

UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE METALOGÊNESE

CLÁUDIA VALÉRIA DE LIMA

**NATUREZA COMPOSICIONAL E PERSPECTIVAS  
METALOGENÉTICAS DE ROCHAS  
METASSEDIMENTARES INTERCALADAS EM BASALTOS  
KOMATIÍTICOS DO *GREESNTONE BELT* DE PIUMHI,  
MINAS GERAIS**

Este exemplar corresponde a  
redação final da dissertação aprovada  
por Cláudia Valéria de Lima  
e aprovada pelo orientador  
em 3/5

Alfonso Schrank  
ORIENTADOR

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências, como parte  
dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Geociências

**Orientador:** Professor Doutor Alfonso Schrank

CAMPINAS - SÃO PAULO  
MAIO - 1996

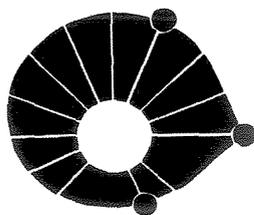
L628n

28037/BC

BIBLIOTECA CENTRAL

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
	TIUNICAMP
	L628.N
V.	Ex
TEMPO BC/	28.03F
PROC.	66.7/96
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO R\$	11,00
DATA	23/07/96
N.º CPD	

CM-000 9046 5-1



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**  
**ÁREA DE METALOGÊNESE**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Geociências

**NATUREZA COMPOSICIONAL E PERSPECTIVAS  
METALOGENÉTICAS DE ROCHAS  
METASSEDIMENTARES INTERCALADAS EM BASALTOS  
KOMATIÍTICOS DO *GREESNTONE BELT* DE PIUMHI,  
MINAS GERAIS**

**Cláudia Valéria de Lima**

**Orientador: Prof. Dr. Alfonso Schrank (IG-UNICAMP)**

**CAMPINAS - SÃO PAULO**  
**MAIO - 1996**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA I.G. - UNICAMP

L628n Lima, Cláudia Valéria de  
Natureza composicional e perspectivas metalogenéticas de  
rochas metassedimentares em basaltos komalíticos do  
Greenstone Belt de Piumhi, Minas Gerais / Cláudia Valéria  
de Lima.- Campinas, SP.: [s.n.], 1996.

Orientador: Alfonso Schrank  
Dissetação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas  
Instituto de Geociências.

1. Rochas Sedimentares. 2. Sedimentação e Depósito.  
I. Schrank, Alfonso. II. Universidade Estadual de Campinas -  
Instituto de Geociências.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**  
**ÁREA DE METALOGÊNESE**

**AUTOR: Cláudia Valéria de Lima**

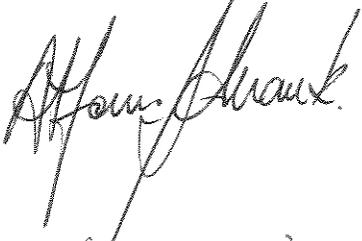
**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Natureza Composicional e Perspectivas Metalogenéticas de Rochas Metassedimentares Intercaladas em Basaltos Komatiíticos do *Greenstone Belt* de Piumhi, Minas Gerais**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Alfonso Schrank**

