda eletrônica-EDS e WDS (Schorscher, 1991) foram efetuados para caracterizar as fases minerais supergênicas características e mais importantes das frentes redox: os minerais de U nas mineralizações supergênicas em nódulos maciços e disseminadas nas partes reduzidas das frentes e, tentativamente, os OHF, nas partes das frentes, visando verificar possíveis concentrações de U, Th, ETR e demais metais pesados. As análises dos minerais de U foram feitas em nódulos supergênicos maciços de pitchblenda/uraninita, e revelaram tratar-se de óxidos quase puros de U, com pequenos teores de SiO_2 (12.09-2.96% peso), K_2O (0.84-1.39% peso) e Al_2O_3 (0.15-0.53% peso). Dos elementos traço notou-se a presença esporádica de Ce e Y; Th não foi detectado (**Anexo III**).

As análises dos OHF de baixa cristalinidade, entretanto, foram mal sucedidas em decorrência da instabilidade destes OHF sob o feixe de elétrons. As espécies mais estáveis de Fe demonstraram ser óxidos puros de Fe. As análises de OHF de baixa cristalinidade necessitam de técnicas específicas adicionais (Veiga et al., 1991), que não foram disponíveis no presente trabalho. Os estudos microanalíticos revelaram também a presença de óxidos hidratados de Ti nas rochas oxidadas próximo às frentes redox, derivados dos minerais de Ti e Nb hidrotermais pretéritos das rochas reduzidas (**Anexo III**), mas o número de observações e análises não foi suficiente para verificar se estes óxidos eram produtos de substituição/alteração *sur place* das fases hidrotermais de seus equivalentes reduzidos, ou se eles representam fases neoformadas por precipitação das soluções supergênicas.

Foto 3: Fonolito não-hidrotermalizado da mina de urânio (amostra A1HT, lâmina A1-1) com microfenocristal de clinopiroxênio zonado, em matriz fina de sanidina, nefelina, aegirina e giannetita (polarizadores X, lado maior da foto = 7mm).Nota-se o núcleo sódi-augítico arredondado por corrosão magmática e supercrescimentos de aegirina-augita a aegirina na borda externa subidiomórfica rica em inclusões poiquilíticas.

Foto 4: Fonolito não-hidrotermalizado da mina de urânio (amostra A1HH, lâmina A1-homo-2). Detalhe de microfenocristal de sanidina com zona de borda rica em inclusões poiquilíticas (polarizadores X, lado maior da foto = 5mm). Ponto 74-análise de WDS, Anexo III.

Foto 5: Fonolito fracamente hidrotermalizado da mina de urânio (amostra A1M, lâmina A1-2) com microfratura preenchida de fluorita hidrotermal de cristalização grossa (incolor a azul), também fraturada e carbonatos em impregnações disseminadas cripto a microcristalinos (polarizadores X, lado maior da foto = 7mm).

Foto 6: Brechas vulcânicas hidrotermalizadas na parte centro-leste (corpo B) da mina Osamu Utsumi (altura da bancada é de $\pm 3m$).

Foto 7: Mineralização uranífera hidrotermal rica na matriz (cimento) de brecha vulcânica, indicada por medidas cintilométricas (valores em cps) e cortada por fraturamento tectônico posterior (linhas tracejadas com setas de movimento relativo) (amostra F4/243-1A).

Foto 8: Imagem nº M1-001 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). Os pontos de análise 4 e 5 representam silicatos de Zr com teores de U de até 5,14%.

Foto 9: Imagem nº M2-001 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). O ponto de análise 9 representa sulfeto de Fe com Zn e Zr e teores de U de até 17,17%.

Foto 10: Imagem nº M3-001 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). O ponto de análise 1 representa sulfeto de Zn com Zr e Fe e teores de U de até 15,49%.

Foto 11: Imagem nº M4-002 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). Trata-se de silicato de Zr com Fe e de teores de U de até 16%.

Foto 12: Imagem nº U-002 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). Os pontos de análises 1 e 2 representam sulfetos de Zn com Fe com teores de U de 21,24 a 38,69%.

Foto 13: Imagem nº U-003 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). O ponto de análise 1 representa silicato de Ca com inclusões de sulfeto de Zn e Fe com teores de U de 26,69%.

Foto 14: Imagem nº U-004 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). O ponto de análise 1 representa um sulfeto de Zn com Fe com teores de U muito baixo de 0,65%.

Foto 15: Imagem nº U-005 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). O ponto de análise 1 representa sulfeto de Fe com Zn com teores de U de 21,24 a 38,69%. Os pontos 2 e 3 representam sulfetos de Zn com Zr e Fe com teores de U de 0,44 %.

Foto 16: Imagem nº U-006 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). Os pontos de análises 1, 2 e 3 representam sulfetos Mo com Fe com teores de U de 0,72 a 12,02 %. O ponto 4 representa um sulfeto de Fe com Zr com teores de U de até 2,76 %.

Foto 17: Imagem nº U-007 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). Os pontos de análises 1, 2 e 3 representam silicatos de Zr com Mo e Fe com teores de U de 4,54 a 6,9 %.

Foto 18: Imagem nº U-009 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). Os pontos de análises 1, 2 e 3 representam sulfetos Fe com Mo com teores de U de 4,32 a 36,83 %.

Foto 19: Imagem nº U-010 de MEV de cimento de brecha hidrotermalizada reduzida mineralizada em U. Os números representam as fases com análises semiquantitativas pontuais por EDS, representadas na Tabela 2 (amostra F4/243-1A). Os pontos de análises 1 e 3 representam sulfetos Fe com Mo, Zr e Zn, o ponto 2 representa sulfeto de Zn com Mo e Zr.

Foto 20: Ph porfirítico hidrotermalizado reduzido da mina Osamu Utsumi, com fenocristais de sanidina, nefelina e pseudoleucita em matriz fina piritizada (amostra F1/69-1A).

Foto 21: Ph porfíritico hidrotermalizado oxidado, com caolinização mais forte dos feldspatos e pigmentação da rocha por OHF (amostra F1/1-1.30m). Concentrações maiores de OHF indicam oxidação das piritas em condições insaturadas.

Foto 22: Frente redox de morfologia irregular em Ph porfíritico com fenocristais de pseudoleucita (redonda branca), sanidina (prismática branca) e nefelina (prismática cinza escura), separando Ph hidrotermalizados reduzidos (cinza azulados) e Ph hidrotermalizados oxidados (marrom avermelhados) (amostra nº F1-47).

Foto 23: Frente redox com mineralização secundária de U em brecha magmática. Os micronódulos finos e pretos de pitchblenda ocorrem somente na parte reduzida da rocha, numa zona de até 20 mm de largura adjacente à frente (amostra do corpo B de minério, próximo às coordenadas J/1Z).

Foto 24: Amostra PDC-PH-028, frente redox de tipo 1, com forte enriquecimento de OHF e indicação de amostragens para ICP-MS.

Foto 25: Amostra M2b, frente redox de tipo 2, com zona branca de contato e indicação de amostragens para ICP-MS.

Foto 26: Amostra SN/15, frente redox de tipo 3, com zonas rítmicas ricas em OHF e indicação de amostragens para ICP-MS.

Foto 27: Amostra U3c, frente redox de tipo 3, com zonas rítmicas ricas em OHF e indicação de amostragens para ICP-MS.

Foto 28 a: Amostra M2c, frente redox de tipo 4, com contato nítido e indicação de amostragens para ICP-MS.

Foto 28 b: Frente redox de tipo 4 em fonolito microxenolítico (amostra SN/21).

Foto 29: Amostra IARF, frente redox complexa e indicação de amostragens para ICP-MS. Ocorrem 2 frentes caracterizadas por zonas enriquecidas em OHF, uma recente na interface com a rocha reduzida e outra fóssil na zona oxidada, separadas por avanço de frente de tipo 4, em condições saturadas e redistribuição homogênea de OHF.

a

b

Foto 30: a-Detalhe de uma frente redox com forte enriquecimento supérgeno de U na forma de micronódulos (pretos) e disseminações finas (tingimentos cinza claros a médios) (amostra SN/21); b-Micronódulos concêntricos e homogêneos (amostra RF1)(tamanho natural).

a

b

Foto 31: *a*-Microfotografia de luz transmitida (polarizadores //) de micronódulo de U (diâmetro de 10 mm), em Ph com textura fluidal, mostrando crescimento periférico intersticial e a substituição interna dos minerais silicáticos (polarizadores //, lado maior da foto 15 mm) (amostra SN/15, lâmina SN/15); *b*-Microfotografia de seção polida (luz refletida) de micronódulo de U (diâmetro de 3mm) mostrando o enriquecimento do nódulo em pirita supergênica em relação às piritas hidrotermais na matriz da rocha (amostra SN/21, lâmina SN/21).

a

b

Foto 32: a-Macronódulo de uraninita/pitchblenda maciça em amostra de mão com piritas supergênicas em cristais de 0,2-1 mm idiomórficos, e núcleo silicático de rocha reduzida (amostra VII); b-Microfotografia de seção polida (luz refletida) de macronódulo com uraninita/pitchblenda botrioidal sobrecrecida às piritas supergênicas idiomórficas e raros restos de piritas hidrotermais finas arredondadas por corrosão/dissolução parcial (amostra SN/24; pol. //, lado maior da 10 mm).

Foto 33: Imagem de microscopia eletrônica de mineralização supergênica de U, mostrando pitchblenda botrioidal e vermiforme, crescendo sobre minerais silicáticos da matriz e piratas da 2ª geração (amostra SN/24, lâmina sn/24).

Foto 34: Imagem de microscopia eletrônica, mostrando detalhe da foto 33 de superfície de uma pirita de 2ª geração, com início do crescimento de pitchblenda botrioidal, em arranjos finamente zonados. Esta estrutura sugere atividade biogênica (colônia de bactérias) que causam a precipitação e o crescimento de pitchblenda botrioidal (amostra SN/24, lâmina sn/24).

Foto 35: Imagem de microscopia eletrônica mostrando outro detalhe da foto 33, com pitchblenda botroidal, evidenciando a criptocristalinidade de seus grãos e as estruturas de crescimento zonado (amostra SN/24, lâmina sn/24).

Foto 36: Imagem de microscopia eletrônica que mostra detalhe de mineralização supergênica de U com pitchblenda criptocristalina vermiciforme, crescendo sobre superfícies (fraturas e bordas de grãos) de minerais silicáticos (amostra SN/24, lâmina sn/24).

Foto 37: Imagem de microscopia eletrônica de OHF exógenos, a partir da oxidação da pirita sob sistema de saturação, finamente disseminados na matriz do hidrotermalito potássico (amostra M2c, lâmina M2c).

Foto 38: Imagem de microscopia eletrônica, mostrando cristal idiomórfico de pirita hidrotermal (amostra M2c, parte reduzida, lâmina M2c).

Foto 39: Imagem de microscopia eletrônica de OHF indígeno, pseudomorfizando um cristal idiomórfico de pirita. A falta de OHF fora da pirita indica um sistema de insaturação durante a oxidação da mesma (amostra F1/1-1.30m, lâmina F1/1).

Foto 40: Imagem de microscopia eletrônica de feldspato potássico da rocha reduzida em estágio inicial de substituição incompleta, por caolinita hidrotermal bem cristalizada (amostra F4/243-1A, lâmina F4/243-1A).

Fotos 41: Detalhe da foto 40, imagem de microscopia eletrônica mostrando caolinita hidrotermal bem cristalizada (amostra F4/243-1A, lâmina F4/243-1A).

Foto 42: Imagem de microscopia eletrônica de feldspato alcalino com inclusões de minerais radioativos hidrotermais envolvidos por auréolas de corrosão (amostra F4/243-1A, lâmina F4/243-1A).

Mineralogia	NeS	Ph	HiRed	HiOx	Frentes Redox
Sanidina	-	m	-	-	-
Ortoclásio perítico	m	-	-	-	-
K-feldspato baixa T	-	-	m	m	m
Nefelina	m	m	-	-	-
Cancrinita	tr	tr	-	-	-
Pseudoleucita	e	e	-	-	-
Aegirina-augita	tr	tr	-	-	-
Natrolita	m	m	-	-	-
Illita/sericita	-	-	e-m	e-m	e-m
Caolinita	-	-	e-m	e-m	e-m
Smectita/(clorita?)	-	-	tr-e	tr-e	tr-e
Apatita	tr	tr	-	-	-
Titanita	tr	tr	-	-	-
Zircão	tr	tr	tr-e	tr-e	tr-e
Baddeleyita	-	-	tr-e	tr-e	tr-e
Giannettita	e	e	-	-	-
Monazita	-	-	tr	tr	-
Fluorita	tr	tr	e	-	-
Carbonato	-	-	tr	-	-
Magnetita	tr	tr	-	-	-
Hematita	tr	tr	-	tr-e	tr-e
Pirita	tr	tr	m	-	e-tr
Uraninita/pitchblenda	-	-	tr (?)	-	e-m
MoS (crist. E/ou amorfo)	-	-	tr-e	-	tr
Galena	-	-	tr	-	tr
Esfalerita	-	-	tr	-	tr
Calcopirita	tr	tr	tr	-	tr
OHF	-	-	-	m	m
TiO ₂ criptocristalino	-	-	tr	tr	tr
Ilsemanita	-	-	-	tr-e	tr
Jarosita	-	-	-	tr (?)	tr (?)
Eudialita	tr-e	tr	-	-	-
Outros silicatos de ETR magmáticos	tr	tr	-	-	-
Pirrotita	tr	tr	-	-	-
Pentlandita	tr	tr	-	-	-
Greenalita	-	-	-	-	Tr
Outros fosfatos de ETR hidrotemais	-	-	tr	tr	Tr
Barita	-	-	tr	tr (?)	tr (?)

Tabela 1: Síntese da mineralogia dos nefelina sienitos (NeS) e fonolitos (Ph) regionais e hidrotermalitos equivalentes reduzidos (HiRed) e oxidados (HiOx) da mina de urânio (m - constituinte maior >10%-vol.; e - constituinte essencial ≥1% - ≤10%-vol; tr - constituintes em traços: <1%-vol).

Imagem	M1-001	M1-001	M2-001	M3-001	M3-001	M4-002	M4-002	M4-002	M4-002
Ponto Análise	4	5	9	1	2	1	2	3	4
Si	7.72	9.8	-	2.56	0.9	11.27	13.32	13.32	11.76
S	0.95	-	40.3	19.58	4.2	-	-	-	-
P	0.89	-	-	-	-	-	-	-	-
K	1.17	-	0.27	-	-	-	-	-	-
Ca	1.38	1.16	-	0.76	0.59	-	-	-	0.32
Ti	-	-	-	-	1.12	-	-	-	-
Fe	0.63	0.82	27.61	2.91	2.96	0.54	0.59	0.64	1.35
Zn	2.29	1.93	2.64	24.96	-	-	-	-	-
Zr	40.51	43.51	2.96	10.69	53.25	37.7	44.43	44.65	42.07
Mn	-	0.29	-	-	-	-	-	-	-
Nd	-	0.38	-	-	-	-	-	-	-
U	5.14	4.79	17.17	15.49	10.35	15.66	5.93	5.38	3.41

Imagem	U-002	U-002	U-002	U-003	U-004	U-004	U-004	U-005	U-006	U-006
Ponto Análise	U002-1	U002-1b	U002-2	U003-1	U004-1	U004-2	U004-3	U005-1	U006-1	U006-2
Si	3.46	3.73	2.11	6.78	0.12	2.15	2.64	-	0.12	0.1
S	14.76	10.52	28.77	4.4	35.96	21.2	19.13	42.01	5.71	4.23
Al	-	-	-	-	-	0.16	0.34	0.06	-	-
Ca	0.88	1.05	0.71	1.22	0	0.69	0.92	0.02	-	0.19
Ti	-	-	-	-	-	0.05	-	0.18	-	-
Mo	-	-	-	-	-	-	-	-	9.72	15.5
Fe	6.04	1.74	14.45	6.4	1.15	1.18	2.37	27.27	1.4	1.15
Zn	11.88	13.86	13.14	2.29	61.34	31.44	25.67	6.3	0.35	0.26
Zr	-	-	-	-	1.56	9.37	11.08	1.36	-	-
Pr	0.6	-	-	0.29	0.08	-	0.83	-	0.33	0.13
Ce	0.22	0.21	0.26	0.21	0.01	-	0.8	-	0.54	0.05
Ac	0.23	0.77	0.86	-	0.45	0.21	0.63	-	-	0.18
Nd	0.3	-	0.15	0.33	0.05	-	-	-	0.07	0.21
Pb	-	-	-	-	4.06	3.86	2.56	13.13	50.9	47.94
Th	0.58	-	0.26	0.05	-	-	0.68	0.59	-	0.26
U	38.69	39.63	21.24	26.69	0.85	18.77	21.51	0.44	1.28	0.72

Imagem	U-006	U-006	U-007	U-007	U-007	U-009	U-009	U-009	U-010	U-010	U-010
Ponto Análise	U006-3	U006-4	U007-1	U007-2	U007-3	U009-1	U009-2	U009-3	U010-1	U010-2	U010-3
Si	1.85	0.42	9.44	13.54	10.81	-	0.39	0.56	-	0.02	0.01
S	12.97	33.86	-	0.61	-	50.38	25.32	19.63	48.36	32.53	46.88
Al	0.56	0.04	1.22	0.22	0.43	-	0.17	-	-	-	-
Ca	0.34	0.12	0.84	0.08	0.43	0.21	0.23	0.07	-	-	-
Ti	-	0.08	0.25	-	0.13	-	0.61	0.4	0.15	-	0.03
Mo	11.35	-	2.4	-	4.11	12.84	0.05	4.36	13.32	4.43	14.57
Fe	3.25	20.38	1.53	0.65	1.2	38.05	15.09	12.99	38.17	0.34	37.22
Zn	0.22	0.29	0.2	0.3	0.38	-	-	-	2.01	60.79	0.1
Zr	6.36	2.49	41.43	48.05	39.85	4.13	37.86	7.08	2.89	2.16	3.29
Pr	0.01	0.17	0.12	-	-	-	0.34	-	-	-	0.23
Ce	0.02	0.12	0.48	0.6	0.68	-	0.4	0.29	0.25	-	0.15
Ac	-	0.08	0.41	-	-	-	0.53	0.2	-	0.09	-
Nd	-	0.19	0.31	0.46	0.05	-	-	-	0.27	-	0.19
Pb	20.45	25.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Th	-	-	0.12	0.48	-	-	-	-	-	-	-
U	12.02	2.76	7.33	6.9	4.54	-	4.3	36.83	-	-	-

Tabela 2: Análises semiquantitativas por MEV-EDS em associações de minerais hidrotermais de urânio de uma amostra de brecha reduzida/piritizada de alta radioatividade da mina Osamu Utsumi (Amostra F4/243-1A, Fotos 8-19).

5. LITOGEOQUÍMICA

Foram estudados, por métodos geoquímicos multielementares de fluorescência de raios X (FRX), espectrometrias de emissão atômica e de massa com fontes de plasma indutivamente acoplado (ICP-AES e ICP-MS) os seguintes litotipos da mina de urânio:

- Ph não hidrotermalizados preservados numa ocorrência restrita na parte limítrofe NW da cava da mina (**Figura 3**);
- Ph e NeS hidrotermalizados reduzidos incluindo mineralizações hipogênicas ricas de U-Th-ETR-Zr,
- frentes redox e mineralizações supergênicas ricas de U, e
- Ph e NeS hidrotermalizados oxidados.

Para comparações foram incluídos ainda dados compilados da literatura (Schorscher e Shea, 1992, e Schumann, 1994). Estes estudos objetivaram caracterizar os processos petro-metalogenéticos fundamentais envolvidos na gênese das mineralizações de urânio hidrotermal e supergênica com enfoque nas migrações e transportes geoquímicos, desde os litotipos do magmatismo alcalino regional a protominérios e minérios.

5.1. ROCHAS NÃO HIDROTERMALIZADAS DA MINA OSAMU UTSUMI E REGIONAIS

Ph não-hidrotermalizados da mina Osamu Utsumi, foram estudados e comparados com Ph e NeS regionais selecionados da caldeira alcalina (**Figuras 2 e 3**), na tentativa de se definir a variabilidade composicional inicial (pré-hidrotermal), uma vez que representariam os protolitos e as eventuais fontes magmáticas dos processos hidrotermais uraníferos, em estudo nesta tese. Efetuadas em paralelo com as preparações litogeoquímicas, as revisões microscópicas mineralógico-petrográficas minuciosas, adequadas as finalidades

geoquímico-petroológicas da etapa do trabalho em curso revelaram que os Ph da borda NW da cava da mina de urânio, considerados previamente, sob aspectos geológico-petrográficos gerais macro e mesoscópicos de campo e laboratoriais, como não-hidrotermalizadas, de fato se subdividem em dois grupos: o primeiro, de rochas não ou pouco alteradas e o segundo de rochas hidrotermalizadas, inclusive mineralizadas e/ou, em geral, alteradas por processos específicos, entre si, diferentes. Neste grupo foram identificadas alterações de tipos e intensidades variáveis, associadas ou independentes, de carbonatização; carbonatização e piritização; carbonatização, piritização e fluoritização; sericitização/ilitização, além de argilização hidrotermal e intempérica (**Anexo I, Tabelas I.1, I.2 e I.3**).

Sob aspectos analíticos geoquímicos, há de se destacar, que as análises globais destas rochas por técnicas rotineiras de FRX sequencial automática, apresentaram-se bastante complicadas, tanto em função dos teores absolutos das combinações de elementos maiores e principalmente traço. Assim, destacam-se os elementos Ce, La, Nd, Zr, F, Sr, Ba, entre outros, por suas elevadas concentrações, além das faixas de calibrações e dos padrões certificados usados na análise de rochas ígneas comuns. Daí resultam problemas adicionais para o cálculo das interferências elementares na redução dos dados analíticos brutos e, por final, também para a confiabilidade das concentrações quantificadas dos elementos dosados. Outros problemas resultaram da preparação de amostras como então usada no Laboratório de FRX do IGc-USP, na forma de pastilhas em pó prensadas, inadequada para a análise mais confiável de elementos maiores via FRX em amostras de rochas. Portanto, as análises deste trabalho, foram realizadas em três laboratórios diferentes e com métodos entre si complementares.

Os respectivos dados geoquímicos são apresentados no **Anexo I** nas **tabelas I.1 e I.2**: análises por FRX de Ph não-hidrotermalizados da mina (feitas em dois laboratórios independentes); **tabela I.3**: análises por ICP-AES de parte das mesmas rochas/amostras, e **tabela I.4**: análises comparativas deste trabalho dos

Ph não ou pouco alterados da borda NW da Mina de Urânio (por FRX e ICP-AES) e de Ph e NeS regionais (por FRX) selecionadas da literatura (Schorscher e Shea, 1992, e Schumann, 1994).

Para os Ph da parte NW da cava da mina de U, não ou pouco alterados, foram calculadas composições médias (**Anexo I, tabelas I.1 e I.2**). De mesma forma procedeu-se com os dados (das mesmas rochas) de ICP-AES e de comparação da literatura (**Anexo I, tabelas I.3 e I.4**). Para todas as rochas regionais e os Ph não ou pouco alterados da mina (**Anexo I, Tabela I.4**) foram ainda calculados os parâmetros de Shand (1943) ACNK e ANK, Fe_2O_3 e FeO (razão 0,5) e os Índices de Agpaicidade (**Anexo I, Tabela I.5**).

Após cuidadosa análise dos dados das diversas populações analíticas do **Anexo I**, foram integrados na **tabela 3** deste capítulo, arquivos litogeoquímicos para os Ph não ou pouco alterados da borda NW da cava da Mina de U, considerados mais completos e corretos possíveis, a partir dos dados de FRX de elementos maiores e traço (da TUM) complementados com dados (FRX do IGc-USP) dos elementos traço F e Sc e, com alguns dados de Be (via ICP-AES, IGc-USP). Para fins de comparação foram ainda incluídos (na **tabela 3**), os resultados obtidos via ICP-AES em partes das mesmas amostras, com as respectivas médias, e as composições médias dos Ph e NeS regionais calculadas a partir de dados de XRF selecionados da literatura.

Da **Tabela 3** (e **Anexo I, tabelas 1.1, 1.2 e 1.3**) depreende-se a correspondência boa a tolerável entre os dados integrados de FRX e respectivas médias, com os resultados equivalentes de ICP-AES (e respectivas médias). Divergências maiores dizem respeito à tendência sistemática via ICP-AES para valores maiores de SiO_2 (em até 1% de peso absoluto), Fe_2O_3 , Ni, e valores menores de Al_2O_3 , CaO, K_2O e Ba. Exceção deve ser feita para a média via ICP-AES de Na_2O , sendo que as duas amostras analisadas, A4B e A5, foram as mais ricas neste óxido de todos os Ph da parte NW da mina de U.

De um modo geral confirma-se para a íntegra das amostras alcalinas regionais e os Ph menos alterados da mina, a grande similaridade geoquímica de todos os

litotipos estudados, com variações locais e regionais apenas menores, inclusive entre rochas texturalmente tão contrastantes quanto nefelina sienitos grossos a muito grossos, tipicamente intrusivos abissais e fonolitos vulcânicos a subvulcânicos rasos, conforme já constatado anteriormente (Schorscher e Shea, 1991; 1992).

Os dados geoquímicos (elementos maiores e traço) dos Ph menos alterados da parte NW da mina de U e dos Ph e NeS regionais da caldeira alcalina foram ainda representados em alguns gráficos já tradicionais de classificação de rochas ígneas (principalmente vulcânicas). Em todos estes diagramas, independentemente se baseados em óxidos maiores e/ou elementos traço, todas as rochas alcalinas regionais, NeS e Ph, e os Ph menos alterados da mina de U, mostram comportamento conjunto, caracterizando uma população litogeoquímica única e inseparável, posicionada ou no campo dos fonolitos (**Figuras 5, 6 e 7**) ou na transição dos campos de fonolitos para traquitos (**Figura 8**). Quanto aos parâmetros de Shand (1943), utilizando-se a representação de Maniar e Piccoli (1989), observa-se um certo espalhamento, desde composições fortemente peralcalinas a metalumínicas e até mesmo peralumínicas; os Ph menos alterados da parte NW da cava da mina de U apresentam-se neste contexto desde fracamente peralcalinos a peralumínicos (**Figura 9**).

Sem a intenção de um maior envolvimento com a litogeoquímica primária e a petrogênese e petrologia magmática das rochas alcalinas nefelínicas do Complexo de Poços de Caldas, que fogem dos objetivos deste trabalho, os dados, tanto dos NeS e Ph regionais quanto dos Ph menos alterados do limite NW da cava da mina de U, foram tratados em diagramas binários dos álcalis K_2O , Na_2O e da soma de $Fe_2O_3+MnO+MgO+TiO_2$ magmáticos versus todos os demais óxidos maiores e elementos traço, na tentativa de se caracterizar eventuais correlações e variabilidades.

TABELA 3 - Dados litogeoquímicos dos fonolitos menos-alterados da borda NW da mina de U (ph-mi) por FRX e ICP-AES e respectivas médias (MMFRX e MMICP), e composições médias de fonolitos e nefelina sienitos regionais (ph-reg e ns-reg) calculadas de dados de FRX de: 1 -Schumann (1994), 2 - Schorscher e Shea (1992).

Amostra Rocha	A1HT ph-mi	A4B ph-mi	A5 ph-mi	A10BH ph-mi	A10BT ph-mi	MMFRX ph-mi	A4BICP ph-mi	A5ICP ph-mi	MMICP ph-mi	MedNS1 ns-reg1
%-peso										
SiO ₂	53.30	53.40	52.70	54.57	54.92	53.78	54.35	54.84	54.60	51.96
TiO ₂	0.38	0.42	0.39	0.37	0.37	0.39	0.40	0.37	0.39	0.37
Al ₂ O ₃	20.72	20.83	20.29	20.04	20.11	20.40	20.50	19.99	20.25	20.78
Fe ₂ O ₃	4.23	4.02	4.09	4.74	4.78	4.37	4.21	4.16	4.19	3.75
MnO	0.49	0.31	0.33	0.63	0.61	0.47	0.31	0.33	0.32	0.21
MgO	0.16	0.14	0.12	0.17	0.19	0.16	0.20	0.18	0.19	0.16
CaO	2.08	1.34	1.49	1.81	1.54	1.65	1.15	1.27	1.21	1.34
Na ₂ O	5.22	7.94	8.35	4.89	4.93	6.27	7.59	7.96	7.78	7.97
K ₂ O	10.01	8.25	9.06	7.93	7.92	8.63	7.23	7.93	7.58	8.87
CO ₂	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
Sum	2.90	4.00	2.30	4.40	4.20	3.56	3.33	1.72	2.53	2.22
total	99.54	100.66	99.13	99.56	99.58	99.69	99.29	98.77	99.03	97.63
H ₂ O-							0.66	0.10	0.38	0.48
ppm										
As	3.00	6.00	14.00	10.00	8.00	8.20				
Ba	797.00	110.00	69.00	579.00	559.00	422.80	54.00	30.00	42.00	145.57
Be		11.00	10.00			10.00	11.00	10.00	10.50	
Ce	451.00	365.00	208.00	482.00	371.00	375.40				384.29
Cl	194.00	791.00	808.00			597.67				
Co	2.00	4.00	4.00	3.00	3.00	3.20				13.00
Cr	30.00	6.00	7.00	16.00	19.00	15.60				17.71
Cs	14.00	5.00	12.00	181.00	93.00	61.00				
Cu	11.00	17.00	6.00	16.00	2.00	10.40				2.43
F	12035.00	3254.00	8645.00	3611.00	2750.00	6059.00				
Ga	38.00	48.00	49.00	45.00	47.00	45.40				41.43
Hf										
La	333.00	345.00	115.00	430.00	303.00	305.20	331.00	105.00	218.00	266.57
Nb	237.00	267.00	248.00	261.00	258.00	254.20				201.57
Nd	93.00	75.00	59.00	143.00	14.00	76.80				72.14
Ni	5.00	1.00	3.00	2.00	4.00	3.00	20.00	16.00	18.00	0.43
Pb	36.00	50.00	47.00	54.00	49.00	47.20				47.00
Rb	342.00	126.00	141.00	550.00	626.00	357.00				242.57
S	300.00	461.00	202.00	367.00	401.00	346.20				509.21
Sc	12.00	7.00	6.00	9.00	7.00	8.20				
Sn	11.00	1.00	1.00	4.00	1.00	3.60				
Sr	2241.00	1083.00	1202.00	1516.00	1121.00	1432.60	1019.00	1125.00	1072.00	1031.71
Ta	3.00	10.00	6.00	1.00	19.00	7.80				
Th	37.00	57.00	17.00	64.00	63.00	47.60				37.71
U	1.00	6.00	4.00	10.00	10.00	6.20				9.57
V	85.00	70.00	59.00	59.00	63.00	67.20	59.00	59.00	59.00	55.57
W	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	1.40				
Y	45.00	40.00	32.00	53.00	45.00	43.00	42.00	30.00	36.00	59.71
Zn	251.00	260.00	295.00	470.00	421.00	339.40	275.00	310.00	292.50	165.00
Zr	1124.00	1721.00	1749.00	1728.00	1686.00	1601.60	1654.00	1674.00	1664.00	1118.71

TABELA 3 - Continuação.

Amostra Rocha	MedFon1 ph-reg1	MedNS2 ns-reg2	MedFon2 ph-reg2	MedNSR ns-reg	MedPhR ph-reg	MedAlcR alc-reg
%-peso						
SiO ₂	52.54	54.18	54.11	52.76	53.12	52.98
TiO ₂	0.52	0.82	0.56	0.53	0.54	0.54
Al ₂ O ₃	20.46	19.99	20.01	20.49	20.29	20.37
Fe ₂ O ₃	4.18	4.22	3.92	3.92	4.08	4.02
MnO	0.22	0.27	0.24	0.23	0.23	0.23
MgO	0.26	0.44	0.24	0.26	0.25	0.25
CaO	1.87	1.84	1.64	1.52	1.79	1.68
Na ₂ O	8.41	6.56	7.38	7.45	8.03	7.79
K ₂ O	8.39	8.04	8.38	8.57	8.39	8.46
P ₂ O ₅	0.03	0.12	0.06	0.04	0.04	0.04
LOI/PF	1.49	2.44	1.38	2.30	1.45	1.80
total	98.37	98.89	97.91	98.09	98.20	98.15
H ₂ O-	0.26			0.48	0.26	0.35
ppm						
As						
Ba	343.80	395.25	131.17	236.36	264.06	252.78
Be						
Ce	394.40	363.75	342.67	376.82	375.00	375.74
Cl						
Co	11.90	8.00	9.17	11.18	10.88	11.00
Cr	15.20		9.00	17.71	14.64	15.83
Cs						
Cu	5.50			2.43	5.50	4.24
F		1746.75	1688.40	1746.75	1688.40	1714.33
Ga	35.60			41.43	35.60	38.00
Hf			1.00		1.00	1.00
La	198.10	268.75	254.00	267.36	219.06	238.74
Nb	180.80	269.00	237.00	226.09	201.88	211.74
Nd	88.20	103.50	88.17	83.55	88.19	86.30
Ni	0.90		3.00	0.43	1.09	0.83
Pb	41.60	9.50	6.60	33.36	29.93	31.38
Rb	180.90	144.75	160.67	207.00	173.31	187.04
S	480.60	793.50	1089.33	612.59	708.88	669.65
Sc						
Sn						
Sr	1929.10	2393.50	1600.17	1526.91	1805.75	1692.15
Ta						
Th	17.50	15.50	9.00	29.64	14.31	20.56
U	0.00		6.00	9.57	0.55	4.06
V	71.20	58.00	71.50	56.45	71.31	65.26
W						
Y	41.80	48.25	38.00	55.55	40.38	46.56
Zn	167.40	181.75	165.83	171.09	166.81	168.56
Zr	891.20	1102.00	895.00	1112.64	892.63	982.26

Legenda adotada para representação, em diagramas de classificação e variogramas, dos Ph e NeS regionais e menos alterados da mina de urânio:

Análises individuais
Média do Grupo

- ◆ Fonolitos da Mina
- Nefelina Sienitos Schumann (1994)
- Fonolitos Schumann (1994)
- △ Nefelina Sienitos Schorscher & Shea (1992)
- ▽ Fonolitos Schorscher & Shea (1992)
- Média dos Nefelina Sienitos
- Média dos Fonolitos regionais
- Média de todas as amostras

Figura 5: Distribuição dos Ph e NeS no campo dos fonolitos, em diagrama de Le Maitre (1989).

Figura 6: Distribuição dos Ph e NeS no campo dos fonolitos, em diagrama de Cox et al. (1979).

Figura 7: Distribuição dos Ph e NeS no campo dos fonolitos em gráfico de Winchester e Floyd (1977).

Figura 8: Distribuição dos Ph e NeS no campo dos fonolitos e traquitos em gráfico de Winchester e Floyd (1977).

Figura 9: Distribuição dos Ph e NeS no campo dos fonolitos no diagrama de Maniar e Piccoli (1989) (parâmetros de Shand (1943)).

Desses diagramas binários das rochas alcalinas regionais e dos Ph menos alterados da mina resultam, para a população integral, comportamento geoquímico muito similar, fortemente anômalo de virtualmente todos os elementos traço, com enriquecimentos dos elementos incompatíveis, contrastando com os compatíveis, imóveis a depauperados. Correlações específicas, entretanto, não podem ser delineadas, e considera-se o conjunto das anomalias geoquímicas como uma característica intrínseca de todos os magmas nefelínicos dos Ph e NeS de Poços de Caldas, independentemente das variações, em geral, muito restritas dos óxidos maiores considerados.

As rochas alcalinas regionais e os Ph menos alterados da mina (dados da **Tabela I.4 do Anexo I**), foram tratados ainda em variogramas multielementares (*spidergrams*) expandidos, normalizados em valores do manto primitivo (Taylor e McLennan, 1985) usando-se o pacote de programas MINPET2. De uma maneira geral, confirma-se o comportamento geoquímico como população única de variabilidade muito restrita, de todas as rochas consideradas do complexo Alcalino de Poços de Caldas, com enriquecimentos fortes, variáveis até muito fortes, de todos os elementos representados, com exceção do Sc- que não desvia do padrão, V e Cu- fracamente depauperados e Cr e principalmente Ni- fortemente depauperados. Observa-se, ainda, o fracionamento normal decrescente dos elementos incompatíveis, enriquecidos, para os compatíveis, depauperados, com anomalias fortes positivas de Cs, e negativas de Pb e Ba, assim como os enriquecimentos típicos e fortes de U e Th em geral com $U > Th$ – de significado metalogenético – e de Nb em relação ao Ti – característico das rochas alcalinas intermediárias e ultrabásicas/carbonatíticas (**Figura 10 a - h**). Por fim foram comparados os Ph menos alterados da parte NW da mina de U com as rochas alcalinas regionais em representações normalizadas de suas respectivas composições médias (**Tabela 3**), apresentando-se os Ph da mina algo mais ricos em SiO_2 , Fe_2O_3 , MnO, LOI/PF e em virtualmente todos os elementos traço, por vezes com fortes enriquecimentos, e mais pobres em TiO_2 , MgO, Na_2O , Co, Nd e Sr (**Figura 11 a e b**).

Figura 10: Variogramas expandidos dos Ph menos alterados da borda NW da mina de U e dos Ph e NeS regionais (Anexo I, Tabela I.4): (a)-todas as amostras e médias; (b)-todas as médias; (c)-Ph menos alterados a mina (análises FRX) e média MMFRX; (d)- Ph menos alterados a mina (análises ICP-AES) e média MMICP; (e)- NeS regionais – NS1 (Schumann, 1994) e média MedNS1; (f)- Ph regionais NS1 (Schumann, 1994) e média MedFon1; (g)- NeS regionais – NS2 (Schorscher e Shea, 1992) e média MedNS2; (h)-Ph regionais – Ph2 (Schorscher e Shea, 1992) e média MedFon2.

Figura 10: Continuação.

Figura 11: Variogramas multielementares da composição média dos Ph menos alterados da borda NW da mina de U normalizados pela composição média dos Ph e NeS regionais: (a)-óxidos maiores; (b)-elementos traço.

Principalmente os mais fortes enriquecimentos em alguns elementos traço típicos, como Zr, Th, U, La, Ce, Rb, entre outros, mais provavelmente se devem ao início dos processos de alteração hidrotermal mineralizante; possivelmente ocorreu ainda um evento hidrotermal anterior, diferente da mineralização hipogênica típica de U, como sugere o forte enriquecimento de F

(indicado por venulitizações de fluorita nesses Ph). Também não pode ser descartada uma tendência magmática primária, nos Ph da mina, para rochas mais peralcalinas (agpaíticas); tendência essa, não mais preservada, mas possível, vistos os índices de agpaicidade que variam de 0,83 até 1,16 com médias de 0,96 e 1,04 (**Anexo I, Tabela I.5**).

5.2. ROCHAS HIDROTERMAIS DA MINA DE URÂNIO: FONOLITOS (PH), NEFELINA SIENITOS (NeS) E BRECHAS (BR) REDUZIDOS E OXIDADOS

A maioria absoluta das rochas da mina de urânio Osamu Utsumi, incluindo Ph, NeS e Br, foram afetadas por processos hidrotermais mineralizantes uranotoríferos específicos (**Figura 3**) fortes e fortemente variáveis, e agrupadas segundo sua preservação hidrotermal ou intempérica-saprolítica, como rochas hidrotermais/hidrotermalitos reduzidos com piritas/piritizados ou oxidados com OHF. Dependendo da intensidade local da alteração hidrotermal mineralizante, distinguem-se, ainda, protominérios de baixo teor e mineralizações ricas de U-Th-ETRL-Zr. Essa distinção é mais difícil no caso dos hidrotermalitos já oxidados por processos intempéricos, sendo que os processos envolvidos causaram tanto obliterações das características pretéritas hidrotermais, quanto novas mineralizações uraníferas supergênicas também variáveis.

Análises por FRX do Projeto Internacional Poços de Caldas (Waber et al., 1992) destes grupos litológicos são apresentadas no **Anexo I** nas **tabelas I.6A** (rochas/hidrotermalitos reduzidos) e **I.6B** (rochas/hidrotermalitos oxidados) junto com as respectivas composições médias.

Para definir a composição média mais representativa dos hidrotermalitos de Ph, NeS e Br reduzidos da mina, que são os protominérios de U, utilizaram-se apenas dados de amostras de testemunhos de sondagens, com ocorrência mais afastada das frentes redox, para evitar possíveis interferências dos processos mineralizantes supergênicos (ligados às partes redutoras dessas frentes).

Também excluíram-se dessa média (**Tabela 4**) quaisquer amostras e valores fortemente anômalos representativos da mineralização hidrotermal rica de U-Th-ETRL-Zr.

A definição da composição média mais representativa dos hidrotermalitos oxidados da mina, que são os produtos de alteração incipiente saprolítica dos protominérios de U, mostrou-se mais difícil e problemática, pela interferência dos processos mineralizantes, tanto hipogênicos – hidrotermais, quanto supergênicos – intempéricos, e pelo fato de que as melhores amostras desse tipo são provenientes do Furo F1 (**Figura 3**) localizado na parte centro-norte da cava da mina em meio do corpo E da mineralização hipogênica mais rica da jazida.

Na **Tabela 4** (texto) são mostradas as composições médias dos hidrotermalitos reduzidos e oxidados, em comparação com as médias dos Ph menos alterados da parte NW da cava da mina de U e das rochas alcalinas regionais; para ilustrar os efeitos e a variabilidade da mineralização hidrotermal rica de U-Th-ETRL-Zr, foram incluídos ainda dois exemplos contrastantes, um uranífero e o outro torífero dessa mineralização, representados por análises individuais. Os dados da **tabela 4** foram usados como valores absolutos quando em diagramas binários, em variogramas multielementares, na análise comparativa dos processos de alteração hidrotermal e da mineralização hipogênica associada mais rica de U e Th, assim como nos processos de intemperismo nas rochas oxidadas.

Assim ficam evidentes, nos hidrotermalitos reduzidos e oxidados em relação às composições médias das rochas alcalinas regionais e dos Ph menos alterados da parte NW da mina de U:

- enriquecimentos fracos a moderados de SiO_2 , Al_2O_3 e P_2O_5 ;
- enriquecimento forte de K_2O ;
- empobrecimentos fracos a moderados de Fe_2O_3 , MnO e MgO ;
- empobrecimentos fortes de CaO e Na_2O ;

- dos elementos traço são enriquecidos principalmente Ba, Ce, Hf, La, Nd, U, V e Y, sendo o principal elemento depauperado o Sr.

Dos hidrotermalitos reduzidos para os oxidados as principais diferenças sistemáticas são:

- enriquecimentos fracos a moderados de TiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , Ba, Ce, Cr, Th, V e Y, e
- empobrecimentos fracos a fortes de Fe_2O_3 , MnO, MgO, CaO, F, Hf, La, Nb, Nd, S, Sr, U, Zn e Zr.

As mineralizações hipogênicas (hidrotermais) ricas de U e Th, respectivamente, mostram comportamentos de elementos maiores e S similares entre si, típicos dos hidrotermalitos reduzidos, dos quais representam um subgrupo. O enriquecimento de P_2O_5 indica a importância crescente das fases fosfáticas nessas mineralizações, notando-se ainda enriquecimentos conjuntos e similares de Co, Cr, Ni e V. As principais diferenças entre os dois tipos contrastantes de mineralizações são representadas por enriquecimentos fortes, principalmente de Hf, Nb, Rb, Sr, U e Zr na mineralização hipogênica rica uranífera, e de Ba, ETRL (Ce, La, Nd), Cu, Pb, Th, Y e Zn na mineralização equivalente torífera.