**Aprovada em: 3 1 5 1 9 6**

**PRESIDENTE: Prof. Dr. Alfonso Schrank**

**EXAMINADORES:**

**Prof. Dr. Prof. Dr. Alfonso Schrank**  - Orientador

**Prof. Dr. Hardy Jost** 

**Prof. Dr. Carlos Roberto Souza** 

Campinas, 03 de maio de 1996

**Dedico este trabalho a três mulheres: Daiz, Nadja e Andréa. Irmã de sangue e irmãs de caminhada e sangue.**

**Daiz raiz meu espelho. Um elo sob o mesmo teto.**

**Nadja linda, maravilhosa e perfeita. Como a defino.**

**Andréa sentimento e música. Ainda não conheci sorriso tão belo quanto o seu.**

A autora expressa seus agradecimentos

- ao Prof. Dr. Alfonso Schrank, pela orientação, dedicação e paciência durante a elaboração dessa Dissertação;
- à Companhia de Metais de Minas Gerais (COMIG) e Companhia Vale do Rio Doce (DOCEGEO), pelo acesso e liberação aos testemunhos de sondagem da área do *greenstone belt* de Piumhi;
- à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelos recursos financeiros para a realização dos trabalhos de campo e análises químicas de elementos traços (Processo nº 92/2620-8);
- à “Val” (Valdirene Pinotti), Secretária do Departamento de Metalogênese e Geoquímica pelo sempre presente suporte;
- ao Dailto pela preparação das seções polidas e pela amizade e carinho;
- ao Geol. Ronaldo Luiz Mincato, pela revisão do texto e sugestões, auxílio na amostragem, contínuo incentivo e, por último, mas não por fim, pela sincera e honesta amizade;
- ao Júnior pela revisão do vernáculo (como prefere ) e pelo apoio e carinho;
- as amigas Ieda e Patrícia pelo incentivo e por acreditarem tanto em mim.
- a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram com o apoio, estímulo e sugestões para o andamento e conclusão desta investigação.

## RESUMO

As rochas do Maciço de Piumhi (MG) estão reunidas nos Grupos Ribeirão Araras, Paciência e Lavapés. O Grupo Ribeirão Araras é um *greenstone belt* arqueano e consiste de uma Unidade Tholeiítica Inferior, uma Komatiítica e uma Tholeiítica Superior. Rochas sedimentares ocorrem, da base para o topo, como (i) rochas silicificadas entre um derrame maciço e um almofadado da Unidade Tholeiítica Inferior; (ii) uma seqüência homogênea de metargilitos, silticos ou não, turbidíticos, entre o topo da Unidade Tholeiítica Inferior e a base da Komatiítica, e (iii) metaturbiditos e filitos carbonosos intercalados em derrames da Unidade Komatiítica. As intercalações sedimentares presentes na Unidade Komatiítica formam a base desta pesquisa.

As rochas metassedimentares da Unidade Komatiítica estão agrupadas em três litotipos: Metaturbiditos Máficos, Metaturbiditos Máficos Carbonosos e Filitos Carbonosos. Estes foram analisados para Metais Nobres (Au, Pd, Pt, Ag), Elementos de Transição (Cr, Ni, Co) e Elementos Calcófilos (Cu, Zn, Pb). Pirita, subordinadamente calcopirita, blenda e galena ocorrem como disseminações ou em lâminas e camadas milimétricas em todas as rochas. Os teores de Metais Nobres são baixos (< 120 ppb), mas Metaturbiditos Máficos são mais ricos em Pt que os demais litotipos, em geral mais ricos em Au e Pd. As proporções de Cr, Ni e Co dos três litotipos são mais elevadas que rochas sedimentares pós-arqueanas e se assemelham às de basaltos N-Morb até as do Manto Primitivo, sugerindo área-fonte máfica e ultramáfica. A abundância de Elementos Calcófilos obedece, em geral, a ordem Zn>Cu>Pb e não há distinção entre os litotipos. As razões entre os Elementos de Transição e os Calcófilos são semelhantes a de rochas metassedimentares de outras áreas arqueanas. Metalogeneticamente, as seções estudadas não mostram características para a ocorrência de depósitos de Ni-EGP sulfetado hospedados em komatiitos, depósitos de sulfetos maciços vulcanogênicos e de metais básicos em metargilitos carbonosos. Isto, entretanto, não exclui a possibilidade de ocorrência destes tipos de mineralizações em outras áreas da região.