Como no caso dos Ph menos alterados da parte NW da mina de U, foram feitos também para os hidrotermalitos reduzidos diagramas binários para análise das variações geoquímicas impostas pelo processo hidrotermal mineralizante e suas possíveis correlações com as principais reações de elementos maiores, representadas pela troca de $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ magmáticos por K_2O hidrotermal. Nestes diagramas binários K_2O versus os demais óxidos maiores e elementos traço não se observam correlações diretas específicas e/ou variações geoquímicas sistemáticas representativas do processo hidrotermal mineralizante.

Os transportes geoquímicos envolvidos nos processos de formação dos hidrotermalitos reduzidos foram analisados em variogramas das composições médias normalizadas pelas composições médias das rochas alcalinas regionais, incluindo as mineralizações hipogênicas ricas uranífera e torífera (**Tabela 4**).

Para os óxidos maiores e os elementos traço observaram-se enriquecimentos fortes a muito fortes e mobilizações/remoções também amplamente variáveis, entretanto, consangüíneos, ou seja de uma mesma tendência e assinatura geoquímica, tanto nos hidrotermalitos reduzidos que são os protominérios de U, quanto nas mineralizações uranífera e torífera hidrotermais ricas, guardadas suas especificidades (Figura 12 a e b).

A análise dos transportes geoquímicos nos hidrotermalitos oxidados foi feita, em analogia, a partir das composições médias, usando-se como valores de normalização a composição média dos hidrotermalitos reduzidos (Tabela 4). Os respectivos gráficos (Figura 13 a e b) mostraram a remoção forte principalmente de CaO e MnO - de carbonatos, F - de fluorita, e Zn e S - de esfalerita e outros sulfetos hidrotermais, sendo fases solúveis em ambiente supergênico oxidante ácido-sulfúrico, assim como o enriquecimento fraco a moderado dos elementos Pb, Th, Ce, Ti, Cu, Ni e Cr, residual (Th, Ti, Cr, Ce), por precipitação como fase própria (Pb como cerussita), e/ou por co-precipitação com OHF (Ce, Co, Ni).

Figura 12: Variogramas multielementares da composição média dos hidrotermalitos reduzidos e de mineralizações ricas hipogênicas (reduzidas) de U e Th, respectivamente, normalizados pela composição média dos Ph e NeS regionais: (a)-óxidos maiores; (b)-elementos traço.

Tabela 4: Composições médias das rochas alcalinas (Ph e NeS) regionais, dos Ph menos alterados da parte NW da mina de U (MedPh-mi), dos hidrotermalitos reduzidos (MedRed-mi) e oxidados (MedOxi-mi), assim como de mineralizações hipogênicas (reduzidas) ricas de U e Th (AltaMin-U e AltaMin-Th), respectivamente.

	MedAlcR	MedPh-mi	MedRed-mi	MedOxi-mi		AltaMin-U	AltaMin-Th
Amostras	s/n	s/n	s/n	s/n		F4:243-A3	F1: 105-1A
% - peso							
SiO ₂	52.98	53.78	55.85	55.56		52.31	48.4
TiO ₂	0.54	0.39	0.44	0.53		0.48	0.37
Al ₂ O ₃	20.37	20.4	21.80	23.32		21.03	20.48
Fe ₂ O ₃	4.02	4.37	2.96	2.74		3.52	1.56
MnO	0.23	0.47	0.14	0.02		0.02	0.1
MgO	0.25	0.16	0.07	0.05		0.17	0.01
CaO	1.68	1.65	0.31	0.01		0.28	0.09
Na ₂ O	7.79	6.27	0.44	0.62		0.01	0.49
K ₂ O	8.46	8.63	13.16	12.94		12.17	10.4
P ₂ O ₅	0.04	0.02	0.06	0.07		0.6	0.68
LOI/PF	1.8	3.56	3.56	3.09		5.13	5.33
total	98.16	99.7	98.64	98.95		95.72	87.91
H ₂ O-	0.35	0.38					
ppm							
As		8	10.25				
Ba	253	423	648.69	746		446	937
Be		10					
Ce	376	375	403.77	479.35		565	22807
Cl		598					
Co	11	3	1.67	1.85		17	9
Cr	16	16	2.60	5.55		14	21
Cs		61					
Cu	4	10	2.23	3.15		15	102
F	1714	6059	3116.42	1388.25		3665	
Ga	38	45	37.27	35.54		42	34
Hf	1		14.00	11.13		232	
La	239	305	507.51	447.8		484	14204
Nb	212	254	225.80	193.25		484	105
Nd	86	77	126.14	107.3		165	5578
Ni	1	3	4.19	5.55		73	93
Pb	31	47	8.79	29.3		109	1202
Rb	187	357	298.56	330.5		333	151
S	670	346	9316.00	37.4		14509	7548
Sc		8	3.24	3.7			8
Sn		4					
Sr	1692	1433	198.28	174.15		1623	689
Ta		8					
Th	21	48	32.61	50.6		114	3651
U	4	6	51.95	48.78		5588	210
V	65	67	213.00	229.85		222	247
W		1					
Y	47	43	69.00	75.5		150	970
Zn	69	339	185.84	23.45		627	4424
Zr	982	1602	1202.93	1043.5		17486	405

Figura 13: Variogramas multielementares da composição média dos hidrotermalitos oxidados normalizados pela média dos hidrotermalitos reduzidos: (a)-óxidos maiores; (b)-elementos traço.

5.3. FRENTES REDOX

As frentes redox, alvo central dessa pesquisa, consistem numa interface nítida, muito bem definida em afloramentos e amostras de mão, que separa as zonas justapostas, bastante estreitas, de rochas reduzidas e oxidadas, que se apresentam com características mineralógicas e geoquímicas distintas entre si e dos hidrotermalitos adjacentes reduzidos e oxidados normais, que predominam por toda a mina de U, com excessão dessas frentes. As frentes redox são o resultado do avanço dos processos intempéricos de tipo frente rolante, impostos aos hidrotermalitos reduzidos. As interfaces são caracterizadas pela mudança drástica na coloração das rochas de cinza-azulado médio a escuro dos hidrotermalitos reduzidos/piritizados, para marrom avermelhado dos hidrotermalitos oxidados/com OHF. São, de fato, interfaces de reações fluidos-rochas supergênicas diversas, que ocorrem conjuntamente num intervalo restrito de tempo, espaço e condições físico-químicas por ação de águas oxidantes do freático sobre as rochas piritizadas e mineralizadas em U de baixo teor. Sob aspectos visuais, macroscópicos, entretanto, predomina a transformação oxidante da pirita, finamente disseminada nas rochas reduzidas

escuras, para OHF (óxi-hidróxidos de Fe) marrom avermelhados nas rochas oxidadas.

As zonas das frentes redox de rochas reduzidas e oxidadas, adjacentes à interface em justaposição, são os reservatórios geológicos de reações geoquímicas específicas com destaque para lixiviação e enriquecimento residual na zona oxidada e de redeposições seletivas na zona reduzida. Essas zonas tem contato brusco entre si, dado pela interface de reação da frente redox, e contatos gradativos com os reservatórios geológicos maiores adjacentes em continuação física dos hidrotermalitos reduzidos, respectivamente, oxidados normais da mina. As zonas reduzidas das frentes redox, resumem-se aos próprios hidrotermalitos reduzidos, com algumas particularidades quanto à presença e distribuição da mineralização supergênica rica de urânio que ocorre disseminada e como micronódulos, de pirita e subordinadamente greenockita. As zonas reduzidas mineralizadas em U por processos supergênicos, de reprecipitação e concentração por frentes rolantes descendentes acompanhando o avanço do perfil de intemperismo, se restringem em geral, a uma faixa com largura média de cerca de 15-20 cm, a partir da frente redox (**fotos 30 a, b**) dentro da zona dos hidrotermalitos reduzidos; excepcionalmente essa zona de mineralização rica supergênica, atinge até 2 metros de largura.

As zonas oxidadas das frentes redox, distinguem-se menos ainda dos hidrotermalitos oxidados normais adjacentes. Notam-se apenas pequenas particularidades mineralógico-químicas, como a eventual persistência de piritas, seja em cristais individuais ou agregados, ainda que corroídos, por estreitas faixas, em geral não excedendo poucos centímetros de largura, até a total oxidação, e anomalias geoquímicas, na forma de gradientes de concentração em processo de diluição e dissipação progressiva, variáveis para os diferentes elementos, com o afastamento da frente para as rochas oxidadas normais.

Particularidades locais e variações temporais na evolução geológica, durante os últimos 76 Ma, dos perfis de intemperismo, tectônicas, morfológicas,

paleoclimáticas e mineralógico-petrográficas, principalmente, causaram variações nas condições de recarga do lençol freático e nas propriedades físico-químicas de suas águas, de concentração/diluição/salinidade e pH, temperatura, difusão de O₂ e Eh. Estas, por sua vez, controlaram e influenciaram as reações fluidos-rochas supergênicas e originaram tipos distintos de frentes redox, sendo que, cinco tipos principais e combinações destes em frentes complexas, foram definidos e estudados nesta pesquisa (cf. Item 4.2.2., p: 32-36).

Para os estudos geoquímicos de detalhe foram realizadas análises multielementares por ICP-MS em amostras selecionadas dos diferentes tipos de frentes redox, na forma de microperfis amostrados com espaçamento mili a centimétrico (**fotos 24 a 29**). As **tabelas I-7A e B do Anexo I** apresentam os dados obtidos com um ou dois fatores de diluição (FD alto: ~50.000 e FD baixo: ~5.000), dependendo da quantidade de amostra em cada caso. Para suprimir e controlar o "efeito pepita" nas microamostras, numa segunda amostragem foram extraídas quantidades maiores de material, sempre quando possível, de partes mais homogêneas das mesmas frentes e amostras e reanalisadas, também por ICP-MS usando um FD ~10.000 (**Anexo I, Tabela I-8**).

5.3.1. RESULTADOS ANALÍTICOS E TRATAMENTOS DOS DADOS

Os resultados analíticos por ICP-MS integrais das amostras dos microperfis de frentes redox (**Fotos 24 a 29**), com os dois fatores de diluição, foram compreendidos e representados em dois grandes grupos, referentes às zonas reduzidas e oxidadas dessas frentes (**Anexo I, Tabelas I-7A e B**). Os resultados das reanálises de amostras selecionadas maiores dessas mesmas frentes encontram-se no **Anexo I, Tabela 8**. Os tratamentos dos dados e discussões no texto, a seguir, baseiam-se na análise individual das frentes redox por tipo

genético, separando elementos traço convencionais e ETR. Para cada uma das frentes redox são apresentadas tabelas com os dados dos microperfis organizados de acordo com a disposição das amostras no perfil: da zona reduzida, para a interface e a zona oxidada da frente. Elementos de interesse específico, que permitem correlações com observações mineralógico-paragenéticas foram selecionados e serão discutidos em valores absolutos. Adicionalmente foram representados em gráficos binários multielementares, perfis geoquímicos esquemáticos das frentes redox, mostrando na abscissa (eixo x), como pontos equidistantes, a disposição das microamostras no perfil da frente redox e na ordenada (eixo y) a concentração elementar. Os dados de ETR foram representados e discutidos a partir de padrões com normalização condritica.

Pela importância petro-metalogenética no contexto do trabalho, cabe ainda ressaltar, que todas as análises dos microperfis das zonas reduzidas das frentes redox com teores de U >3.000 ppm e de Th <150 ppm representam mineralização supergênica rica de U em micronódulos.

5.3.2. GEOQUÍMICA DAS FRENTES REDOX

FRENTE REDOX PDC-PH-028 (Foto 24)

Tipologia: Frente Redox Tipo 1(simples)

É caracterizada pela formação de uma zona de alta concentração de OHF na parte da zona oxidada imediatamente adjacente a interface da frente, apresentando concentração máxima de OHF e contato brusco com a rocha reduzida na interface, e decrescência gradativa de OHF com o afastamento da interface adentro à zona oxidada. Geneticamente, trata-se de uma frente estagnada, praticamente inativa e imóvel, ainda que imersa na zona de saturação, por redução temporária do potencial redox aliado ao rebaixamento

do nível do freático e a decantação e filtração de colóides de OHF da suspensão. O avanço dessa frentes foi controlado predominantemente por critérios texturais (bordas de grãos, porosidade e permeabilidade), embora efeitos estruturais de microfraturas também sejam observados (**Foto 24**).

Geoquímica multielementar

Dessa frente foram analisadas um perfil de 8 microamostras (**Foto 24**), sendo as amostras 1 e 2 da zona oxidada, com a aproximação da interface progressivamente mais ricas em OHF; os pontos 3, 4 e 5 da zona oxidada de concentração máxima de OHF imediatamente adjacente a interface da frente; os pontos 6 e 7 eqüidistantes, a cerca de 0,5 cm da interface na zona reduzida, e o ponto 8, a cerca de 4 cm da interface também na zona reduzida da frente redox. Os dados analíticos deste perfil são apresentados na **Tabela 5** (texto). Adicionalmente foram ainda reanalisadas 4 amostras maiores, 2 da zona oxidada e 2 da reduzida (**Anexo I, Tabela I-8**).

Nas **figuras 14 a-d** são plotados os gráficos binários multielementares dos elementos de maior relevância nos microperfis, como U, Tu, Hf, As, Cd, Zr, Zn, Mo, Pd, Pb, abaixo discutidos, onde no eixo (x) estão dispostos os pontos amostrados segundo os microperfis, e no eixo (y) as concentrações em ppm.

U (urânio): Apresenta valor mais elevado (~5500 ppm) na zona reduzida, no ponto (8 do microperfil) mais afastado a ~4cm da interface (I) da frente redox (FR) (**foto 24**) representativo de um micronódulo de uraninita/pitchblenda da mineralização supergênica rica. Os outros dois pontos (7 e 6 do microperfil) da zona reduzida apresentam teor de ~300 ppm (que era o teor de corte operacional da empresa mineradora), lembrando ainda o teor médio dos hidrotermalitos reduzidos normais da mina mais afastados das FR, de ~50 ppm (**Tabela 4**). Na zona oxidada, o U apresenta clara correlação positiva com o Fe, na forma férrica, sendo mais concentrado (~1000-1500 ppm) nas zonas mais ricas em OHF junto a IFR e decrescendo com o afastamento da FR para as rochas oxidadas normais da mina, porém, mais rapidamente e até certo ponto

independentemente dos teores totais de Fe. Isto é bem observado na sequência dos pontos 3, 2 e 1 do microperfil (**foto 24, tabela 5**). O U na zona oxidada, demonstra desta forma dependência e correlação não apenas com os teores totais de Fe, mas também e principalmente com a especiação do Fe férrico, sendo que os OHF diretamente adjacentes à FR apresentam-se de menor cristalinidade (com maior teor de amorfos: limonitas) do que aqueles mais envelhecidos/cristalinos, milímetros a poucos centímetros adentro da zona oxidada (com mais goetita e hematita).

Th (tório): Ocorre em teores baixos em todo o microperfil, dentro da variabilidade das médias dos hidrotermalitos reduzidos e oxidados normais da mina (**Tabela 4**). Na zona reduzida é algo mais concentrado (~55 ppm) no micronódulo de U (ponto 8 do microperfil) em relação aos pontos 7 e 6 (~15 ppm), e na zona oxidada mostra fraca concentração e correlação positiva com Fe/OHF (pontos 5 e 3 do microperfil). O fraco enriquecimento no micronódulo de U e na zona oxidada junto ao Fe dos OHF, com valores dentro da média dos hidrotermalitos normais, apontam para o controle essencialmente hidrotermal do Th e seu pouco envolvimento nos processos supergênicos.

Zr (zircônio) e Hf (háfnio): Confirmam no seu comportamento as relações de análogos geoquímicos de origens hidrotermais, pouco envolvidos nos processos supergênicos. Na zona reduzida os teores mais elevados ocorrem no micronódulo de U (ponto 8 do microperfil); na zona oxidada os teores são em geral algo superiores, correlacionados com o Fe e excedem nos pontos 5 e 3, mais ricos em Fe/OHF, os valores médios dos hidrotermalitos oxidados (**Tabelas 5 e 4**).

Zn (zinco), Cd (cádmio), Mo (molibdênio) e As (arsênio): Estes metais pesados tem sua origem na mineralização hidrotermal, Cd substituindo Zn na estrutura da esfalerita, Mo ocorrendo em fases próprias nos sulfetos cristalino e amorfo, molibdenita e jordisita, e o As, mais provavelmente, como impureza na pirita. No microperfil estudado, na parte reduzida, o Zn ocorre com valor máximo (85 ppm), bem abaixo da média dos hidrotermalitos reduzidos normais

(Tabela 4), enquanto que o Mo, As e Cd, com valores máximos de 30, 8,4 e 2,2 ppm ficam próximos, Mo e As algo abaixo e Cd acima, das respectivas médias, de 40, 10,3 e 1,3 ppm de hidrotermalitos reduzidos normais (as médias de Mo e Cd foram calculadas de dados do Projeto Internacional Poços de Caldas extraídos de Waber et al., 1991). Nos pontos do microperfil na zona oxidada observa-se o enriquecimento de todos os metais pesados em correlação positiva muito boa com os teores de Fe/OHF (Tabela 5). Isto complementa e esclarece os processos mineralógicos de frentes redox observados, indicando que a esfalerita e os sulfetos de Mo sofrem dissolução oxidante antes da pirita, disponibilizando em solução Zn, Cd e Mo. A reprecipitação de parte do Cd na zona reduzidas das frentes, como greenockita (CdS), principalmente em inclusões nos micro (e macro) nódulos de U já foi observada (Schorscher, 1991; Waber et al., 1992) e confirmada nesse trabalho em estudos de microscopia de minérios. Similarmente é reprecipitada também uma parte do Mo numa fase supergênica própria, estável na zona reduzida no campo limítrofe superior de estabilidade da pirita, a ilsemannita (*azul de molibdênio*: um óxi-hidróxido ou oxisulfato hidratado de Mo), de cor azul escuro forte e típica expressão visual em afloramentos e amostras de mão. Na dissolução oxidante da pirita são disponibilizados ainda sulfatos de Fe (di e trivalentes) e As em solução. A diluição e hidrólise dos sulfatos de Fe causou, em conjunto, a liberação da principal parte do ácido sulfúrico (Blanchard, 1968), dissolução da ilsemannita e disponibilização do Mo e a reprecipitação do Fe como OHF na zona oxidada, que, muito efetivamente, coprecipitaram os quatro metais pesados ainda disponíveis em solução, em correlação com os teores totais de Fe/OHF (tabela 5). O avanço da FR e o envelhecimento dos OHF, novamente disponibilizaram parte dos metais pesados em solução, o que levou ao seu empobrecimento nas rochas oxidadas normais, entretanto, por processos diferenciados: o Cd foi enriquecido na zona reduzida nos processos de frente rolante, e o Zn parcialmente removido em solução oxidante e por fim nas águas

superficiais; o comportamento do As e Mo nas rochas oxidadas normais ainda continua obscuro por falta de dados específico.

Pb (chumbo): Apresenta na zona reduzida concentrações acima da respectiva média (**Tabelas 4 e 5**) e enriquecimento extremo (850 ppm) no micronódulo de pitchblenda (ponto 8 do microperfil). Na zona oxidada apresenta valores também acima da média das rochas oxidadas normais e concentração maior (152 ppm) no primeiro ponto adjacente a interface na zona oxidada da frente (pto. 5 do microperfil), entretanto sem correlação direta com os teores de Fe/OHF. O enriquecimento extremo (850 ppm) no micronódulo de pitchblenda deve ser considerado como de origem radiogênica. O avanço da frente redox remobilizou o Pb pela dissolução da mineralização supergênica rica de U da zona reduzida. Na zona oxidada foi rapidamente reprecipitado, provavelmente como fase própria anglesita (PbSO_4) e, eventualmente, em menor proporção, coprecipitado em OHF.

Pd (palládio): Foi inicialmente observado como enriquecimento isolado numa das FR da mina de U Osamu Utsumi nos trabalhos do Projeto Internacional Poços de Caldas (McKenzie et al. 1991; cf. Waber et al., 1992) e estudado mais detalhadamente nesta pesquisa. Apresenta concentração máxima de 14 ppm no micronódulo de U (ponto 8 do microperfil; **Tabela 5**) e de ~2 ppm, nos demais pontos da zona reduzida; na zona oxidada os teores variam de ~3 a 6,6 ppm, em boa correlação com os teores de Fe/HFO (**Tabela 5**), confirmando a afinidade geoquímica do Pd com Fe em meio oxidante. Para Pd inexitem valores médios de referência das rochas reduzidas e/ou oxidada normais.

Fe (ferro): Ocorre, na zona reduzida da FR quase que na totalidade como pirita e na zona oxidada como OHF (óxi-hidróxidos de Fe férrico) diversos, amorfos como limonitas a perfeitamente cristalinos como hematita, sendo constituintes maiores essenciais dos sistemas naturais de FR aqui estudados. Seu comportamento geoquímico é controlado pelas reações de oxi-redução da pirita para OHF, bem estudadas em condições supergênicas naturais, experimentais e teóricas (por ex.: Blanchard, 1968; Garrels e Christ, 1965; Nordstroem et al.,

1992). Estas reações controlam, pela liberação de ácido sulfúrico, a mobilização de todos os demais elementos nos processos de FR, seguida pela coprecipitação/imobilização seletiva de metais afins nos OHF em *estatus nascendi* na zona oxidada. Por fim, o envelhecimento (*aging*) dos OHF amorfos e de baixa cristalinidade, incluindo sua desidratação e cristalização progressiva até a formação de hematita, liberam novamente os metais coprecipitados, em processos que ainda carecem de estudos mais detalhados, principalmente experimentais e teóricos em sistemas mais puros. Dessa forma o Fe é, sem dúvida, o elemento mais importante para a compreensão dos processos de frente redox considerados, controlando o comportamento geoquímico de virtualmente todos os demais elementos presentes.

Na FR considerada apresenta teores de ~2 %-peso nos pontos analíticos da zona reduzida, que correspondem a média dos hidrotermalitos reduzidos normais (Tabelas 4 e 5). Ocorrendo como pirita, não apresenta na zona reduzida correlações nítidas com nenhum dos outros elementos. Na zona oxidada, fortemente enriquecida em OHF (**foto 15**) pela evolução específica desta FR (de tipo estagnante), os teores de Fe sobem forte e bruscamente, atingindo o valor máximo de ~6 %-peso (no ponto 3 do microperfil); com o afastamento da FR na zona oxidada os valores decrescem gradativamente (pontos 2 e 1 do microperfil). Observa-se assim o comportamento geoquímico conservador/inerte do Fe férrico, ficando, tanto em valores absolutos quanto na sua distribuição fisiográfica (estrutural e textural) preservado nos hidrotermalitos oxidados, conforme depositado pela frente redox específica, quando ativa. Desta forma é um excelente indicador para o tipo de FR fósseis, a evolução do perfil de intemperismo e das condições do lençol freático e, implicitamente, das condições paleoclimáticas. Na zona oxidada o Fe férrico, na forma de OHF, apresenta-se altamente correlacionado com a grande maioria dos demais elementos estudados, pelos processos acima descritos de coprecipitação até as transformações posteriores de envelhecimento e cristalização.

Tabela 5: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox *PDC-PH-028*.

Amostra ppm\Tipo	028-8 red	028-7 red	028-6 red	028-5 fr. ox-Fe	028-4 fr. ox-Fe	028-3 fr. ox-Fe	028-2 ox	028-1 ox
As	8.38	4.59	5.27	14.62	8.20	25.28	10.73	23.84
Ba	458.20	508.40	497.40	497.60	507.70	835.00	518.40	700.00
Be	5.99	4.41	3.22	1.27	4.59	3.49	2.24	2.89
Bi	0.04	1.18	0.02	0.08	0.04	0.02	0.03	0.03
Ca	445.60	443.80	164.70	270.90	456.40	663.80	70.75	384.70
Cd	1.80	2.21	1.20	2.88	2.19	4.12	2.41	1.66
Ce	743.90	106.50	73.90	382.60	187.60	336.70	125.00	361.70
Co	4.43	20.61	1.30	9.03	6.12	8.91	1.71	2.19
Cr	13.44	12.85	17.46	13.26	6.98	25.52	42.79	28.37
Cs	0.31	1.36	0.22	0.36	0.31	0.54	0.32	0.35
Cu	4.96	5.60	31.66	7.38	8.33	10.43	122.60	5.14
Dy	40.12	3.50	4.46	12.61	5.63	14.78	7.01	7.25
Er	20.77	2.24	3.37	8.89	4.24	10.20	5.37	4.75
Eu	15.37	1.40	1.48	4.08	2.17	4.20	2.27	2.80
Fe	19660.00	20120.00	20130.00	47230.00	42320.00	62030.00	28650.00	28350.00
Ga	55.65	52.31	42.90	26.17	66.91	76.94	43.84	43.89
Gd	49.68	4.68	4.17	17.07	8.32	15.37	9.83	12.82
Ge	4.76	1.82	1.51	3.85	2.98	4.31	3.17	2.19
Hf	14.87	9.23	13.32	19.28	13.60	31.09	17.75	14.71
Ho	7.77	0.79	1.03	2.94	1.35	3.28	1.70	1.56
La	460.40	88.50	73.21	264.70	148.30	271.30	99.75	266.30
Li	94.22	94.81	79.54	23.88	108.90	110.10	69.98	67.43
Lu	1.85	0.36	0.55	1.21	0.59	1.33	0.73	0.56
Mg	455.40	521.90	416.80	151.40	561.10	550.30	357.10	260.90
Mn	56.51	52.72	27.25	96.46	92.75	135.70	54.63	48.35
Mo	30.12	13.60	16.03	254.90	192.90	385.40	180.40	182.00
Nb	34.50	25.52	39.53	50.02	16.40	21.79	18.79	13.00
Nd	253.80	22.68	19.64	91.36	44.01	87.54	32.88	76.54
Ni	14.60	17.96	37.65	15.11	46.34	92.61	38.93	342.20
Pb	849.70	26.53	21.69	152.40	34.94	58.16	33.54	89.53
Pd	14.07	1.80	2.17	6.60	2.98	6.81	5.99	3.38
Pr	87.05	8.69	6.38	36.69	17.66	32.40	11.71	32.54
Rb	239.10	270.40	244.30	234.00	290.20	431.90	242.60	274.30
S	57140.00	69540.00	61580.00	11310.00	18160.00	0.00	20910.00	1583.00
Sb	0.87	1.98	0.69	2.98	2.14	5.14	2.28	3.32
Sc	1.80	1.58	0.94	2.07	1.39	1.79	1.47	1.39
Se	2.88	0.86	6.09	1.75	1.59	0.64	1.32	1.13
Sm	44.14	3.55	3.46	11.84	5.77	11.62	5.97	7.59
Sr	245.60	216.30	179.70	257.50	239.40	416.10	210.80	310.40
Ta	0.33	0.33	0.73	0.88	0.17	0.22	0.09	0.08
Tb	7.78	0.68	0.73	2.32	1.17	2.54	1.28	1.50
Th	53.65	13.57	16.04	59.93	29.08	50.61	21.20	25.28
Ti	1737.00	2113.00	2434.00	2552.00	2177.00	2012.00	3136.00	809.50
Tm	2.40	0.40	0.55	1.45	0.64	1.38	0.84	0.65
U	5495.00	278.90	341.80	1608.00	1077.00	1472.00	436.70	278.90
V	270.60	257.90	223.40	132.60	331.10	357.60	263.70	178.60
W	3.49	2.51	3.37	6.08	2.35	4.52	2.49	2.24
Y	237.80	29.99	34.87	105.60	52.22	112.40	53.67	55.50
Yb	12.95	3.61	3.48	8.16	4.01	7.67	5.48	3.97
Zn	86.62	37.76	68.67	327.60	428.70	413.70	245.40	157.40
Zr	890.00	518.90	794.40	1281.00	807.70	1813.00	1034.00	1030.00

Figura 14: Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra PDC-PH-028 (frente redox de tipo 1). O pontos amostrados estão dispostos equidistantemente na abcissa, segundo a seqüência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil 1, (b)- perfil 2, (c)- perfil 1 – detalhe e (d)- perfil 2 – detalhe.

Mn (manganês): É um elemento também muito susceptível a reações de oxidação-redução por suas múltiplas valências possíveis em sistemas supergênicos, que, similarmente ao Fe férrico, forma, em ambiente oxidante, óxi-hidróxidos de Mn, muito ativos na co-precipitação de outros metais. Entretanto, como constituinte menor, não propiciou quaisquer efeitos notáveis no sistema estudado. Apresenta em geral teores abaixo das respectivas médias dos hidrotermalitos reduzidos e oxidados (tabelas 4 e 5). Na zona reduzida apresenta variações menores, independentes do Fe, e não pode ser associado a um determinado mineral. Não é isomórfico com o Fe na pirita, mas, mais provavelmente ocorre como impureza nos demais minerais hidrotermais (feldspato alcalino, ilita/sericita, caolinita, esmectitas, etc.). Na zona oxidada seu comportamento é análogo ao Fe férrico, com enriquecimentos máximos acompanhando os mais elevados teores de Fe/OHF e decrescendo com o afastamento da FR para as rochas oxidadas normais. Óxi-hidróxidos de Mn não foram observados.

Ba (bário), Rb (rubídio) e Cs (césio): São os principais elementos traço litófilos de grande raio iônico e, como tais, não apresentam maior envolvimento nos processos de FR, sendo ligados principalmente nas estruturas dos minerais potássicos hidrotermais (feldspato alcalino e ilita/sericita) estáveis nesses processos. Ba e Rb apresentam, tanto na zona reduzida, quanto na oxidada, teores algo abaixo das respectivas médias; Cs está em geral presente em teores muito baixos (<2 ppm), não se dispondo de valores médios (tabelas 4 e 5). Os três elementos apresentam comportamento geoquímico análogo, nas respectivas proporções, sendo que Ba e Rb apresentam concentrações máximas no ponto analítico 3 de maior concentração de Fe/OHF do microperfil; outras correlações com o Fe, entretanto, não se percebem.

Ca (cálcio), Mg (magnésio) e Sr (estrôncio): Esses elementos presentes em concentrações de poucas centenas de ppm, também mostram pouca participação nos processos de FR. Apresentam comportamento similar entre si e, até certo ponto, também com os elementos acima descritos (Ba, Rb e Cs), entretanto,

pela natureza global potássica do sistema estudado, sua relação com os principais minerais hidrotermais é menos aparente. Ca e Sr são controlados principalmente pelos feldspatos alcalinos hidrotermais, como impurezas, e Mg pela illita/sericita, como foi confirmado nos estudos de química mineral via microsonda eletrônica (cf.: Schorscher, 1991; Waber et al., 1992). Os três elementos também ocorrem com concentrações máximas no ponto analítico 3 de maior concentração de Fe/OHF, sem outras correlações diretas com o Fe férrico (Tabela 5).

Demais elementos analisados (Tabela 5): Entre esses há de se mencionar o *S* (*enxôfre*) cujos valores, embora semiquantitativos, proporcionam um bom controle da passagem da zona oxidada com OHF para a zona reduzida piritizada, dessa e todas as demais FR. *Ti* (*titânio*) e *Nb* (*nióbio*) apresentam-se ambos inertes nos processos de FR, inclusive com comportamentos entre si bastante discordantes, embora sejam análogos geoquímicos. Foi verificada, por estudos via microsonda eletrônica, sua ocorrência conjunta em óxidos de Ti, mas com Nb associado em proporções amplamente variáveis (Schorscher, 1991). Confirmou-se ainda, a similaridade geoquímica fundamental de alguns elementos como *Ga* (*gálio*) e *V* (*vanádio*); *Ge* (*germânio*) e *U*; *Sb* (*antimônio*) e *Cd*; *Li* (*lítio*) e *Be* (*berílio*), apesar de não terem sido encontradas bases interpretativas específicas nos estudos mineralógico-petrográficos. Principalmente Ge e Sb e em menor proporção Ga e V, mostraram também enriquecimentos na zona oxidada nos microamostras mais ricas em Fe/OHF (Tabela 5). Outros elementos, entretanto, mostraram ou comportamento pouco regular e assistemático como *Ni* (*níquel*), *Cr* (*crômio*), *Co* (*cobalto*), *Cu* (*cobre*), ou então comportamento irregular, aliado à presença em concentrações muito baixas como *W* (*volfrâmio, tungstênio*), *Se* (*selênio*), *Ta* (*tântalo*) e *Bi* (*bismuto*), não permitindo quaisquer inferências sobre os processos de FR estudados. Vários desses elementos, citados como de comportamento geoquímico geral irregular, entretanto, também apresentam enriquecimentos bastante significativos na zona oxidada, principalmente nos pontos analíticos 3,

4 e 5 do microperfil com os mais altos teores de Fe/OHF, podendo se citar como exemplos Ni, Co e W (**Tabela 5**).

Elementos Terras Raras (ETR), Sc (escândio) e Y (ítrio)

Os ETR, Sc e Y serão tratados em conjunto, sendo o Sc e o Y elementos com comportamento geoquímico análogo aos ETRL e ETRP, respectivamente. Para melhor representação e análise dos ETR em diagramas de distribuição normalizados, os pontos analíticos dos microperfis foram reagrupados de forma a representar dois perfis completos, compreendendo cada um duas rochas reduzidas e duas rochas oxidadas. Para normalização utilizou-se o padrão de manto primordial (Taylor e McLennan, 1985). Os espectros dos ETR da frente redox PDC-PH-028 são representados nas **figuras 15 e 16**. Para cada uma das microamostras representadas, foram ainda informadas, nas figuras, os teores (absolutos) de U, Th, Zr e Fe, em ppm, sendo estes os principais elementos que, em ambiente hipo e supergênico (Fe principalmente na forma férrica supergênica) apresentam propriedades cristaloquímicas similares e de isomorfia, se correlacionam e controlam o comportamento dos ETR e seus análogos Sc e Y.

Na **figura 15** são representados os perfis de ETR das microamostras 8, 5, 2 e 7 (listados na ordem decrescente dos seus teores de ETR) e, na **figura 16**, na mesma forma e ordem, as microamostras 8, 1, 4 e 6. A amostra 8, de um micronódulo de U da mineralização rica supergênica da zona reduzida da FR, foi incluída nas duas figuras pelos seus teores mais elevados de ETR (individuais e totais) e de U.

Na **figura 15** observam-se as amostras 8 e 7 da zona reduzida, respectivamente com mais altos e baixos teores totais de ETR, e as amostras 5 e 2 da zona oxidada com teores intermediários de ETR. A amostra 8 reduzida de um micronódulo de U e com os mais elevados teores de ETR e U (5500 ppm), apresenta um padrão fracionado normal, caindo quase que linear e constantemente, dos ETRL fortemente enriquecidos, do La (cerca de 1000x

enriquecido) para os ETRP, até o Lu (cerca de 30x enriquecido). Nítidos efeitos tetrádicos são marcados por leves anomalias negativas de Sm e Dy, nesta e em todas as demais amostras dessa frente. A amostra 7, também reduzida, de mais baixos teores de ETR e U (279 ppm) apresenta um padrão similar, sendo as principais diferenças a queda quase linear e mais íngreme dos teores (normalizados) de ETRL, do La ao Sm, o leve enriquecimento linear dos ETRP, de Dy ao Lu, e sua interrupção por uma anomalia positiva brusca do Yb. Esta anomalia, entretanto, é algo duvidosa, sendo um caso único em todas as amostras e, portanto, sugerindo a possibilidade de tratar-se de um problema analítico. As amostras da zona oxidada apresentam padrões muito similares entre si, distinguindo-se apenas nos perfis a queda e nitidez relacionada dos efeitos tetrádicos dos ETRL, de La ao Sm. Do Sm ao Lu, estes perfis são réplicas fiéis entre si, distinguindo-se das rochas reduzidas por uma anomalia positiva do Gd e pelo leve enriquecimento, e mais nítido efeito tetrádico dos ETRP, de Dy ao Lu. Na **figura 16** observam-se relações análogas, tanto nas amostras reduzidas quanto oxidadas, exceção feita para uma muito leve anomalia negativa do Gd na amostra 6 reduzida de mais baixos teores de ETR totais e U (342 ppm). Anomalias similares foram observadas apenas em duas outras amostras (4 e 7) da frente redox IARF tratando-se de rochas oxidadas de zonas ricas em Fe/OHF, totalmente diferentes e sem relação direta ou indireta com o caso acima, para o qual não se tem explicação, a não ser por tratar-se, possivelmente, de um erro analítico.

Analisando-se ainda, a relação dos ETR com os principais elementos geneticamente correlacionados e mais significativos das frentes redox U, Th, Zr e Fe, depreende-se, para as rochas reduzidas e as mineralizações uraníferas supergênicas em micronódulos, o controle principal e direto dos teores totais e dos padrões de ETR pelos teores de U. Já no caso das rochas oxidadas destaca-se o Zr, como diretamente correlacionado com os teores de ETR totais, Fe, U, Th podendo variar aleatoriamente; entretanto, enriquecimentos de Fe e U,

conjuntos e separados, parecem exercer um controle mais específico sobre o enriquecimento correlacionado dos ETR intermediários e/ou pesados.

Sc e Y, elementos com comportamento geoquímico análogo aos ETRL e ETRP, respectivamente, apresentam certa diferença em relação ao esperado. Para o Sc observam-se duas progressões distintas, uma para as amostras reduzidas incluindo o micronódulo de U supergênico, na seqüência dos pontos analíticos 6, 7 e 8 (com Sc de 0,9; 1,6 e 1,8 ppm) e a outra para as amostras oxidadas na seqüência dos pontos 1, 4, 2, 3 e 5 (com Sc de 1,4; 1,4; 1,5; 1,8 e 2,1 ppm), ambas acompanhando teores crescentes de ETRL (e ETR totais) mas sem correlação com U, Th, e Zr (**Tabela 5**). Já o Y cresce continuamente mais bem correlacionado com os ETR intermediários, a exemplo do Tb; também existe correlação com os ETRP, por exemplo Yb e Lu mas com algumas pequenas irregularidade (dentro dos limites dos erros analíticos) (**Tabela 5**).

Frente Redox M2b (foto 25)

Tipologia: Frente Redox Tipo 2 (simples)

Essa frente ocorre em fonolito fortemente xenolítico transicional para brecha magmática e não apresenta mineralização supergênica rica na forma de micronódulos de uraninita/pitchblenda. É caracterizada por uma zona branca milimétrica (variando de 3 até 8 mm de largura), portanto, isenta de OHF e mineralização de U, que apresenta apenas algumas piritas metaestáveis em restos corroídos de dissolução incompleta. Essa zona branca separa as rochas oxidada marrom avermelhada homogênea quanto à distribuição de OHF (sem pirita), e reduzida cinza azulada com piritas hidrotermais inalteradas e alguma mineralização supergênica pobre de U finamente disseminada (**Foto 25**).

Figura 15: Variograma dos ETR da amostra PDC-PH-028 (perfil 1) da frente redox de tipo 1, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe.

Figura 16: Variograma dos ETR da amostra PDC-PH-028 (perfil 2) da frente redox de tipo 1, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe.

Essa frente formou-se imersa na zona de saturação, como frente de baixa atividade em progressão lenta, por rebaixamento do nível, redução do volume, diminuição do Eh e aumento da acidez (H_2SO_4) nas águas do lençol freático (cf. item 4.2.2., p. 34). Na zona branca, típica de máxima concentração de ácido e lixiviação, estariam presentes essencialmente sulfatos di e trivalentes de Fe. A formação e precipitação de OHF ocorreria apenas após diluição e hidrólise dos sulfatos trivalentes de Fe, a certa distância da interface com as rochas reduzidas, definindo a largura da zona branca (de 1-2 mm a 1-2 cm) e a sua passagem para as rochas oxidadas típicas com OHF. O avanço dessa frentes foi controlado predominantemente por disequilíbrios geoquímicos; critérios estruturais e texturais foram secundários, como mostra a transposição discordante da frente redox por bordas de grãos, de fragmentos e matriz independentemente de suas porosidades e permeabilidades diferentes (**Foto 25**).

Geoquímica multielementar

Dessa frente foram analisadas um perfil de 6 microamostras (**Foto 25**), sendo as amostras 1, 2 e 7 da zona reduzida, distando, respectivamente ~5, ~0,8 e ~0,5 cm da zona branca, amostra 3, e as amostras 5 e 6 da zona oxidada, ambas quase equidistantes à ~0,3-0,5 cm da interface com a zona branca.

Os dados analíticos deste perfil são apresentados na **Tabela 6** (texto) e a **figura 17 a-d** representa gráficos binários de alguns elementos de maior relevância (em ppm) versus os pontos amostrados segundo os microp perfis. Adicionalmente foram ainda reanalisadas 4 amostras maiores, 2 da zona reduzida, 1 da zona branca e 1 da oxidada (**Anexo I, Tabela I-8**).

Figura 17: Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra M2b (frente redox de tipo 2). O pontos amostrados estão dispostos equidistantemente na abcissa, segundo a sequência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil 1, (b)- perfil 2, (c)- perfil 1 – detalhe e (d)- perfil 2 – detalhe.

Tabela 6: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox **M2b**.

Amostra ppm\Tipo	M2b-1 red	M2b-2 red	M2b-7 red	M2b-3 zo.branca	M2b-5 fr.ox	M2b-6 fr.ox
As	30.60	53.92	34.41	8.43	111.00	68.03
Ba	809.30	951.40	805.90	966.40	1845.00	996.80
Be	1.39	4.60	4.23	4.27	8.79	4.68
Bi	0.07	0.19	0.13	0.31	0.14	0.09
Ca	301.90	607.50	404.80	1553.00	263.90	376.20
Cd	4.10	3.81	3.47	0.89	4.03	3.58
Ce	230.80	92.79	59.63	265.10	104.60	109.00
Co	9.09	3.79	2.74	1.22	13.58	1.04
Cr	16.12	17.90	12.91	28.82	43.41	9.60
Cs	0.21	0.23	0.24	0.32	0.24	0.26
Cu	2.52	4.44	9.19	21.96	22.45	3.48
Dy	8.29	20.71	25.12	10.90	44.60	33.04
Er	5.30	15.14	19.84	7.85	31.60	26.55
Eu	2.35	2.69	2.96	2.99	5.48	3.63
Fe	12520.00	16260.00	8606.00	21430.00	21920.00	13940.00
Ga	33.09	30.75	49.67	37.36	26.88	71.41
Gd	8.36	7.88	8.93	14.60	14.98	11.98
Ge	1.44	1.28	1.21	2.27	2.50	1.27
Hf	10.73	22.21	28.70	4.35	17.67	31.23
Ho	1.73	5.07	6.61	2.69	11.11	8.53
La	148.60	72.12	45.06	184.70	45.40	87.43
Li	18.21	17.01	38.78	27.65	29.82	41.71
Lu	0.73	2.21	2.92	0.95	4.87	4.12
Mg	200.80	241.70	302.20	348.20	170.20	457.30
Mn	14.87	18.29	22.32	127.60	42.80	32.06
Mo	180.20	1256.00	771.60	151.70	778.90	647.60
Nb	23.00	41.84	41.58	11.79	8.26	26.57
Nd	50.25	20.33	16.60	57.42	23.25	25.56
Ni	3.41	3.49	2.79	8.21	8.77	4.22
Pb	25.26	62.68	24.11	81.62	22.42	37.37
Pd	3.05	9.28	11.72	7.41	33.07	15.22
Pr	19.80	7.29	5.45	22.18	7.16	9.31
Rb	214.70	216.40	244.10	190.80	199.60	201.40
S	39830.00	53360.00	24740.00	14970.00	19370.00	10200.00
Sb	0.56	3.05	2.06	1.20	0.86	1.19
Sc	1.10	3.84	5.37	1.47	8.01	6.32
Se	0.00	2.24	1.05	1.11	3.49	2.31
Sm	6.09	5.21	5.63	7.98	8.96	7.25
Sr	327.30	413.70	299.00	487.80	128.90	591.30
Ta	0.11	0.95	0.61	0.10	0.22	0.32
Tb	1.28	2.40	2.98	1.92	5.23	3.74
Th	33.55	74.99	92.38	48.19	122.60	128.50
Ti	2501.00	2067.00	2884.00	1529.00	3864.00	2928.00
Tm	0.77	2.25	3.28	1.10	5.06	4.29
U	41.48	182.10	240.50	60.22	405.10	265.70
V	214.20	208.50	368.70	302.90	242.60	504.00
W	5.66	8.83	9.04	111.20	5.11	7.29
Y	55.27	165.80	219.40	78.26	304.70	266.20
Yb	4.86	14.39	18.87	6.96	32.18	26.64
Zn	21.92	59.32	44.11	144.50	46.53	30.24
Zr	443.50	1148.00	1467.00	331.00	1252.00	1669.00

Essa frente, em relação a FR de tipo 1 acima discutida, é tipicamente de pobre mineralização, tanto hipo, quanto supergênica, apresentando teores dos principais elementos de interesse central dessa pesquisa U, Th, Zr, ETR, Fe, Zn, Cd, e Pd na microamostra reduzida mais afastada da FR (ponto 1), mais típica da mineralização hidrotermal, abaixo daqueles do ponto equivalente de comparação (**Tabela 6**, pto. 1 e **Tabela 5**, pto. 8). Por outro lado, seus teores de alguns elementos como As, Ba, Co, Cr, Mo, Sr e W, são, em parte, nitidamente superiores, indicando, possivelmente, certa heterogeneidade dos fluidos hidrotermais. No geral, entretanto, destacam-se nessa frente, para as zonas reduzidas e oxidadas, respectivamente, muitas características análogas aos processos já descritos da frente tipo 1 (**Tabela 6**, cf. **Tabela 5**):

U (urânio) sobe na zona reduzida com a aproximação da FR, indicando a atuação da mineralização supergênica, fraca, de tipo frente rolante, e também apresenta-se enriquecido, atingindo os valores mais altos na zona oxidada em correlação direta com os teores de Fe/OHF (**Tabela 6**, ptos. 5 e 6).

Comportamento análogo de enriquecimento na zona oxidada, relacionado aos teores de **Fe-férrico nos OHF**, é mostrado por virtualmente todos os elementos já discutidos nesse contexto da frente tipo 1, como: *As, Ba, Cd, Mn, Mo, Pd, Co, Se*, entre outros. Também confirmam-se as tendências de **inércia** face aos processos de FR e de certo **enriquecimento residual** na zona oxidada, entretanto sem correlações com Fe/OHF dos elementos *Th, Ti, Nb, Zr, Hf, Cr, Ni, V* principalmente. Nas microamostras da zona reduzida, os teores de todos os elementos são fortemente influenciados pelo efeito pepita, evidenciando muito bem a heterogeneidade textural e composicional na distribuição da mineralização hipogênica; em comparação, as amostras maiores reanalisadas desta mesma zona caracterizam-se por valores de maior constância (**Anexo I, Tabela I-8**).

A **zona branca** representa a grande particularidade desta FR e foi identificada genericamente, por mineralogia e petrografia, como uma zona de lixiviação. Os resultados geoquímicos considerando a microamostra 3 (**Tabela 6**) e a reanálise

(**Anexo I, Tabela I-8**), confirmam este resultado para alguns dos elementos de maior interesse como U, Zr, Hf, As, Cd, Mo, Pd e S; o único elemento de enriquecimento substancial (confirmado pela reanálise) é o W. Outros elementos, apresentaram resultados ambíguos, indicando até fortes enriquecimentos na microamostra que, entretanto, não foram confirmados na reanálise (ex.: Ca, Fe, Mn, Pb, e Zn). Já os ETR, Sc e Y apresentam comportamentos diferenciados, (confirmados pela reanálise) que serão discutidos à seguir, no contexto integral do microperfil.

Elementos Terras Raras (ETR), Sc (escândio) e Y (ítrio)

Os ETR das 6 microamostras foram tratados em conjunto, reagrupados em dois variogramas normalizados (manto primordial) para representar dois perfis completos através da FR. Para tanto, as microamostras dos pontos 1 e 3, respectivamente, da zona reduzida mais afastado da FR e da zona branca, foram repetidos nos dois gráficos, que também apresentam os teores de U, Th, Zr e Fe correlacionados geneticamente aos ETR (**Figuras 18 e 19**).

As duas **figuras (18 e 19)** ressaltam o comportamento similar por um lado das microamostras 1 e 3 (reduzida mais afastada da FR e da zona branca) e por outro lado das microamostras 5, 2, 6 e 7, com padrões muito diferentes. As amostras 1 e 3 têm os mais fortes enriquecimentos de ETRL, com forte queda (em padrão convexo) de La (enriquecido ~300x) a Sm (~20x). Eu continua constante no patamar do Sm; Gd mostra anomalias positivas muito fraca (amostra 1) a acentuada (amostra 3), seguindo-se quedas para patamares baixos, sem fracionamento notável, entretanto com leve efeito tetrádico (amostra 3), de Tb a Lu (enriquecidos entre ~20-10x).

Figura 18: Variograma dos ETR da amostra M2b (perfil 1) da frente redox de tipo 2, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe.

Figura 19: Variograma dos ETR da amostra M2b (perfil 2) da frente redox de tipo 2, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe.

O padrões das microamostras 5, 2, 6 e 7 são muito similares entre si (e drasticamente diferentes das amostras 1 e 3). Apresentam, tipicamente, enriquecimentos mais baixos de ETRL, com quedas (em padrão côncavo) de La (enriquecido $\sim 100x$) para Nd ($\sim 15-20x$). Sm mostra, em relação ao Nd e Eu, sempre anomalia negativa, podendo variar em relação ao Sm, de empobrecido (amostras 2 e 6) a enriquecido (amostras 7 e 5). Eu e Gd sempre apresentam expressivas anomalias, respectivamente positiva e negativa, seguindo-se fortes enriquecimentos (em padrão convexo) de Gd a Ho e daí patamares horizontais até Lu (entre si paralelos), com enriquecimentos por amostra constantes de $\sim 30x$ (amostra 2), $\sim 45x$ (amostra 7), $\sim 60x$ (amostra 6) e $\sim 70x$ (amostra 5). É notável que neste grupo muito homogêneo, as amostras 2 e 7 representam a zona reduzida próxima a interface com a zona branca e, analogamente, as amostras 5 e 6 representam a zona oxidada próxima a interface, enquanto que a zona branca (amostra 3), com padrão totalmente distinto, é similar aos hidrotermalitos reduzidos mais afastados da FR (amostra 1), e separa, na natureza, os dois subgrupos (das interfaces reduzida e oxidada). Uma interpretação possível seria que a elevada concentração de ácido na interface, representada pela zona branca, lixiviaria dessa zona os ETR ligados junto com a mineralização supergênica de U de pitchblenda/uraninita, anteriormente existente, reprecipitando-os, com padrões similares, num processo único e contínuo junto com U imediatamente à frente da interface reduzida e junto com U e OHF atrás da interface oxidada da zona branca (considerando-se como referencial de movimento o sentido do avanço geológico da FR). De fato, observa-se que todas as seis amostras têm seus teores de todos os ETR correlacionados com U, exceto Eu nas amostras 1 e 3. A amostra 1, de hidrotermalito reduzido mais distante e sem efeito da frente redox (de atividade fraca), não apresenta qualquer anomalia de Eu. A amostra 3, da zona branca, tem padrão de ETR idêntico, apenas em geral algo enriquecido, e com anomalia negativa de Eu em relação a amostra 1. A amostra 3 da zona branca representaria uma parte do hidrotermalito algo mais enriquecido em ETR desde

a mineralização hipogênica (ou mesmo do fonolito magmático original), lixiviada de mineralização supergênica de U e ETR solúveis e de parte do Eu hipogênico (divalente) por ataque supergênico oxidante de ácido sulfúrico mais concentrado. Daí, resultaria, na zona branca novamente, um hidrotermalito apenas com os teores originais hipogênicos de U e ETR insolúveis hipogênicos idêntico proporcionalmente a amostra 1, exceção feita para uma pequena parte do Eu divalente, oxidado e removido na solução ácida concentrada. A quantia do Eu, removido em solução, causaria reprecipitação nas zonas adjacentes às interfaces, tanto reduzida, quanto oxidada, das anomalias positivas observadas de Eu (oxidado trivalente) supergênicas. Observa-se também, que as amostras das interfaces da FR, 5 e 6 oxidadas e 2 e 7 reduzidas, correlacionam-se, quanto aos ETR totais e sua distribuição, todas perfeitamente com os teores de U; entretanto as amostras 2 e 7 apresentam, adicionalmente, correlação similar com Th e Zr (sem incluir o Fe), enquanto que nas amostras 5 e 6 (oxidadas) a correlação adicional análoga é restrita ao Fe (sem incluir Th e Zr). Sc e Y, análogos dos ETRL e ETRP respectivamente, deveriam mostrar comportamentos entre si diferenciados, entretanto, não é o que ocorre; ambos apresentam comportamento correlacionado com os ETRP com teores crescentes (cada qual), na seqüência das amostras 1, 3, 2, 7, 6, 5 (**Tabela 6**).

Frentes Redox SN/15 e U3c (Fotos 26 e 27)

Tipologia: Frentes Redox Tipo 3 (heterogêneas)

Essas frentes ocorrem, respectivamente, em fonolitos vulcânico fino (U3c) e subvulcânico fino/médio (tingüaito) (SN/15) microporfiríticos e fracamente microxenolíticos. Na zona reduzida são constituídas tipicamente de hidrotermalitos reduzidos normais, com mineralização supergênica de U em micronódulos e disseminada variável, em geral, pobre, conforme prevalece na mina. A frente U3c apresenta fraca mineralização supergênica de U, inclusive

micronódulos na zona reduzida da FR (**Foto 27**), o que não foi observado na FR S/N15 (**Foto 26**). Na zona oxidada essas frentes são caracterizadas e definidas pela precipitação/distribuição peculiar dos OHF, formando hidrotermalitos oxidados com alternâncias rítmicas de zonas finas milimétricas ferruginosas e menos ferruginosas a brancas isentas de OHF, podendo ocorrer pequenos cristais de pirita corroídos, metaestáveis, como restos de dissolução incompleta, em diminutas quantidades nas bandas menos ferruginosas a brancas e, também, alguma variação na espessura e concentração de OHF nas zonas ferruginosas (**Fotos 26 e 27**). Frentes desse tipo são melhor desenvolvidas em rochas de granulometria fina e muito fina, de menor porosidade e permeabilidade, dada a natureza filigrana de suas estruturas rítmicas. Quando bem formadas, como é o caso da FR U3c (**Foto 27**), fica clara, macro e microscopicamente, a analogia de suas zonas brancas rítmicas com as zonas brancas de lixiviação que ocorrem nas interfaces das FR de tipo 2 (acima descritas). Assim, as frentes de tipo 3 heterogêneas são constituídas de hidrotermalitos reduzidos normais típicos da mina com mineralização supergênica de U variável e em geral pobre nas zonas reduzidas, em contato nítido na interface da frente, sem qualquer concentração anômala de OHF e/ou outras feições notáveis, com hidrotermalitos da zona oxidada heterogêneos, apresentando alternâncias milimétricas rítmicas de zonas brancas de lixiviação por alta concentração de ácido com outras de precipitação e concentração algo variável de OHF.

Essas FR originaram-se imersas no freático com zona de saturação pouco espessa ou próximas a superfície do lençol, como frentes ativas e sensíveis à alternâncias cíclicas e rítmicas de relativamente curta duração nas condições ambientais, que retratam, mais provavelmente, efeitos de repetidas mudanças climáticas sazonais, entre condições de frentes simples dos tipos 2 e 4 e eventualmente 1 e 2 (cf. item 4.2.2., p.34). O avanço dessas frentes foi controlado por parâmetros texturais da rocha de porosidade e permeabilidade,

assim como pelas condições físico-químicas no lençol freático; fraturas exerceram pouco ou nenhum efeito (**Foto 27**).

Geoquímica multielementar

Dessas frentes foram analisados perfis de 7 (FR U3c) e 5 (FR S/N15) microamostras (**Fotos 27 e 26**), sendo os dados analíticos apresentados nas **Tabelas 7 e 8** (texto). Adicionalmente foram ainda reanalisadas 3 amostras maiores, todas da FR S/N15, 2 da zona reduzida e 1 da oxidada (**Anexo I, Tabela I-8**). Quanto à amostragem das rochas oxidadas com zoneamento rítmico, há de se destacar que mesmo as microamostras representam amostras globais, não tendo sido possível amostrar separadamente as zonas ferruginosas e brancas. A disposição das microamostras nos perfis das frentes redox são mostrados nas **Fotos 27** para a FR U3c e **26** para a FR S/N15. Para esta última, deve ser mencionado que a amostra 4 representa uma zona ferruginosa de frente redox tipo 1 fóssil e a amostra 5 a rocha oxidada homogênea, fora da zona de frente redox zonada heterogênea de tipo 3 (representando a rocha oxidada formada num estágio anterior/fóssil de FR tipo 4).

Sob aspectos geoquímicos globais as frentes U3c e S/N15, em relação às duas frentes anteriormente tratadas, apresentam-se ainda mais pobremente mineralizadas, considerando tanto as fases hipogênicas quanto supergênicas, conforme é claramente evidenciado pelos baixos teores nos principais elementos de interesse central da pesquisa U, Th, Zr, ETR, Y, Sc, Fe, Mo, Zn, Cd, e Pd, entre outros (**Tabelas 5-8, e figuras 20 a-b e 21 a-b**). Comparadas entre si a FR SN/15 é a mais pobre (**Tabelas 7 e 8**). Desta forma, predominam em ambas as frentes os controles geoquímicos globais dos hidrotermalitos respectivamente reduzidos e oxidados normais da mina, impostos pelos elementos litófilos maiores e traço comuns formadores dessas rochas desde as suas origens magmáticas ou mesmo empobrecidos por lixiviação no estágio hidrotermal.

Figura 20: Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra SN/15 (frente redox de tipo 3, heterogênea). O pontos amostrados estão dispostos equidistantemente na abcissa, segundo a seqüência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil, (b)- detalhe.

Figura 21: Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra U3c (frente redox de tipo 3, heterogênea). O pontos amostrados estão dispostos equidistantemente na abcissa, segundo a seqüência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil, (b)- detalhe.

Tabela 7: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox **S/N15**.

Amostra	SN/15-1	SN/15-2	SN/15-3	SN/15-4	SN/15-5
ppm\Tipo	red	ox-Fe	ox-Fe	ox-Fe	ox
As	15.97	12.66	5.30	7.10	2.75
Ba	539.40	522.80	428.60	430.80	471.20
Be	2.26	1.42	2.03	2.34	0.58
Bi	0.53	0.26	0.21	0.07	0.07
Ca	1293.00	333.40	74.23	225.60	82.11
Cd	1.72	1.43	1.22	1.83	0.96
Ce	73.81	77.42	66.69	88.49	52.55
Co	0.54	0.44	0.34	0.70	0.46
Cr	32.60	13.22	23.67	12.94	14.51
Cs	0.29	0.28	0.21	0.28	0.22
Cu	10.24	5.94	1.76	1.55	2.16
Dy	3.11	3.01	4.27	2.96	5.99
Er	1.79	1.92	0.72	1.77	4.37
Eu	0.80	0.66	0.75	0.72	0.75
Fe	4309.00	20430.00	18270.00	32420.00	6594.00
Ga	36.98	41.25	26.38	34.51	11.91
Gd	3.49	3.43	3.22	3.07	3.03
Ge	1.01	2.06	1.93	1.69	1.01
Hf	1.81	1.28	2.05	1.53	4.99
Ho	0.68	0.71	0.94	0.60	1.53
La	42.62	76.80	71.85	84.23	49.17
Li	35.12	35.59	17.82	23.95	13.79
Lu	0.28	0.28	0.34	0.24	0.69
Mg	360.20	199.10	54.71	122.20	57.45
Mn	28.50	27.03	12.30	19.35	15.71
Mo	10.96	22.23	22.68	0.02	12.48
Nb	15.60	14.71	19.06	13.13	18.29
Nd	11.54	12.29	9.45	14.81	8.21
Ni	41.86	22.86	16.31	7.17	14.14
Pb	23.39	37.33	38.76	33.31	15.44
Pd	1.97	2.23	3.46	0.00	4.13
Pr	5.62	5.88	4.72	7.16	3.95
Rb	229.40	239.20	203.70	230.90	203.10
S	12200.00	15480.00	19110.00	5990.00	10420.00
Sb	0.40	0.33	0.31	0.36	0.16
Sc	0.28	0.59	0.58	0.70	0.95
Se	0.77	3.24	5.22	2.67	1.03
Sm	1.23	1.13	1.10	1.50	1.32
Sr	267.30	292.10	351.20	274.30	198.90
Ta	0.15	0.05	0.12	0.11	0.06
Tb	0.50	0.53	0.64	0.50	0.68
Th	26.21	74.78	75.96	75.38	70.58
Ti	1096.00	987.20	1753.00	996.60	1125.00
Tm	0.30	0.28	0.42	0.26	0.73
U	262.60	360.20	262.80	315.80	156.40
V	194.60	226.50	147.40	153.40	40.36
W	3.84	3.64	3.57	3.16	3.16
Y	19.65	20.49	29.80	22.01	41.29
Yb	1.89	1.61	2.73	1.61	4.41
Zn	66.86	95.86	93.11	150.70	31.76
Zr	61.70	54.28	81.58	61.58	199.70

Tabela 8: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox U3c.

Amostra ppm\Tipo	U3c-1 red	U3c-2 fr. red	U3c-3 fr. red	U3c-4 fr. ox	U3c-5 fr. ox	U3c-6 fr. ox	U3c-7 ox
As	6.74	4.04	5.02	3.78	5.18	3.23	2.23
Ba	350.90	265.40	369.20	303.20	380.80	387.10	338.00
Be	4.96	3.54	3.72	3.00	5.01	3.56	1.45
Bi	1.48	0.11	0.07	0.11	0.07	0.14	0.09
Ca	431.50	378.00	68.79	524.30	316.80	24.92	414.60
Cd	10.06	5.60	2.55	2.07	2.43	9.79	5.51
Ce	95.32	74.70	51.31	60.55	70.05	82.35	93.52
Co	0.90	0.61	0.58	0.46	0.90	1.88	1.23
Cr	14.66	7.21	25.77	18.17	28.39	30.61	12.39
Cs	0.25	0.26	0.25	0.26	0.25	0.17	0.29
Cu	4.22	4.38	4.06	6.03	9.57	16.36	65.01
Dy	7.38	3.79	7.21	2.80	4.86	4.44	4.19
Er	5.64	2.91	6.32	2.45	4.05	3.58	3.65
Eu	1.16	0.62	0.73	0.52	0.79	0.85	0.95
Fe	4921.00	5615.00	8785.00	8026.00	11540.00	14230.00	12860.00
Ga	42.27	43.11	40.12	36.76	44.76	76.59	20.88
Gd	4.69	2.64	3.21	2.20	3.02	4.17	3.39
Ge	1.29	0.88	1.09	1.15	1.03	1.34	1.49
Hf	7.14	3.85	7.74	2.66	5.49	4.72	6.67
Ho	1.77	0.88	2.00	0.70	1.31	1.02	1.03
La	74.82	65.48	51.75	58.18	62.80	59.06	80.34
Li	47.83	38.25	35.31	24.73	38.31	70.52	10.58
Lu	1.04	0.56	1.08	0.36	0.74	0.64	0.67
Mg	326.00	240.60	259.10	186.10	191.70	151.00	97.00
Mn	20.88	14.46	39.08	23.49	52.02	97.30	71.78
Mo	7.89	6.00	10.79	62.90	13.65	8.65	6.54
Nb	22.51	20.34	19.29	11.28	16.84	16.99	37.45
Nd	21.48	14.48	9.00	11.10	13.10	16.91	16.90
Ni	3.22	1.95	9.91	3.70	6.81	13.16	10.01
Pb	27.70	43.20	111.90	50.11	39.99	168.20	34.70
Pd	3.55	2.13	5.27	1.37	2.77	2.36	2.53
Pr	9.90	6.70	4.53	5.03	6.15	8.36	7.76
Rb	217.50	206.50	212.40	206.60	224.30	169.10	229.50
S	19480.00	18000.00	17410.00	11900.00	9382.00	7155.00	6647.00
Sb	0.41	0.28	0.25	0.72	0.34	0.63	0.31
Sc	0.94	0.25	0.68	0.31	0.87	0.65	0.68
Se	1.14	0.54	1.34	1.06	1.31	1.90	1.09
Sm	2.88	1.51	1.27	1.06	1.51	1.96	1.81
Sr	244.80	285.00	294.40	339.10	328.60	106.50	292.60
Ta	9.34	0.06	0.02	0.03	0.12	0.05	0.47
Tb	0.98	0.53	0.76	0.39	0.62	0.75	0.65
Th	25.35	12.86	24.21	42.16	44.35	36.57	39.20
Ti	1923.00	1286.00	1448.00	602.40	1357.00	1022.00	2403.00
Tm	1.01	0.52	1.11	0.37	0.70	0.59	0.69
U	1677.00	890.50	412.80	392.00	492.80	2076.00	769.80
V	157.60	136.70	163.50	112.30	153.10	235.70	63.41
W	9.08	8.24	18.68	15.54	29.85	75.01	29.23
Y	55.44	29.80	54.74	21.69	44.90	29.99	38.97
Yb	6.30	3.28	7.59	2.44	4.84	4.14	4.05
Zn	69.73	78.40	70.91	54.59	86.69	89.47	25.80
Zr	364.40	160.90	338.70	103.00	254.70	180.10	261.80

Figura 22: Variograma dos ETR da amostra U3c da frente redox de tipo 3, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe.

Figura 23: Variograma dos ETR da amostra SN/15, da frente redox de tipo 3, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe.

Do processo supergênico, notam-se na FR U3c apenas enriquecimentos de *U* (~1700 ppm) com *Cd* (~10 ppm) associado, na amostra 1, reduzida, à cerca de 2 cm da frente (**Foto 27**) como típico efeito da mineralização supergênica de *U* (**Figura 21**). A forte variabilidade dessa mineralização de distribuição heterogênea em micronódulos é bem evidenciada pela amostra 2, a poucos cm de distância, com teores muito menores (*U* ~900 ppm e *Cd* ~6 ppm). Já na amostra 3 da interface reduzida dessa frente, notam-se os efeitos de lixiviação ácida, também notados na interface oxidada e a poucos cm na zona oxidada (amostras 4 e 5). A amostra 6 oxidada apresenta os mais elevados teores de *U* (~2080 ppm) *Fe* (~1,4 %) e *Mn* (~100 ppm), associados com *Cd* (~10 ppm) e enriquecimentos algo mais variáveis de *Ba*, *Cr*, *Cu*, *Ni*, *V*, *Zn*, *Se*, entre outros, indicando coprecipitação com OHF, aliada, eventualmente, com a dissolução incompleta de um micronódulo supergênico de *U*.

Sobre a FR S/N15, de mais fraca mineralização hidrotermal e supergênica, menos ainda pode ser comentado. Apenas os teores de *U* são claramente acima das médias dos Ph e NeS magmáticos regionais e da mina, bem como dos hidrotermalitos reduzidos e oxidados normais, entretanto, sem variações sistemáticas mais significantes no perfil da FR (**Tabelas 4 e 7 e Figura 20 a-b**). Também não se notam variações sistemáticas mais significantes na zona oxidada indicando a coprecipitação mais expressiva de outros metais nos OHF, nem sequer na amostra 4, mais rica em OHF, pelo que tudo indica por deficiência desses outros metais.

A geoquímica global das duas frentes redox de tipo 3 heterogêneas mostra sua ocorrência em hidrotermalitos de fraca mineralização hipogênica, eventualmente por fases de lixiviação hidrotermal; mostra ainda a seletividade e variabilidade até muito fraca da mineralização supergênica restrita, na zona reduzida, ao *U* associado com *Cd*. Na zona oxidada, a mineralização supergênica de *U* também é restrita, além do *Cd*, mas a outros metais mobilizados por ataque e lixiviação/dissolução ácida oxidante parcial dos

hidrotermalitos reduzidos, são oportunisticamente coprecipitados nos OHF dependendo de sua disponibilidade.

Elementos Terras Raras (ETR), Sc (escândio) e Y (ítrio)

Os ETR, Sc e Y, nas duas frentes, são baixos (U3c) e muito baixos (SN/15) quando comparados com as demais FR estudadas e entre si (**Tabelas 5-8**). Dois gráficos de espectros de ETR normalizados (manto primordial) foram representados na **figuras 22** da FR U3c e **23** da FR S/N15, cada qual com 4 microamostras.

Os 4 espectros da FR U3c (**Figura 22**) são todos entre si muito similares, caracterizados por forte fracionamento dos ETR leves (La-Sm), nítida a forte anomalia negativa de Sm e leve e sistemática crescença dos ETR intermediários a pesados, até atingir patamares de enriquecimentos máximos e constantes de Tm a Lu (de 10 a 20x PRIM). Notam-se, ainda, os teores de ETRL mais elevados e a anomalia negativa de Sm mais fraca na amostra 1 reduzida, de mais elevado teor de U (1677 ppm, de mineralização de tipo micronódulo supergênica), e os mais baixos teores de ETR intermediários e pesados, mas com claros efeitos tetrádicos, na amostra 6 oxidada, de mais elevados teores de U (2076 ppm) e OHF/ Fe-férrico (~1,4 %).

As amostras da FR S/N15 (**Figura 23**) também apresentam padrões de ETRL entre si muito similares e perfeitamente análogos às amostras da FR U3c, fortemente fracionados de La a Sm e com forte anomalia negativa do Sm. De Sm a Lu surgem duas tendências, as amostras 1, 2 e 4, reduzida e oxidadas, continuam entre si muito similares; apresentam leve enriquecimento de ETR intermediárias (Sm-Dy), seguido de decréscimo, para um patamar constante, dos ETRP (Ho-Lu), com enriquecimento de ~4x PRIM. A amostra 5, oxidada, diverge deste padrão mostrando enriquecimento de Sm-Lu como ocorre em todas as amostras da FR U3c (**Figura 22**). Comparando-se esses padrões com os teores dos elementos potencialmente correlacionados U, Yh, Zr e Fe, nota-se claramente que o controle entre os dois padrões, no intervalo incluindo os ETR

intermediários e ETRP, é exercido, no caso das duas FR, pelo Zr, abaixo de 100 ppm em todas as amostras com enriquecimento leve apenas dos ETR intermediários, e acima de 180 ppm em todas as amostras com enriquecimento contínuo dos ETR intermediários, até um patamar máximo de ETRP (**Figuras 22 e 23**).

Sc e Y mostram comportamento variável, ora mais similar aos ETRL, ora aos ETRP sem que se notou um controle ou explicações específicas em cada caso.

Frente Redox M2c (Foto 28 a)

Tipologia: Frentes Redox **Tipo 4** (simples)

Essa frente ocorre em fonolito vulcânico fino microporfirítico e fracamente microxenolítico. É constituída por hidrotermalitos normais reduzidos e oxidados separados por uma interface nítida muito bem definida sem qualquer efeito adicional de enriquecimento e/ou zoneamento de OHF ou outra heterogeneidade nova relacionada ao desenvolvimento da frentes, a não ser a mudança de cor, de cinza médio da rocha reduzida para marrom avermelhado da rocha oxidada. Na zona reduzida ocorre mineralização supergênica de U em micronódulos e disseminada pobre. A distribuição e tingimento de OHF na zona oxidada são homogêneos exceção feita a eventuais microxenolitos e fenocristais.

Essa frente formou-se imersa no freático com zona de saturação de volume expressivo, assim, capaz de atenuar as influências de eventuais variações climáticas de curta duração sobre as condições de Eh e pH do lençol; representa, portanto, um tipo de frente ativa, sob condições de equilíbrio/desequilíbrio de constância secular considerando: avanço da frente, potencial redox, acidez, rebaixamento e alimentação/recarga do freático. Essas frentes produziram as principais e mais ricas mineralizações supergênicas de U da mina.

Geoquímica multielementar e ETR

Dessa frente foram analisadas 5 microamostras cuja disposição no perfil da frentes redox é indicada na **foto 28 a**. Os dados analíticos são apresentados na **tabela 9** (texto). Adicionalmente foram ainda reanalisadas 4 amostras maiores, 2 da zona reduzida e 2 da oxidada (**Anexo I, Tabela I-8**).

Essa frente apresenta alguma mineralização supergênica de U com Cd associado, entretanto, quanto a mineralização hipogênica hidrotermal, o hidrotermalito hospedeiro é, em geral, algo mais pobre em relação às respectivas médias dos hidrotermalitos reduzidos e oxidados normais da mina, considerando-se os elementos mais típicos dos processos hidrotermais (Zr e os ETRL La, Ce, Nd, entre outros) e excetuando-se a microamostra 5 reduzida, portadora de mineralização supergênica de U.

Quanto a geoquímica dos principais elementos traço nos processos de FR, apenas pouquíssimas redistribuições sistemáticas se observam. Entre estas citam-se o caso, já destacado, do Cd de empobrecimento na zona oxidada excessão feita para a sua coprecipitação nas amostras com teor maior de OHF (**Figura 24 a-b**). Observam-se ainda depauperações também na zona oxidada de Ge, Nb, Pb, Sb, Sr e, não por último, do U, nas amostras mais afastadas da FR, assim como, certo enriquecimento do Pd (**Figura 24 a-b**). Variações dos demais elementos representam mais provavelmente heterogeneidades das próprias rochas e o efeito pepita da amostragem.

Quatro das microamostras foram representadas em espectros de distribuição dos ETR normalizados (manto primordial) na **figura 25**. Destaca-se a amostra 5, reduzida, localizada a poucos milímetros da interface da FR, pelos mais altos teores de ETRL (La-Sm) e intermediários (Sm-Dy), e decréscimos até os mais baixos teores de Tm-Lu, além de efeitos tetrádicos nítidos. Seu padrão de ETRL e intermediários é controlado pela especiação e os elevados teores destes na mineralização supergênica, junto com U e Th. A depauperação dos ETRP parece estar controlada adicionalmente pelo baixo teor de Zr. No geral o padrão

Tabela 9: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox **M2c**.

Amostra ppm\Tipo	M2c-5 red	M2c-4 fr. ox	M2c-3 fr. ox	M2c2 ox	M2c-1 ox
As	6.77	10.99	7.56	6.81	8.30
Ba	658.30	599.80	598.60	486.40	692.40
Be	3.30	2.13	2.45	1.81	3.01
Bi	0.06	0.05	0.05	0.04	0.07
Ca	430.90	86.75	396.10	117.80	399.70
Cd	7.46	1.75	5.11	1.98	2.35
Ce	738.80	189.10	165.60	138.90	131.90
Co	1.65	0.59	1.33	6.46	11.36
Cr	3.65	33.34	9.81	28.96	15.54
Cs	0.51	0.40	0.57	0.48	0.55
Cu	5.53	0.00	3.03	1.65	3.23
Dy	25.98	11.87	23.14	18.99	20.80
Er	12.96	6.56	15.06	11.78	11.75
Eu	11.48	3.87	6.35	5.17	5.41
Fe	26990.00	11900.00	19840.00	15350.00	21520.00
Ga	45.59	33.45	50.45	35.28	53.52
Gd	42.21	16.20	19.44	18.63	16.07
Ge	4.08	2.19	2.15	2.37	2.03
Hf	11.39	8.36	15.02	18.54	25.83
Ho	5.08	2.41	4.94	4.30	4.20
La	565.00	221.20	168.90	160.60	149.80
Li	68.87	60.20	106.40	72.75	99.46
Lu	1.27	0.69	1.95	1.62	1.52
Mg	350.80	280.30	445.40	331.00	543.80
Mn	46.25	50.81	49.87	26.50	73.87
Mo	157.90	163.00	231.50	80.73	187.20
Nb	39.15	15.45	16.03	7.85	19.48
Nd	183.20	51.47	56.14	41.93	46.60
Ni	1.96	0.27	1.58	2.66	7.65
Pb	58.06	21.71	17.86	17.63	21.72
Pd	9.83	9.12	11.27	16.05	9.86
Pr	75.57	20.61	19.69	16.27	17.09
Rb	216.30	188.80	223.20	189.30	260.60
S	76990.00	23030.00	11850.00	17100.00	10140.00
Sb	1.26	0.38	0.90	0.37	0.97
Sc	1.81	1.06	2.44	2.04	2.56
Se	4.20	3.31	5.56	3.96	3.27
Sm	28.57	9.76	14.08	11.71	11.66
Sr	610.50	469.70	444.60	370.20	367.80
Ta	0.57	0.05	0.17	0.12	0.28
Tb	5.96	2.29	3.88	3.10	3.33
Th	100.30	33.65	53.33	39.28	44.24
Ti	2708.00	1292.00	1448.00	1445.00	1967.00
Tm	1.58	0.91	2.24	1.73	1.74
U	1257.00	1105.00	1469.00	765.10	849.00
V	224.20	174.20	246.00	199.50	295.20
W	6.80	3.43	3.40	2.27	3.08
Y	158.70	73.89	171.10	125.10	143.60
Yb	8.52	5.01	12.78	10.54	10.58
Zn	104.70	29.41	99.69	61.42	100.10
Zr	624.30	393.30	1109.00	1013.00	1201.00

Figura 24: Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra M2c (frente redox de tipo 4). O pontos amostrados estão dispostos eqüidistantemente na abcissa, segundo a seqüência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil, (b)- detalhe.

Figura 25: Variograma dos ETR da amostra M2c da frente redox de tipo 4, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe.

de ETR desta amostra é similar às outras com mineralizações supergênica de U (por ex.: amostra 8 da FR PDC-PH-028 e amostra 1 da FR U3c), principalmente quando comparados com base na proporcionalidade das ETRL. Já os padrões de ETR das outras amostras oxidadas dessa FR se assemelham muito com os padrões de hidrotermalitos reduzidos e oxidados normais das outras frentes já descritas.

Frentes e Processos Redox da Zona Insaturada

Tipologia: Frentes Redox Tipo 5 (heterogêneas)

Essas frentes e processos redox ocorrem em qualquer tipo de hidrotermalito reduzido (de Ph, NeS e Br). São representados por hidrotermalitos normais reduzidos que passam a oxidados com estruturas irregulares e mais variáveis quanto às distribuições/tingimentos de OHF. Estes ocorrem em manchas de dimensões muito variáveis (de milimétricas a decimétricas). São caracterizadas pela ocorrência associada de OHF concentrados em agregados virtualmente puros, também de tamanhos e estruturas diferentes. Ora preenchem pequenos cubos, pseudomorfos de piritas hidrotermais pretéritas, idiomórficas, em cristais individuais esparsos, ora pseudomorfizam concreções maiores policristalinas de pirita de formas irregulares e tamanhos variáveis, milimétricos a centimétricos. Comumente ocorre ainda alguma pirita preservada em restos de oxidação incompleta. As manchas com OHF alternam-se com porções ainda preservadas de hidrotermalitos reduzidos com piritas (e outros sulfetos hidrotermais) também metaestáveis, conforme indicam sulfatos supergênicos principalmente de Fe, Al e K (por ex.: Halotrichita e Kalinita, entre outros sulfatos hidratados do grupo dos alunos) em poros e fraturas, evidenciando fortes desequilíbrios locais.

Essas frentes e processo são originados pela oxidação e substituição pseudomórfica direta das piritas pretéritas, *in situ*, por OHF indígenas, comumente com a preservação metaestável de piritas corroídas em restos de

substituição incompleta, indicando, condições predominantes de oxidação das piritas ao ar, na zona de insaturação acima do nível médio do freático. A escassez de fluídos (água do freático) temporária a permanente, neste horizonte do perfil de alteração, impediu a dissolução das piritas e decorrente exportação e redistribuição do Fe em solução com reprecipitação posterior na forma de OHF dispersos, condicionando a substituição pseudomórfica das piritas *sur place*. Entretanto, na medida da disponibilidade de fluidos, por exemplo, promovido pela umidade fixada às rochas, e/ou por inundações de curta duração da zona insaturada, formaram-se as manchas de OHF de maior ou menor tamanho, dependendo também da abundância de pirita no local. Essas frentes não foram estudadas com métodos químicos multielementares, apenas mineralógicos. As imagens de MEV das duas situações contrastantes, de OHF indígenas pseudomorfizando uma pirita idiomórfica, por oxidação *in situ*, em condições de insaturação e a mobilização, exportação e redistribuição em solução, com reprecipitação final de OHF finamente distribuídos no hidrotermalito oxidado em condições de saturação são mostradas na **foto 21**.

Frentes e Processos Redox Complexos

Variações climáticas sazonais a seculares, associadas e, eventualmente, reforçadas por processos tectônicos e geomorfológicos regionais, e principalmente, as particularidades locais da evolução estrutural e morfológica, modificaram repetidamente as condições do lençol freático, tanto de carga e recarga/nível e volume, quanto físico-químicas, durante os últimos 76 Ma, período estimado para o desenvolvimento geológico do perfil de alteração supergênica na área da mina de urânio Osamu Utsumi (Schorscher e Shea, 1992; Shea, 1992; Schorscher e Osmond, 1992). Estas variações deixaram seus registros mineralógico-petrográficos e geoquímicos em intervalos por vezes restritos, centimétricos a decimétricos, do perfil de alteração, na forma de frentes redox complexas. Trata-se, de fato, de sucessões temporais de frentes

redox de tipos distintos, desenvolvidas, ora em sucessões espaciais estreitas, ora mesmo em superposição espacial, quando a tectônica local de blocos e/ou mudanças climáticas causaram subidas mais duradouras do nível do lençol freático e a reinundação de frentes redox anteriores/fósseis, ou mesmo quando apenas as condições de temperatura, Eh e pH na zona de saturação foram alteradas. Um exemplo de frente redox complexa será brevemente descrito a seguir.

Frente Redox IARF (Foto 29)

Tipologia: Frente Redox Complexa Tipo 1 e 4

Essa frente ocorre em fonolito vulcânico fino microporfirítico e microxenolítico. Compreende dois estágios de frentes estagnadas (**tipo 1**) praticamente imóveis, por redução do potencial redox, aliado ao rebaixamento do nível do freático e OHF, caracterizados por duas zonas ferruginosas de forte enriquecimento de OHF. Uma representa a frente recente, estando em contato brusco com a rocha reduzida na interface da frente atual e em contato gradativo por decrescência de OHF com a rocha oxidada adjacente. A segunda zona ferruginosa representa uma frente **tipo 1** fóssil (dentro da zona oxidada), distando cerca de 10 cm da primeira, porém repetindo como uma réplica virtualmente as mesmas características morfológicas e mineralógicas, por exemplo, o gradiente de concentração de OHF. As duas zonas representativas de estágios de frentes estagnadas são separadas por uma zona de rocha oxidada normal com disseminação fina pobre mas homogênea de OHF (de cerca de 10 cm de largura). Esta zona representa um intervalo de tempo-espço em que a frente redox progrediu efetivamente como frente de **tipo 4**, sob condições de elevada recarga e potencial redox constantes do freático.

O avanço dessa frente complexa foi controlado predominantemente por critérios texturais (bordas de grãos, porosidade e permeabilidade), embora efeitos estruturais de microfraturas também sejam observados. O sentido

direcional da progressão da frente é bem documentado pelos gradientes de concentração dos OHF, gerados por efeitos associados de decantação e filtração dos colóides de OHF, nos períodos de estagnação das frentes.

Geoquímica multielementar e ETR

Dessa frente foram analisados 12 microamostras representativas de:

Amostra 12 – zona reduzida ~2 cm da FR **tipo 1** atual;

Amostras 8, 9, 11 – zona reduzida ~2-4 mm da interface da FR **tipo 1** atual;

Amostras 7, 10 – zona ferruginosa da FR **tipo 1** atual;

Amostra 5 – rocha oxidada normal a ~8 mm da interface da FR **tipo 1** fóssil;

Amostra 3 – rocha oxidada da interface da FR **tipo 1** fóssil;

Amostras 1, 2, 4 e 6 – várias partes da zona ferruginosa da FR **tipo 1** fóssil, e reanalisadas 7 amostras maiores, 2 reduzidas, 3 oxidadas e 2 das zona ferruginosas. Os resultados analíticos das microamostras são representados na **Tabela 10** (texto) e as reanálises no **Anexo I, Tabela I-8**. As microamostras foram agrupadas em 2 perfis analíticos que atravessam (ambas) todas as zonas da frente complexa, da rocha reduzida para a zona oxidada nas seqüências (**foto 29**):

PERFIL 1, pontos 12 $\Rightarrow$ 11 $\Rightarrow$ 10 $\Rightarrow$ 3 $\Rightarrow$ 2 $\Rightarrow$ 6 $\Rightarrow$ 1, onde

ponto 12 = rocha reduzida mais distante da FR tipo 1 atual;

ponto 11 = rocha reduzida da interface da FR tipo 1 atual;

ponto 10 = parte da zona ferruginosa limítrofe à interface da FR tipo 1 atual;

ponto 3 = rocha oxidada próxima à 2ª FR tipo 1 fóssil;

ponto 2 = parte limítrofe profunda da 2ª zona ferruginosa da FR tipo 1 fóssil, e

pontos 6 e 1 = partes limítrofes rasas da 2ª zona ferruginosa da FR tipo 1 fóssil (referindo-se as designações raso e profundo ao sentido de progressão descendente da FR).

PERFIL 2, pontos 12 $\Rightarrow$ 9 $\Rightarrow$ 7 $\Rightarrow$ 5 $\Rightarrow$ 4 $\Rightarrow$ 6 $\Rightarrow$ 1, onde

ponto 12 = rocha reduzida mais distante da FR tipo 1 atual;

ponto 9 = rocha reduzida da interface da FR tipo 1 atual;

Tabela 10: Microperfil geoquímico via ICP-MS da frente redox IARF.

Amostra ppm\Tipo	IARF-12 red	IARF-11 red	IARF-8 fr. red	IARF-9 fr. red	IARF-10 fr. ox-Fe	IARF-7 fr. ox-Fe	IARF-5 ox	IARF-3 ox	IARF-4 ox-Fe
As	6.59	22.02	8.82	5.45	8.62	10.00	6.83	17.50	25.83
Ba	739.30	623.30	1461.00	562.60	450.70	879.60	499.30	474.90	372.80
Be	5.18	5.82	15.56	4.39	3.68	12.79	5.11	5.20	7.14
Bi	0.06	0.06	0.03	0.05	0.06	0.00	0.02	0.03	0.03
Ca	842.30	77.40	453.20	424.10	1525.00	302.50	58.67	176.40	712.40
Cd	3.18	2.02	3.38	1.40	1.80	1.83	0.72	0.66	1.16
Ce	372.50	328.70	130.40	133.50	388.70	93.29	71.61	760.30	47.66
Co	7.85	21.12	6.03	8.67	40.39	9.51	3.45	0.15	1.52
Cr	16.63	31.15	14.13	26.23	60.80	78.13	82.56	10.53	10.43
Cs	0.52	0.57	0.42	0.39	0.55	0.23	0.34	0.28	0.46
Cu	3.35	8.71	7.97	2.93	17.21	3.10	7.26	0.56	14.26
Dy	34.36	15.37	14.06	7.74	20.65	10.03	5.06	39.93	4.87
Er	25.88	9.90	10.92	4.94	12.94	7.07	3.93	15.61	3.56
Eu	5.30	2.75	3.08	1.55	3.60	1.96	1.12	13.37	1.01
Fe	13230.00	33080.00	24970.00	15080.00	42510.00	47370.00	10980.00	27550.00	64500.00
Ga	44.40	51.39	101.20	39.67	25.78	78.38	33.27	32.60	49.82
Gd	20.21	12.04	8.03	6.92	19.93	5.76	4.32	61.76	3.22
Ge	1.58	2.43	1.99	1.27	3.10	2.98	1.91	4.24	3.27
Hf	12.00	9.45	24.21	5.95	0.90	16.19	8.14	5.84	7.79
Ho	8.48	3.52	3.49	1.75	4.72	2.36	1.36	6.68	1.17
La	381.30	341.30	129.60	142.50	338.20	110.40	89.30	454.00	57.15
Li	21.93	35.50	76.48	39.60	13.88	69.42	40.59	37.56	77.07
Lu	3.56	1.14	1.67	0.62	1.42	1.13	0.57	1.05	0.51
Mg	147.50	199.10	399.90	174.70	140.20	257.60	138.00	112.90	301.40
Mn	38.45	47.69	108.30	50.89	81.46	92.26	36.68	40.31	44.53
Mo	654.00	408.00	257.60	180.70	294.20	217.80	53.31	151.00	284.70
Nb	21.62	26.31	90.12	15.55	10.06	20.75	17.60	17.29	24.36
Nd	56.98	39.02	23.48	17.30	50.34	16.77	11.71	195.50	11.01
Ni	2.57	9.45	1447.00	51.63	6.98	2529.00	901.80	13.93	314.90
Pb	46.94	41.68	30.71	28.57	37.38	16.14	17.33	26.17	33.78
Pd	18.95	8.04	6.87	5.57	17.79	4.90	4.65	13.13	2.41
Pr	27.08	21.08	9.87	9.20	23.05	7.64	5.30	80.16	4.68
Rb	226.50	215.90	358.20	178.10	150.00	228.20	192.10	179.50	189.60
S	36810.00	47850.00	61940.00	35210.00	25360.00	15150.00	18350.00	6814.00	5407.00
Sb	1.95	1.64	1.84	1.24	0.62	1.44	0.39	0.71	1.21
Sc	12.19	4.42	5.16	2.14	4.63	4.19	1.62	2.92	2.36
Se	2.94	1.56	1.00	0.86	2.71	0.75	1.77	3.04	0.71
Sm	11.13	5.87	5.07	2.99	8.83	3.67	1.82	3.46	1.88
Sr	1478.00	1502.00	590.70	744.40	1592.00	507.00	482.30	423.10	319.10
Ta	0.17	0.26	0.91	0.02	0.10	0.12	0.05	0.11	2993.00
Tb	4.98	2.36	1.90	1.20	3.06	1.43	0.74	8.37	0.70
Th	124.40	54.42	70.64	30.50	93.34	108.10	30.73	55.26	31.13
Ti	1280.00	1826.00	4126.00	1113.00	1558.00	1993.00	1819.00	1549.00	2514.00
Tm	4.05	1.46	1.90	0.74	1.85	1.19	0.61	1.67	0.60
U	256.30	155.90	283.60	146.70	563.90	323.30	91.57	199.50	265.30
V	260.90	345.90	601.50	258.60	165.40	452.60	210.30	216.20	369.30
W	9.28	6.46	8.96	3.97	4.70	3.88	2.84	4.67	1.81
Y	291.60	125.30	122.10	57.05	144.80	85.22	39.38	146.30	40.29
Yb	24.43	8.44	11.30	4.20	10.31	7.49	3.83	8.43	3.33
Zn	71.91	80.95	114.00	115.40	286.10	100.80	60.62	84.48	201.30
Zr	1195.00	591.30	1222.00	320.50	51.09	823.40	296.70	201.80	294.80

Amostra ppm\Tipo	IARF-2 ox-Fe	IARF-6 ox-Fe	IARF-1 ox-Fe
As	14.14	27.15	78.24
Ba	517.00	427.10	567.50
Be	4.98	1.93	3.63
Bi	0.04	0.04	0.11
Ca	839.20	423.90	670.10
Cd	1.38	2.26	2.42
Ce	77.80	69.16	1017.00
Co	0.60	0.37	1.06
Cr	7.30	22.21	53.37
Cs	0.93	0.69	0.39
Cu	4.93	0.00	9.32
Dy	4.53	10.11	54.08
Er	3.19	6.79	21.45
Eu	1.22	2.05	19.73
Fe	77670.00	66260.00	62580.00
Ga	30.77	32.52	44.83
Gd	3.99	8.03	66.98
Ge	3.60	3.46	7.32
Hf	4.82	9.20	12.12
Ho	1.08	2.28	8.97
La	88.19	80.61	714.20
Li	22.99	58.12	45.99
Lu	0.40	0.98	1.80
Mg	213.80	218.40	210.90
Mn	55.06	54.92	117.30
Mo	327.40	263.90	325.90
Nb	21.90	16.08	17.35
Nd	12.71	20.49	293.60
Ni	12.03	9.74	65.72
Pb	35.39	33.66	52.67
Pd	2.44	7.39	14.63
Pr	6.01	8.49	116.00
Rb	197.80	162.10	203.40
S	9264.00	14060.00	5400.00
Sb	1.15	0.41	2.39
Sc	1.67	2.67	5.88
Se	5397.00	0.78	4.21
Sm	2.31	4.20	48.98
Sr	424.60	491.10	1097.00
Ta	0.11	0.15	0.33
Tb	0.73	1.59	10.88
Th	33.43	36.20	130.10
Ti	1704.00	2072.00	1128.00
Tm	0.48	0.98	2.43
U	133.30	196.30	520.10
V	180.30	211.60	178.50
W	3.93	2.13	29.93
Y	39.33	70.34	232.70
Yb	2.89	6.55	12.71
Zn	253.90	279.00	280.80
Zr	183.40	356.10	543.00

Figura 26: Gráficos binários multielementares dos microperfis da amostra IARF (frente redox complexa). O pontos amostrados estão dispostos equidistantemente na abcissa, segundo a sequência de alteração (da zona reduzida para oxidada) : (a)- perfil 1, (b)- perfil 2, (c)- perfil 1 – detalhe e (d)- perfil 2 – detalhe.

Figura 27: Variograma dos ETR da amostra IARF (perfil 1) da frente complexa, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe.

Figura 28: Variograma dos ETR da amostra IARF (perfil 2) da frente redox complexa, normalizados pelo manto primitivo (PRIM), com os respectivos teores de U, Th, Zr e Fe.

ponto 7 = parte da zona ferruginosa limítrofe à interface da FR tipo 1 atual;
 ponto 5 = rocha oxidada próximo à 2ª FR tipo 1 fóssil;
 ponto 4 = parte limítrofe profunda da 2ª zona ferruginosa da FR tipo 1 fóssil, e
 pontos 6 e 1 = partes limítrofes rasas da 2ª zona ferruginosa da FR tipo 1 fóssil.
 Os resultados de elementos traço comuns foram representados em gráficos binários autoexplicativos (**Figura 26 a-d**) e não serão discutidos aqui em maiores detalhes.

Os perfis normalizados (manto primordial) de ETR referentes aos dois perfis de microamostras são representados nas **Figuras 27 e 28**. Estes também confirmam em geral os resultados já verificados e discutidos das frentes análogas simples. Uma anomalia negativa muito forte do Sm na microamostra 3 (**Figura 28**) não foi observada desta forma em toda a população de amostras analisadas e não tem explicação. Trata-se de uma amostra de rocha oxidada normal, diferindo da amostra 1 (de padrão muito similar apenas sem a anomalia de Sm) principalmente nos teores de Fe, U, Th e Zr muito mais baixos; com as demais amostras oxidadas compara-se bem nos teores de Fe, U, Th e Zr, entretanto, é drasticamente diferente em todos os demais ETR, exceto o Sm.

CONSIDERAÇÕES GEOQUÍMICAS FINAIS DAS FRENTES REDOX

Os processos associados de FR e mineralização supergênica de U da mina Osamu Utsumi sobrepõem-se aos protolitos alcalinos hidrotermalizados, ou seja, dependem e são diretamente influenciados pelas características mineralógico-geoquímicas do somatório destes estágios evolutivos anteriores. Os Ph, NeS e Br magmáticos são ricos em álcalis e elementos traço incompatíveis, em particular litófilos, e pobres em Ca, Mg, Fe, metais base e elementos traço compatíveis. O processo hidrotermal específico da região da mina de U causou, principalmente, remoção do Na e aporte forte de K, piritização sem aporte de Fe (apenas de S/HS), e enriquecimentos

principalmente de U, Th, ETR, Sc, Y, Zr, F, Mo, Zn, em proporções variáveis, indicando fluidos heterogêneos, mas consangüíneos. Originaram-se assim, os hidrotermalitos piritizados/reduzidos com mineralizações de teor de protominérios de U ricos em Th, ETR, Zr, F, etc., e variáveis em pequena escala na mina e principalmente na escala de amostras de mão.

Os processos de frentes redox proporcionaram, em condições ambientais supergênicas, a dissolução oxidante da pirita, liberação de ácido sulfúrico e ataques variáveis, segundo a sua susceptibilidade específica a todos os minerais presentes nos hidrotermalitos piritizados. Os metais, assim disponibilizados em solução, distribuíram-se de acordo com as suas afinidades específicas entre fases reprecipitadas na zona reduzida da FR, e foram precipitados em fases específicas e/ou coprecipitados nos OHF na zona oxidada da FR, ou, ainda, foram levados embora em solução pelas águas do lençol freático e/ou superficiais.

Os estudos geoquímicos mostraram a baixa atividade dos elementos litófilos nos processos de FR. Na zona reduzida das FR foram enriquecidos por processos de tipo frente rolante, principalmente U com Cd (em greenockita) subordinadamente associado e, eventualmente outros elementos chalcófilos presentes em quantidades muito pequenas como As, Sb, Se, entre outros, eventualmente incorporados como impurezas numa segunda geração de piritas supergênicas formadas em conjunto com a mineralização supergênica de U nos micronódulos de pitchblenda/uraninita criptocristalina.

Na zona oxidada da FR ocorreram a precipitação eventual de alguns metais pesados como fases próprias supergênicas (Pb em anglesita, Ba em barita, Mo em Ilsemanita), e principalmente a coprecipitação, aparentemente pouco específica conforme disponíveis, de virtualmente todos os metais pesados nos OHF, também com variações conforme o tipo de frente redox e os teores de OHF. Ocorreram assim, com bastante frequência, concentrações altas de metais específicos, mas sem delinear correlações cristalóquímicas sistemáticas e

regulares. Como caso típico, pode ser citado o Pd, presente em teores de até 40 ppm, sem fontes evidentes.

Os ETR mostraram-se particularmente sensíveis nos processos de frentes redox, embora com variações nem sempre, e em todos os detalhes, explicáveis. As amostras/microperfis dos quatro tipos de frentes redox simples e de uma frente redox complexa, tratadas em diagramas normalizados (manto primordial) de Elementos Terras Raras (**Figuras 15, 16, 18, 19, 22, 23, 25, 27 e 28**), com o auxílio do programa Newpet (Clarke, 1994) apresentaram:

1) Para os hidrotermalitos reduzidos não enriquecidos em U (com teores de U $\leq$ 50 ppm), que ocorrem nos pontos analíticos mais afastados das frentes, perfis fortemente fracionados com rápido decréscimo dos ETR leves (ETRL), de La a Sm; evolução plana, sem anomalias de Eu, do Sm ao Gd; e decréscimo suave e contínuo das ETR pesadas (ETRP), do Gd ao Lu.

2-) Para todos os demais pontos dos perfis, quando influenciados por processos supérgenos, sejam em ambiente redutor ou oxidante, aparecem, junto com o fracionamento dos ETRL (La-Sm), efeitos tetrádicos (Masuda et al., 1987; Kawabe et al., 1991; Kawabe, 1992; Hidata et al., 1992; Akagi et al., 1993; McLennan, 1994; Bau, 1996), frequentemente associados ao desenvolvimento de anomalias positivas de Eu, e fortes enriquecimentos dos ETRP, do Gd ao Lu, relacionados com enriquecimento supérgeno (redutor e oxidante) principalmente de U mas também e em proporções variáveis de Th, Zr, e Fe-férrico nos OHF. Assim resultam padrões de ETR que embora genericamente similares, apresentam uma variabilidade maior nos detalhes. Essas variabilidades podem ter controles entre si diferentes, herdados desde as origens magmáticas (cf.: Schorscher e Shea, 1992), dos processos hidrotermais (cf.: este trabalho e Waber et al., 1992) ou gerados por detalhes específicos ainda não definidos do próprio enriquecimento supergênico ativo nos processos de frente redox ou do enriquecimento residual.

Num tratamento integrado todos os dados de ETR das FR foram representados em diagramas binários Y *versus* Y/Ho e Y/Ho *versus* Zr/Hf, segundo Bau

(1996), para verificar o seu comportamento cristaloquímico definido por íons simples (controle *charac*: charge and radius control), típico dos processos hipogênicos de alta temperatura *versus* tetrádico característico de íons complexos, típico com diversos ligantes aniônicos de sistemas aquosos supergênicos oxidantes e/ou redutores (**Figura 29 a-b**). Essas representações confirmam o comportamento tetrádico, situando-se uma grande parte dos pontos analíticos fora dos campos *charac*.

Figura 29: Diagramas binários, segundo Bau (1996), das amostras de frentes redox: $\square$ - reduzida, $\circ$ - oxidada, $\bullet$ - oxidada rica em Fe, $\triangle$ - zona branca. (a) - Y/Ho versus Zr/Hf , (b) - Y versus Y/Ho .

6. ESTUDOS ISOTÓPICOS DE $\delta^{34}\text{S}$

Estudos de isótopos estáveis representam hoje uma ferramenta muito importante na compreensão de processos de interação fluidos-rochas, uma vez que, são constituintes freqüentemente controladores destes fluidos e seus efeitos geológicos. O seu estudo, em depósitos minerais, permite a caracterização da natureza destes fluidos e de sua participação nos processos petro-metalogenéticos envolvidos.

Neste trabalho são apresentados estudos de isótopos de $\delta^{34}\text{S}$ de diferentes gerações de piritas e sulfatos relacionados às mineralizações uraníferas hipógenas hidrotermais e supérgenas da mina Osamu Utsumi, que contribuíram para a melhor compreensão da metalogênese hipo e supergênica do urânio e seu contexto sistemático de migração.

Estudos mineralógicos e petrográficos revelaram diferenças entre as associações de U e piritas nas mineralizações primárias hidrotermais e supergênicas, que permitiram a caracterização textural e separação física de piritas das diferentes gerações em concentrados puros.

Nas associações hidrotermais de U-piritas nos hidrotermalitos reduzidos (Ph, NeS e Br) foram identificadas duas formas de ocorrência: (1)-de piritas disseminada homogeneamente nas rochas ou em fragmentos das Br com teores de U (hidrotermal) de protominérios e, (2)-em fraturas nas rochas e nos cimentos e matrizes das Br com mineralizações de U fortemente enriquecidas (**Foto 7**). As piritas hidrotermais são idiomórficas e predominantemente de granulção fina (< 1mm), entretanto, alguns raros cristais podem atingir 10 a 15 mm. Nas zonas reduzidas, sob influência das frentes redox, as piritas hidrotermais se apresentam arredondadas e corroídas, devido ao início da dissolução/oxidação e conseqüente saída inicial do Fe em soluções sulfatadas.

<i>Amostra</i>	$\delta^{34}\text{S}_{\text{‰ CDT}}$	<i>Características texturais e genéticas</i>
F1 70-1C-1	+1.24	Py de fonolito hidrotermalizado muito poroso
F1 70-1C-2	+0.80	Idem
F1 70-1C-3	+1.04	Idem
F1 114-1A-1	-2.30	Py de fonolito hidrotermalizado
F1 114-1A-2	+0.36	Idem
F1 126-1A	-0.86	Idem
F4 243-1A	+0.27	Py de mineralização de U hidrotermal profunda em matriz de brecha
F4 277-1A-1	-14.77	Py em fratura (pós-brecha), associada com argilas
F4 383-1A-1	-3.61	Py em fratura (pós-brecha)
F4 383-1A-2	-4.66	Py em fratura (pós-brecha), com cobertura escura Mn?
F4 386-1A-1	+3.04	Py em fratura (pós-brecha)
F4 386-1A-1.1	-2.18	Idem
F4 386-1A-1.2	-2.38	Idem
F4 386-1A-2	+4.60	Py em fratura (pós-brecha), com cobertura escura Mn?
F4 386-1A-2.1	+0.46	Idem
F4 386-1A-3	-2.29	Idem
F4 386-1A-4	-1.89	Py em fratura (pós-brecha)
F4 394-1A-1	-2.29	Idem
F4 394-1A-2	-3.31	Py em fratura (pós-brecha), com cobertura escura Mn?
F4 397-1A-1	-0.57	Py de fragmento de fonolito pouco poroso (pré-brecha)
F4 397-1A-2	-0.68	Idem
F4 397-1A-3	-0.83	Idem
F4 397-1A-4	-0.74	Idem
F4 408-1A-1	-1.67	Py de fragmento muito anguloso de fonolito (pré-brecha)
F4 408-1A-2	-1.55	Idem
F4 414 1B-1	-1.02	Py da matriz da brecha (sin-brecha)
F4 414 1B-2	-1.15	Idem
F4 414 1B-3	-1.30	Idem
F4 414 1B-4	-0.95	Idem
F4 414 1B-5	-1.27	Idem
F4 414 1B-6	-1.13	Idem
U-4A	-0.49	Py fina, de fonolito com mineralização de Mo e avançada argilização
U-4B	-2.40	Py média de fonolito com argilização avançada
U-4D	-2.05	Py grossa de fonolito com argilização avançada (altos teores de caolinita)
U-7E	-0.54	Py fina de frente redox com mineralização de U
U-7G	-3.63	Idem
OUM-102	-3.26	Py de fonolito hidrotermalizado
SN/24-1	-8.85	Py, mistura de 2 gerações, de núcleo silicático de nódulo de U maciço
SN/24-2	-12.20	Py de zona de pitchblenda de nódulo de U maciço
SN/24-3	-13.31	Idem, mais fina
SN/24-4	-13.11	Idem, mais fina
SN/24-5	-8.13	Py da cobertura externa silicática de nódulo de U maciço
KU-3-1	-2.20	Idem
KU-3-2	-2.40	Py da zona de pitchblenda de nódulo de U maciço
KU-6-1	-3.14	Py com leve oxidação da zona de pitchblenda de nódulo de U maciço
KU-6-1.1	-12.39	Py da zona de pitchblenda de nódulo de U maciço
KU-6-1.2	-11.83	Idem
VII-1.1	-3.78	Py do núcleo silicático de nódulo de U maciço
VII-1.2	-3.81	Idem
VII-2	-5.16	Py da zona de pitchblenda de nódulo de U maciço
VII-3	-7.25	Py da cobertura externa de nódulo de U maciço
04/02	+0.53	Sulfatos recentes (placas e agulhas) incolores sobre FR com mineralização de U
M-1	+0.52	Sulfatos recentes (placas e agulhas) azuis sobre FR com mineralização de Mo
U-1A	-2.60	Sulfatos recentes, massas botrioidais amarelas em cavidades de brechas

Tabela 11: Resultados das análises isotópicas de S de piritas (Py) hidrotermais e supergênicas e de sulfatos supergênicos (em $\delta^{34}\text{S}$ relativo CDT) e caracterização paragenética e textural

Como já discutido nos itens anteriores 4 e 5, as mineralizações supergênicas de U estão restritas ao desenvolvimento das frentes redox, como disseminações

muito finas e principalmente micro e macronódulos de pitchblenda/uraninita criptocristalina. Nos micro e macronódulos, o principal mineral de U é a pitchblenda amorfa ou de baixa cristalinidade, transicionando para uraninita criptocristalina, formando concreções e agregados botrioidais (**Fotos 34 e 35**). Somente nessas mineralizações formam-se, dentro dos nódulos de pitchblenda, as piritas secundárias supergênicas que são idiomórficas e de granulação mais grossa do que as piritas primárias hidrotermais corroídas (**Foto 32**).

Cinquenta e quatro concentrados de piritas hidrotermais e de piritas e sulfatos supergênicos foram separados a partir de amostras de mão (SN/24, VII, 04/02, M1), de testemunhos de sondagens (F1, F4) e nódulos maciços de U (U1, U-4, U-7, OUM, KU-3, KU-6). Os sulfatos recentes (halotrichita e kalinita foram identificados por DRX) formavam abundantes cristais individuais ou ainda massas botrioidais cobrindo planos de fraturas e superfícies expostas. Os concentrados de piritas apresentaram uma pureza bastante elevada, em torno de 95% a 99%, entretanto, algumas impurezas, eventualmente presentes, eram representadas por minerais silicáticos, que não influenciaram os resultados isotópicos do S.

Os resultados das 54 análises isotópicas realizadas em cooperação internacional pelo Prof. Dr. A. E. Fallick nos laboratórios da Unidade de Pesquisas Isotópicas (*Isotope Research Unit*) do Scottish Universities Research and Reactor Centre-SURRC, são apresentados na **tabela 11**, juntamente com algumas observações pertinentes, sobre a tipologia das piritas e das rochas mãe, de onde foram separadas. A representação gráfica no histograma da **figura 31** mostra de uma maneira geral, que as piritas hidrotermais relacionadas às mineralizações hipogênicas de U de alta temperatura têm composições isotópicas do S próximas ao padrão meteorítico, compatíveis com origens de magmas máficos de derivação do manto superior. Seu intervalo composicional corresponde ainda àquele dos sulfetos de depósitos porfiríticos de cobre.

Figura 30 : Histograma dos resultados das análises isotópicas do S de piratas hidrotermais, supergênicas e sulfatos supergênicos em $\delta^{34}\text{S}$ relativo CDT.

As piratas secundárias dos nódulos supergênicos de U, apresentam S de composições isotópicas mais leves, sugerindo, de acordo com as evidências texturais, retrabalhamento biológico durante a redução de sulfatos originados pela dissolução oxidante das piratas hidrotermais. Este processo e a formação das piratas secundárias supergênicas ocorreu exclusivamente no interior durante o crescimento dos nódulos de pitchblenda relacionados aos processos de frentes redox. Dessa forma, as precipitações concrecionárias e nodulares de pitchblenda/uraninita criptocristalina com piratas supergênicas no seu interior, mais provavelmente, representam, como um todo, produtos da atividade biogeoquímica de colônias de bactérias redutoras de sulfatos, coprecipitando no ambiente redutor que geraram inclusive a pitchblenda/uraninita criptocristalina. Estudos de desequilíbrio de U/Th (Schorscher e Omond, 1992), revelaram que as taxas de crescimento dos nódulos de U estariam em torno de 0.02 mm/ka, podendo ser até 100 vezes mais lentas, quando comparadas às taxas de migração de frentes redox de tipo 4, mais ativas em processos de frentes rolantes (*roll fronts*). Já a coincidência do intervalo de variação da composição isotópica do S dos sulfatos supergênicos com a composição das piratas hidrotermais metaestáveis, das quais se formaram, indica que a oxidação das

piritas foi completa, na presença de oxigênio abundante e que não houve qualquer fracionamento isotópico.

7. CONCLUSÕES E DISCUSSÃO FINAL

A mina de urânio Osamu Utsumi foi estudada com métodos geológicos de campo e laboratoriais mineralógicos, petrográficos e geoquímicos globais multielementares e de química mineral, com os objetivos específicos de contribuir à:

- pesquisa fundamental do ciclo do U em sistemas naturais abertos, hidrotermal e supergênico e respectivas reações fluidos-rochas de temperaturas contrastantes, e
- pesquisa aplicada nas áreas de metalogênese do U, mineração e meio ambiente e análogos naturais.

A mineralização de U é poligenética e foi formada por processos superimpostos hipogênico-hidrotermais específicos de altas temperaturas e supergênicos intempéricos sob condições ambientais. Encontra-se hospedada em fonolitos e nefelina sienitos leucocráticos a hololeucocráticos e brechas subvulcânicas destes, na parte SE do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG, de idade mesozóica.

Os processos hidrotermais mineralizantes ocorreram de forma localizada e causaram a potassificação, argilização e piritização das rochas nefelínicas magmáticas da região da mina, transformando-as em hidrotermalitos reduzidos, junto com sua mineralização pobre em U, Th, Zr, ETR, F, Mo, Zn, Pb, Ba, removendo principalmente Na, Ca, Mg e Sr. A alteração hidrotermal mineralizante transformou os álcali-feldspatos magmáticos (ortoclásios peritíticos, sanidinas) em feldspatos potássicos (triclínicos) puros, as nefelinas em pseudomorfos de illita e caolinita e os clinopiroxênio em misturas de minerais finos, incluindo fases titaníferas semiopacas, argilominerais e pirita. A piritização generalizada, finamente disseminada ocorreu sem aporte de Fe, apenas de S/HS.

A mineralização uranífera hidrotermal é complexa e compreendeu um estágio inicial de impregnação disseminada pobre (com teores de anomalia geoquímica) e um estágio de *stockwork* superimposto, relacionado às explosões magmato-freáticas, que também formaram as brechas subvulcânicas. Composicionalmente é bastante variável, compreendendo, além de fases uranotoríferas, zircão – às vezes intercrescido com baddeleyita de precipitação intergranular/intersticial, monazita e outros minerais de ETR, esfalerita, molibdenita, jordisita e fluorita, entre outros, em proporções e associações variáveis, indicando fluidos heterogêneos. A assinatura geoquímica incluindo os ETR, entretanto, relaciona os processos hidrotermais-mineralizantes uraníferos como pós-magmáticos finais e consangüíneos ao magmatismo nefelínico. A mineralização de tipo impregnação disseminada é, em geral, pobre (anomalia geoquímica); mineralização mais rica ocorre nas matrizes e como cimentos das brechas e em fraturas da mineralização *stockwork* nos hidrotermalitos reduzidos adjacentes aos corpos de brechas. Nas brechas hidrotermais mineralizadas foram encontradas, com métodos microanalíticos (MEV-EDS e MSE), fases minerais individuais e suas misturas, incluindo sulfetos, óxidos, silicatos e molibdatos com teores de U de até ~40 % de peso. Um mineral de U, entretanto não foi definido, embora seja provável a ocorrência de uraninita criptocristalina.

Há cerca de 76 Ma cessaram os processos magmáticos na área da mina, iniciando-se o ciclo supergênico, em andamento até hoje, e responsável pela formação do perfil de intemperismo (Schoscher e Shea, 1992; Shea, 1992; Schoscher e Osmond, 1992). Os agentes desse ciclo, principalmente águas oxidantes descendentes, sob condições ambientais, promoveram a dissolução de pirita e demais sulfetos, liberação de ácido sulfúrico e ataques variáveis e específicos à todas as fases minerais dos hidrotermalitos reduzidos/piritizados pré-existentes, transformando-os em hidrotermalitos oxidados com OHF (isentos de pirita e demais sulfetos). Originaram-se assim, frentes redox típicas, separando os hidrotermalitos reduzidos dos oxidados por interfaces nítidas

muito bem definidas. As zonas de frentes redox compreendem faixas de 10-20 cm de largura dos hidrotermalitos reduzidos e oxidados adjacentes às interfaces e são os principais sítios da mineralização supergênica rica de U. Cinco tipos de frentes redox simples, além de frentes complexas, foram definidos por critérios geológicos, mineralógicos e geoquímicos, todos com atividade de tipo frentes rolantes. Essa atividade gerou a mineralização supergênica rica de U dissolvendo o U na zona oxidada, redepositando e concentrando-o progressivamente nas zonas reduzidas das frentes redox, finamente disseminado e em micro e macronódulos concrecionários de pitchblenda/uraninita criptocristalina, com estruturas botrioidais. Os macronódulos representam um caso especial de dissolução *in situ* por colapso contrativo de hidrotermalitos mineralizados, isolados na zona oxidada. Apenas no interior dos nódulos supergênicos de U ocorrem o sulfeto de Cd greenockita e uma segunda geração de piritas. As fases mineralógicas características das zonas oxidadas das frentes redox são os OHF formados por processos e principalmente em quantidades muito variáveis, dependendo do tipo de frente redox.

Estudos isotópicos do S de piritas hidrotermais e de uma segunda geração de piritas, que ocorrem exclusivamente no interior dos nódulos de pitchblenda supergênicos, além de sulfatos supergênicos, foram realizados em 54 concentrados puros obtidos por separação instrumental, com apuração final manual. Os resultados mostraram, para as primeiras, composições isotópicas do S próximas ao padrão meteorítico CDT, indicando origens de magmas máficos do manto superior; diferentemente do S das piritas incluídas em nódulos supergênicos de U, que é isotopicamente mais leve, sugerindo processos biogeoquímicos de fracionamento isotópico por bactérias redutoras de sulfato.

Os estudos geoquímicos multielementares por FRX, ICP-AES e ICP-MS mostraram que os processos de FR e mineralização supergênica de U dependem e são diretamente influenciados pelas características mineralógico-geoquímicas

da somatória dos estágios evolutivos anteriores magmático e hidrotermal dos protolitos. Estes, desde o estágio magmático, foram ricos em álcalis e elementos traço incompatíveis, em particular litófilos, e pobres em Ca, Mg, Fe, metais base e elementos traço compatíveis. O processo hidrotermal mineralizante uranífero específico da região da mina, acentuou ainda mais essas características (ver acima). Os elementos litófilos mostraram-se, nos processos de FR, de muito baixa atividade. Na zona reduzida das FR foram enriquecidos por processos de tipo frente rolante, principalmente U com Cd subordinadamente associado e, eventualmente outros elementos chalcófilos presentes em quantidades muito pequenas, como As, Sb, Se, entre outros, possivelmente incorporados como impurezas nas piritas formadas em conjunto com a mineralização supergênica de U em nódulos de pitchblenda/uraninita criptocristalina.

Na zona oxidada da FR ocorreram a precipitação eventual de alguns metais pesados como fases próprias supergênicas (Pb em anglesita, Ba em barita, Mo em Ilsemanita) e, principalmente a coprecipitação nos OHF, aparentemente pouco específica, conforme disponíveis, de virtualmente todos os metais pesados. Variações adicionais foram causadas pelo tipo de frente redox e os teores de OHF. Ocorreram assim, com bastante frequência, concentrações altas de metais específicos, entretanto, sem delinear correlações cristaloquímicas sistemáticas e regulares. Como caso típico pode ser citado o Pd presente em teores de até 40 ppm, sem fontes evidentes.

Os ETR mostraram-se particularmente sensíveis nos processos de frentes redox, embora com variações nem sempre, e em todos os detalhes explicáveis. Os dados dos microperfis de frentes redox (4 simples e 1 complexa), tratados em diagramas normalizados (manto primordial) apresentaram:

1) Para os hidrotermalitos reduzidos não enriquecidos ($U \leq 50$ ppm) mais afastados das frentes, forte fracionamento dos ETRL de La a Sm; evolução plana, sem anomalias de Eu, do Sm ao Gd; e decréscimo suave e contínuo das

ETR pesadas (ETRP), do Gd ao Lu, típicos das rochas alcalinas em geral e de Poços de Caldas em particular (Schorscher e Shea, 1992).

2-) Em todas as rochas influenciados por processos redox supérgenos, sejam de ambiente redutor ou oxidante, aparecem, junto com o fracionamento dos ETRL (La-Sm), efeitos tetrádicos frequentemente associados à anomalias positivas de Eu, e fortes enriquecimentos dos ETRP, do Gd ao Lu, relacionados com o enriquecimento supérgeno (redutor e oxidante), principalmente de U, mas também e em proporções variáveis de Th, Zr, e Fe-férrico nos OHF.

Sob aspectos de aplicação, destaca-se o comportamento geoquímico-supergênico conservador de rápida reprecipitação e/ou imóvel de U, Th, ETR, Zr e demais metais pesados, tanto em ambiente redutor quanto oxidante, sendo, no ambiente oxidante, os OHF de baixa cristalinidade as principais fases imobilizantes.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMEDALI, S.T. (ed), 1989. X-ray fluorescence analysis in the geological sciences: Advances in methodology. Geol. Assn. Canada: Short course 7.

AHRENS, L.H., 1965. Distribution of the elements in our planet. McGraw-Hill, 110pp.

AKAGI, T.; SHABANI, M.B. e MASUDA, A., 1993. Lanthanide tetrad effect in kimuraite ($\text{CaY}_2(\text{CO}_3)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$): Implication for a new geochemical index. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 2899-2905.

ALMEIDA, F.F.M. de, 1977. O Cráton do São Francisco. *Rev. Bras. Geociênc.*, 7 (4): 349-364.

ALMEIDA FILHO, R. e PARANDELLA, W.R., 1977. Estudo do Maciço de Poços de Caldas Através de imagens Landsat com ênfase em mineralizações radioativas. INPE, 11/2-TPT/065.

ARAÚJO, R.L.C., 1980. Pesquisa geotermal na chaminé alcalina de Poços de Caldas. 31st Cong. Bras. Geol., Camboriú, Anais, 2: 1059-1074.

ATENCIO, D.; COUTINHO, J.M.V.; ULBRICH, M.N.C.; VLACH, S.R.F.; RASTSVETAeva, R.K. e PUSHCHAROVSKY, D.Y., 1999. Hainite from Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. *Can. Mineral.*, v.37: 8.

ATENCIO, D.; ULBRICH, M.N.C.; COUTINHO, J.M.V.; MATIOLI, P.A., ULBRICH, H.H.G.J., 1996. Minerais raros do maciço alcalino de Poços de Caldas, Minas Gerais e São Paulo. Cong. Bras. Geol., 39. Anais. Salvador, BA, v.3: 19-21.

BAU, M., 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.123: 323-333.

BLANCHARD, R., 1968. Interpretation of leached outcrops. Nevada Bureau of Mines, Bull. 66, 196pp.

BRUNO, J.; PABLO, J. de; DURO, L. e FIGUEROLA, E., 1995. Experimental study and modeling of the U(VI)-Fe(OH)₃ surface precipitation/coprecipitation equilibria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (20): 4113-4123.

BRUNO, J.; DURO, L.; DE PABLO, J.; CASAS, I.; AYORA, C.; DELGADO, J.; GIMENO, M.J.; PENA, J.; LINKLATER, C.; DEL VILLAR, L.P. e GOMEZ, P., 1998. Estimation of the concentrations of trace metals in natural systems – The application of codissolution and coprecipitation approaches to El berrocal (Spain) and Poços de Caldas (Brazil). *Chemical Geology*, v.151:1-4.

BUSHEE, J., 1971. Potassium-argon ages of some alkaline rocks from southern Brazil. Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, CA, 145pp.

CLARKE, D., 1994. Newpet 1987-1994: programa livre para microcomputador (IBM – PC e compatíveis), para cálculos petroquímicos e representações gráficas. St. John's, Memorial University of Newfoundland, Department of Earth Sciences.

COX, K.G.; BELL, J.D. E PANKHURST, R.J., 1979. The interpretation of igneous rock. George Allan & Unwin. London, 450pp.

DE PUTTER, T.; CHARLET, J.M. E QUINIF, Y., 1999. Ree, Y and U concentration at the fluid-iron oxide interface in late cenozoic cryptodolines from Southern Belgium. *Chemical Geology*, v.153: 1-4.

DYCK, W., 1978. The mobility and concentration of uranium and its decay products in temperate surficial environments. In: *Uranium Deposits, Their Mineralogy and Origin. Short Course Handbook*, vol.3. Univ. Toronto: 57-100.

EDGHILL, R., 1991. Selective phase extraction analyses on four rock samples from the Osamu Utsumi mine site, Poços de Caldas, Brazil. Poços de Caldas Project Technical Report 90-11: 225-247.

ELLERT, R., 1959. Contribuição à geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. *Bol. Fac. Fil. Ciênc. Letras, Univ. São Paulo (Geologia 18)*, 237: 5-63.

ELLERT, R.; BJÖRNBERG, A.J.S. e COUTINHO, J.M.V., 1959. Mapa geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, Brasil. In: R. Ellert, Contribuição à Geologia do Maciço de Poços de Caldas. *Bol. Fac. Fil. Ciênc. Letras, Univ. São Paulo (Geologia 18)*, 237: 5-63.

FRAENKEL, M.O.; SANTOS, R.C.; LOUREIRO, F.E.V.L. e MUNIZ, W.S., 1985. Jazida de urânio no Planalto de Poços de Caldas-Minas Gerais. *Principais Depósitos Minerais do Brasil*, v.1, Recursos Minerais Energéticos, MMe, DNPM e CVRD, Brasília: 89-103.

FRAYHA, R., 1962. DNPM, DFPM, Bol. 116, Rio de Janeiro: 75pp.

GARDA, G.M., 1990. A Alteração hidrotermal no contexto da evolução geológica do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. Dissertação de Mestrado. IGc-USP. São Paulo: 213pp.

GARRELS, R.M. e CHRIST, C.M., 1965. Solutions, minerals and equilibria. Harper & Row, New York, 450 pp.

GOLDSCHMIDT, V.M., 1954. Geochemistry. Oxford. 562-567.

GOMES, C.B. e DUTRA, C.V., 1984. Fluorescência de raios X na geologia. Técnicas analíticas aplicadas à geologia. XXXIII Congresso Bras. Geol. : 84-120.

GORSKY, V. A. e GORSKY, E., 1974. Contribuição à mineralogia e petrografia do planalto de Poços de Caldas. Comissão Nacional de Energia Nuclear, bol. 13: 91 pp.

GUALDA, G. A.R. e VLACH, S.R.F., 1996. Eudialitas-eucolitas do maciço alcalino Poços de Caldas, MG: quimismo e correlações com comportamento óptico. Cong. Bras. Geol., 39. Anais. Salvador, BA, v.3: 34-36.

GUALDA, G.A.R. e VLACH, S.R.F., 1998. Controles na mineralogia acessória de rochas intermediárias a agpáticas do Taquari – maciço alcalino de Poços de Caldas (MG-SP). Cong. Bras. Geol., 40. Anais. Belo Horizonte, MG, p.460.

HAMZA, V.M., 1982. Terrestrial heat flow in the Alkaline Intrusive Complex of Poços de Caldas, Brazil, Tectonophysics, 83 (1-2): 45-62.

HALL, A.J., BOYCE, A.J. e FALLICK, A.E. (1987): Iron Sulphides in Metasediments: Isotopic Support for a Retrogressive Pyrrhotite to Pyrite Reaction. - Chem. Geol. (Isot. Geosci.) 65: 305-310.

HIDATA, H.; HOLLIGER, P.; SHIMIZU, H. e MASUDA, A., 1992. Lanthanide tetrad effect observed in the Oklo and ordinary uraninites and its implication for their forming processes. *Geochemical Journal*, 26: 337-346.

JANASI, A.; ANDRADE, S.; ULBRICH, H.H.G.J., 1995. A correção do *drift* instrumental em ICP-AES com espectrômetro sequencial e análise de elementos maiores, menores e traços em rochas. *Bol. IGc-Usp, série científica*, v. 26: 45-48.

KAWABE, I.; KITAHARA, Y. e NAITO, K., 1991. Non-chondritic yttrium/holmium ratio nad lanthanide tetrad effect observed in pre-Cenozoic limestones. *Geochemical Journal*, 25: 31-44.

KAWABE, I., 1992. Lanthnide tetrad effect in the Ln^{3+} ionic radii and refined spin-pairing energy theory. *Geochemical Journal*, 26: 309-315.

KAWASHITA, K.; MAHIQUES, M.M. e ULBRICH, H.H.G.J., 1984. Idades Rb/Sr de Nefelina-sienitos do Anel Norte do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. In: 33º Congr. Bras. Geol., Rio de janeiro, Resumos: 345-415.

LE MAITRE, R.W., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford, Blackwell. 193pp.

MacKENZIE, A.B.; SCOTT, R.D.; LINSALATA, P.; MIEKELEY, N.; OSMOND, J.K. e CURTIS, D.B., 1991. Natural radionuclide and stable element studies os rock samples from Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil. Poços de Caldas Report, no. 7, 185pp.

MANIAR, P.S. & PICCOLI, P.M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society American Bulletin*, 101: 635-643.

MARTIN, R.M.; DREXEL, V.; JAHSCH, H. e WEIMER, E., 1995. Neuartiges Raster – Elektronenmikroskop setzt akzente in materialwissnschaft und biologie – DSM 982 GEMINI. *Zeiss Information mit Jenaer Rundschau* 4, n.5: 14-16.

MASUDA, A.; KAWAKAMI, O.; DOHMOTO, Y. e TAKENAKA, Y., 1987. Lanthanide tetrad effect in nature: two mutually opposite types, W and M. *Geochemical Journal*, 21: 119-124.

McLENNAN, S. M., 1994. Rare earth element geochemistry and the “tetrad” effect. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58 (9): 2025-2033.

MONTES-LAUAR, C.R., 1988. Estudo paleomagnético dos maciços alcalinos de Poços de Caldas, Passa Quatro e Itatiaia. M. Sc. Thesis, Inst. Astron. e Geofis., Univ. São Paulo, 101pp.

NORDSTROM, D.K., McNUTT, R.H., PUIGDOMÈNECH, I., SMELLIE, J.A.T., WOLF, M., 1992: Ground water chemistry and geochemical modeling of water-rock interactions at the Osamu Utsumi mine and the Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. – *J. Geochem. Exploration*, 45: 249-287.

ROBINSON, B.W. e KUSAKBE, M., 1975. Quantitative Preparation of SO₂ for ³⁴S/³²S Analyses from Sulphides by Combustion with Cuprous Oxide. - *Anal. Chem.* 47:1179-1181.

ROGERS, J.J.W. e ADAMS, J.A.S., 1974. Uranium. In: *Handbook of geochemistry*. vol.II-4, cap.92-B-O, Springer-Verlag, Berlin.

SCHORSCHER, J.H.D., 1991. Mineral chemistry studies of rocks from Osamu Utsumi uranium mine, Poços de Caldas, Brazil. Poços de Caldas Report nº2. SKB Technical Report 90-11: 253-267.

SCHORSCHER, J.H.D.; GARDA, G.M.; SHEA, M.; WABER, M., 1991. Lamprophyre dykes from Osamu Utsumi uranium mine, Poços de Caldas (MG), Brazil. Intern. Symp. Mafic Dykes (3º Congr. Bras. Geoq.; 1º Cong. Geoq. Plot), São Paulo, Ed. IGc-USP. Ext. Abstr.: 116-124.

SCHORSCHER, J.H.D.; CAPOVILLA, M.M.G.M.; FALLICK, A., 1997. $\delta^{34}\text{S}$ studies of pyrites generations related to uranium mineralization at Osamu Utsumi mine, Poços de Caldas Alkaline Complex, Brazil. South-American Symposium on Isotope Geology, Extended Abstracts: 289-290.

SCHORSCHER, J.H.D.; MONTEIRO, M.M.G.; AGUILAR, A. P.; GARDA, G.M.; BOHLAND NETO, F.; SCHULZ-DODRICK, B., 1992. Contribuição ao conhecimento da ginnettita do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG. Boletim IGc-USP, 12: 105-107.

SCHORSCHER, J.H.D., MONTEIRO, M.M.G. e FALLICK, A.E., 1991. Mineralogical, geochemical and sulphur isotope studies of selected pyrite samples and pyrite generations from the Osamu Utsumi Mine Site, Poços de Caldas, Brazil. In: The Poços de Caldas Project: Natural Analogues of Processes in a Radiactive Waste Repository. SKB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management CO, Technical Report, 90-11: 177-247.

SCHORSCHER, J.H.D. e OSMOND, J.K., 1992. Origin and growth of pitchblende nodules at Osamu Utsumi Mine, Poços de Caldas, Brazil. In: N.A. Chapman, I.G. Mckinley, M.E. Shea and J.A.T. Smallie (Editors), The Poços

de Caldas Project: Natural Analogues of Processes in a Radioactive Waste Repository. *Journal of Geochem. Explor.*, 45: 159-171.

SCHORSCHER, J.H.D. e SHEA, M.E., 1992. The regional geology of the Poços de Caldas Alkaline Complex: Mineralogy and geochemistry of selected nepheline-syenites and phonolites. In: N.A. Chapman, I.G. Mckinley, M.E. Shea and J.A.T. Smallie (Editors), *The Poços de Caldas Project: Natural Analogues of Processes in a Radioactive Waste Repository. Journal of Geochem. Explor.*, 45: 25-51.

SCHUMANN, A .S., 1994. Chemische verwitterung auf alkaligesteinen und hinweise auf hydrothermale einwirkungen seit dem ausgehenden mesozoikum, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brasilien. Dissertation zur Erlangung des doktorgrades. Universität Hamburg, 190pp.

SHAND, S. J., 1943. *The Erruptive Rocks*. – 2nd ed., Wiley, New York.

SHEA, M.E., 1992. Isotopic geochemical characterization of selected nepheline syenites and phonolites from the Poços de Caldas Alkaline Complex, Minas Gerais, Brazil. *Journal of Geochem. Explor.*, 45: 173-214.

SPARK, K.M.; JOHSON, B.B. e WILLS, J.D., 1995. Characterizing heavy-metal adsorption on oxides and oxyhydroxides. *European Journal of Soil Science*, 16: 621-631.

TAYLOR, G.H., 1979. Biogeochemical cycling of mineral-forming elements. *Studies in Environmental Science* 3, vol.3. Elsevier Scient.Publ.Co., NY: 485-514.

TAYLOR , S.R. e McLENNAN, S.M., 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell ed. Oxford. 312pp.

TERTIAN, R. e CLAISSE, F., 1982. Principles of quantitative X-ray fluorescence analysis. Wiley-Heyden, New York.

TOLBERT, G.E., 1966. The uraniferous zirconium deposits of Poços de Caldas plateau, Brazil. Part II. Eng. Min. Metal., 27 (162): 353-360.

ULBRICH, M.N.C., 1983. Aspectos mineralógicos e petrológicos de nefelina sienitos de Poços de Caldas, MG-SP. Tese de doutorado. Igc-USP. 369pp.

ULBRICH, H.H.G.J., 1984. A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina-sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. Tese de Livre-Docência, Inst. Geociên., Univ. São Paulo, São Paulo, 2v, 375pp.

ULBRICH, H.H.G.J e GOMES, C.B., 1981. Alkaline rocks from continental Brazil. Earth Sci. Ver. 17: 135-154.

ULBRICH, M.N.C.; GOMES, C.B. e ULBRICH, H.H.G.J., 1984. Nefelina sienitos do Maciço de Poços de Caldas, MG-SP: Caracterização Mineralógica e Petrológica. 33º Congresso Bras. Geol. Rio de Janeiro, Anais, 9: 4362-4376.

VEIGA, M.M.; SCHORSCHER, J.H.D. e FYFE, W.S., 1991. Relationship of cooper with hydrous ferric oxides: Salobro, Carajás, PA, Brazil. In: Ore geology reviews, 6: 245-255.

WABER, N., 1990. Hydrothermal and supergene uranium evolution of the Osamu Utsumi Uranium Deposit and the Morro do Ferro Thorium-rare earth deposit (Minas Gerais, Brazil). PhD Thesis, Universitaet Bern. 233pp.

WABER, N.; SCHORSCHER, J.H.D. e PETERS, T. , 1991. Mineralogy, petrology and geochemistry of Poços de Caldas analoguee study sitres, Minas

Gerais, Brazil. I. Osamu Utsumi Mine. Poços de Caldas Report nº2. SKB Technical Report 90-11: 1-163.

WABER, N.; SCHORSCHER, J.H.D. e PETERS, T. , 1992. Hydrothermal and supergene uranium mineralization at Osamu Utsumi Mine, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. In: N.A. Chapman, I.G. Mckinley, M.E. Shea and J.A.T. Smallie (Editors), The Poços de Caldas Project: Natural Analogues of Processes in a Radioactive Waste Repository. Journal of Geochem. Explor., 45: 53-112.

WAITE, T.D.; DAVIS, J.A.; PAYNE, T.E.; WAYCHUNAS, G.A. e XU, N., 1994. Uranium (VI) adsorption to ferrihydrite: Application of surface complexation model. Geoch. Cosmochimica Acta, v.58, 24: 5465-5478.

WILLIAMS, K.L., 1987. Introduction to X-ray spectrometry. Allen e Unwin, London.

WINCHESTER, J.A. e FLOYD, P.A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and their Differentiation Products Using Immobile Elements. Chemical Geology, 20: 325-343.

WITTAKER, E.J.W. e MUNTS, R., 1970. Ionic radii for use in geochemistry. Geochim. Cosmochim. Acta 34: 945-956.

ANEXO I

TABELA I.1 - Análises por FRX (IGc-USP) de Fonolitos da borda NW da Mina de Urânio: (ph-mi) - não a fracamente hidrotermalizados e composição Média, e (ph-mi-alt) - variavel a fortemente alterados. L.D. e L.Q. - Limites de Detecção e Quantificação; ¹ - carbonatização fraca; ² - carbonatização forte e piritização; ³ - carbonatização, fluoritização e piritização fortes; ¹¹ - sericitização forte; ¹² - argilização intempérica.

Amostras Rocha	A1HT ph-mi	A4B ph-mi	A5 ph-mi	A10BH ph-mi	A10BT ph-mi	Média ph-mi	A1HH ¹ ph-mi-alt	A1M ² ph-mi-alt	A1S ³ ph-mi-alt	A6 ¹¹ ph-mi-alt	A11N ¹² ph-mi-alt
%-peso											
SiO ₂	52.52	54.08	53.26	53.75	54.94	53.71	53.37	50.43	38.84	58.43	53.71
TiO ₂	0.47	0.42	0.38	0.40	0.40	0.41	0.38	0.39	0.35	0.42	0.40
Al ₂ O ₃	19.01	20.45	18.71	19.54	19.90	19.22	19.85	17.87	12.26	24.03	20.71
Fe ₂ O ₃	3.86	4.37	4.31	5.25	5.34	4.63	4.54	5.23	6.70	1.25	3.32
MnO	0.38	0.30	0.31	0.65	0.62	0.45	0.48	1.01	2.26	0.02	0.07
MgO	0.11	0.09	0.13	0.13	0.16	0.12	0.10	0.22	0.60	0.11	0.19
CaO	4.42	1.16	1.32	1.88	1.60	2.08	1.95	5.15	19.20	0.02	0.23
Na ₂ O	6.95	7.09	7.22	4.21	4.57	6.01	4.48	3.99	2.81	0.27	2.12
K ₂ O	9.11	7.83	8.50	8.44	8.43	8.46	9.49	7.72	4.12	13.92	8.47
P ₂ O ₅	0.05	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.07	0.24	0.05	0.01
LOI/PF	2.66	3.33	1.72	3.75	3.67	3.03	1.67	4.28	9.29	2.15	4.02
total	99.54	99.12	95.86	98.01	99.64	98.43	96.33	96.35	96.67	100.67	93.25
H ₂ O-	0.38	0.66	0.10	0.65	0.61	0.48	0.14	0.62	1.21	0.41	1.49
ppm											
As											
Ba	619	97	77	631	534	392	788	828	1183	741	678
Be											
Ce	982	303	129	422	360	439	404	1419	7888	380	3169
Cl	994	1392	1115	51	0	710	419	<LD	<LD	<LD	<LD
Co	2	2	5	3	3	3	3	3	1	2	3
Cr	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cs											
Cu	11	17	6	16	20	14	23	19	41	12	2
F	12035	3254	8645	3611	2750	6059	2301	9180	60656	1121	3699
Ga	40	52	57	55	53	51	43	56	44	45	54
Hf											
La	809	350	109	427	349	409	375	1276	5067	405	12920
Nb	230	260	236	258	254	248	231	254	213	211	241
Nd	197	83	36	73	43	86	65	220	1021	123	2697
Ni	5	0	6	0	4	3	<LD	6	6	4	9
Pb	55	57	51	64	60	57	46	77	219	44	68
Rb	185	125	137	510	588	309	311	323	291	298	142
S	466	461	202	367	401	379	772	478	2050	<LD	<LD
Sc	12	7	6	9	7	8	6	14	43	4	17
Sn											
Sr	5375	1032	1147	1495	1103	2030	2142	4374	11670	541	462
Ta											
Th	102	83	43	90	90	82	68	163	254	70	25
U	0	36	39	41	34	30	22	32	14	17	69
V	86	60	62	62	64	67	86	78	94	117	56
W											
Y	109	73	65	90	76	83	82	159	566	90	1717
Zn	175	199	222	368	325	258	183	286	508	32	203
Zr	425	1695	1803	1781	1668	1474	940	1476	415	925	1775

TABELA I.1 - Continuação.

Amostras	L.D.	L.Q.
Rocha		
%-peso		
SiO2	<0,005	0.01
TiO2	0.001	0.003
Al2O3	<0,005	0.01
Fe2O3	<0,005	0.01
MnO	<0,005	0.002
MgO	<0,005	0.01
CaO	<0,005	0.01
Na2O	<0,005	0.01
K2O	<0,001	0.005
P2O5	0.001	0.002
LOI/PF		0.1
total		
H2O-		0.1
ppm		
As		
Ba	8	26
Be		
Ce	10	33
Cl	3	11
Co	1	3
Cr	2	6
Cs		
Cu	2	6
F	47	157
Ga	2	5
Hf		
La	7	22
Nb	1	3
Nd	1	4
Ni	3	11
Pb	3	10
Rb	<0,3	1
S	20	60
Sc	2	5
Sn		
Sr	1	2
Ta		
Th	3	10
U	2	8
V	2	8
W		
Y	1	3
Zn	2	7
Zr	1	4

TABELA I.2 - Análises por FRX de Fonolitos da borda NW da Mina de Urânio: (ph-mi) - não a fracamente hidrotermalizados e composição Média, e (ph-mi-alt) - variável a fortemente alterados, analisados no Laboratório de FRX do Instituto de Mineralogia Aplicada e Geoquímica da T.U. Munique, Alemanha. L.D. - Limites de Detecção; ¹ - carbonatização fraca; ² - carbonatização forte e piritização; ³ - carbonatização, fluoritização e piritização fortes; ¹¹ - sericitização forte; ¹² - argilização intempérica.

Amostra Rocha	A1HT ph-mi	A4B ph-mi	A5 ph-mi	A10BH ph-mi	A10BT ph-mi	Média ph-mi	A1HH ¹ ph-mi-alt	A1M ² ph-mi-alt	A1S ³ ph-mi-alt	A6 ¹¹ ph-mi-alt
%-peso										
SiO ₂	53.30	53.40	52.70	54.57	54.92	53.78	49.50	50.10	31.50	58.35
TiO ₂	0.38	0.42	0.39	0.37	0.37	0.39	0.49	0.40	0.34	0.40
Al ₂ O ₃	20.72	20.83	20.29	20.04	20.11	20.40	18.95	18.84	14.14	23.29
Fe ₂ O ₃	4.23	4.02	4.09	4.74	4.78	4.37	3.65	5.01	6.90	1.09
MnO	0.49	0.31	0.33	0.63	0.61	0.47	0.41	1.03	2.29	0.01
MgO	0.16	0.14	0.12	0.17	0.19	0.16	0.16	0.29	0.66	0.07
CaO	2.08	1.34	1.49	1.81	1.54	1.65	4.51	5.15	16.20	0.20
Na ₂ O	5.22	7.94	8.35	4.89	4.93	6.27	7.57	4.71	3.50	0.30
K ₂ O	10.01	8.25	9.06	7.93	7.92	8.63	9.64	8.00	4.14	13.58
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.22	0.00
LOI/PF	2.90	4.00	2.30	4.40	4.20	3.56	2.50	5.20	9.10	2.60
total	99.49	100.65	99.12	99.55	99.57	99.68	98.38	98.74	88.99	99.89
H ₂ O-										
ppm										
As	3.00	6.00	14.00	10.00	8.00	8.20	12.00	13.00	19.00	7.00
Ba	797.00	110.00	69.00	579.00	559.00	422.80	617.00	732.00	1077.00	705.00
Be										
Ce	451.00	365.00	208.00	482.00	371.00	375.40	1067.00	1430.00	6770.00	490.00
Cl	194.00	791.00	808.00	0.00	0.00	358.60	776.00	0.00	0.00	0.00
Co	0.00	4.00	4.00	0.00	3.00	2.20	5.00	0.00	0.00	2.00
Cr	30.00	6.00	7.00	16.00	19.00	15.60	12.00	9.00	7.00	13.00
Cs	14.00	0.00	12.00	181.00	93.00	60.00	15.00	48.00	224.00	11.00
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.40	0.00	0.00	0.00	2.00
F	12035.00	3254.00	8645.00	3611.00	2750.00	6059.00	2301.00	9180.00	60656.00	1121.00
Ga	38.00	48.00	49.00	45.00	47.00	45.40	37.00	44.00	30.00	39.00
Hf										
La	333.00	345.00	115.00	430.00	303.00	305.20	880.00	1456.00	6536.00	386.00
Nb	237.00	267.00	248.00	261.00	258.00	254.20	235.00	269.00	238.00	209.00
Nd	93.00	75.00	59.00	143.00	14.00	76.80	244.00	303.00	1386.00	115.00
Ni	5.00	1.00	3.00	2.00	4.00	3.00	0.00	1.00	7.00	0.00
Pb	36.00	50.00	47.00	54.00	49.00	47.20	37.00	81.00	359.00	14.00
Rb	342.00	126.00	141.00	550.00	626.00	357.00	191.00	359.00	342.00	313.00
S	300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	60.00	0.00	0.00	2000.00	0.00
Sc										
Sn	11.00	0.00	0.00	4.00	0.00	3.00	13.00	0.00	0.00	0.00
Sr	2241.00	1083.00	1202.00	1516.00	1121.00	1432.60	5637.00	4535.00	12321.00	539.00
Ta	3.00	10.00	6.00	0.00	19.00	7.60	0.00	0.00	0.00	1.00
Th	37.00	57.00	17.00	64.00	63.00	47.60	58.00	134.00	198.00	43.00
U	0.00	6.00	4.00	10.00	10.00	6.00	0.00	0.00	0.00	11.00
V	85.00	70.00	59.00	59.00	63.00	67.20	97.00	86.00	86.00	133.00
W	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	0.60	0.00	2.00	20.00	6.00
Y	45.00	40.00	32.00	53.00	45.00	43.00	84.00	109.00	457.00	80.00
Zn	251.00	260.00	295.00	470.00	421.00	339.40	220.00	367.00	635.00	38.00
Zr	1124.00	1721.00	1749.00	1728.00	1686.00	1601.60	1117.00	1809.00	1859.00	1019.00

TABELA 1.2 -Continuação.

Amostra	A11N ¹²	L.D.
Rocha	ph-mi-alt	
%-peso		
SiO ₂	55.70	0.01
TiO ₂	0.39	0.00
Al ₂ O ₃	21.35	0.02
Fe ₂ O ₃	3.22	0.01
MnO	0.08	0.00
MgO	0.18	0.01
CaO	0.36	0.01
Na ₂ O	2.82	0.02
K ₂ O	8.21	0.01
P ₂ O ₅	0.00	0.01
LOI/PF	5.70	0.00
total	98.01	
H ₂ O-		
ppm		
As	0.00	20.00
Ba	241.00	20.00
Be		
Ce	3112.00	40.00
Cl	0.00	400.00
Co	6.00	8.00
Cr	11.00	6.00
Cs	80.00	30.00
Cu	1.00	8.00
F	3699.00	8.00
Ga	53.00	4.00
Hf		
La	12225.00	30.00
Nb	282.00	4.00
Nd	3109.00	30.00
Ni	27.00	6.00
Pb	67.00	10.00
Rb	162.00	4.00
S	0.00	20.00
Sc		
Sn	11.00	30.00
Sr	488.00	4.00
Ta	0.00	8.00
Th	36.00	4.00
U	11.00	6.00
V	45.00	6.00
W	13.00	30.00
Y	1413.00	4.00
Zn	266.00	6.00
Zr	1509.00	4.00

Tabela 1.3 -Análises por ICP-AES (IGc-USP) de Fonolitos da borda NW da Mina de Urânio: (ph-mi) - não a fracamente hidrotermalizadas e composição Média, e (ph-mi-alt) - variável a fortemente alterados. L.D. e L.Q. - limites de Detecção e Quantificação; ¹ - carbonatização e piritização fracas; ² - argilização intempérica.

Amostra Rocha %-peso	A4B ph-mi	A5 ph-mi	Média ph-mi	A10BH ¹ ph-mi-alt	A11 ² ph-mi-alt	L.D.	L.Q.
SiO ₂	54.35	54.84	54.60	54.71	55.81	0.024	0.1
TiO ₂	0.40	0.37	0.39	0.39	0.41	0.0006	0.003
Al ₂ O ₃	20.50	19.99	20.25	19.78	21.18	0.0006	0.003
Fe ₂ O ₃	4.21	4.16	4.19	5.22	3.51	0.001	0.01
MnO	0.31	0.33	0.32	0.66	0.09	0.0001	0.0005
MgO	0.20	0.18	0.19	0.24	0.23	0.005	0.03
CaO	1.15	1.27	1.21	1.87	0.19	0.001	0.01
Na ₂ O	7.59	7.96	7.78	4.86	2.76	0.006	0.03
K ₂ O	7.23	7.93	7.58	7.83	8.04	0.032	0.15
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.009	0.05
LOI/PF	3.33	1.72	2.53	3.75	4.02	0.01	0.1
total	99.29	98.77	99.03	99.34	96.26		
H ₂ O-	0.66	0.10	0.38	0.65	1.49	0.01	0.1
ppm							
As							
Ba	54	30	42	542	187	10	30
Be	11	10	11	11	7		
Ce							
Cl							
Co	<15	<15		<15	<15	15	50
Cr	<15	<15		<15	<15	15	50
Cs							
Cu	<15	<15		17	<15	15	50
F							
Ga							
Hf							
La	331	105	218	376	10900	15	50
Nb							
Nd							
Ni	20	16	18	16	19	15	50
Pb							
Rb							
S							
Sc	<10	<10		<10	<10	10	30
Sn							
Sr	1019	1125	1072	1516	494	5	15
Ta							
Th							
U							
V	59	59	59	56	61	15	50
W							
Y	42	30	36	50	1359	10	30
Zn	275	310	293	514	299	10	30
Zr	1654	1674	1664	1742	1545	25	50

TABELA 1.4 - Dados litogeoquímicos comparativos de Fonolitos não-hidrotermalizados selecionados da borda NW da Mina de Urânio (ph-mi) por FRX e ICP-AES e médias (MMXRF e MMICP), assim como de fonolitos e nefelina sienitos regionais (ph-reg e ns-reg): 1-segundo Schumann (1994), 2-segundo Schorscher e Shea (1992) e respectivas médias.

Amostra	A1HT	A4B	A5	A10BH	A10BT	MMFRX	A4BICP	A5ICP	MMICP	51/13	55/15
Rocha	ph-mi	ph-mi	ph-mi	ph-mi	ph-mi	ph-mi	ph-mi	ph-mi	ph-mi	ns-reg1	ns-reg1
%-peso											
SiO ₂	53.30	53.40	52.70	54.57	54.92	53.78	54.35	54.84	54.60	51.11	51.28
TiO ₂	0.38	0.42	0.39	0.37	0.37	0.39	0.40	0.37	0.39	0.23	0.42
Al ₂ O ₃	20.72	20.83	20.29	20.04	20.11	20.40	20.50	19.99	20.25	22.01	20.19
Fe ₂ O ₃	4.23	4.02	4.09	4.74	4.78	4.37	4.21	4.16	4.19	3.08	4.22
MnO	0.49	0.31	0.33	0.63	0.61	0.47	0.31	0.33	0.32	0.22	0.26
MgO	0.16	0.14	0.12	0.17	0.19	0.16	0.20	0.18	0.19	0.03	0.23
CaO	2.08	1.34	1.49	1.81	1.54	1.65	1.15	1.27	1.21	0.98	1.59
Na ₂ O	5.22	7.94	8.35	4.89	4.93	6.27	7.59	7.96	7.78	9.11	8.16
K ₂ O	10.01	8.25	9.06	7.93	7.92	8.63	7.23	7.93	7.58	8.52	8.15
P ₂ O ₅	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0	0
LOI/PF	2.90	4.00	2.30	4.40	4.20	3.56	3.33	1.72	2.53	2.50	3.00
total	99.54	100.66	99.13	99.56	99.58	99.69	99.29	98.77	99.03	97.79	97.50
H ₂ O-							0.66	0.10	0.38	0.26	0.44
ppm											
As	3	6	14	10	8	8					
Ba	797	110	69	579	559	423	54	30	42	54	298
Be		11	10			10	11	10	11		
Ce	451	365	208	482	371	375				403	254
Cl	194	791	808			598					
Co	2	4	4	3	3	3				13	7
Cr	30	6	7	16	19	16				13	16
Cs	14	5	12	181	93	61					
Cu	11	17	6	16	2	10				0	4
F	12035	3254	8645	3611	2750	6059					
Ga	38	48	49	45	47	45				43	44
Hf											
La	333	345	115	430	303	305	331	105	218	285	191
Nb	237	267	248	261	258	254				202	180
Nd	93	75	59	143	14	77				83	48
Ni	5	1	3	2	4	3	20	16	18	0	0
Pb	36	50	47	54	49	47				35	59
Rb	342	126	141	550	626	357				183	195
S	300	461	202	367	401	346				120	200
Sc	12	7	6	9	7	8					
Sn	11	1	1	4	1	4					
Sr	2241	1083	1202	1516	1121	1433	1019	1125	1072	532	1471
Ta	3	10	6	1	19	8					
Th	37	57	17	64	63	48				24	28
U	1	6	4	10	10	6				11	0
V	85	70	59	59	63	67	59	59	59	50	62
W	1	1	1	3	1	1					
Y	45	40	32	53	45	43	42	30	36	41	38
Zn	251	260	295	470	421	339	275	310	293	150	262
Zr	1124	1721	1749	1728	1686	1602	1654	1674	1664	754	1294

TABELA I.4 - Continuação.

Amostra	56/16	61/18	61b/20	66/22	99/33	MedNS1	44/8 ph	44a/9 ph	70a/24	71a/25
Rocha	ns-reg1	ns-reg1	ns-reg1	ns-reg1	ns-reg1	ns-reg1	ph-reg1	ph-reg1	ph-reg1	ph-reg1
%-peso										
SiO2	51.72	51.24	52.55	53.16	52.63	51.96	51.06	52.12	52.12	53.31
TiO2	0.44	0.38	0.33	0.41	0.38	0.37	0.51	0.52	0.57	0.51
Al2O3	20.14	22.32	21.63	18.81	20.38	20.78	19.94	19.63	20.16	21.03
Fe2O3	3.87	2.43	2.51	5.83	4.34	3.75	4.21	4.43	4.27	4.07
MnO	0.23	0.13	0.14	0.21	0.3	0.21	0.21	0.22	0.22	0.19
MgO	0.25	0.15	0	0.25	0.2	0.16	0.08	0.25	0.3	0.17
CaO	1.63	0.91	0.96	1.92	1.4	1.34	1.84	1.93	1.8	1.92
Na2O	8.76	6.9	7.3	7.25	8.28	7.97	11.42	10.2	7.8	8.42
K2O	8.29	11.07	10.52	7.99	7.55	8.87	8.3	8.61	8.48	8.52
P2O5	0	0	0	0	0	0.00	0.03	0	0.03	0.03
LOI/PF	2.43	1.83	2.91	1.6	1.27	2.22	1.55	1.19	2.49	1.09
total	97.76	97.36	98.85	97.43	96.73	97.63	99.15	99.10	98.24	99.26
H2O-	0.23	0.41	0.35	0.32	1.34	0.48	0.19	0.13	0.6	0.18
ppm										
As										
Ba	251	67	88	134	127	146	436	428	420	451
Be										
Ce	291	161	191	1081	309	384	337	372	337	337
Cl										
Co	14	7	3	19	28	13	1	21	13	15
Cr	21	15	20	21	18	18	9	10	23	12
Cs										
Cu	1	2	10	0	0	2	12	4	4	0
F										
Ga	42	39	33	45	44	41	38	42	31	33
Hf										
La	221	82	110	750	227	267	185	198	173	146
Nb	192	214	146	275	202	202	160	176	177	146
Nd	74	31	39	168	62	72	77	85	74	99
Ni	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
Pb	57	63	38	11	66	47	46	33	43	31
Rb	202	526	275	120	197	243	167	190	175	172
S	360	1001	1762	0	120	509	280	481	320	280
Sc										
Sn										
Sr	1384	295	542	1674	1324	1032	1989	2128	2077	2115
Ta										
Th	38	16	31	79	48	38	4	25	19	11
U	1	47	0	8	0	10	0	0	0	0
V	43	43	16	111	64	56	76	58	69	85
W										
Y	43	29	27	226	14	60	37	48	53	34
Zn	213	74	72	119	265	165	164	180	163	112
Zr	1284	1337	722	781	1659	1119	918	1005	905	746

TABELA I.4 - Continuação.

Amostra	77a/27	74/28	84a/30	126a/38	127a/39	1271/40	MedFon1	NS-1	NS-4	NS-6
Rocha	ph-reg1	ph-reg1	ph-reg1	ph-reg1	ph-reg1	ph-reg1	ph-reg1	ns-reg2	ns-reg2	ns-reg2
%-peso										
SiO2	53.11	52.4	53.91	51.55	53.02	52.76	52.54	54.78	54.83	54.52
TiO2	0.52	0.55	0.52	0.51	0.5	0.52	0.52	0.79	0.87	0.91
Al2O3	20.25	19.93	20.9	20.58	21.37	20.76	20.46	19.93	20.2	20.17
Fe2O3	4.18	4.65	3.74	4.23	4.3	3.69	4.18	4.43	4.34	4.35
MnO	0.21	0.24	0.23	0.21	0.21	0.24	0.22	0.28	0.25	0.27
MgO	0.2	0.19	0.35	0.52	0.24	0.31	0.26	0.44	0.51	0.52
CaO	1.81	1.93	1.59	2.18	2.08	1.65	1.87	1.99	1.99	1.9
Na2O	8.14	8.06	8.21	7.76	5.19	8.94	8.41	6.48	6.48	5.66
K2O	8.23	8.12	8.28	8.8	8.57	8.03	8.39	8.26	8.23	7.95
P2O5	0	0	0.03	0.07	0.05	0.03	0.03	0.12	0.13	0.14
LOI/PF	1.68	1.29	0.97	1.36	2.77	0.54	1.49	1.23	1.88	3.46
total	98.33	97.36	98.73	97.77	98.30	97.47	98.37	98.73	99.71	99.85
H2O-	0.31	0.29	0.16	0.2	0.35	0.21	0.26			
ppm										
As										
Ba	420	392	54	378	412	47	344	261	479	502
Be										
Ce	327	813	388	293	325	415	394	422	357	335
Cl										
Co	25	3	19	0	11	11	12	7	11	8
Cr	10	18	9	23	24	14	15	<1d	<1d	<1d
Cs										
Cu	4	0	5	8	11	7	6	<1d	<1d	<1d
F								2670	1766	1216
Ga	34	33	40	39	30	36	36			
Hf								<1d	<1d	<1d
La	190	234	228	189	198	240	198	320	265	245
Nb	165	206	224	156	167	231	181	287	239	260
Nd	71	91	99	86	73	127	88	125	110	93
Ni	0	0	1	0	5	3	1	<1d	<1d	<1d
Pb	34	43	49	49	55	33	42	8	6	12
Rb	170	175	171	217	204	168	181	148	146	138
S	120	200	200	921	1722	280	481	987	764	878
Sc								<1d	<1d	<1d
Sn										
Sr	2090	2091	1391	2116	1988	1306	1929	2019	2709	2750
Ta										
Th	3	32	13	46	19	3	18	14	9	17
U	0	0	0	0	0	0	0	<1d	<1d	<1d
V	64	74	63	62	85	76	71	69	72	51
W										
Y	35	44	44	30	41	52	42	53	44	44
Zn	160	193	182	166	170	184	167	181	165	180
Zr	885	1120	893	944	542	954	891	1112	932	1156

TABELA 1.4 - Continuação.

Amostra Rocha	NS-7 ns-reg2	MedNS2 ns-reg2	ph02a ph-reg2	ph-02b ph-reg2	ph-03 ph-reg2	ph-05 ph-reg2	ph-08 ph-reg2	ph-09b ph-reg2	MedFon2 ph-reg2	MedNSR ns-reg
%-peso										
SiO2	52.58	54.18	53.13	54.96	55.61	53.21	53.92	53.8	54.11	52.76
TiO2	0.7	0.82	0.51	0.56	0.58	0.55	0.59	0.57	0.56	0.53
Al2O3	19.66	19.99	19.84	20.21	20.63	19.75	19.83	19.78	20.01	20.49
Fe2O3	3.77	4.22	4.09	4.25	3.88	3.72	3.81	3.78	3.92	3.92
MnO	0.26	0.27	0.21	0.26	0.24	0.24	0.24	0.25	0.24	0.23
MgO	0.27	0.44	0.19	0.24	0.31	0.21	0.24	0.22	0.24	0.26
CaO	1.46	1.84	1.78	1.82	1.57	1.52	1.58	1.57	1.64	1.52
Na2O	7.6	6.56	7.77	6.95	6.87	8	7.3	7.4	7.38	7.45
K2O	7.73	8.04	8.54	8.43	8.41	7.94	8.53	8.4	8.38	8.57
P2O5	0.08	0.12	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04
LOI/PF	3.17	2.44	1.06	1.89	1.36	1.82	0.96	1.2	1.38	2.30
total	97.28	98.89	97.18	99.63	99.52	97.02	97.06	97.03	97.91	98.09
H2O-										0.48
ppm										
As										
Ba	339	395	371	217	44	45	60	50	131	236
Be										
Ce	341	364	275	266	355	369	400	391	343	377
Cl										
Co	6	8	9	9	7	8	13	9	9	11
Cr	<1d		<1d	9	<1d	<1d	<1d	<1d	9	18
Cs										
Cu	<1d		<1d	<1d	<1d	<1d	<1d	<1d		2
F	1335	1747	2199	na	1578	1490	1703	1472	1688	1747
Ga										41
Hf	<1d		<1d	<1d	<1d	<1d	1	<1d	1	
La	245	269	235	172	257	266	310	284	254	267
Nb	290	269	185	195	251	262	267	262	237	226
Nd	86	104	53	77	99	99	108	93	88	84
Ni	<1d		<1d	3	<1d	<1d	<1d	<1d	3	0
Pb	12	10	3	23	<1d	4	2	1	7	33
Rb	147	145	173	175	143	147	165	161	161	207
S	545	794	1689	1496	1288	630	782	651	1089	613
Sc	<1d		<1d	<1d	<1d	<1d	<1d	<1d		
Sn										
Sr	2096	2394	1944	1974	1252	1265	1607	1559	1600	1527
Ta										
Th	22	16	6	30	1	7	6	4	9	30
U	<1d		<1d	6	<1d	<1d	<1d	<1d	6	10
V	40	58	72	71	63	61	78	84	72	56
W										
Y	52	48	27	39	37	42	44	39	38	56
Zn	201	182	140	195	162	169	165	164	166	171
Zr	1208	1102	827	1004	931	891	859	858	895	1113

TABELA I.4 - Continuação.

Amostra	MedPhR	MedAlcR
Rocha	ph-reg	alc-reg
%-peso		
SiO ₂	53.12	52.98
TiO ₂	0.54	0.54
Al ₂ O ₃	20.29	20.37
Fe ₂ O ₃	4.08	4.02
MnO	0.23	0.23
MgO	0.25	0.25
CaO	1.79	1.68
Na ₂ O	8.03	7.79
K ₂ O	8.39	8.46
P ₂ O ₅	0.04	0.04
LOI/PF	1.45	1.80
total	98.20	98.15
H ₂ O-	0.26	0.35
ppm		
As		
Ba	264	253
Be		
Ce	375	376
Cl		
Co	11	11
Cr	15	16
Cs		
Cu	6	4
F	1688	1714
Ga	36	38
Hf	1	1
La	219	239
Nb	202	212
Nd	88	86
Ni	1	1
Pb	30	31
Rb	173	187
S	709	670
Sc		
Sn		
Sr	1806	1692
Ta		
Th	14	21
U	1	4
V	71	65
W		
Y	40	47
Zn	167	169
Zr	893	982

TABELA 1.5 - Índice de alcalinidade/agaipacidade de Fonolitos não-hidrotermalizados selecionados da borda NW da Mina de Urânio (ph-mi) por FRX e ICP-AES e médias (MMXRF e MMICP), assim como de fonolitos e nefelina sienitos regionais (ph-reg e ns-reg): 1-segundo Schumann (1994), 2-segundo Schorscher e Shea (1992) e respectivas médias.

Amostra	Rocha	ACNK	ANK	Fe2O3	FeO	(Na2O+K2O)/ Al2O3 (molar)
126a/38ph	ph-reg1	0.78	0.92	2.20	1.98	1.08
1271/40ph	ph-reg1	0.79	0.89	1.91	1.72	1.13
127a/39ph	ph-reg1	0.99	1.20	2.26	2.03	0.83
44/8 ph	ph-reg1	0.64	0.72	2.16	1.94	1.39
44a/9ph	ph-reg1	0.66	0.75	2.27	2.04	1.33
51/13ns	ns-reg1	0.85	0.91	1.62	1.46	1.10
55/15ns	ns-reg1	0.80	0.91	2.24	2.01	1.10
56/16ns	ns-reg1	0.76	0.86	2.03	1.83	1.16
61/18ns	ns-reg1	0.89	0.96	1.27	1.15	1.05
61b/20ns	ns-reg1	0.86	0.92	1.31	1.18	1.08
66/22 ns	ns-reg1	0.78	0.91	3.05	2.75	1.09
70a/24ph	ph-reg1	0.80	0.92	2.23	2.01	1.09
71a/25ph	ph-reg1	0.79	0.91	2.08	1.87	1.10
74/28ph	ph-reg1	0.78	0.90	2.43	2.18	1.11
77a/27ph	ph-reg1	0.79	0.91	2.17	1.96	1.10
84a/30ph	ph-reg1	0.82	0.93	1.92	1.72	1.07
99/33ns	ns-reg1	0.84	0.94	2.28	2.05	1.07
A10BH	ph-mi	1.01	1.21	2.50	2.25	0.83
A10BT	ph-mi	1.03	1.21	2.51	2.26	0.83
A1HT	ph-mi	0.89	1.07	2.19	1.97	0.94
A4B	ph-mi	0.85	0.95	2.08	1.87	1.06
A4BICP	ph-mi	0.91	1.01	2.20	1.98	0.99
A5	ph-mi	0.77	0.86	2.12	1.90	1.16
A5ICP	ph-mi	0.83	0.92	2.15	1.93	1.08
MedAlc	alc-reg	0.81	0.93	2.09	1.88	1.08
MedFon1	ph-reg1	0.78	0.89	2.16	1.94	1.12
MedFon2	ph-reg2	0.83	0.94	2.04	1.83	1.06
MedNS1ns	ns-reg1	0.83	0.92	1.97	1.77	1.09
MedNS2	ns-reg2	0.88	1.03	2.19	1.97	0.98
MMedFon	ph-mi	0.79	0.91	2.11	1.90	1.10
MMICP	ph-mi	0.87	0.96	2.17	1.96	1.04
MMXRF	ph-mi	0.90	1.04	2.28	2.05	0.96
NS2-1	ns-reg2	0.86	1.02	2.28	2.05	0.98
NS2-4	ns-reg2	0.87	1.03	2.22	2.00	0.97
NS2-6	ns-reg2	0.94	1.12	2.26	2.03	0.89
NS2-7	ns-reg2	0.84	0.94	2.01	1.81	1.06
ph2-02a	ph-reg2	0.79	0.90	2.13	1.92	1.11
ph2-02b	ph-reg2	0.85	0.98	2.18	1.96	1.02
ph2-03	ph-reg2	0.89	1.01	1.98	1.78	0.99
ph2-05	ph-reg2	0.81	0.91	1.96	1.76	1.10
ph2-08	ph-reg2	0.82	0.93	1.99	1.79	1.07
ph2-09b	ph-reg2	0.82	0.93	1.98	1.78	1.08

Tabela I.6 A: Análises por FRX de rochas reduzidas (hidrotermalitos reduzidos) com pirita da mina de U Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas (Projeto Internacional Poços de Caldas; dados extraídos de Waber et al., 1991; 1992).

Amostra	39-1A	41-1A	68-1A	68-1AA	68-1AB	68-1AC	69-1B	71-1A	71-1B	74-1A
Furo	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1
Litotipo	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.
<hr/>										
% - peso										
SiO ₂	56.77	58.28	54.10	55.22	55.50	54.13	55.68	57.19	58.23	53.59
TiO ₂	0.36	0.17	0.52	0.50	0.52	0.52	0.46	0.24	0.24	0.32
Al ₂ O ₃	24.70	22.88	21.46	22.64	22.14	21.77	22.29	24.11	21.54	19.41
Fe ₂ O ₃ tot	0.92	0.88	4.07	3.81	3.76	3.72	3.65	0.80	1.73	4.48
MnO	0.10	0.01	0.01	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.02
MgO	0.03	0.02	0.11	0.09	0.12	0.10	0.10	0.06	0.03	0.23
CaO	0.10	0.10	0.10	0.10	0.01	0.10	0.10	0.10	0.10	0.57
Na ₂ O	0.28	1.00	1.31	0.24	0.25	0.18	0.20	0.16	0.42	0.35
K ₂ O	11.99	14.20	12.96	13.20	13.28	13.06	13.44	13.07	13.25	12.35
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02
LOI/PF	4.10	2.44	4.84	3.99	3.94	4.29	3.79	3.68	3.14	4.44
CO ₂										
Total	99.40	100.03	99.53	99.94	99.67	98.02	99.86	99.56	98.83	95.78
ppm										
As			10.00							
Ba	418.00	553.00	383.00	310.00	298.00	315.00	345.00	457.00	417.00	533.00
Ce	746.00	468.00	188.00	178.00	157.00	111.00	182.00	221.00	479.00	6272.00
Co	7.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cu	1.00	4.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	4.00	6.00
Cr	1.00	1.00	14.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	46.00
F				1091.00	1220.00	883.00	953.00	1003.00		
Ga	29.00	34.00	47.00						39.00	45.00
Hf				15.00	7.00	2.00	6.00	0.00		
La	1128.00	556.00	213.00	233.00	229.00	208.00	260.00	291.00	337.00	6843.00
Nb	68.00	192.00	306.00	244.00	257.00	220.00	249.00	395.00	445.00	240.00
Nd	254.00	128.00	46.00	33.00	25.00	16.00	31.00	43.00	145.00	1854.00
Ni	10.00	7.00	6.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	10.00	47.00
Pb	11.00	13.00	22.00	15.00	13.00	1.00	1.00	1.00	1.00	27.00
Rb	319.00	347.00	309.00	299.00	295.00	277.00	296.00	299.00	316.00	273.00
S	1983.00	2545.00	1414.00	1527.00	7384.00	7115.00	5821.00	2164.00	6785.00	18153.00
Sc	2.00	1.00	6.00	5.00	4.00	3.00	4.00	4.00	1.00	1.00
Sr	80.00	136.00	196.00	192.00	167.00	148.00	132.00	109.00	97.00	183.00
Th	21.00	65.00	17.00	9.00	12.00	8.00	14.00	13.00	31.00	6.00
U	29.00	79.00	191.00	61.00	45.00	25.00	86.00	206.00	89.00	17.00
V	65.00	109.00	318.00	259.00	244.00	251.00	231.00	134.00	72.00	116.00
Y	92.00	53.00	38.00	48.00	39.00	23.00	43.00	22.00	50.00	461.00
Zn	1.00	22.00	21.00	11.00	11.00	13.00	16.00	2.00	9.00	714.00
Zr	333.00	251.00	826.00	1425.00	1004.00	588.00	806.00	198.00	2222.00	1109.00

Tabela I.6 A: Continuação.

Amostra	75-1BA	75-1BB	77-1A	77-1B	78-1A	81-1A	85-1A	90-1B	91-1A	95-1A
Furo	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1
Litotipo	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.
<hr/>										
% - peso										
SiO ₂	55.82	56.53	56.51	56.59	56.70	56.10	51.82	56.01	56.52	57.71
TiO ₂	0.47	0.45	0.44	0.46	0.43	0.46	0.42	0.47	0.46	0.57
Al ₂ O ₃	21.60	21.77	21.90	21.71	21.51	21.69	20.59	21.73	22.12	23.23
Fe ₂ O ₃ tot	3.28	3.18	2.83	2.96	3.51	3.28	6.41	3.41	2.63	0.90
MnO	0.01	0.10	0.10	0.10	0.10	0.01	1.48	0.10	0.01	0.01
MgO	0.04	0.10	0.06	0.09	0.10	0.02	0.24	0.07	0.01	0.01
CaO	0.23	0.22	0.03	0.30	0.09	0.01	0.21	0.01	0.01	0.01
Na ₂ O	0.58	0.33	0.43	0.36	0.29	0.33	0.49	0.68	0.30	0.38
K ₂ O	13.70	13.76	13.96	13.86	14.04	14.04	11.39	13.01	13.06	14.49
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05	0.06
LOI/PF	3.32	3.03	3.10	3.09	3.10	2.96	6.13	3.77	3.59	1.73
CO ₂										
Total	99.08	99.50	99.40	99.56	99.92	98.94	99.23	99.29	98.76	99.10
ppm										
As									7.00	
Ba	375.00	415.00	445.00	477.00	451.00	477.00	973.00	1668.00	631.00	710.00
Ce	335.00	208.00	278.00	205.00	141.00	203.00	362.00	308.00	351.00	398.00
Co	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cu	4.00	1.00	4.00	1.00	1.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Cr	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
F		2660.00		2888.00	1527.00					
Ga	38.00		32.00			34.00	31.00	28.00	26.00	40.00
Hf		4.00		4.00	5.00					
La	272.00	281.00	226.00	248.00	170.00	133.00	232.00	205.00	241.00	327.00
Nb	211.00	234.00	235.00	207.00	222.00	243.00	247.00	200.00	241.00	241.00
Nd	85.00	31.00	69.00	29.00	12.00	49.00	76.00	52.00	78.00	89.00
Ni	5.00	1.00	1.00	1.00	1.00	5.00	6.00	5.00	6.00	5.00
Pb	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Rb	301.00	283.00	302.00	299.00	300.00	315.00	264.00	286.00	302.00	342.00
S	14074.00	1024.00	11477.00	9447.00	8004.00	13139.00	9126.00	9120.00	12576.00	890.00
Sc	1.00	4.00	1.00	4.00	4.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Sr	216.00	307.00	122.00	167.00	171.00	112.00	174.00	96.00	121.00	170.00
Th	15.00	1.00	21.00	1.00	5.00	21.00	41.00	14.00	22.00	26.00
U	20.00	5.00	17.00	3.00	30.00	30.00	37.00	25.00	14.00	13.00
V	142.00	161.00	113.00	153.00	262.00	111.00	82.00	102.00	96.00	299.00
Y	34.00	29.00	38.00	30.00	19.00	23.00	39.00	32.00	35.00	54.00
Zn	753.00	843.00	299.00	413.00	311.00	93.00	520.00	123.00	432.00	25.00
Zr	706.00	655.00	544.00	767.00	851.00	667.00	645.00	1218.00	894.00	453.00

Tabela I.6 A: Continuação.

Amostra	101-1A	104-1A	105-1A	106-1A	107-1A	109-1A	109-1B	111-1A	112-1A
Furo	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1
Litotipo	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.
% - peso									
SiO ₂	55.33	56.71	48.40	56.20	56.96	51.20	56.88	56.09	55.97
TiO ₂	0.52	0.55	0.37	0.48	0.52	0.72	0.51	0.48	0.56
Al ₂ O ₃	21.95	21.73	20.48	21.66	21.92	25.54	22.25	22.18	18.51
Fe ₂ O ₃ tot	3.75	2.38	1.56	3.20	2.56	3.84	2.28	3.12	5.64
MnO	0.10	0.01	0.10	0.10	0.01	0.03	0.10	0.10	0.10
MgO	0.01	0.04	0.01	0.02	0.04	0.07	0.06	0.03	0.02
CaO	0.01	0.01	0.09	0.01	0.01	0.46	0.01	0.01	0.01
Na ₂ O	0.35	0.13	0.49	0.86	0.07	0.36	0.23	0.43	0.54
K ₂ O	13.48	13.40	10.40	13.86	13.61	8.23	13.51	13.96	13.85
P ₂ O ₅	0.03	0.11	0.68	0.10	0.06	0.09	0.09	0.05	0.04
LOI/PF	3.55	3.34	5.33	3.13	3.24	7.50	3.47	2.99	3.70
CO ₂									
Total	99.08	98.41	87.91	99.62	99.00	98.04	99.39	99.44	98.94
ppm									
As									
Ba	607.00	1095.00	937.00	779.00	719.00	446.00	891.00	589.00	376.00
Ce	339.00	258.00	22807.00	435.00	240.00	446.00	243.00	371.00	572.00
Co	1.00	1.00	9.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cu	4.00	1.00	21.00	4.00	1.00	1.00	1.00	4.00	4.00
Cr	1.00	1.00	102.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
F							1102.00		
Ga	36.00	56.00	34.00	41.00	42.00	37.00		36.00	41.00
Hf							8.00		
La	264.00	168.00	14204.00	276.00	155.00	259.00	308.00	259.00	322.00
Nb	248.00	202.00	105.00	225.00	229.00	336.00	205.00	286.00	507.00
Nd	71.00	22.00	5578.00	97.00	41.00	65.00	41.00	88.00	187.00
Ni	7.00	1.00	93.00	12.00	1.00	1.00	1.00	6.00	15.00
Pb	1.00	7.00	1202.00	9.00	1.00	1.00	1.00	48.00	2.00
Rb	292.00	316.00	151.00	292.00	331.00	197.00	286.00	304.00	290.00
S	17483.00	10081.00	7548.00	14482.00	10079.00	15148.00	842.00	11823.00	29553.00
Sc	1.00	7.00	8.00	1.00	7.00	4.00	4.00	1.00	1.00
Sr	109.00	480.00	689.00	453.00	255.00	112.00	421.00	237.00	289.00
Th	30.00	127.00	3651.00	91.00	29.00	12.00	83.00	59.00	45.00
U	31.00	18.00	210.00	51.00	25.00	94.00	10.00	24.00	24.00
V	208.00	592.00	247.00	258.00	311.00	90.00	408.00	176.00	185.00
Y	48.00	89.00	970.00	127.00	67.00	77.00	68.00	59.00	110.00
Zn	213.00	139.00	4424.00	145.00	107.00	119.00	151.00	83.00	188.00
Zr	970.00	2323.00	405.00	1559.00	1754.00	2084.00	898.00	855.00	2785.00

Tabela I.6 A: Continuação.

Amostra	112-1AD	113-1A	113-1B	115-1A	117-1A	118-1A	119-1A	121-1A	126-1A
Furo	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1
Litotipo	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.
% - peso									
SiO ₂	56.36	59.03	59.51	55.46	55.73	56.86	56.15	61.54	56.09
TiO ₂	0.41	0.08	0.39	0.47	0.55	0.32	0.49	0.08	0.45
Al ₂ O ₃	21.71	22.18	21.63	18.43	22.44	21.76	22.66	19.12	22.10
Fe ₂ O ₃ tot	3.09	0.73	0.99	3.49	3.34	2.75	2.44	0.84	1.83
MnO	0.10	0.01	0.10	0.02	0.10	0.02	0.02	0.01	0.13
MgO	0.08	0.02	0.05	0.01	0.07	0.04	0.02	0.01	0.02
CaO	0.01	0.50	0.28	0.54	0.13	0.02	0.06	0.24	1.09
Na ₂ O	0.36	0.05	0.21	0.11	0.39	0.28	0.44	0.60	0.32
K ₂ O	13.60	14.13	14.42	14.23	12.64	13.24	12.86	15.02	13.25
P ₂ O ₅	0.04	0.07	0.06	0.05	0.06	0.09	0.07	0.05	0.05
LOI/PF	3.25	2.17	2.21	3.12	4.11	3.58	3.70	1.25	3.50
CO ₂									
Total	99.01	98.97	99.85	95.93	99.56	98.96	98.91	98.76	98.83
ppm									
As							7.00		17.00
Ba	634.00	882.00	761.00	620.00	660.00	786.00	783.00	715.00	750.00
Ce	535.00	341.00	374.00	263.00	230.00	293.00	321.00	310.00	355.00
Co	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	4.00	4.00	4.00
Cr	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
F	1331.00		2343.00		1098.00				
Ga		40.00		43.00		43.00	31.00	29.00	37.00
Hf	38.00		6.00		23.00				
La	504.00	193.00	417.00	140.00	259.00	167.00	227.00	233.00	301.00
Nb	224.00	17.00	91.00	332.00	303.00	76.00	338.00	83.00	97.00
Nd	127.00	60.00	68.00	44.00	47.00	41.00	69.00	65.00	82.00
Ni	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Pb	11.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Rb	305.00	345.00	331.00	331.00	284.00	305.00	286.00	379.00	301.00
S	4191.00	2459.00	3831.00	14668.00	3743.00	11741.00	11914.00	2366.00	5273.00
Sc	4.00	7.00	4.00	7.00	4.00	6.00	1.00	1.00	1.00
Sr	180.00	240.00	188.00	134.00	155.00	100.00	128.00	130.00	206.00
Th	35.00	52.00	22.00	21.00	13.00	26.00	51.00	40.00	14.00
U	1.00	17.00	1.00	80.00	79.00	12.00	42.00	10.00	7.00
V	247.00	257.00	218.00	155.00	231.00	155.00	97.00	36.00	232.00
Y	91.00	88.00	59.00	73.00	72.00	51.00	46.00	43.00	55.00
Zn	81.00	81.00	144.00	89.00	494.00	42.00	109.00	19.00	132.00
Zr	2790.00	1735.00	740.00	2139.00	2068.00	733.00	431.00	258.00	248.00

Tabela 1.6 A: Continuação.

Amostra	126-1AA	126-1B	91-1B	107-1A	123-1A	129-1A	265-1A-B	Média
Furo	F1	F1	F4	F4	F4	F4	F4	todas rs.
Litotipo	red.	red.	red.	red.	red.	red.	red.	reduzidas
% - peso								
SiO ₂	56.56	55.72	52.60	54.16	55.18	52.48	50.45	55.85
TiO ₂	0.53	0.69	0.56	0.50	0.44	0.41	0.49	0.44
Al ₂ O ₃	22.03	21.41	22.49	23.07	20.11	18.64	22.98	21.80
Fe ₂ O ₃ tot	2.36	2.83	3.16	2.99	3.57	3.89	4.32	2.96
MnO	0.11	0.44	0.10	0.16	0.40	0.91	0.07	0.14
MgO	0.06	0.07	0.17	0.19	0.10	0.15	0.34	0.07
CaO	0.28	0.43	1.63	1.32	1.19	2.49	0.60	0.31
Na ₂ O	0.31	0.48	0.80	1.90	0.55	0.53	0.62	0.44
K ₂ O	13.62	13.22	12.77	9.46	13.27	12.24	11.30	13.16
P ₂ O ₅	0.06	0.06	0.09	0.11	0.05	0.18	0.32	0.06
LOI/PF	3.46	3.93	3.90	4.07	2.53	3.68	4.51	3.56
CO ₂			0.19	0.44	0.69	1.42		0.55
Total	99.38	99.28	98.46	98.37	98.08	97.02	96.00	98.64
ppm								
As								10.25
Ba	863.00	824.00	787.00	677.00	780.00	444.00	1135.00	648.69
Ce	302.00	430.00	538.00	396.00	189.00	2253.00	1809.00	403.77
Co	1.00	1.00	4.00	5.00	5.00	9.00	5.00	1.67
Cu	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.23
Cr	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	12.00	1.00	2.60
F	2100.00	2733.00	8101.00	5946.00	6989.00	11579.00	3665.00	3116.42
Ga								37.27
Hf	0.00	1.00	1.00	1.00	25.00	57.00	63.00	14.00
La	352.00	457.00	479.00	395.00	186.00	1641.00	1396.00	507.51
Nb	100.00	131.00	215.00	276.00	148.00	232.00	258.00	225.80
Nd	49.00	71.00	108.00	70.00	35.00	441.00	312.00	126.14
Ni	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	4.19
Pb	2.00	2.00	5.00	51.00	11.00	59.00	43.00	8.79
Rb	296.00	291.00	315.00	239.00	289.00	248.00	277.00	298.56
S	9303.00	7972.00	18134.00	5498.00	13441.00	22781.00	21098.00	9316.00
Sc	5.00	6.00	3.00	1.00	4.00	3.00	5.00	3.24
Sr	132.00	131.00	335.00	387.00	176.00	577.00	355.00	198.28
Th	10.00	5.00	28.00	17.00	17.00	62.00	214.00	31.14
U	1.00	1.00	43.00	864.00	78.00	184.00	281.00	51.95
V	471.00	393.00	345.00	336.00	192.00	146.00	279.00	213.00
Y	33.00	44.00	35.00	32.00	62.00	105.00	320.00	69.00
Zn	77.00	139.00	37.00	79.00	256.00	68.00	506.00	185.84
Zr	403.00	532.00	645.00	383.00	2082.00	4529.00	4621.00	1202.93

Tabela 1.6B: Análises por FRX de rochas oxidadas (hidrotermalitos oxidados) com OHF da mina de U Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas (Projeto Internacional Poços de Caldas; dados extraídos de Waber et al., 1991; 1992).

Amostra	1-1B	10-1A	14-1A	16-1A	20-1A	20-1B	23-1A	26-1A	31-1A	33-1A	45-1A
Furo	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1
Litotipo	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.
<hr/>											
% - peso											
SiO ₂	54.49	56.05	55.51	57.30	57.04	56.02	58.32	53.67	56.67	58.61	54.52
TiO ₂	0.49	0.40	0.47	0.22	0.52	0.52	0.38	0.49	0.45	0.50	0.58
Al ₂ O ₃	24.05	23.14	23.09	22.37	23.84	22.71	21.69	23.10	24.17	21.41	23.56
Fe ₂ O ₃ tot	3.65	3.50	3.57	0.70	1.18	3.30	2.03	3.56	1.46	1.49	4.05
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	0.02	0.01	0.04	0.05	0.04	0.02	0.06	0.05	0.03	0.04	0.03
CaO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Na ₂ O	0.35	0.27	0.39	3.03	0.27	0.26	0.30	2.19	0.48	0.34	0.30
K ₂ O	12.33	13.64	13.62	13.53	13.42	13.58	14.33	11.76	13.10	13.81	13.11
P ₂ O ₅	0.07	0.02	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.07
LOI/PF	3.37	2.36	2.47	2.44	3.04	2.39	1.85	3.96	2.91	2.23	2.86
CO ₂											
Total	98.84	99.41	99.21	99.71	99.42	98.85	99.01	98.85	99.34	98.50	99.10
ppm											
As				5.00				21.00		5.00	17.00
Ba	567.00	568.00	618.00	767.00	650.00	626.00	733.00	4585.00	1324.00	1497.00	510.00
Ce	805.00	10.00	393.00	268.00	1606.00	574.00	1276.00	327.00	136.00	137.00	772.00
Co	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cu	1.00	1.00	1.00	17.00	1.00	1.00	1.00	10.00	1.00	7.00	4.00
Cr	10.00	10.00	10.00	14.00	1.00	10.00	1.00	14.00	10.00	10.00	12.00
F					1100.00		1508.00				
Ga	37.00	35.00	42.00	42.00		35.00	2.00	44.00	37.00	30.00	41.00
Hf					2.00		12.00				
La	307.00	117.00	97.00	256.00	211.00	121.00	1498.00	176.00	140.00	120.00	250.00
Nb	121.00	125.00	143.00	47.00	104.00	197.00	216.00	149.00	114.00	146.00	324.00
Nd	105.00	21.00	51.00	71.00	26.00	42.00	288.00	67.00	31.00	22.00	97.00
Ni	12.00	9.00	9.00	9.00	3.00	3.00	3.00	9.00	3.00	3.00	7.00
Pb	34.00	23.00	39.00	19.00	9.00	45.00	59.00	23.00	3.00	11.00	17.00
Rb	321.00	350.00	359.00	414.00	343.00	351.00	369.00	304.00	345.00	353.00	313.00
S	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	104.00	64.00	127.00	62.00
Sc	2.00	1.00	1.00	7.00	4.00	3.00	6.00	10.00	2.00	1.00	1.00
Sr	176.00	175.00	163.00	243.00	180.00	183.00	155.00	174.00	136.00	193.00	158.00
Th	62.00	18.00	14.00	24.00	30.00	26.00	16.00	36.00	28.00	217.00	30.00
U	69.00	23.00	36.00	23.00	78.00	108.00	51.00	88.00	27.00	41.00	190.00
V	238.00	150.00	156.00	212.00	196.00	143.00	165.00	257.00	142.00	144.00	171.00
Y	76.00	37.00	39.00	60.00	36.00	55.00	103.00	63.00	53.00	61.00	59.00
Zn	20.00	10.00	14.00	18.00	1.00	1.00	7.00	18.00	1.00	1.00	25.00
Zr	912.00	567.00	649.00	403.00	420.00	892.00	977.00	1345.00	783.00	702.00	752.00

Tabela 1.6B: Continuação.

Amostra	47-1A	50-1A	55-1A	59-1A	59-1B	63-1A	19-1A	22-1A	39-1A	Médias
Furo	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F4	F4	F4	Todos
Litotipo	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	oxi.	R. oxidadas
<hr/>										
% - peso										
SiO ₂	56.75	57.21	56.36	54.76	54.20	54.85	53.04	53.45	54.33	55.66
TiO ₂	0.75	0.38	0.53	0.46	0.59	0.49	0.65	0.70	0.99	0.53
Al ₂ O ₃	22.56	23.56	22.08	23.77	23.28	24.13	25.22	24.88	23.75	23.32
Fe ₂ O ₃ tot	1.97	1.46	3.30	3.71	4.33	3.72	2.79	2.41	2.57	2.74
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.17	0.02	0.02
MgO	0.06	0.00	0.06	0.04	0.05	0.01	0.16	0.12	0.12	0.05
CaO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	0.02	0.01
Na ₂ O	0.16	0.28	0.16	0.57	0.21	0.25	1.04	0.83	0.74	0.62
K ₂ O	13.75	12.84	13.03	12.59	11.79	12.45	11.64	11.96	12.48	12.94
P ₂ O ₅	0.09	0.05	0.08	0.09	0.10	0.06	0.17	0.13	0.14	0.07
LOI/PF	2.95	3.03	3.98	3.28	4.97	3.50	3.79	3.54	2.92	3.09
CO ₂							0.12	0.15	0.19	0.02
Total	99.06	98.83	99.60	99.29	99.54	99.48	98.67	98.36	98.27	99.07
ppm										
As				50.00						
Ba	702.00	578.00	524.00	598.00	528.00	587.00	679.00	815.00	1312.00	746.47
Ce	2331.00	204.00	301.00	277.00	401.00	150.00	1459.00	1658.00	659.00	479.35
Co	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	6.00	8.00	6.00	1.85
Cu	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	1.00	1.00	3.15
Cr	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	5.55
F	1340.00		1095.00		1000.00		1820.00	1699.00	1544.00	1388.25
Ga		29.00		45.00		43.00				35.54
Hf	13.00		11.00		27.00		5.00	10.00	9.00	11.13
La	412.00	183.00	428.00	298.00	361.00	281.00	1836.00	1230.00	634.00	447.80
Nb	184.00	70.00	236.00	278.00	328.00	256.00	264.00	264.00	299.00	193.25
Nd	85.00	84.00	79.00	90.00	71.00	60.00	448.00	266.00	142.00	107.30
Ni	3.00	7.00	3.00	10.00	3.00	6.00	3.00	3.00	3.00	5.55
Pb	35.00	3.00	31.00	29.00	27.00	59.00	39.00	313.00	43.00	28.84
Rb	324.00	336.00	309.00	295.00	383.00	311.00	268.00	282.00	280.00	330.50
S	5.00	32.00	5.00	5.00	5.00	47.00	196.00	56.00	5.00	37.40
Sc	5.00	1.00	6.00	1.00	6.00	1.00	4.00	6.00	6.00	3.70
Sr	160.00	196.00	180.00	207.00	211.00	226.00	123.00	144.00	100.00	174.15
Th	75.00	41.00	27.00	61.00	58.00	42.00	51.00	94.00	62.00	50.60
U	212.00	91.00	153.00	263.00	308.00	198.00	107.00	118.00	101.00	48.78
V	400.00	135.00	170.00	263.00	269.00	296.00	268.00	404.00	418.00	229.85
Y	68.00	86.00	66.00	101.00	141.00	56.00	83.00	147.00	120.00	75.50
Zn	20.00	1.00	80.00	9.00	14.00	7.00	76.00	74.00	72.00	23.45
Zr	857.00	3057.00	1101.00	1794.00	2208.00	596.00	616.00	1072.00	1167.00	1043.50

Tabela I-7A: Geoquímica via ICP-MS dos microperfis das frentes redox nas zonas reduzidas.

AMOSTRA	IARF-12	IARF-12	IARF-11	IARF-11	IARF-9	IARF-9	IARF-8	IARF-8	M2c-5
Fd	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000
ppm\tipo	red	red	red	red	fr.red	fr.red	fr.red	fr.red	red
As	6.59	5.20	22.02	25.66	5.45	8.77	8.82	13.09	6.77
Ba	739.30	902.40	623.30	736.00	562.60	806.60	1461.00	1800.00	658.30
Be	5.18	6.74	5.82	6.56	4.39	7.88	15.56	18.13	3.30
Bi	0.06	0.12	0.06	0.13	0.05	0.00	0.03	0.05	0.06
Ca	842.30	883.90	77.40	900.10	424.10	0.00	453.20	239.70	430.90
Cd	3.18	4.00	2.02	2.44	1.40	2.05	3.38	0.00	7.46
Ce	372.50	425.60	328.70	348.00	133.50	173.80	130.40	128.20	738.80
Co	7.85	9.11	21.12	24.83	8.67	12.80	6.03	7.43	1.65
Cr	16.63	11.59	31.15	31.39	26.23	15.68	14.13	26.45	3.65
Cs	0.52	0.68	0.57	0.55	0.39	0.42	0.42	0.55	0.51
Cu	3.35	4.13	8.71	13.91	2.93	1.29	7.97	10.47	5.53
Dy	34.36	33.67	15.37	16.97	7.74	8.62	14.06	14.11	25.98
Er	25.88	23.37	9.90	10.96	4.94	6.09	10.92	10.16	12.96
Eu	5.30	5.00	2.75	2.60	1.55	1.50	3.08	3.80	11.48
Fe	13230.00	15280.00	33080.00	38970.00	15080.00	24150.00	24970.00	30720.00	26990.00
Ga	44.40	50.67	51.39	59.20	39.67	60.33	101.20	125.10	45.59
Gd	20.21	24.12	12.04	12.08	6.92	5.84	8.03	11.29	42.21
Ge	1.58	2.35	2.43	0.00	1.27	2.60	1.99	7.18	4.08
Hf	12.00	10.64	9.45	6.68	5.95	4.90	24.21	16.80	11.39
Ho	8.48	8.96	3.52	3.94	1.75	2.07	3.49	3.08	5.08
La	381.30	448.70	341.30	389.30	142.50	194.00	129.60	135.60	565.00
Li	21.93	0.00	35.50	51.22	39.60	63.81	76.48	211.00	68.87
Lu	3.56	3.98	1.14	1.08	0.62	0.51	1.67	1.56	1.27
Mg	147.50	229.70	199.10	321.30	174.70	252.90	399.90	516.70	350.80
Mn	38.45	42.59	47.69	50.31	50.89	75.26	108.30	130.80	46.25
Mo	654.00	716.00	408.00	447.40	180.70	228.50	257.60	288.90	157.90
Nb	21.62	19.71	26.31	18.42	15.55	19.68	90.12	75.98	39.15
Nd	56.98	59.57	39.02	36.72	17.30	22.82	23.48	20.95	183.20
Ni	2.57	3.87	9.45	9.09	51.63	68.20	1447.00	1861.00	1.96
Pb	46.94	43.27	41.68	48.12	28.57	25.56	30.71	35.50	58.06
Pd	18.95	18.92	8.04	6.59	5.57	4.03	6.87	6.22	9.83
Pr	27.08	28.11	21.08	22.97	9.20	10.12	9.87	9.58	75.57
Rb	226.50	254.90	215.90	230.70	178.10	240.00	358.20	425.00	216.30
S	36810.00	54060.00	47850.00	64110.00	35210.00	61390.00	61940.00	120400.00	76990.00
Sb	1.95	1.85	1.64	1.48	1.24	1.14	1.84	1.53	1.26
Sc	12.19	14.16	4.42	4.92	2.14	3.44	5.16	6.91	1.81
Se	2.94	0.00	1.56	1.93	0.86	6.60	1.00	0.00	4.20
Sm	11.13	10.40	5.87	6.10	2.99	3.35	5.07	4.14	28.57
Sr	1478.00	1928.00	1502.00	1912.00	744.40	1059.00	590.70	715.80	610.50
Ta	0.17	0.04	0.26	0.02	0.02	0.06	0.91	0.00	0.57
Tb	4.98	4.40	2.36	2.20	1.20	1.32	1.90	2.68	5.96
Th	124.40	141.40	54.42	55.20	30.50	31.35	70.64	71.44	100.30
Ti	1280.00	1483.00	1826.00	2062.00	1113.00	1468.00	4126.00	4832.00	2708.00
Tm	4.05	4.07	1.46	1.42	0.74	0.77	1.90	1.73	1.58
U	256.30	280.20	155.90	162.50	146.70	143.80	283.60	294.30	1257.00
V	260.90	318.30	345.90	400.80	258.60	365.50	601.50	735.00	224.20
W	9.28	7.51	6.46	6.21	3.97	4.38	8.96	7.26	6.80
Y	291.60	326.10	125.30	130.60	57.05	75.04	122.10	141.40	158.70
Yb	24.43	24.53	8.44	8.35	4.20	4.06	11.30	12.30	8.52
Zn	71.91	93.05	80.95	124.60	115.40	119.60	114.00	125.90	104.70
Zr	1195.00	1086.00	591.30	511.20	320.50	322.50	1222.00	1121.00	624.30

Tabela I-7A: Continuação.

AMOSTRA	M2c-5	PH-028-8	PH-028-8	PH-028-7	PH-028-7	PH-028-6	PH-028-6	U3c-1	U3c-1
Fd	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000
ppm/tipo	red	red	red	red	red	red	red	red	red
As	4.98	8.38	9.12	4.59	6.75	5.27	5.79	6.74	5.20
Ba	793.00	458.20	549.10	508.40	682.60	497.40	594.60	350.90	443.40
Be	3.17	5.99	11.11	4.41	3.59	3.22	3.44	4.96	5.30
Bi	0.15	0.04	0.02	1.18	1.45	0.02	0.06	1.48	2.00
Ca	427.50	445.60	491.90	443.80	0.00	164.70	111.60	431.50	66.46
Cd	6.88	1.80	0.41	2.21	1.71	1.20	0.00	10.06	9.74
Ce	929.10	743.90	842.60	106.50	128.90	73.90	84.14	95.32	113.10
Co	2.00	4.43	4.99	20.61	3.16	1.30	1.84	0.90	1.00
Cr	10.27	13.44	23.89	12.85	13.63	17.46	24.17	14.66	8.88
Cs	0.59	0.31	0.43	1.36	1.81	0.22	0.27	0.25	0.32
Cu	10.51	4.96	6.67	5.60	7.22	31.66	43.73	4.22	8.15
Dy	29.50	40.12	41.95	3.50	3.39	4.46	3.81	7.38	9.91
Er	15.15	20.77	19.69	2.24	2.30	3.37	3.17	5.64	6.75
Eu	11.10	15.37	16.76	1.40	1.31	1.48	1.59	1.16	1.06
Fe	34740.00	19660.00	23670.00	20120.00	23520.00	20130.00	24100.00	4921.00	5525.00
Ga	56.61	55.65	61.54	52.31	55.98	42.90	53.07	42.27	47.91
Gd	48.00	49.68	56.28	4.68	5.03	4.17	5.13	4.69	4.91
Ge	6.83	4.76	6.56	1.82	2.96	1.51	3.13	1.29	0.00
Hf	9.86	14.87	12.13	9.23	7.69	13.32	9.60	7.14	6.92
Ho	5.84	7.77	8.17	0.79	1.01	1.03	1.11	1.77	1.76
La	700.60	460.40	479.50	88.50	108.80	73.21	79.82	74.82	90.05
Li	91.04	94.22	176.20	94.81	51.74	79.54	146.50	47.83	48.09
Lu	1.25	1.85	2.00	0.36	0.43	0.55	0.61	1.04	1.25
Mg	509.20	455.40	595.80	521.90	635.30	416.80	480.70	326.00	391.50
Mn	61.29	56.51	73.67	52.72	58.11	27.25	39.27	20.88	21.74
Mo	178.20	30.12	34.94	13.60	15.53	16.03	18.05	7.89	10.09
Nb	36.22	34.50	23.44	25.52	23.46	39.53	31.27	22.51	23.23
Nd	193.30	253.80	250.00	22.68	27.02	19.64	18.48	21.48	25.14
Ni	4.04	14.60	17.63	17.96	20.42	37.65	50.62	3.22	5.70
Pb	66.83	849.70	922.00	26.53	28.11	21.69	20.66	27.70	36.70
Pd	8.93	14.07	15.87	1.80	1.40	2.17	2.26	3.55	2.50
Pr	86.36	87.05	90.80	8.69	9.73	6.38	6.41	9.90	12.21
Rb	239.30	239.10	290.20	270.40	282.00	244.30	292.60	217.50	233.60
S	83520.00	57140.00	118200.00	69540.00	0.00	61580.00	111400.00	19480.00	0.00
Sb	0.95	0.87	0.84	1.98	2.23	0.69	0.71	0.41	0.40
Sc	1.34	1.80	1.81	1.58	0.23	0.94	0.00	0.94	0.43
Se	0.00	2.88	4.83	0.86	2.11	6.09	6.84	1.14	12.65
Sm	29.80	44.14	46.73	3.55	3.97	3.46	4.06	2.88	2.92
Sr	684.20	245.60	308.10	216.30	238.70	179.70	223.40	244.80	269.10
Ta	0.35	0.33	0.72	0.33	0.13	0.73	0.77	9.34	0.24
Tb	5.99	7.78	8.85	0.68	1.03	0.73	0.74	0.98	1.05
Th	116.20	53.65	49.53	13.57	15.38	16.04	14.99	25.35	29.60
Ti	3081.00	1737.00	1956.00	2113.00	2193.00	2434.00	2903.00	1923.00	2044.00
Tm	1.68	2.40	2.57	0.40	0.47	0.55	0.47	1.01	1.11
U	1582.00		5495.00	278.90	380.30	341.80	300.90	1677.00	2522.00
V	275.60	270.60	303.50	257.90	268.20	223.40	267.30	157.60	167.80
W	6.04	3.49	2.23	2.51	2.75	3.37	2.59	9.08	9.47
Y	162.90	237.80	279.10	29.99	32.59	34.87	39.74	55.44	60.34
Yb	9.41	12.95	14.18	3.61	4.68	3.48	3.65	6.30	8.28
Zn	181.00	86.62	99.66	37.76	39.84	68.67	123.60	69.73	83.99
Zr	547.30	890.00	835.50	518.90	496.00	794.40	791.00	364.40	334.00

Tabela I-7A: Continuação.

AMOSTRA	U3c-2	U3c-2	U3c-3	U3c-3	U3c-7	U3c-7	SN/15-1	SN/15-1	04/02-5
Fd	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000
ppm/tipo	fr.red	fr.red	fr.red	fr.red	red	red	red	red	red
As	4.04	3.30	5.02	10.09	2.23	2.64	15.97	24.61	9.75
Ba	265.40	348.00	369.20	549.20	338.00	455.20	539.40	793.60	308.10
Be	3.54	0.53	3.72	11.16	1.45	0.00	2.26	5.78	4.77
Bi	0.11	0.19	0.07	0.13	0.09	0.12	0.53	0.64	0.03
Ca	378.00	339.80	68.79	0.00	414.60	374.60	1293.00	1161.00	309.00
Cd	5.60	4.68	2.55	2.76	5.51	8.05	1.72	2.19	5.06
Ce	74.70	81.82	51.31	63.75	93.52	119.50	73.81	90.45	174.30
Co	0.61	0.84	0.58	0.55	1.23	1.15	0.54	1.04	1.99
Cr	7.21	18.85	25.77	38.00	12.39	6.94	32.60	48.75	10.72
Cs	0.26	0.34	0.25	0.29	0.29	0.40	0.29	0.29	0.14
Cu	4.38	3.89	4.06	5.17	65.01	86.01	10.24	12.41	7.06
Dy	3.79	4.19	7.21	8.22	4.19	6.62	3.11	3.48	9.50
Er	2.91	2.71	6.32	7.51	3.65	4.05	1.79	1.91	5.75
Eu	0.62	0.78	0.73	0.79	0.95	1.02	0.80	0.80	1.47
Fe	5615.00	6583.00	8785.00	13970.00	12860.00	15430.00	4309.00	6589.00	5932.00
Ga	43.11	49.44	40.12	58.33	20.88	24.24	36.98	52.28	32.65
Gd	2.64	2.65	3.21	4.29	3.39	4.70	3.49	2.75	9.27
Ge	0.88	1.55	1.09	0.24	1.49	0.00	1.01	1.48	0.97
Hf	3.85	4.45	7.74	7.38	6.67	5.86	1.81	1.58	4.27
Ho	0.88	1.00	2.00	1.92	1.03	1.31	0.68	0.66	2.03
La	65.48	64.74	51.75	63.78	80.34	100.40	42.62	90.37	167.10
Li	38.25	109.60	35.31	118.20	10.58	0.00	35.12	146.70	31.80
Lu	0.56	0.61	1.08	1.42	0.67	0.72	0.28	0.34	0.52
Mg	240.60	289.30	259.10	216.60	97.00	107.00	360.20	466.90	162.30
Mn	14.46	21.58	39.08	57.23	71.78	82.67	28.50	34.11	68.41
Mo	6.00	6.41	10.79	14.84	6.54	8.53	10.96	13.33	225.40
Nb	20.34	21.83	19.29	25.76	37.45	32.49	15.60	21.46	18.75
Nd	14.48	13.91	9.00	10.89	16.90	21.80	11.54	15.86	34.33
Ni	1.95	4.93	9.91	11.32	10.01	10.18	41.86	54.82	249.60
Pb	43.20	46.41	111.90	120.00	34.70	46.75	23.39	22.15	31.99
Pd	2.13	1.96	5.27	4.16	2.53	2.59	1.97	0.20	6.14
Pr	6.70	7.07	4.53	5.08	7.76	10.42	5.62	7.19	14.86
Rb	206.50	243.80	212.40	276.60	229.50	273.20	229.40	301.00	120.90
S	18000.00	16000.00	17410.00	78370.00	6647.00	0.00	12200.00	46930.00	15380.00
Sb	0.28	0.20	0.25	0.59	0.31	0.31	0.40	0.42	0.68
Sc	0.25	1.36	0.68	1.55	0.68	0.00	0.28	0.73	0.50
Se	0.54	1.85	1.34	3.30	1.09	0.00	0.77	0.00	2.38
Sm	1.51	1.18	1.27	1.22	1.81	2.11	1.23	1.53	3.78
Sr	285.00	332.30	294.40	407.90	292.60	358.10	267.30	365.40	897.30
Ta	0.06	0.02	0.02	0.08	0.47	0.26	0.15	1.08	0.12
Tb	0.53	0.56	0.76	1.01	0.65	0.71	0.50	0.57	1.46
Th	12.86	12.71	24.21	23.52	39.20	50.47	26.21	32.50	32.99
Ti	1286.00	1485.00	1448.00	1905.00	2403.00	2561.00	1096.00	1476.00	1199.00
Tm	0.52	0.59	1.11	1.22	0.69	0.70	0.30	0.53	0.71
U	890.50	1014.00	412.80	416.80	769.80	1023.00	262.60	280.70	1089.00
V	136.70	154.00	163.50	215.00	63.41	69.77	194.60	242.40	167.20
W	8.24	7.86	18.68	17.00	29.23	30.66	3.84	4.19	4.12
Y	29.80	33.57	54.74	75.62	38.97	41.65	19.65	26.19	61.23
Yb	3.28	3.24	7.59	6.85	4.05	5.22	1.89	1.78	3.98
Zn	78.40	89.13	70.91	124.10	25.80	42.54	66.86	42.66	4307.00
Zr	160.90	140.40	338.70	364.30	261.80	258.30	61.70	71.42	173.30

Tabela I-7A: Continuação.

AMOSTRA	04/02-5	04/02-4	04/02-4	M2b-1	M2b-1	M2b-2	M2b-2	M2b-7	M2b-7
Fd	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000
ppm/tipo	red	red	red	red	red	red	red	red	red
As	11.07	31.54	35.39	30.60	35.67	53.92	61.63	34.41	32.52
Ba	415.40	517.50	559.30	809.30	1057.00	951.40	1252.00	805.90	1003.00
Be	6.82	5.70	3.65	1.39	0.52	4.60	4.34	4.23	3.31
Bi	0.03	0.24	0.45	0.07	0.00	0.19	0.20	0.13	0.25
Ca	228.50	608.80	560.70	301.90	791.50	607.50	578.30	404.80	375.10
Cd	5.48	8.11	10.95	4.10	3.61	3.81	3.06	3.47	2.36
Ce	248.20	288.80	336.90	230.80	238.10	92.79	99.09	59.63	63.81
Co	1.74	4.26	4.35	9.09	11.04	3.79	4.57	2.74	2.58
Cr	1.32	12.66	27.58	16.12	25.99	17.90	37.31	12.91	16.25
Cs	0.12	0.44	0.40	0.21	0.31	0.23	0.29	0.24	0.21
Cu	10.60	7.47	8.01	2.52	8.11	4.44	5.04	9.19	13.45
Dy	11.02	36.99	46.07	8.29	8.31	20.71	23.22	25.12	28.01
Er	6.87	23.58	28.78	5.30	5.63	15.14	15.57	19.84	21.27
Eu	1.37	3.35	3.40	2.35	2.60	2.69	3.38	2.96	3.49
Fe	8031.00	18380.00	21320.00	12520.00	15310.00	16260.00	18120.00	8606.00	9750.00
Ga	43.18	54.38	57.49	33.09	34.58	30.75	34.08	49.67	51.53
Gd	8.23	16.43	17.38	8.36	9.67	7.88	9.01	8.93	9.03
Ge	0.00	1.74	2.32	1.44	1.97	1.28	2.03	1.21	0.63
Hf	4.16	14.07	11.56	10.73	9.51	22.21	14.49	28.70	20.08
Ho	2.38	8.61	10.22	1.73	2.14	5.07	5.46	6.61	7.35
La	212.10	253.80	282.70	148.60	152.30	72.12	78.74	45.06	45.49
Li	9.94	45.43	0.00	18.21	81.46	17.01	57.26	38.78	1.99
Lu	0.71	3.31	3.00	0.73	0.68	2.21	2.14	2.92	3.31
Mg	246.90	255.20	342.50	200.80	247.50	241.70	259.80	302.20	451.00
Mn	81.21	115.30	133.70	14.87	24.10	18.29	27.08	22.32	22.21
Mo	283.40	208.20	249.00	180.20	203.50	1256.00	1451.00	771.60	850.40
Nb	16.22	21.05	17.81	23.00	22.17	41.84	26.90	41.58	36.18
Nd	41.41	54.72	56.26	50.25	53.06	20.33	21.43	16.60	15.11
Ni	334.80	405.60	466.50	3.41	5.34	3.49	5.01	2.79	3.30
Pb	33.67	40.64	45.62	25.26	28.83	62.68	68.72	24.11	25.70
Pd	4.71	16.70	13.77	3.05	3.06	9.28	7.79	11.72	11.69
Pr	18.88	23.64	27.70	19.80	21.05	7.29	7.59	5.45	5.91
Rb	142.70	236.50	251.20	214.70	268.20	216.40	258.40	244.10	252.10
S	0.00	47740.00	109100.00	39830.00	88010.00	53360.00	112300.00	24740.00	0.00
Sb	0.69	1.25	1.46	0.56	1.05	3.05	3.65	2.06	2.05
Sc	0.00	4.22	3.25	1.10	1.43	3.84	4.47	5.37	4.05
Se	0.00	5.00	1.79	0.00	0.00	2.24	3.24	1.05	0.00
Sm	3.96	7.85	7.21	6.09	6.63	5.21	4.70	5.63	5.39
Sr	1226.00	1086.00	1301.00	327.30	412.80	413.70	510.70	299.00	306.10
Ta	0.17	0.21	0.00	0.11	0.00	0.95	0.30	0.61	0.25
Tb	1.40	4.98	5.47	1.28	1.51	2.40	2.14	2.98	2.49
Th	33.17	100.00	100.70	33.55	34.30	74.99	81.18	92.38	94.59
Ti	1583.00	1878.00	2152.00	2501.00	2738.00	2067.00	2252.00	2884.00	3237.00
Tm	0.68	3.80	3.88	0.77	0.97	2.25	2.59	3.28	3.28
U	1531.00	556.70	671.10	41.48	41.77	182.10	185.10	240.50	278.40
V	214.60	249.70	280.40	214.20	239.00	208.50	227.00	368.70	427.90
W	4.31	6.04	5.01	5.66	6.07	8.83	9.24	9.04	7.38
Y	73.89	272.60	294.70	55.27	62.60	165.80	182.70	219.40	229.00
Yb	4.39	21.12	22.94	4.86	6.00	14.39	14.40	18.87	23.13
Zn	64.20	108.40	144.40	21.92	72.44	59.32	76.76	44.11	103.00
Zr	190.70	929.20	794.80	443.50	404.20	1148.00	1007.00	1467.00	1412.00

Tabela I-7A: Continuação.

AMOSTRA	M2b-3	M2b-3
Fd	5000	50000
ppm\tipo	zona brca	zona brca
As	8.43	16.05
Ba	966.40	1467.00
Be	4.27	7.29
Bi	0.31	0.30
Ca	1553.00	1688.00
Cd	0.89	0.52
Ce	265.10	349.60
Co	1.22	1.67
Cr	28.82	13.96
Cs	0.32	0.27
Cu	21.96	32.39
Dy	10.90	13.49
Er	7.85	9.01
Eu	2.99	3.99
Fe	21430.00	34210.00
Ga	37.36	57.15
Gd	14.60	13.29
Ge	2.27	4.52
Hf	4.35	5.12
Ho	2.69	3.49
La	184.70	257.50
Li	27.65	87.92
Lu	0.95	1.07
Mg	348.20	589.80
Mn	127.60	203.60
Mo	151.70	208.10
Nb	11.79	19.13
Nd	57.42	68.53
Ni	8.21	8.77
Pb	81.62	87.41
Pd	7.41	4.93
Pr	22.18	26.14
Rb	190.80	254.80
S	14970.00	57320.00
Sb	1.20	1.19
Sc	1.47	2766.00
Se	1.11	7.77
Sm	7.98	9.75
Sr	487.80	701.20
Ta	0.10	0.10
Tb	1.92	2.16
Th	48.19	56.20
Ti	1529.00	1999.00
Tm	1.10	1.49
U	60.22	64.01
V	302.90	404.40
W	111.20	133.00
Y	78.26	108.50
Yb	6.96	6.67
Zn	144.50	184.30
Zr	331.00	416.50

Tabela I-7B: Geoquímica via ICP-MS dos microperfis das frentes redox nas zonas oxidadas.

AMOSTRA	IARF-10	IARF-10	IARF-7	IARF-7	IARF-5	IARF-5	IARF-3	IARF-3	IARF-2
Fd	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000
ppm\tipo	oxi	oxi	fr.oxi	fr.oxi	oxi	oxi	oxi	oxi	oxi
As	8.62	12.06	10.00	7.49	6.83	13.26	17.50	23.12	14.14
Ba	450.70	591.70	879.60	1162.00	499.30	727.50	474.90	592.80	517.00
Be	3.68	3.98	12.79	8.46	5.11	7.71	5.20	3.52	4.98
Bi	0.06	0.00	0.00	105.60	0.02	0.01	0.03	0.13	0.04
Ca	1525.00	1473.00	302.50	0.00	58.67	0.00	176.40	49.17	839.20
Cd	1.80	1.86	1.83	2.62	0.72	0.83	0.66	0.84	1.38
Ce	388.70	480.50	93.29	102.90	71.61	86.41	760.30	1062.00	77.80
Co	40.39	54.69	9.51	10.79	3.45	4.73	0.15	0.08	0.60
Cr	60.80	25.50	78.13	52.62	82.56	104.80	10.53	14.27	7.30
Cs	0.55	0.53	0.23	0.27	0.34	0.40	0.28	0.28	0.93
Cu	17.21	22.80	3.10	5.61	7.26	9.42	0.56	3.11	4.93
Dy	20.65	25.55	10.03	12.30	5.06	5.41	39.93	42.00	4.53
Er	12.94	12.45	7.07	7.90	3.93	4.39	15.61	17.95	3.19
Eu	3.60	3.40	1.96	1.87	1.12	0.98	13.37	14.90	1.22
Fe	42510.00	72060.00	47370.00	58730.00	10980.00	16960.00	27550.00	39380.00	77670.00
Ga	25.78	33.33	78.38	79.87	33.27	48.10	32.60	42.91	30.77
Gd	19.93	17.09	5.76	6.55	4.32	3.91	61.76	5682.00	3.99
Ge	3.10	5.95	2.98	4.69	1.91	3.80	4.24	3.80	3.60
Hf	0.90	0.65	16.19	14.76	8.14	6.33	5.84	4.49	4.82
Ho	4.72	4.74	2.36	2.85	1.36	1.10	6.68	7.43	1.08
La	338.20	434.10	110.40	124.40	89.30	112.80	454.00	604.10	88.19
Li	13.88	210.90	69.42	44.86	40.59	131.00	37.56	5.50	22.99
Lu	1.42	1.36	1.13	1.15	0.57	0.49	1.05	1.10	0.40
Mg	140.20	145.60	257.60	309.50	138.00	130.90	112.90	198.30	213.80
Mn	81.46	129.50	92.26	101.90	36.68	53.26	40.31	42.70	55.06
Mo	294.20	371.90	217.80	236.80	53.31	70.46	151.00	176.80	327.40
Nb	10.06	12.97	20.75	18.14	17.60	21.62	17.29	21.73	21.90
Nd	50.34	60.72	16.77	17.83	11.71	12.85	195.50	248.90	12.71
Ni	6.98	5.48	2529.00	2956.00	901.80	1245.00	13.93	18.73	12.03
Pb	37.38	29.75	16.14	0.00	17.33	11.93	26.17	27.84	35.39
Pd	17.79	8.94	4.90	4.64	4.65	2.12	13.13	7.81	2.44
Pr	23.05	28.40	7.64	8.49	5.30	5.79	80.16	98.31	6.01
Rb	150.00	190.40	228.20	229.20	192.10	250.10	179.50	213.40	197.80
S	25360.00	0.00	15150.00	0.00	18350.00	0.00	6814.00	0.00	9264.00
Sb	0.62	0.78	1.44	1.62	0.39	0.40	0.71	1.09	1.15
Sc	4.63	6.21	4.19	3.25	1.62	3.35	2.92	2.33	1.67
Se	2.71	0.00	0.75	0.00	1.77	1.99	3.04	0.00	5397.00
Sm	8.83	8.24	3.67	3.25	1.82	1.60	3.46	38.95	2.31
Sr	1592.00	2414.00	507.00	550.20	482.30	712.80	423.10	508.00	424.60
Ta	0.10	0.11	0.12	0.08	0.05	0.17	0.11	0.08	0.11
Tb	3.06	3.33	1.43	1.54	0.74	0.63	8.37	8.55	0.73
Th	93.34	83.95	108.10	321.90	30.73	32.79	55.26	66.34	33.43
Ti	1558.00	1868.00	1993.00	2078.00	1819.00	2181.00	1549.00	1867.00	1704.00
Tm	1.85	1.90	1.19	1.33	0.61	0.56	1.67	1.51	0.48
U	563.90	523.70	323.30		91.57	74.78	199.50	213.70	133.30
V	165.40	184.50	452.60	491.10	210.30	247.10	216.20	247.20	180.30
W	4.70	5.59	3.88	4.05	2.84	3.20	4.67	5.72	3.93
Y	144.80	180.60	85.22	89.83	39.38	55.39	146.30	167.60	39.33
Yb	10.31	10.07	7.49	8.93	3.83	3.20	8.43	8.58	2.89
Zn	286.10	332.40	100.80	108.00	60.62	63.59	84.48	163.20	253.90
Zr	51.09	74.70	823.40	729.40	296.70	339.00	201.80	199.50	183.40

Tabela I-7B: Continuação.

AMOSTRA	IARF-2	IARF-4	IARF-4	IARF-6	IARF-6	IARF-1	IARF-1	M2c-4	M2c-4
Fd	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000
ppm\tipo	oxi	oxi	oxi	oxi	oxi	oxi	oxi	oxi	oxi
As	12.78	25.83	27.68	27.15	42.26	78.24	86.00	10.99	17.33
Ba	675.90	372.80	462.80	427.10	685.40	567.50	676.20	599.80	827.60
Be	4.58	7.14	10.10	1.93	5.98	3.63	8.92	2.13	5.52
Bi	0.04	0.03	0.07	0.04	0.04	0.11	0.15	0.05	0.04
Ca	660.40	712.40	600.70	423.90	0.00	670.10	805.70	86.75	0.00
Cd	1.36	1.16	2.20	2.26	3.26	2.42	1.18	1.75	2.20
Ce	84.42	47.66	55.19	69.16	92.94	1017.00	1389.00	189.10	230.10
Co	0.69	1.52	1.99	0.37	0.58	1.06	1.83	0.59	0.73
Cr	0.00	10.43	20.28	22.21	0.17	53.37	44.55	33.34	0.00
Cs	1.05	0.46	0.36	0.69	0.90	0.39	0.51	0.40	0.50
Cu	5.85	14.26	22.47	0.00	0.00	9.32	12.54	0.00	0.00
Dy	6.18	4.87	5.70	10.11	13.36	54.08	58.66	11.87	13.72
Er	3.77	3.56	2.94	6.79	8.04	21.45	23.67	6.56	7.03
Eu	1.39	1.01	0.78	2.05	2.08	19.73	21.20	3.87	4.44
Fe	99390.00	64500.00	86350.00	66260.00	138100.00	62580.00	82200.00	11900.00	18430.00
Ga	32.43	49.82	55.65	32.52	47.33	44.83	51.50	33.45	42.41
Gd	3.99	3.22	3.61	8.03	8.32	66.98	77.74	16.20	13.97
Ge	3.99	3.27	2.56	3.46	5.37	7.32	10.96	2.19	3.24
Hf	4.43	7.79	6.54	9.20	8.12	12.12	9.91	8.36	7.49
Ho	1.29	1.17	1.23	2.28	2.88	8.97	10.57	2.41	2.67
La	96.94	57.15	66.24	80.61	115.80	714.20	865.60	221.20	263.30
Li	0.00	77.07	118.50	58.12	147.80	45.99	150.90	60.20	227.50
Lu	0.51	0.51	0.54	0.98	0.88	1.80	1.91	0.69	0.43
Mg	267.30	301.40	410.50	218.40	366.60	210.90	294.30	280.30	363.20
Mn	53.80	44.53	57.59	54.92	91.65	117.30	133.70	50.81	72.96
Mo	354.90	284.70	312.00	263.90	343.00	325.90	358.30	163.00	198.40
Nb	13.71	24.36	21.72	16.08	21.68	17.35	13.00	15.45	19.16
Nd	15.10	11.01	12.63	20.49	24.79	293.60	275.80	51.47	64.82
Ni	11.64	314.90	355.80	9.74	12.04	65.72	77.07	0.27	0.00
Pb	41.45	33.78	41.81	33.66	32.47	52.67	58.46	21.71	14.43
Pd	2.35	2.41	2.55	7.39	3.79	14.63	11.45	9.12	4.05
Pr	7.01	4.68	4.96	8.49	10.11	116.00	118.90	20.61	22.62
Rb	204.70	189.60	213.80	162.10	228.90	203.40	246.40	188.80	240.00
S	0.00	5407.00	229.50	14060.00	0.00	5400.00	0.00	23030.00	0.00
Sb	1.46	1.21	0.81	0.41	0.54	2.39	2.41	0.38	0.34
Sc	0.54	2.36	1.21	2.67	4.22	5.88	7.63	1.06	2.80
Se	0.00	0.71	0.00	0.78	4.01	4.21	2.59	3.31	18.48
Sm	2.11	1.88	2.23	4.20	3.74	48.98	52.35	9.76	11.40
Sr	456.40	319.10	363.50	491.10	729.40	1097.00	1517.00	469.70	617.80
Ta	0.03	2993.00	0.55	0.15	0.10	0.33	0.13	0.05	0.08
Tb	0.71	0.70	0.67	1.59	1.93	10.88	12.69	2.29	2.26
Th	38.00	31.13	38.50	36.20	39.70	130.10	126.30	33.65	36.10
Ti	1726.00	2514.00	2764.00	2072.00	2719.00	1128.00	1381.00	1292.00	1528.00
Tm	0.60	0.60	0.69	0.98	0.95	2.43	2.98	0.91	0.71
U	165.00	265.30	335.90	196.30	214.40	520.10	533.30	1105.00	1123.00
V	182.80	369.30	436.40	211.60	269.80	178.50	212.20	174.20	187.90
W	3.32	1.81	2.35	2.13	5.50	29.93	32.64	3.43	3.41
Y	39.89	40.29	44.66	70.34	101.40	232.70	272.60	73.89	91.21
Yb	3.73	3.33	3.52	6.55	7.11	12.71	14.81	5.01	4.66
Zn	296.50	201.30	354.60	279.00	4319.00	280.80	310.20	29.41	55.49
Zr	159.80	294.80	317.70	356.10	457.10	543.00	469.80	393.30	435.30

Tabela I-7B: Continuação.

AMOSTRA	M2c-3	M2c-3	M2c2	M2c2	M2c-1	M2c-1	PH-028-3	PH-028-3	PH-028-4
Fd	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000
ppm/tipo	oxi	oxi	oxi	oxi	oxi	oxi	fr.oxi	fr.oxi	fr.oxi
As	7.56	6.83	6.81	9.08	8.30	10.40	25.28	28.54	8.20
Ba	598.60	715.60	486.40	678.90	692.40	889.70	835.00	950.90	507.70
Be	2.45	1.22	1.81	6.01	3.01	4.08	3.49	0.00	4.59
Bi	0.05	0.08	0.04	0.02	0.07	0.12	0.02	0.04	0.04
Ca	396.10	437.30	117.80	0.00	399.70	378.30	663.80	867.00	456.40
Cd	5.11	5.97	1.98	1.08	2.35	1.58	4.12	4.05	2.19
Ce	165.60	170.00	138.90	167.00	131.90	146.40	336.70	361.20	187.60
Co	1.33	1.37	6.46	8.76	11.36	12.55	8.91	10.51	6.12
Cr	9.81	0.92	28.96	5.33	15.54	20.50	25.52	36.98	6.98
Cs	0.57	0.59	0.48	0.48	0.55	0.55	0.54	0.47	0.31
Cu	3.03	2.96	1.65	1.65	3.23	3.51	10.43	13.37	8.33
Dy	23.14	23.77	18.99	20.51	20.80	22.91	14.78	14.06	5.63
Er	15.06	15.10	11.78	11.75	11.75	13.23	10.20	9.89	4.24
Eu	6.35	6.52	5.17	5.14	5.41	6.66	4.20	4.32	2.17
Fe	19840.00	23540.00	15350.00	23680.00	21520.00	24730.00	62030.00	78050.00	42320.00
Ga	50.45	56.35	35.28	51.05	53.52	60.99	76.94	86.20	66.91
Gd	19.44	18.28	18.63	16.38	16.07	18.95	15.37	21.58	8.32
Ge	2.15	2.70	2.37	1.83	2.03	3.29	4.31	7.81	2.98
Hf	15.02	13.01	18.54	15.02	25.83	20.18	31.09	26.98	13.60
Ho	4.94	5.28	4.30	4.47	4.20	4.70	3.28	3.17	1.35
La	168.90	191.10	160.60	207.90	149.80	160.80	271.30	291.30	148.30
Li	106.40	130.90	72.75	218.40	99.46	189.80	110.10	218.60	108.90
Lu	1.95	1.96	1.62	1.46	1.52	1.74	1.33	1.19	0.59
Mg	445.40	661.80	331.00	488.90	543.80	733.90	550.30	913.40	561.10
Mn	49.87	53.94	26.50	51.98	73.87	84.54	135.70	152.00	92.75
Mo	231.50	244.30	80.73	93.56	187.20	204.10	385.40	404.00	192.90
Nb	16.03	14.75	7.85	10.98	19.48	17.30	21.79	20.61	16.40
Nd	56.14	58.50	41.93	57.11	46.60	43.48	87.54	83.32	44.01
Ni	1.58	1.29	2.66	0.64	7.65	10.91	92.61	113.70	46.34
Pb	17.86	17.21	17.63	12.88	21.72	22.48	58.16	71.82	
Pd	11.27	7.46	16.05	6.79	9.86	6.70	6.81	4.51	2.98
Pr	19.69	22.28	16.27	18.16	17.09	17.78	32.40	33.49	17.66
Rb	223.20	237.40	189.30	235.70	260.60	316.90	431.90	521.40	290.20
S	11850.00	59250.00	17100.00	0.00	10140.00	15730.00	0.00	0.00	18160.00
Sb	0.90	0.94	0.37	0.39	0.97	0.77	5.14	5.32	2.14
Sc	2.44	1.94	2.04	3.45	2.56	2.42	1.79	3.03	1.39
Se	5.56	5.37	3.96	9.30	3.27	8.67	0.64	0.00	1.59
Sm	14.08	13.10	11.71	11.63	11.66	11.00	11.62	11.23	5.77
Sr	444.60	490.70	370.20	462.20	367.80	445.60	416.10	509.60	239.40
Ta	0.17	0.10	0.12	0.06	0.28	0.13	0.22	0.05	0.17
Tb	3.88	3.78	3.10	3.21	3.33	3.81	2.54	2.52	1.17
Th	53.33	68.88	39.28	43.14	44.24	46.83	50.61	53.28	29.08
Ti	1448.00	1630.00	1445.00	1745.00	1967.00	2128.00	2012.00	2382.00	2177.00
Tm	2.24	2.30	1.73	1.71	1.74	1.89	1.38	1.79	0.64
U	1469.00	2416.00	765.10	897.10	849.00	1006.00	1472.00	2092.00	1077.00
V	246.00	294.00	199.50	252.70	295.20	330.60	357.60	385.90	331.10
W	3.40	3.19	2.27	1.22	3.08	2.66	4.52	4.14	2.35
Y	171.10	183.90	125.10	144.80	143.60	161.00	112.40	121.70	52.22
Yb	12.78	15.69	10.54	9.84	10.58	10.98	7.67	9.35	4.01
Zn	99.69	135.80	61.42	49.60	100.10	145.80	413.70	570.20	428.70
Zr	1109.00	1034.00	1013.00	1166.00	1201.00	1201.00	1813.00	1791.00	807.70

Tabela I-7B: Continuação.

AMOSTRA	PH-028-4	PH-028-5	PH-028-5	PH-028-1	PH-028-1	PH-028-2	PH-028-2	U3c-4
Fd	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000
ppm\tipo	fr.oxi	fr.oxi	fr.oxi	oxi	oxi	oxi	oxi	fr.oxi
As	8.33	14.62	16.21	23.84	24.49	10.73	17.55	3.78
Ba	664.60	497.60	624.20	700.00	892.00	518.40	718.60	303.20
Be	0.00	1.27	0.00	2.89	2.63	2.24	4.52	3.00
Bi	0.12	0.08	0.05	0.03	0.08	0.03	0.00	0.11
Ca	160.20	270.90	140.80	384.70	656.70	70.75	0.00	524.30
Cd	2.58	2.88	2.66	1.66	1.46	2.41	2.21	2.07
Ce	233.90	382.60	434.40	361.70	385.10	125.00	147.50	60.55
Co	6.70	9.03	9.18	2.19	2.58	1.71	2.31	4568.00
Cr	7.44	13.26	15.07	28.37	42.35	42.79	30.81	18.17
Cs	0.31	0.36	0.27	0.35	0.41	0.32	0.31	0.26
Cu	9.89	7.38	6.94	5.14	6.81	122.60	195.20	6.03
Dy	7.34	12.61	13.33	7.25	7.77	7.01	8.04	2.80
Er	6.00	8.89	10.01	4.75	5.41	5.37	5.93	2.45
Eu	2.23	4.08	4.09	2.80	2.46	2.27	2.14	0.52
Fe	49090.00	47230.00	58980.00	28350.00	34920.00	28650.00	45470.00	8026.00
Ga	72.52	26.17	28.39	43.89	53.51	43.84	60.38	36.76
Gd	8.20	17.07	15.67	12.82	11.18	9.83	8.77	2.20
Ge	1.27	3.85	1.68	2.19	2.08	3.17	2.09	1.15
Hf	10.30	19.28	14.46	14.71	10.96	17.75	15.64	2.66
Ho	1.59	2.94	3.05	1.56	1.73	1.70	1.73	0.70
La	185.70	264.70	307.30	266.30	283.10	99.75	122.50	58.18
Li	114.20	23.88	0.00	67.43	49.65	69.98	270.90	24.73
Lu	0.65	1.21	1.58	0.56	0.68	0.73	0.63	0.36
Mg	683.20	151.40	177.90	260.90	461.20	357.10	570.70	186.10
Mn	88.90	96.46	100.90	48.35	54.49	54.63	81.59	23.49
Mo	218.00	254.90	274.10	182.00	201.30	180.40	214.30	62.90
Nb	17.84	50.02	27.50	13.00	13.65	18.79	27.86	11.28
Nd	48.28	91.36	85.04	76.54	79.69	32.88	37.53	11.10
Ni	50.57	15.11	17.92	342.20	417.40	38.93	47.07	3.70
Pb	34.94	152.40	190.60	89.53	84.48	33.54	35.82	50.11
Pd	1.96	6.60	5.09	3.38	3.12	5.99	3.51	1.37
Pr	19.16	36.69	40.83	32.54	33.52	11.71	13.56	5.03
Rb	291.50	234.00	229.00	274.30	290.50	242.60	332.90	206.60
S	0.00	11310.00	0.00	1583.00	99570.00	20910.00	0.00	11900.00
Sb	1.90	2.98	2.65	3.32	2.99	2.28	3.30	0.72
Sc	0.00	2.07	0.46	1.39	2.43	1.47	3.55	0.31
Se	0.00	1.75	5.84	1.13	0.00	1.32	1.08	1.06
Sm	5.85	11.84	12.36	7.59	7.11	5.97	5.08	1.06
Sr	239.20	257.50	263.50	310.40	332.80	210.80	282.10	339.10
Ta	0.07	0.88	0.32	0.08	0.10	0.09	0.06	0.03
Tb	1.12	2.32	2.26	1.50	1.31	1.28	1.17	0.39
Th	35.53	59.93	69.02	25.28	28.64	21.20	24.10	42.16
Ti	2274.00	2552.00	2672.00	809.50	973.80	3136.00	4142.00	602.40
Tm	0.66	1.45	1.60	0.65	0.62	0.84	0.86	0.37
U	1655.00	1608.00	2743.00	278.90	360.60	436.70	395.10	392.00
V	363.70	132.60	144.90	178.60	221.70	263.70	327.00	112.30
W	2.48	6.08	4.70	2.24	1.15	2.49	1.85	15.54
Y	57.25	105.60	113.60	55.50	60.00	53.67	70.86	21.69
Yb	4.79	8.16	8.74	3.97	3.92	5.48	4.94	2.44
Zn	523.70	327.60	392.10	157.40	200.60	245.40	360.60	54.59
Zr	784.60	1281.00	1158.00	1030.00	987.60	1034.00	1263.00	103.00

Tabela I-7B: Continuação.

AMOSTRA	U3c-4	U3c-5	U3c-5	U3c-6	U3c-6	SN/15-1	SN/15-1	SN/15-2	SN/15-2
Fd	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000
ppm\tipo	fr.oxi	fr.oxi	fr.oxi	fr.oxi	fr.oxi	oxi	oxi	oxi	oxi
As	4.81	5.18	3.02	3.23	5.70	15.97	24.61	12.66	25.87
Ba	399.70	380.80	507.50	387.10	479.10	539.40	793.60	522.80	792.60
Be	2.64	5.01	4.65	3.56	10.21	2.26	5.78	1.42	6.77
Bi	0.00	0.07	0.15	0.14	0.23	0.53	0.64	0.26	0.05
Ca	403.70	316.80	98.89	24.92	0.00	1293.00	1161.00	333.40	0.00
Cd	1.74	2.43	2.25	9.79	10.61	1.72	2.19	1.43	1.36
Ce	62.06	70.05	77.06	82.35	90.76	73.81	90.45	77.42	96.04
Co	0.96	0.90	1.29	1.88	2.87	0.54	1.04	0.44	0.00
Cr	23.00	28.39	21.32	30.61	38.64	32.60	48.75	13.22	60.89
Cs	0.37	0.25	0.28	0.17	0.22	0.29	0.29	0.28	0.32
Cu	9.22	9.57	18.04	16.36	24.61	10.24	12.41	5.94	7.45
Dy	3.08	4.86	6.39	4.44	5.55	3.11	3.48	3.01	4.12
Er	2.75	4.05	4.55	3.58	3.72	1.79	1.91	1.92	2.17
Eu	0.61	0.79	0.77	0.85	1.23	0.80	0.80	0.66	0.87
Fe	9892.00	11540.00	13810.00	14230.00	22920.00	4309.00	6589.00	20430.00	34900.00
Ga	41.30	44.76	51.27	76.59	108.60	36.98	52.28	41.25	61.20
Gd	3.22	3.02	2.77	4.17	3.21	3.49	2.75	3.43	3.60
Ge	1.63	1.03	2.76	1.34	0.00	1.01	1.48	2056.00	3.64
Hf	3.13	5.49	4.13	4.72	3.42	1.81	1.58	1.28	0.90
Ho	0.56	1.31	1.56	1.02	1.29	0.68	0.66	0.71	1.03
La	63.25	62.80	73.63	59.06	70.16	42.62	90.37	76.80	96.15
Li	138.40	38.31	0.00	70.52	126.40	35.12	146.70	35.59	145.20
Lu	0.43	0.74	0.88	0.64	0.56	0.28	0.34	0.28	0.26
Mg	277.20	191.70	232.20	151.00	205.70	360.20	466.90	199.10	243.50
Mn	33.71	52.02	57.85	97.30	136.10	28.50	34.11	27.03	33.27
Mo	63.68	13.65	14.99	8.65	7.53	10.96	13.33	22.23	26.89
Nb	12.56	16.84	17.00	16.99	20.81	15.60	21.46	14.71	18.97
Nd	10.27	13.10	14.56	16.91	21.80	11.54	15.86	12.29	14.54
Ni	5.59	6.81	10.80	13.16	15.68	41.86	54.82	22.86	32.03
Pb	48.06	39.99	48.48	168.20	185.40	23.39	22.15	37.33	38.08
Pd	1.29	2.77	2.27	2.36	2.11	1.97	0.20	2.23	1.80
Pr	4.97	6.15	6.70	8.36	9.22	5.62	7.19	5.88	7.41
Rb	258.50	224.30	242.80	169.10	228.20	229.40	301.00	239.20	324.40
S	7603.00	9382.00	0.00	7155.00	0.00	12200.00	46930.00	15480.00	0.00
Sb	0.80	0.34	0.23	0.63	0.77	0.40	0.42	0.33	0.27
Sc	0.25	0.87	0.00	0.65	2.90	0.28	0.73	0.59	2.67
Se	4.59	1.31	0.00	1.90	4.56	0.77	0.00	3.24	21.08
Sm	1.11	1.51	1.43	1.96	2.50	1.23	1.53	1.13	0.97
Sr	432.50	328.60	374.90	106.50	135.70	267.30	365.40	292.10	391.80
Ta	0.02	0.12	0.01	0.05	0.04	0.15	1.08	0.05	0.00
Tb	0.44	0.62	0.50	0.75	0.78	0.50	0.57	0.53	0.52
Th	41.64	44.35	57.44	36.57	42.54	26.21	32.50	74.78	83.04
Ti	656.00	1357.00	1468.00	1022.00	1330.00	1096.00	1476.00	987.20	1250.00
Tm	0.43	0.70	0.79	0.59	0.50	0.30	0.53	0.28	0.21
U	412.20	492.80	662.30	2076.00	3180.00	262.60	280.70	360.20	346.10
V	126.40	153.10	167.00	235.70	317.10	194.60	242.40	226.50	286.50
W	15.44	29.85	30.20	75.01	69.16	3.84	4.19	3.64	4.11
Y	26.42	44.90	47.05	29.99	36.11	19.65	26.19	20.49	26.92
Yb	2.92	4.84	5.37	4.14	4.82	1.89	1.78	1.61	2.13
Zn	49.74	86.69	142.30	89.47	102.70	66.86	42.66	95.86	101.90
Zr	98.21	254.70	210.20	180.10	166.80	61.70	71.42	54.28	63.76

Tabela I-7B: Continuação.

AMOSTRA	SN/15-3	SN/15-3	SN/15-4	SN/15-4	SN/15-5	SN/15-5	04/02-3	04/02-3	04/02-1
Fd	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000	5000
ppm\tipo	fr.oxi	fr.oxi	oxi	oxi	oxi	oxi	fr.oxi	fr.oxi	oxi
As	5.30	10.26	7.10	0.43	2.75	8.41	83.44	90.77	51.96
Ba	428.60	634.30	430.80	619.30	471.20	605.60	501.30	619.30	476.70
Be	2.03	3.31	2.34	6.06	0.58	1.84	5.28	6.34	7.83
Bi	0.21	0.30	0.07	0.19	0.07	0.06	0.16	0.09	0.07
Ca	74.23	0.00	225.60	0.00	82.11	0.00	497.50	407.80	785.70
Cd	1.22	0.93	1.83	2.80	0.96	1.05	8.26	9.64	7.20
Ce	66.69	82.06	88.49	94.47	52.55	61.82	268.70	359.30	209.80
Co	0.34	0.64	0.70	0.58	0.46	0.51	2.87	3.43	2.32
Cr	23.67	0.00	12.94	8.01	14.51	0.00	21.10	26.22	3.72
Cs	0.21	0.27	0.28	0.34	0.22	0.22	0.26	0.37	0.30
Cu	1.76	2.04	1.55	3.24	2.16	1.28	4.36	9.62	38.45
Dy	4.27	4.77	2.96	2.91	5.99	6.62	106.60	118.60	12.53
Er	0.72	3.17	1.77	2.10	4.37	4.84	66.60	76.56	7.85
Eu	0.75	0.51	0.72	0.74	0.75	0.80	6.20	7.10	1.82
Fe	18270.00	30830.00	32420.00	39020.00	6594.00	10110.00	17570.00	21210.00	18850.00
Ga	26.38	38.87	34.51	39.34	11.91	17.04	42.24	51.01	83.31
Gd	3.22	2.69	3.07	3.01	3.03	2.80	30.97	32.92	8.72
Ge	1.93	6.46	1.69	0.43	1.01	0.66	1.93	1.12	2.49
Hf	2.05	2.99	1.53	1.07	4.99	6.03	23.35	22.57	10.43
Ho	0.94	1.05	0.60	0.78	1.53	1.65	24.41	26.90	2.66
La	71.85	93.60	84.23	93.57	49.17	61.51	220.90	288.10	180.50
Li	17.82	56.13	23.95	0.00	13.79	87.05	41.93	0.00	88.60
Lu	0.34	0.38	0.24	0.28	0.69	0.74	9.28	11.44	0.96
Mg	54.71	26.32	122.20	171.10	57.45	16.56	203.30	306.60	450.00
Mn	12.30	17.09	19.35	23.20	15.71	18.31	105.50	134.90	147.60
Mo	22.68	28.70	0.02	52.01	12.48	14.34	848.40	1032.00	538.20
Nb	19.06	24.93	13.13	14.02	18.29	25.56	15.09	18.70	52.65
Nd	9.45	13.10	14.81	15.30	8.21	9.49	58.38	68.81	37.78
Ni	16.31	21.29	7.17	10.08	14.14	16.73	457.30	592.70	20.24
Pb	38.76	39.59	33.31	37.57	15.44	10.96	44.80	46.52	44.35
Pd	3.46	2.33	0.00	1.05	4.13	1.90	55.70	37.25	6.13
Pr	4.72	5.78	7.16	7.40	3.95	4.76	22.17	28.62	17.41
Rb	203.70	289.30	230.90	232.70	203.10	270.50	197.20	237.70	246.40
S	19110.00	0.00	5990.00	0.00	10420.00	3167.00	7862.00	0.00	15200.00
Sb	0.31	0.67	0.36	0.61	0.16	0.24	0.61	0.35	8225.00
Sc	0.58	1.41	0.70	0.00	0.95	1.61	9.52	10.05	1.68
Se	5.22	9.99	2.67	0.00	1.03	3.08	10.00	4.14	4.47
Sm	1.10	1.48	1.50	0.93	1.32	1.37	13.83	15.28	4.33
Sr	351.20	518.40	274.30	288.10	198.90	267.10	969.50	1265.00	861.60
Ta	0.12	0.13	0.11	0.03	0.06	0.44	0.34	0.34	0.74
Tb	0.64	0.76	0.50	0.52	0.68	0.69	12.10	13.25	1.80
Th	75.96	91.88	75.38	82.04	70.58	74.97	237.20	275.60	53.24
Ti	1753.00	2259.00	996.60	1076.00	1125.00	1427.00	2623.00	29.31	3587.00
Tm	0.42	0.46	0.26	0.28	0.73	0.73	9.17	11.52	1.10
U	262.80	311.00	315.80	378.90	156.40	149.90	899.70	1119.00	439.70
V	147.40	185.90	153.40	161.10	40.36	48.43	244.10	292.40	425.90
W	3.57	4.16	3.16	3.26	3.16	2.87	5.80	6.03	6.01
Y	29.80	41.79	22.01	20.80	41.29	52.20	593.30	774.40	95.53
Yb	2.73	2.22	1.61	1.72	4.41	4.27	57.78	73.95	5.90
Zn	93.11	83.85	150.70	187.80	31.76	9.09	157.00	230.20	157.50
Zr	81.58	91.98	61.58	50.14	199.70	214.50	1741.00	2156.00	476.50

Tabela I-7B: Continuação.

AMOSTRA	04/02-1	04/02-2	04/02-2	M2b-5	M2b-5	M2b-6	M2b-6
Fd	50000	5000	50000	5000	50000	5000	50000
ppm/ltipo	oxi	oxi	oxi	fr.oxi	fr.oxi	oxi	oxi
As	54.42	6.81	9.08	111.00	164.50	68.03	71.25
Ba	634.40	486.40	678.90	1845.00	3483.00	996.80	1327.00
Be	10.77	1.81	6.01	8.79	11.47	4.68	4.52
Bi	0.09	0.04	0.02	0.14	0.14	0.09	0.28
Ca	524.30	117.80	0.00	263.90	0.00	376.20	400.70
Cd	6.72	1.98	1.08	4.03	3.01	3.58	3.64
Ce	252.40	138.90	167.00	104.60	128.40	109.00	125.00
Co	2.54	6.46	8.76	13.58	20.98	1.04	1.18
Cr	5.63	28.96	5.33	43.41	17.14	9.60	21.38
Cs	0.30	0.48	0.48	0.24	0.20	0.26	0.23
Cu	46.09	1.65	1.65	22.45	32.18	3.48	10.65
Dy	14.28	18.99	20.51	44.60	51.65	33.04	38.79
Er	8.00	11.78	11.75	31.60	35.19	26.55	27.06
Eu	1.67	5.17	5.14	5.48	6.54	3.63	3.73
Fe	21720.00	15350.00	23680.00	21920.00	35850.00	13940.00	14920.00
Ga	88.65	35.28	51.05	26.88	38.66	71.41	80.52
Gd	8.22	18.63	16.38	14.98	17.34	11.98	10.33
Ge	2.50	2.37	1.83	2.50	0.94	1.27	0.00
Hf	9.67	18.54	15.02	17.67	16.97	31.23	25.73
Ho	3.26	4.30	4.47	11.11	12.93	8.53	9.38
La	209.40	160.60	207.90	45.40	59.12	87.43	98.25
Li	67.27	72.75	218.40	29.82	123.40	41.71	68.18
Lu	1.34	1.62	1.46	4.87	5.48	4.12	4.68
Mg	504.10	331.00	488.90	170.20	228.60	457.30	633.70
Mn	154.40	26.50	51.98	42.80	65.28	32.06	33.38
Mo	596.40	80.73	93.56	778.90	1050.00	647.60	684.30
Nb	33.18	7.85	10.98	8.26	12.41	26.57	22.63
Nd	43.55	41.93	57.11	23.25	31.84	25.56	28.77
Ni	22.75	2.66	0.64	8.77	10.28	4.22	6.68
Pb	56.23	17.63	12.88	22.42	16.36	37.37	45.27
Pd	4.49	16.05	6.79	33.07	19.47	15.22	13.70
Pr	19.86	16.27	18.16	7.16	8.57	9.31	10.18
Rb	270.20	189.30	235.70	199.60	271.00	201.40	218.40
S	0.00	17100.00	0.00	19370.00	0.00	10200.00	45250.00
Sb	0.57	0.37	0.39	0.86	0.79	1.19	0.97
Sc	0.94	2.04	3.45	8.01	13.07	6.32	6.41
Se	2.11	3.96	9.30	3.49	10.48	2.31	8.54
Sm	4.42	11.71	11.63	8.96	9.83	7.25	7.93
Sr	1029.00	370.20	462.20	128.90	172.80	591.30	636.50
Ta	0.34	0.12	0.06	0.22	0.19	0.32	0.04
Tb	1.98	3.10	3.21	5.23	5.64	3.74	3.41
Th	64.49	39.28	43.14	122.60	139.10	128.50	140.00
Ti	3840.00	1445.00	1745.00	3864.00	5533.00	2928.00	3233.00
Tm	1.18	1.73	1.71	5.06	5.74	4.29	4.51
U	547.50	765.10	897.10	405.10	411.30	265.70	286.50
V	476.10	199.50	252.70	242.60	312.20	504.00	598.00
W	6.11	2.27	1.22	5.11	5.12	7.29	6.18
Y	105.80	125.10	144.80	304.70	453.70	266.20	288.90
Yb	7.07	10.54	9.84	32.18	35.35	26.64	26.72
Zn	180.70	61.42	49.60	46.53	31.90	30.24	114.70
Zr	439.60	1013.00	1166.00	1252.00	1838.00	1669.00	1690.00

Tabela I-8: Reanálise via ICP-MS e AES* de amostras maiores das **frentes redox** dos microperfis.

Amostra	iarf4	iarf3	iarf2	iarf1	iarf5	iarf7	iarf6	m2b2
Fd	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
ppm tipo	red	red	oxi-OHF	oxi	oxi	oxi	oxi-OHF	red
Al*	65000.00	108000.00	106000.00	116000.00	82000.00	112000.00	96000.00	136000.00
As	38.27	37.28	34.65	32.98	25.69	21.63	52.58	90.53
Ba	749.80	799.20	744.50	667.80	515.10	662.80	601.80	1198.00
Bi	0.50	0.85	0.00	0.26	0.28	0.35	0.62	0.29
Ca	624.00	617.50	488.90	485.80	334.20	508.40	455.70	424.20
Ca*	184.00	187.00	213.00	109.00	113.00	133.00	134.00	100.00
Cd	3.83	1.05	7.79	1.77	6.25	0.91	2.20	7.97
Ce	339.80	395.90	315.80	181.20	134.20	233.90	85.47	119.50
Co	1.07	1.41	0.41	0.61	0.62	0.32	0.13	0.79
Cr	1.38	0.57	0.00	1.38	0.11	1.04	1.29	0.00
Cs	0.78	0.81	0.68	0.50	0.63	0.46	0.92	0.38
Cu	1.66	2.78	1.01	2.92	1.08	9.81	3.45	4.08
Dy	15.57	21.95	23.11	14.80	14.01	12.90	10.82	9.46
Er	9.61	13.03	15.18	10.05	12.31	7.15	7.74	7.53
Eu	5.25	6.26	3.15	2.99	2.09	3.31	1.75	1.44
Fe*	20000.00	23000.00	64000.00	30000.00	18000.00	15000.00	122000.00	20000.00
Ga	54.29	47.61	42.09	54.46	40.51	46.49	45.65	67.08
Gd	19.87	23.38	15.06	12.60	8.39	14.96	7.80	5.39
Ge	3.40	3.62	6.24	3.67	2.23	4.54	9.15	3.15
Hf	36.06	16.55	56.05	21.45	50.60	13.74	13.07	16.96
Ho	3.47	4.27	5.21	3.33	3.97	2.64	2.51	2.28
La	313.90	341.10	345.40	166.50	138.10	188.60	94.90	99.09
Lu	1.01	1.44	2.12	1.33	1.94	0.87	1.04	0.94
Mg*	116.00	118.00	173.00	292.00	188.00	167.00	224.00	259.00
Mn	40.78	36.60	42.61	60.85	84.14	49.35	70.76	18.74
Mn*	35.00	33.00	47.00	51.00	69.00	42.00	69.00	19.00
Mo	355.30	204.10	418.20	176.20	217.20	129.60	356.60	116.20
Nb	244.60	241.40	271.00	230.00	217.40	259.70	195.90	162.20
Nd	72.04	75.45	39.21	35.33	20.66	48.68	21.73	20.45
Ni	0.55	0.23	0.95	0.00	0.41	2.10	0.00	1.79
Pb	57.18	65.51	51.34	33.80	28.61	24.57	41.38	29.61
Pd	4.87	5.69	7.48	3.26	5.92	3.16	2.12	3.63
Pr	29.51	32.29	18.52	14.68	8.60	19.35	7.64	7.19
Pt	0.52	0.16	0.81	0.36	0.45	0.21	0.13	0.31
Rb	281.00	251.20	243.90	292.30	268.00	258.20	243.50	348.00
S	85120.00	112500.00	0.00	9585.00	0.00	0.00	0.00	10230.00
Sb	2.41	2.15	3.99	2.03	2.22	0.95	1.60	1.10
Se	5.89	3.57	2.20	6.47	6.03	7.90	5.52	0.53
Sm	15.11	16.26	7.47	6.88	4.97	8.49	4.41	3.63
Sr	1178.00	1471.00	1546.00	711.40	513.10	599.10	521.10	714.00
Ta	3.22	5.22	4.48	9.07	3.38	4.92	5.27	3.52
Tb	2.45	3.46	2.77	2.05	1.79	2.11	1.38	1.01
Th	106.60	76.47	151.80	63.90	77.13	46.81	43.22	53.14

Tabela I-8: Continuação.

Amostra	m2b1	m2b3	m2b4	m2c4	m2c2	m2c1	m2c3	sn/15-1
Fd	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
ppm/tipo	red	z.brca	oxi	red	red	oxi	oxi	red
Al*	114000.00	108000.00	118000.00	124000.00	114000.00	118000.00	113000.00	96000.00
As	55.49	23.63	185.10	17.73	15.09	14.13	12.80	4.07
Ba	1054.00	1085.00	2544.00	1039.00	793.10	811.60	864.20	603.90
Bi	0.35	0.18	0.92	0.31	0.80	0.31	0.30	0.00
Ca	536.10	559.40	744.10	481.70	542.80	345.50	421.60	295.40
Ca*	76.00	16.00	132.00	132.00	103.00	108.00	144.00	47.00
Cd	9.15	0.98	3.00	2.93	5.80	2.87	1.84	1.17
Ce	71.78	216.70	162.30	547.40	130.00	121.80	92.57	77.60
Co	0.51	0.89	0.63	0.70	0.90	1.86	1.09	1.09
Cr	0.00	8.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cs	0.38	0.29	0.32	0.56	0.73	0.62	0.74	0.36
Cu	8.84	19.06	2.92	5.74	3.04	0.02	23.51	1.97
Dy	11.97	10.81	15.08	19.36	9.89	11.17	14.11	4.32
Er	9.89	8.04	11.33	9.46	6.64	7.31	8.64	2.79
Eu	1.16	2.07	2.50	7.73	2.43	2.77	3.37	0.57
Fe*	15000.00	8200.00	22000.00	17000.00	19000.00	18000.00	21000.00	4200.00
Ga	54.95	44.23	46.53	446.20	50.68	49.85	43.34	27.83
Gd	5.30	8.04	8.27	30.65	8.96	10.49	11.65	2.66
Ge	2.79	1.63	3.27	2.49	3.51	2.60	2.81	1.64
Hf	22.80	16.65	18.61	16.70	16.04	17.58	18.77	2.69
Ho	3.36	2.90	3.74	3.80	2.22	2.71	3.17	1.01
La	67.63	163.80	142.00	389.80	124.90	148.30	132.80	91.89
Lu	1.35	1.10	1.56	1.14	0.91	0.91	0.99	0.33
Mg*	0.25	196.00	236.00	230.00	247.00	312.00	378.00	27.00
Mn	20.11	30.45	22.78	32.43	73.50	46.44	56.96	11.04
Mn*	19.00	29.00	22.00	30.00	59.00	44.00	51.00	11.00
Mo	61.21	92.94	892.90	191.60	109.40	155.10	126.80	7.73
Nb	105.50	163.20	199.20	183.30	170.60	174.60	1610.00	231.30
Nd	13.39	33.00	28.59	126.40	28.13	31.34	28.83	10.23
Ni	1.94	9.73	1.74	2.15	1.41	1.49	2.89	4.19
Pb	14.46	24.07	39.16	73.46	37.08	22.08	20.65	34.53
Pd	4.74	4.28	5.23	4.86	3.23	4.01	5.67	1.31
Pr	4.97	14.52	11.03	50.96	9.45	10.73	10.12	4.94
Pt	0.30	0.34	0.14	0.12	0.11	0.20	0.21	0.37
Rb	309.30	277.80	304.10	331.80	296.30	304.70	285.90	273.30
S	76140.00	11370.00	25500.00	64660.00	94010.00	0.00	21440.00	12940.00
Sb	1.24	1.87	2.93	6.79	0.89	1.24	1.13	0.50
Se	0.00	0.00	3.49	11.92	3.18	0.00	6.74	0.00
Sm	3.41	5.59	6.12	19.73	5.74	7.01	8.02	1.43
Sr	500.10	699.80	791.30	524.30	456.50	457.40	398.30	558.80
Ta	5.25	4.39	3.90	3.36	3.27	3.38	3.24	3.78
Tb	1.31	1.37	1.67	3.65	1.38	1.80	2.08	0.57
Th	50.30	59.73	92.50	59.46	34.59	37.51	39.56	22.49
Ti	1630.00	2292.00	2468.00	2613.00	2552.00	2442.00	2520.00	1716.00
Ti*	1600.00	2600.00	2500.00	2600.00	2500.00	2500.00	2600.00	1700.00
Tm	1.48	1.25	1.59	1.28	0.94	1.10	1.18	0.40
U	94.42	70.57	107.60	1532.00	1358.00	1102.00	691.30	150.70
V	498.60	383.90	413.20	257.00	305.30	335.00	304.80	153.00
W	7.80	55.00	14.74	14.24	13.86	10.42	10.52	12.31
Y	122.40	109.00	147.70	133.30	89.45	100.00	121.20	34.60
Yb	9.51	7.46	10.29	7.31	5.70	6.21	7.12	2.23
Zn	96.60	45.29	80.76	172.90	50.29	70.22	82.79	218.30
Zr	1697.00	1115.00	1396.00	1376.00	1264.00	1155.00	1496.00	172.70

Tabela I-8 : Continuação.

Amostra	sn/15-3	sn/15-2	028-4	028-3	028-2	028-1
Fd	10000	10000	10000	10000	10000	10000
ppm\tipo	red	oxi	red	red	oxi-OHF	oxi
Al*	110000.00	111000.00	100000.00	115000.00	112000.00	119000.00
As	12.04	6.35	20.96	32.95	8.19	25.37
Ba	540.80	482.50	582.80	608.70	333.30	677.20
Bi	0.03	0.00	1.11	0.00	0.00	0.00
Ca	160.10	195.50	402.50	562.80	0.00	486.10
Ca*	43.00	36.00	106.00	90.00	100.00	150.00
Cd	1.97	1.88	12.36	1.76	1.25	2.74
Ce	69.02	71.19	546.60	473.20	319.30	331.00
Co	1.91	0.59	4.02	2.69	2.29	1.42
Cr	1.45	2.16	0.27	0.28	0.00	2.26
Cs	0.34	0.40	0.42	0.42	0.22	0.52
Cu	3.45	0.21	2.15	15.16	53.24	4.30
Dy	2.99	3.71	9.82	5.56	7.29	6.62
Er	2.14	1.99	6.62	3.46	5.09	4.77
Eu	0.52	0.50	4.41	2.51	2.42	2.23
Fe*	23000.00	19000.00	20000.00	14000.00	30000.00	23000.00
Ga	37.74	42.73	40.02	59.70	24.48	55.79
Gd	2.34	2.37	22.41	15.04	12.83	10.64
Ge	2.90	2.21	4.21	3.99	1.63	3.45
Hf	2.72	2.77	16.62	10.67	19.36	19.76
Ho	0.73	0.67	2.16	1.22	1.52	1.61
La	68.02	70.79	384.70	324.50	219.20	224.90
Lu	0.30	0.33	0.78	0.39	0.71	0.66
Mg*	99.00	100.00	286.00	360.00	339.00	391.00
Mn	18.86	21.24	56.51	59.95	35.07	56.65
Mn*	19.00	20.00	43.00	42.00	63.00	48.00
Mo	19.77	23.44	119.90	19.28	67.97	105.50
Nb	323.90	162.90	219.10	100.80	88.27	164.60
Nd	9.73	10.45	123.60	103.70	42.47	54.57
Ni	3.70	1.43	3.27	3335.00	1.27	2.90
Pb	43.32	21.98	390.60	33.80	15.47	40.50
Pd	1.20	0.52	3.07	1.74	0.93	2.01
Pr	4.41	4.62	51.28	41.95	16.73	23.26
Pt	0.09	0.13	0.19	0.15	0.01	0.27
Rb	273.10	274.90	283.80	359.10	163.80	368.70
S	8.48	15160.00	105000.00	68840.00	0.00	6887.00
Sb	0.63	0.42	0.98	1.32	1.47	2.75
Se	0.00	3.29	4.79	2.76	0.00	0.00
Sm	1.28	1.22	30.88	10.99	7.86	7.41
Sr	278.20	264.70	220.10	279.90	130.60	357.10
Ta	6.50	3.59	4.29	2.56	4.68	4.69
Tb	0.43	0.39	1.89	1.17	1.32	1.23
Th	70.90	56.69	54.03	29.39	16.80	42.67
Ti	2787.00	1823.00	2792.00	2158.00	1570.00	2450.00
Ti*	2800.00	1900.00	2800.00	2000.00	3200.00	2300.00
Tm	0.31	0.35	0.90	0.44	0.74	0.72
U	265.70	234.30	1152.00	258.00	327.70	206.50
V	235.00	252.90	243.40	328.10	149.50	342.30
W	13.72	8.40	7.11	3.91	3.43	5.79
Y	26.03	25.39	88.46	453.90	29.25	66.27
Yb	1.97	1.97	5.12	2.55	4.57	4.29
Zn	112.40	345.50	568.10	85.42	139.30	191.10
Zr	168.20	177.50	1505.00	1081.00	730.90	1991.00

ANEXO II

TABELA II-1: LISTAGEM DAS AMOSTRAS

*: Schumann, 1994; **: Schorsch e Shea, 1992, ***: Waber et al., 1992

Legenda: Ph-fonolito; NeS-nefelina sienito; Br-brecha; FRX- fluorescência de raios X; MSO- microsonda eletrônica; ICP-AES- espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplado; ICP-MS- espectrometria de massa com fonte de plasma indutivamente acoplado; ESOHF- extração seletiva de óxi-hidróxidos de ferro; MEV- microscopia eletrônica de varredura

Nº da Amostra	Localização	Descrição	Análises
A1M	mina Osamu Utsumi	Ph com hidrotermalismo incipiente	FRX, MSO
A1HH	mina Osamu Utsumi	Ph não hidrotermalizado	FRX, MSO
A1HT	mina Osamu Utsumi	Ph não hidrotermalizado	FRX, MSO
A1S	mina Osamu Utsumi	Ph com hidrotermalismo incipiente e veio sulf.	FRX, MSO
A2	mina Osamu Utsumi	Ph com hidrotermalismo inicial incipiente	MSO
A4B	mina Osamu Utsumi	Ph não hidrotermalizado	FRX, ICP-AES, MSO
A5	mina Osamu Utsumi	Ph não hidrotermalizado	FRX, ICP-AES, MSO
A6	mina Osamu Utsumi	Ph pouco hidrotermalizado	FRX, MSO
A10BH	mina Osamu Utsumi	Ph não hidrotermalizado	FRX, ICP-AES, MSO
A10BT	mina Osamu Utsumi	Ph não hidrotermalizado	FRX, MSO
A11N	mina Osamu Utsumi	Ph Intemperizado	FRX, ICP-AES, MSO
IARF	mina Osamu Utsumi	Frente redox	FRX, ICP-MS, ICP-AES, ESOHF
M2b	mina Osamu Utsumi	Frente redox	FRX, ICP-MS, ICP-AES, ESOHF
M2c	mina Osamu Utsumi	Frente redox	FRX, ICP-MS, ICP-AES, ESOHF
PDC-PH-028	mina Osamu Utsumi	Frente redox	FRX, ICP-MS, ICP-AES, ESOHF
SN/15	mina Osamu Utsumi	Frente redox	ICP-MS
U3c	mina Osamu Utsumi	Frente redox	ICP-MS
04/02	mina Osamu Utsumi	Frente redox	ICP-MS, IsoS
IRF	mina Osamu Utsumi	Frente redox	FRX, ICP-MS, ICP-AES, ESOHF
VIII	mina Osamu Utsumi	Frente redox	FRX, ICP-MS, ICP-AES, ESOHF
RF III	mina Osamu Utsumi	Frente redox	FRX
RF IV	mina Osamu Utsumi	Frente redox	FRX
SN/24-1	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
SN/24-2	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
SN/24-3	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
SN/24-4	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
SN/24-5	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
KU-3-1	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
KU-3-2	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
KU-6-1	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
KU-6-1.1	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
KU-6-1.2	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
VII-1.1	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
VII-1.2	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
VII-2	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
VII-3	mina Osamu Utsumi	Nódulo maciço de U	IsoS
M-1	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido com mineralização de Mo	IsoS
U-1A	mina Osamu Utsumi	Br reduzida	IsoS
U-4A	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido com mineralização de Mo	IsoS
U-4-B	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	IsoS
U-4-D	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	IsoS
U-7E	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido em frente redox com min. U	IsoS
U7-G	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido em frente redox com min. U	IsoS
OUM-102	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	IsoS
44a/9*	Barreira (CBA) - ba, fig. 2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
51/13*	Campo dos Bezerras (Togni S/A) -cb, fig. 2	NeS regional não-hidrotermalizado	FRX
55/15*	Campo do Leme (Min. Curimbaba) - cl, fig.2	NeS regional não-hidrotermalizado	FRX
56/16*	Campo do Leme (Min. Curimbaba) - cl, fig.2	NeS regional não-hidrotermalizado	FRX
61/18*	Barro Preto (Min. Curimbaba) - bp, fig. 2	NeS regional não-hidrotermalizado	FRX
61/20b*	Barro Preto (Min. Curimbaba) - bp, fig. 2	NeS regional não-hidrotermalizado	FRX
66/22*	Quilinos (Min. Curimbaba) - q, fig.2	NeS regional não-hidrotermalizado	FRX
70a/24*	Gebera (Min. Curimbaba) - g, fig.2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
71a/25*	Barreira (CBA) - ba, fig.2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
72a/27*	Barreira (CBA) - ba, fig.2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
74/28*	Barreira (CBA) - ba, fig.2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
84a/30*	Santa Rosália (Alcoa) - sr, fig.2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
99/33*	Picada (CBA) - p, fig.2	NeS regional não-hidrotermalizado	FRX
126a/38*	Barreira (CBA) - ba, fig.2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
127V/40*	Picada Maranhão (CBA) - pm, fig.2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
ph02a**	ver Figura 2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
ph02b**	ver Figura 2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
ph03**	ver Figura 2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
ph05**	ver Figura 2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
ph08**	ver Figura 2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
ph09b**	ver Figura 2	Ph regional não- hidrotermalizado	FRX
NS-1**	ver Figura 2	NeS regional não-hidrotermalizado	FRX
NS-4**	ver Figura 2	NeS regional não-hidrotermalizado	FRX
NS-6**	ver Figura 2	NeS regional não-hidrotermalizado	FRX
NS-7**	ver Figura 2	NeS regional não-hidrotermalizado	FRX
Furo sondagem F1			
1-1B***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
1-1C***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
10-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
14-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX

Nº da Amostra	Localização	Descrição	Análises
16-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
20-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
20-1B***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
23-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
26-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
31-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
33-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
45-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
47-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
50-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
55-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
59-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
59-1B***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
63-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
39-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
41-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
68-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
68-1AA***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
68-1AB***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
68-1AC***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
69-1B***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
70-1C-1	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	IsoS
70-1C-2	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	IsoS
70-1C-3	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	IsoS
71-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
71-1B***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
74-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
75-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX, MSO
75-1B***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
77-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
77-1B***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
78-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
81-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX, MSO
85-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
90-1B***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
91-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
95-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
101-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
104-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
105-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
106-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
107-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
109-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
109-1B***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
111-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
110-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	MSO
112-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
112-1AD***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
113-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
113-1B***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
114-1A-1	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	IsoS
114-1A-2	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	IsoS
115-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
117-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
118-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
119-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
121-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
126-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX, IsoS
126-1AA***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
126-1B***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
Furo sondagem F4			
19-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
22-1A***	mina Osamu Utsumi	NeS oxidado	FRX
39-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph oxidado	FRX
91-1B***	mina Osamu Utsumi	NeS reduzido	FRX
107-1A***	mina Osamu Utsumi	NeS reduzido	FRX
123-1A***	mina Osamu Utsumi	NeS reduzido	FRX
129-1A***	mina Osamu Utsumi	Ph reduzido	FRX
243-1A	mina Osamu Utsumi	Br reduzida	MEV, IsoS
243-A3	mina Osamu Utsumi	Br reduzida	FRX
265-1A-B***	mina Osamu Utsumi	NeS reduzido	FRX
277-1A-1	mina Osamu Utsumi	fratura hidrotermal, porção reduzida	IsoS
383-1A-1	mina Osamu Utsumi	fratura hidrotermal em br reduzida	IsoS
383-1A-2	mina Osamu Utsumi	fratura hidrotermal em br reduzida	IsoS
386-1A-1	mina Osamu Utsumi	fratura hidrotermal em br reduzida	IsoS
386-1A-1.1	mina Osamu Utsumi	fratura hidrotermal em br reduzida	IsoS
386-1A-1.2	mina Osamu Utsumi	fratura hidrotermal em br reduzida	IsoS
386-1A-2	mina Osamu Utsumi	fratura hidrotermal em br reduzida	IsoS
386-1A-2.1	mina Osamu Utsumi	fratura hidrotermal em br reduzida	IsoS
386-1A-3	mina Osamu Utsumi	fratura hidrotermal em br reduzida	IsoS
386-1A-4	mina Osamu Utsumi	fratura hidrotermal em br reduzida	IsoS
394-1A-1	mina Osamu Utsumi	Fratura hidrotermal em NeS reduzido	IsoS

Nº da Amostra	Localização	Descrição	Análises
394-1A-2	mina Osamu Utsumi	Fratura hidrotermal em NeS reduzido	IsoS
397-1A-1	mina Osamu Utsumi	Fragmento de Ph reduzido	IsoS
397-1A-2	mina Osamu Utsumi	Fragmento de Ph reduzido	IsoS
397-1A-3	mina Osamu Utsumi	Fragmento de Ph reduzido	IsoS
397-1A-4	mina Osamu Utsumi	Fragmento de Ph reduzido	IsoS
408-1A-1	mina Osamu Utsumi	Fragmento de Ph reduzido	IsoS
408-1A-2	mina Osamu Utsumi	Fragmento de Ph reduzido	IsoS
413-1A-A***	mina Osamu Utsumi	NeS reduzido	FRX
413-1A-B***	mina Osamu Utsumi	NeS reduzido	FRX
413-1A-C***	mina Osamu Utsumi	NeS reduzido	FRX
413-1A-D***	mina Osamu Utsumi	NeS reduzido	FRX
413-1A-C***	mina Osamu Utsumi	NeS reduzido	FRX
414-1B-1	mina Osamu Utsumi	Br reduzida	IsoS
414-1B-2	mina Osamu Utsumi	Br reduzida	IsoS
414-1B-3	mina Osamu Utsumi	Br reduzida	IsoS
414-1B-4	mina Osamu Utsumi	Br reduzida	IsoS
414-1B-5	mina Osamu Utsumi	Br reduzida	IsoS
414-1B-6	mina Osamu Utsumi	Br reduzida	IsoS

ANEXO III

FELDSPATOS ALCALINOS

AMOSTRA	A1-H-h	A1-H-h	A1-H-h	A1-H-h
Localização	P.1/c2	P.2/c2	P.8/c4	P.6/c2
	borda	borda	borda	borda
SiO ₂	63.1	63.0	64.1	63.9
TiO ₂	0.0	0.1	0.0	0.1
Al ₂ O ₃	19.2	19.3	18.3	18.3
Fe ₂ O ₃	0.3	0.3	0.2	0.5
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	0.1	0.1	0.0	0.0
SrO	1.4	1.5	0.2	0.6
BaO	0.7	1.1	0.2	0.1
Na ₂ O	1.9	1.8	0.7	1.4
K ₂ O	13.1	13.0	15.6	14.5
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.1	0.1	0.0
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0
soma	99.7	100.2	99.3	99.2

AMOSTRA	A1-H-h	A1-H-h	A1-H-h
Localização	P.3/c2	P.7/c4	P.5/c2
	centro	centro	centro
SiO ₂	63.3	61.8	65.1
TiO ₂	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	18.9	17.9	18.4
Fe ₂ O ₃	0.3	2.5	0.4
MnO	0.0	0.7	0.0
CaO	0.1	0.2	0.0
SrO	1.4	0.8	0.6
BaO	0.6	0.2	0.0
Na ₂ O	2.1	1.6	1.9
K ₂ O	12.8	13.3	14.1
MgO	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0
Cl	0.0	0.0	0.0
soma	99.5	99.0	100.5

AMOSTRA	A1-H-h	A1-H-h	A1-H-h	A1-H-h	A1-H-h
Localização	P.29/c2	P.30/c2	P.33/c3	P.34/c3	P.35/c6
	Matriz	Matriz	Matriz	Matriz	Matriz
SiO ₂	65.5	65.1	64.8	65.4	65.2
TiO ₂	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	18.0	18.2	17.8	18.1	18.0
Fe ₂ O ₃	0.7	0.6	0.6	0.8	0.7
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SrO	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
BaO	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0
Na ₂ O	1.3	1.1	1.0	1.5	1.4
K ₂ O	15.0	15.2	15.3	14.6	14.8
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	-	0.0	0.1
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
soma	100.7	100.5	99.8	100.7	100.3

Análises de microsonda eletrônica por WDS de feldspatos puros

FELDSPATOS ALCALINOS

AMOSTRA Localização	A2 P.14/c6 borda	A2 P.10/c1 borda	A2 P.54/c1 inclusão	A2 P.12/c2 borda	A2 P.16/c8 borda	A2 P.17/c8 borda/borda	A2 P.19/c8 borda
SiO ₂	65.1	65.4	65.4	64.6	65.5	66.0	65.4
TiO ₂	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	18.4	18.6	18.5	18.4	18.5	18.2	18.8
Fe ₂ O ₃	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.5	0.4
MnO	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
CaO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SrO	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.0	0.3
BaO	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
Na ₂ O	3.0	3.1	3.1	3.0	2.6	2.7	2.7
K ₂ O	12.3	12.3	12.2	12.4	13.1	12.9	12.7
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	-	0.0	0.1	0.0	0.1
Cl	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0
soma	99.7	100.4	100.0	100.8	100.6	100.4	100.5

AMOSTRA Localização	A2 P.13/c6 centro	A2 P.9/c1 centro	A2 P.11/c2 centro	A2 P.15/c8 centro	A2 P.18/c8 centro	A2 P.56/c1 centro
SiO ₂	65.9	65.8	65.5	65.0	65.1	67.6
TiO ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Al ₂ O ₃	18.6	18.5	18.6	18.2	18.4	19.0
Fe ₂ O ₃	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SrO	0.2	0.4	0.4	0.1	0.3	0.1
BaO	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Na ₂ O	3.1	3.2	2.9	1.7	1.9	10.5
K ₂ O	12.4	12.2	12.4	14.2	13.9	1.8
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
soma	100.8	100.7	100.5	99.7	100.0	99.3

AMOSTRA Localização	A2 P.38/c5 Matriz	A2 P.39/c5 Matriz	A2 P.40/c6 Matriz	A2 P.41/c8 Matriz	A2 P.42/c8 Matriz	A2 P.36/C1 Matriz	A2 P.37/c1 Matriz
SiO ₂	65.3	65.8	66.0	65.9	65.2	65.9	65.4
TiO ₂	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	17.8	18.1	18.0	17.9	18.3	18.1	17.9
Fe ₂ O ₃	0.8	1.0	0.8	0.8	0.3	0.4	0.8
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SrO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BaO	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0
Na ₂ O	2.1	2.1	2.8	2.8	1.3	2.9	2.4
K ₂ O	13.8	13.7	12.7	12.9	14.7	12.9	13.4
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
soma	99.9	101.0	100.3	100.5	100.0	100.1	99.9

Análises de microsonda eletrônica por WDS de feldspatos puros

FELDSPATOS ALCALINOS

AMOSTRA Localização	A4-B P.21/c1 borda	A4-B P.23/c1 borda	A4-B P.25/c4 borda	A4-B P.28/c6 borda
SiO ₂	65.6	65.5	63.9	64.8
TiO ₂	0.1	0.0	0.0	0.1
Al ₂ O ₃	18.4	18.5	19.3	19.0
Fe ₂ O ₃	0.3	0.4	0.4	0.3
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	0.0	0.0	0.0	0.0
SrO	0.4	0.4	0.3	0.2
BaO	0.0	0.1	0.2	0.1
Na ₂ O	2.4	2.8	3.5	3.4
K ₂ O	13.3	12.8	12.5	11.9
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.1	0.0
Cl	0.0	0.0	0.2	0.0
soma	100.5	100.4	100.3	99.9

AMOSTRA Localização	A4-B P.20/c1 centro	A4-B P.22/c2 centro	A4-B P.24/c4 centro	A4-B P.27/c6 centro	A4-B P.59/c4 centro	A4-B P.48/c6 centro
SiO ₂	65.4	65.9	66.1	65.4	65.5	65.3
TiO ₂	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
Al ₂ O ₃	18.5	18.7	18.5	18.6	18.6	18.7
Fe ₂ O ₃	0.2	0.3	0.4	0.3	0.5	0.4
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SrO	0.6	0.5	0.0	0.5	0.5	0.4
BaO	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2
Na ₂ O	2.4	3.0	2.5	2.4	3.1	2.7
K ₂ O	13.2	12.4	13.3	13.1	12.2	12.6
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
soma	100.3	101.1	100.9	100.6	100.5	100.4

AMOSTRA Localização	A4-B P.46/c6 Matriz
SiO ₂	61.0
TiO ₂	0.1
Al ₂ O ₃	17.9
Fe ₂ O ₃	0.8
MnO	0.0
CaO	1.4
SrO	0.4
BaO	0.0
Na ₂ O	3.6
K ₂ O	11.8
MgO	0.0
F	0.4
Cl	0.0
soma	97.3

Análises de microsonda eletrônica por WDS de feldspatos puros

CLINOPIROXÊNIO- análises de microsonda eletrônica por WDS de cpx puros

AMOSTRA Localização	A1-H-h P.62/C1 centro	A1-H-h P.71/C3 centro	A1-H-h P.65/C1 centro
SiO ₂	47.4	50.9	52.9
TiO ₂	1.4	0.7	0.4
Al ₂ O ₃	4.4	0.8	4.9
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	16.8	26.6	22.4
MnO	1.2	1.7	1.5
MgO	7.4	1.6	1.6
CaO	21.4	8.1	8.5
Na ₂ O	1.5	8.7	6.3
K ₂ O	0.0	0.0	2.7
ZrO ₂	0.0	0.3	0.2
ZnO	0.1	0.1	0.0
BaO	0.0	0.0	0.0
SrO	0.2	0.2	0.2
soma	101.8	99.6	101.6

AMOSTRA Localização	A1-H-h P.63/C1 borda	A1-H-h P.64/C1 borda	A1-H-h P.72/C3 borda	A1-H-h P.77/C6 borda
SiO ₂	43.3	51.3	50.6	50.4
TiO ₂	1.1	0.9	0.6	0.6
Al ₂ O ₃	4.4	0.7	0.8	0.9
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	16.6	26.0	26.0	28.2
MnO	2.4	1.6	1.5	1.6
MgO	9.0	2.4	1.8	1.5
CaO	7.9	8.1	9.2	8.5
Na ₂ O	4.2	8.8	8.0	8.6
K ₂ O	4.1	0.0	0.0	0.0
ZrO ₂	0.1	0.2	0.2	0.2
ZnO	0.0	0.0	0.1	0.0
BaO	0.1	0.0	0.0	0.0
SrO	1.2	0.0	0.3	0.2
soma	94.5	100.0	99.2	100.7

AMOSTRA Localização	A1-H-h P.70/C2 matriz	A1-H-h P.74/C3 matriz
SiO ₂	57.6	49.8
TiO ₂	0.1	0.4
Al ₂ O ₃	23.8	0.7
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	1.0	25.4
MnO	0.0	1.7
MgO	0.0	2.0
CaO	1.5	10.1
Na ₂ O	3.8	7.6
K ₂ O	11.1	0.1
ZrO ₂	0.0	0.2
ZnO	0.0	0.0
BaO	0.1	0.0
SrO	0.2	0.2
soma	99.3	98.3

CLINOPIROXÊNIO- análises de microsonda eletrônica por WDS de cpx puros

AMOSTRA Localização	A2 P.80/C5 centro	A2 P.83/C5 centro	A4-B P.91/C9 centro	A-10-B1 P.130/C4 centro
SiO ₂	52.3	52.2	50.4	52.7
TiO ₂	1.2	1.4	0.8	0.8
Al ₂ O ₃	0.8	0.8	0.8	2.9
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	27.5	27.5	23.7	24.3
MnO	1.4	1.3	1.2	1.3
MgO	1.7	1.7	3.3	1.3
CaO	5.4	5.4	10.4	4.5
Na ₂ O	10.7	10.4	7.6	9.6
K ₂ O	0.0	0.0	0.0	1.3
ZrO ₂	0.4	0.3	0.4	0.3
ZnO	0.1	0.1	0.0	0.1
BaO	0.0	0.0	0.0	0.0
SrO	0.0	0.0	0.1	0.0
soma	101.5	101.1	98.6	99.1

AMOSTRA Localização	A2 P.81/C5 borda	A2 P.82/C5 borda
SiO ₂	52.4	52.1
TiO ₂	1.2	1.2
Al ₂ O ₃	0.8	0.9
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	27.2	27.3
MnO	1.4	1.4
MgO	1.7	1.6
CaO	5.4	4.6
Na ₂ O	10.6	11.2
K ₂ O	0.0	0.0
ZrO ₂	0.3	0.3
ZnO	0.0	0.0
BaO	0.0	0.2
SrO	0.0	0.0
soma	65.2	0.0

AMOSTRA Localização	A2 P.85/C5 matriz	A2 P.86/C6 matriz	A2 P.89/C6 matriz	A2 P.90/C6 matriz
SiO ₂	56.2	51.5	51.7	51.3
TiO ₂	0.7	1.0	1.1	1.0
Al ₂ O ₃	9.7	0.8	0.9	0.8
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	15.0	27.6	27.8	26.7
MnO	0.6	1.2	1.1	1.4
MgO	0.6	1.4	1.4	1.6
CaO	2.0	4.6	4.3	5.1
Na ₂ O	6.4	11.4	11.2	10.8
K ₂ O	7.0	0.0	0.0	0.0
ZrO ₂	0.1	0.3	0.2	0.3
ZnO	0.0	0.0	0.1	0.1
BaO	0.0	0.0	0.0	0.0
SrO	0.0	0.0	0.2	0.0
soma	96.3	99.9	99.9	99.1

CLINOPIROXÊNIO- análises de microsonda eletrônica por WDS de cpx puros

AMOSTRA Localização	A5 P.114/C1 centro	A5 P.116/C1 centro
SiO ₂	52.5	52.2
TiO ₂	0.8	0.6
Al ₂ O ₃	0.9	1.0
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	30.9	31.3
MnO	0.6	0.4
MgO	0.4	0.2
CaO	1.1	0.7
Na ₂ O	13.0	13.2
K ₂ O	0.0	0.0
ZrO ₂	0.6	0.3
ZnO	0.0	0.0
BaO	0.0	0.0
SrO	0.0	0.0
soma	100.7	99.9

AMOSTRA Localização	A5 P.115/C1 borda
SiO ₂	52.3
TiO ₂	0.5
Al ₂ O ₃	1.4
Cr ₂ O ₃	0.0
Fe ₂ O ₃	30.7
MnO	0.6
MgO	0.7
CaO	0.8
Na ₂ O	12.8
K ₂ O	0.3
ZrO ₂	0.4
ZnO	0.0
BaO	0.1
SrO	0.0
soma	100.6

AMOSTRA Localização	A5 P.113/C1 matriz	A5 P.117/C1 matriz
SiO ₂	51.5	52.9
TiO ₂	0.9	0.5
Al ₂ O ₃	3.2	1.0
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	26.3	31.1
MnO	2.1	0.4
MgO	3.0	0.2
CaO	0.6	0.7
Na ₂ O	10.2	13.1
K ₂ O	1.8	0.0
ZrO ₂	0.3	0.5
ZnO	0.1	0.1
BaO	0.0	0.1
SrO	0.0	0.0
soma	100.0	100.6

NEFELINAS E FELDSPATÓIDES - análises de microsonda eletrônica por WDS

AMOSTRA Localização	A1-H-h P.52/c6 nefelina	A4-B P.60/c7 nefelina centro	A4-B P.26/c6 centro	A4-B P.32/c4 nefelina	A4-B P.50/c9 nefelina	A4-B P.58/c1 nefelina	A4-B P.47/c6 nefelina	A2 P.53/c1 nefelina	A2 P.55/c1 nefelina
SiO2	45.5	44.6	44.1	43.7	44.3	46.9	44.6	44.8	45.6
TiO2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al2O3	34.9	33.2	33.0	33.2	33.1	31.3	32.1	37.1	34.9
Fe2O3	3.6	1.0	1.1	1.0	0.9	0.9	1.1	1.7	2.0
MnO	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	0.2	0.0	0.3	0.2	0.0	0.1	0.4	0.0	0.1
MgO	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5
Na2O	0.9	16.4	16.5	16.3	16.2	6.9	16.1	0.1	0.3
K2O	8.2	6.1	6.2	6.4	6.3	5.6	5.7	10.4	9.5
SrO	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BaO	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
soma	93.9	101.4	101.5	100.9	100.8	91.6	100.5	94.5	93.0

AMOSTRA Localização	A4-B P.61/c7 nefelina borda
SiO2	43.4
TiO2	0.0
Al2O3	31.5
Fe2O3	1.0
MnO	0.0
CaO	0.2
SrO	0.1
BaO	0.0
Na2O	16.2
K2O	6.0
MgO	0.0
F	0.0
Cl	0.0
soma	98.3

AMOSTRA Localização	A4-B P.43/c1 leucita Matriz	A4-B P.49/c7 leucita Matriz	A4-B P.44/c1 analcita Matriz	A4-B P.45/c4 analcita Matriz
SiO2	56.4	56.7	53.4	53.2
TiO2	0.0	0.1	0.0	0.1
Al2O3	23.8	24.2	24.0	24.0
Fe2O3	1.6	1.4	0.1	0.0
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	0.1	0.0	0.0	0.0
SrO	0.0	0.0	0.0	0.0
BaO	0.1	0.0	0.0	0.0
Na2O	8.1	8.5	13.5	13.5
K2O	9.5	9.5	0.3	0.3
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0	0.1
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0
soma	99.5	100.3	91.3	91.2

NEFELINAS E FELDSPATÓIDES - análises de microsonda eletrônica por WDS

AMOSTRA Localização	A4-B P.92/C9 nefelina borda	A5 P.118/C5 nefelina centro	A5 P.124/C7 nefelina centro	A5 P.127/C7 nefelina centro
SiO ₂	43.7	44.5	48.6	45.5
TiO ₂	0.0	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	35.1	32.3	33.3	34.6
Fe ₂ O ₃	1.1	1.9	2.0	2.9
MnO	0.0	0.0	0.1	0.1
CaO	0.3	0.2	0.0	0.0
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0
Na ₂ O	16.4	17.3	14.5	15.7
K ₂ O	6.1	5.3	5.6	5.4
SrO	0.0	0.0	0.0	0.0
BaO	0.0	0.0	0.0	0.0
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0
soma	102.8	101.5	104.2	104.2

AMOSTRA Localização	A5 P.119/C5 analcita borda	A5 P.125/C7 nefelina borda	A5 P.128/C7 contaminação borda	A5 P.121/C10 nefelina borda
SiO ₂	54.9	65.7	23.9	47.6
TiO ₂	0.1	0.0	0.2	0.0
Al ₂ O ₃	25.0	19.4	2.7	34.2
Fe ₂ O ₃	0.2	1.0	13.2	2.7
MnO	0.0	0.0	0.2	0.0
CaO	0.0	0.0	35.1	0.0
MgO	0.0	0.0	0.1	0.1
Na ₂ O	11.6	2.5	6.3	16.0
K ₂ O	1.2	13.3	0.3	4.6
SrO	0.0	0.1	3.1	0.0
BaO	0.0	0.1	0.0	0.0
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0
ZrO ₂	0.1	0.0	0.2	0.0
soma	93.0	102.1	85.1	105.2

FELDSPATOS ALCALINOS HIDROTERMAIS- análises de microsonda eletrônica por WDS

AMOSTRA Localização	A6 P.94/C1 felds.alc. centro	A6 P.103/C3 felds.alc. centro
SiO ₂	63.2	64.9
TiO ₂	2.3	0.0
Al ₂ O ₃	17.7	17.7
Fe ₂ O ₃	0.2	0.8
MnO	0.0	0.0
CaO	0.0	0.0
SrO	0.0	0.1
BaO	0.2	0.1
Na ₂ O	0.2	1.0
K ₂ O	16.1	15.5
MgO	0.0	0.0
F	0.0	0.0
Cl	0.0	0.0
soma	100.0	100.0

AMOSTRA Localização	A6 P.93/C1 felds.alc. borda	A6 P.97/C1 felds.alc. borda	A6 P.104/C3 felds.alc. borda	A6 P.102/C3 felds.alc. borda
SiO ₂	64.2	62.5	65.6	64.6
TiO ₂	0.1	0.0	0.0	0.1
Al ₂ O ₃	17.9	17.6	17.9	17.6
Fe ₂ O ₃	0.4	0.4	0.7	0.6
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	0.0	0.0	0.0	0.0
SrO	0.2	0.1	0.1	0.1
BaO	0.2	0.1	0.0	0.0
Na ₂ O	0.6	0.4	0.8	0.5
K ₂ O	15.8	15.9	15.6	16.1
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0	0.0
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0
soma	99.4	97.0	100.7	99.5

AMOSTRA Localização	A6 P.98/C1 felds.alc. matriz	A6 P.99/C2 felds.alc. matriz	A6 P.106/C4 felds.alc. matriz	A6 P.101/C2 felds.alc. matriz	A6 P.95/C1 felds.alc. matriz	A6 P.96/C1 felds.alc. matriz
SiO ₂	64.1	64.7	64.9	64.2	64.6	64.2
TiO ₂	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	17.9	18.0	18.0	17.6	18.1	17.9
Fe ₂ O ₃	0.5	0.1	0.5	0.6	0.3	0.2
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SrO	0.2	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
BaO	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0
Na ₂ O	0.5	0.2	0.6	0.4	0.4	0.3
K ₂ O	15.8	16.7	15.7	16.2	16.1	16.0
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
soma	99.2	99.9	100.0	99.1	99.7	98.7

SERICITAS HIDROTERMAIS - análises de microsonda eletrônica por WDS

AMOSTRA Localização	A3 P.107/C1 sericitas centro	A3 P.109/C1 sericitas centro	A3 P.110/C4 sericitas centro
SiO2	44.5	45.4	44.6
TiO2	0.1	0.2	0.1
Al2O3	37.1	36.8	35.2
Fe2O3	2.0	2.1	3.2
MnO	0.1	0.0	0.1
CaO	0.0	0.0	0.0
SrO	0.0	0.0	0.0
BaO	0.0	0.0	0.0
Na2O	0.4	0.4	0.2
K2O	10.4	10.4	10.7
MgO	0.1	0.1	0.2
F	0.1	0.1	0.2
Cl	0.0	0.0	0.0
soma	94.8	95.5	94.5

AMOSTRA Localização	A3 P.108/C1 sericitas borda
SiO2	45.1
TiO2	0.1
Al2O3	37.1
Fe2O3	1.9
MnO	0.0
CaO	0.0
SrO	0.1
BaO	0.1
Na2O	0.4
K2O	10.4
MgO	0.1
F	0.0
Cl	0.0
soma	95.2

AMOSTRA Localização	A6 P.100/C2 sericitas matriz	A6 P.105/C3 sericitas matriz	A6 P.105/C4 sericitas matriz	A6 P.106/C4 sericitas matriz
SiO2	48.3	45.0	48.6	47.4
TiO2	0.1	0.5	0.1	1.1
Al2O3	39.0	32.8	35.3	22.6
Fe2O3	0.8	3.9	1.8	1.6
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	0.1	0.0	0.0	0.0
SrO	0.0	0.0	0.0	0.0
BaO	0.1	0.0	0.0	0.0
Na2O	0.0	0.1	0.2	0.1
K2O	13.0	10.7	12.0	11.3
MgO	0.2	0.5	0.2	0.2
F	0.1	0.3	0.1	0.2
Cl	0.0	0.0	0.0	0.1
soma	101.5	93.7	98.2	84.5

AMOSTRA	75-1B	75-1B	75-1B	75-1B	75-1B	75-1B	75-1B
Localização	75/5-ko01	75/5-ko02	75/5-ko03	75/5-ko04	75/5-ko05	75/5-ko06	75/5-ko07
	caol-red	caol-red	caol-red	caol-red	caol-red	caol-red	caol-red
SiO ₂	43.88	45.2	47.59	47.96	47.49	47.5	47.48
FeO	0	0	0	0.64	0.44	0	0.51
Na ₂ O	0	0	0	0.05	0.06	0	0.09
MgO	0	0	0	0	0	0	0
K ₂ O	0	0	0	0.73	0	0	0
Al ₂ O ₃	36.54	37.87	39.32	39.37	40.17	39.86	39
UO ₂	0	0	0	0	0	0	0
ThO ₂	0	0	0	0	0	0	0
ZrO ₂	0	0	0	0	0	0	0
Ce ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
La ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
Y ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
Yb ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
HfO ₂	0	0	0	0	0	0	0
soma	80.42	83.07	86.91	88.75	88.16	87.36	87.08

AMOSTRA	78-1A	78-1A	78-1A	78-1A	78-1A	78-1A	78-1A
Localização	78/6-Z04	78/6-Z06a	78/6-Z08	78/6-Z03	78/6-Z09	78/6-Z11	78/6-Z10a
	zircão-red	zircão-red	zircão-red	zircão-red	zircão-red	zircão-red	zircão-red
	centro	centro	interm.	borda	borda	centro	borda
SiO ₂	32.77	33.34	33.23	32.9	33.57	33.2	32.33
FeO	0	0	0	0	0	0	0
Na ₂ O	0.1	0.1	0.11	0.15	0.07	0.08	0.13
MgO	0	0	0	0	0	0	0
UO ₂	0	0	0	0	0	0	0
ThO ₂	0	0	0	0	0	0	0
ZrO ₂	67.43	66.77	66.86	66.11	67.2	66.36	65.04
Yb ₂ O ₃	0	0	0.12	0.16	0.12	0.12	0.12
Ce ₂ O ₃	0.07	0.17	0.19	0.11	0.11	0.1	0.09
Y ₂ O ₃	0.39	0.23	0.36	0.29	0.33	0.62	0.88
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0
Al ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
La ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
HfO ₂	0.47	0.72	0.79	0.7	0	0.79	0.39
soma	101.23	101.33	101.66	100.42	101.4	101.27	98.78

AMOSTRA	78-1A	78-1A	78-1A	78-1A	78-1A	78-1A	78-1A
Localização	78/6-F116	78-6-F117	78/6-F118	78/6-F119	78/4-F101	78/4-F102	78/4-F103
	fluor.-red	fluor.-red	fluor.-red	fluor.-red	fluor.-red	fluor.-red	fluor.-red
SiO ₂	0	0	0	0	0	0	0
FeO	0	0	0	0	0	0	0
Na ₂ O	0.06	0.07	0.09	0.06	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0
UO ₂	0	0	0	0	0	0	0
ThO ₂	0	0	0	0	0	0	0
ZrO ₂	0	0	0	0	0	0	0
Yb ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
Ce ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
Y ₂ O ₃	0	0	0	0.07	0.12	0.15	0
K ₂ O	0.93	0.7	0.79	0.83	0.76	0.96	0.87
Al ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
La ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
HfO ₂	0	0	0	0	0	0	0
FeO	48.67	48.67	48.67	48.67	48.67	48.67	48.67
CaO	50.51	50.7	50.62	50.54	50.6	50.42	50.61
soma	100.17	0.77	100.17	100.17	100.15	100.2	100.15

AMOSTRA Localização	SN/24 SN/24-1ru5 rutilo	SN/24 SN/24-1ru6 rutilo	SN/24 SN/24-2ru2 rutilo	SN/24 SN/24-2ru3 rutilo	110-1A 110/1ru4 rutilo	110-1A 110/1ru5 rutilo	110-1A 110/1ru6 rutilo
TiO2	95.42	95.44	94.22	95.85	87.91	91	91.62
MnO	0	0	0	0	0	0	0
FeO	0	1.95	1.02	1.67	4.77	4.59	2.89
Al2O3	0.76	0.81	1.1	0.68	0.68	0.64	0.66
SiO2	0.76	1.04	1.11	0.6	1.34	0.57	0.6
CaO	0	0	0	0	0	0	0
K2O	0	0	0	0	0.38	0	0
Nb2O3	0.5	0	0.47	0.24	2.07	1.08	1.96
UO2	0	0	0	0	0	0	0
ThO2	0	0	0.21	0	0	0	0
Y2O3	0	0.1	0.15	0.31	0.46	0	0
Ce2O3	0	0	0	0	0	0	0
La2O3	0	0	0	0	0	0	0
Yb2O3	0	0	0	0	0	0	0
soma	97.44	99.34	96.28	99.35	97.61	97.88	97.73
AMOSTRA Localização	110-1A 110/1-py54 pirita	110-1A 110/1-py55 pirita	110-1A 110/1-py58 pirita	110-1A 110/1-py60 pirita	110-1A 110/1-py01 pirita	110-1A 110/1-py64 pirita	110-1A 110/py pirita
Fe	46.23	45.2	44.93	46.4	45.97	46.29	46.62
S	53.2	52.77	51.83	52.96	53.01	53.36	52.52
Pb	0.67	0.94	0.89	0	0	0	1.13
As	0.12	0.17	0.17	0	0	0	0
Mo	0.7	0.57	0.74	0.6	0.57	0.56	0.57
Ag	0	0.16	0	0	0	0	0
soma	100.92	99.65	98.56	99.96	99.55	100.21	100.84
AMOSTRA Localização	SN/24 SN24-1U1 Óx. Urânio	SN/24 SN24-1U2 Óx. Urânio	SN/24 SN24-1U3 Óx. Urânio	SN/24 SN24-1U4 Óx. Urânio	SN/24 SN24-1U7 Óx. Urânio	SN/24 SN24-1U9 Óx. Urânio	SN/24 SN24-1U11 Óx. Urânio
FeO	0	0	0	0	0	0	0
CaO	0	0	0	0	0	0	0
SiO2	2.42	2.15	2.23	2.09	2.13	2.96	2.59
Al2O3	0.29	0.15	0	0.2	0.18	0.53	0.39
TiO2	0	0	0	0	0	0	0
MnO	0	0	0	0	0	0	0
K2O	1.39	1.16	1.01	0.94	0.86	0.84	1.16
Nb2O	0	0	0	0	0	0	0
Yb2O	0	0	0	0	0	0	0
UO2	87.17	82.8	82.32	82.66	84.06	84.89	82.16
Y2O3	0.42	0	0.3	0.07	0	0.14	0
Ce2O3	0.32	0	0	0	0	0.3	0
La2O3	0	0	0	0	0	0	0
ThO2	0	0	0	0	0	0	0
soma	92.01	86.26	85.86	85.96	87.23	89.66	86.3
AMOSTRA Localização	SN/24 SN24-2U5 matriz	SN/24 SN24-1U2 matriz	SN/24 SN24-1U3 matriz	SN/24 SN24-1U4 matriz	SN/24 SN24-1U7 matriz	SN/24 SN24-1U9 matriz	SN/24 SN24-1U11 matriz
FeO	0	0	0	0	0	0	0
CaO	0	0	0	0	0	0	0
SiO2	3	2.15	2.23	2.09	2.13	2.96	2.59
Al2O3	0.29	0.15	0	0.2	0.18	0.53	0.39
TiO2	0	0	0	0	0	0	0
MnO	0	0	0	0	0	0	0
K2O	1.39	1.16	1.01	0.94	0.86	0.84	1.16
Nb2O	0	0	0	0	0	0	0
Yb2O	0	0	0	0	0	0	0
UO2	87.17	82.8	82.32	82.66	84.06	84.89	82.16
Y2O3	0.42	0	0.3	0.07	0	0.14	0
Ce2O3	0.32	0	0	0	0	0.3	0
La2O3	0	0	0	0	0	0	0
ThO2	0	0	0	0	0	0	0
soma	92.59	86.26	85.86	85.96	87.23	89.66	86.3