## ABSTRACT

Rocks of the Piumhi Massive, Brazil, are subdivided into the Ribeirão Araras, Paciência, and Lavapés Groups. The Ribeirão Araras Group is an Archaean greenstone belt and consists, from base to top, of a Lower Tholeiitic, a Komatiitic, and an Upper Tholeiitic Units. Metasedimentary rocks occur as (i) silicified rocks between massive and pillowed basalt flows of the Lower Tholeiitic Unit; (ii) a homogeneous sequence of metaturbidites (metargillites and metasilites) separating the Lower Tholeiitic Unit and the Komatiitic Unit, and (iii) metaturbidites and carbonaceous phyllites in twelve intercalations in lava flows of the Komatiitic Unit. The latter are the focus of this thesis.

The metasedimentary rocks of the Komatiitic Unit are divided into three lithotypes (Mafic Metaturbidites, Mafic Carbonaceous Metaturbidite, and Carbonaceous Phyllites), which were analysed for their Noble Metal (Au, Pd, Pt, Ag), Transition Elements (Cr, Ni, Co), and Chalcophile Elements (Cu, Zn, Pb) contents. Pyrite, followed by chalcopyrite and sphalerite are the main sulphides and occur as disseminations or as films and millimetric layers in all rocks of the twelve intercalations. Noble Metals are in general very low (< 120 ppb) and the Mafic Metaturbidites are frequently richer in Pt than other lithotypes, in general richer in Au and Pd. The Cr, Ni, and Co proportions of these rocks are higher than those of post-Archaean sedimentary rocks and are similar to N-MORB up to Primitive Mantle, suggesting a mafic to ultramafic source area. The abundance of Chalcophile Elements follows the order Zn>Cu>Pb with no distinction between the lithotypes. The ratios of Transition Elements as well as Chalcophile Elements are similar to those found in other Archaean metasedimentary rocks. From the metallogenetic stand point, the studied sections do not show characteristics for the occurrence of komatiite hosted Ni-sulphide PGE deposits, volcanogenic massive sulphide deposits and carbonaceous shale hosted base metal deposits. The lack of local diagnostic features does not preclude the potential of other portions of the area.

## ÍNDICE

Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	6
INTRODUÇÃO	6
GRUPO BAMBUÍ	8
COMPLEXO DE <i>NAPPES</i> DE PASSOS	9
MACIÇO DE PIUMHI	9
Generalidades	11
Grupo Ribeirão Araras	11
Grupo Paciência	15
Grupo Lavapés	16
CAPÍTULO III - OCORRÊNCIA E PETROGRAFIA DAS ROCHAS	17
METASSEDIMENTARES	
DESCRIÇÃO GERAL	17
DESCRIÇÃO DOS LITOTIPOS	21
Introdução	21
Metaturbiditos Máficos	26
Metaturbiditos Máficos Carbonosos	31
Filitos Carbonosos	36
MINERALOGIA DAS FASES OPACAS	37
CAPÍTULO IV - GEOQUÍMICA DAS ROCHAS METASSEDIMENTARES	40
INTRODUÇÃO	40
COMPORTAMENTO E VARIAÇÃO DOS ELEMENTOS	42
Metais Nobres	45
Ouro	45
Paládio	48
Platina	49
Prata	50
Metais Básicos	51
Níquel	51
Cromo	53
Cobalto	56
Cobre	58
Zinco	61
Chumbo	63
RELAÇÕES ENTRE ELEMENTOS TRAÇOS E LITOTIPOS	66
COMPARAÇÃO DE TEORES DE ROCHAS METASSEDIMENTARES COM OS DE	70
METAVULCÂNICAS ADJACENTES	
CORRELAÇÃO ENTRE ELEMENTOS	72
DIAGRAMAS BINÁRIOS E TERNÁRIOS	74
CAPÍTULO V - PERSPECTIVAS METALOGENÉTICAS	82
INTRODUÇÃO	82
DEPÓSITOS EM KOMATIITOS	82
DEPÓSITOS VULCANOGÊNICOS	88
DEPÓSITOS SEDIMENTARES SINGENÉTICOS	89
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXO I	100
ANEXO II	102
ANEXO III	104

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	TEXTO	PÁGINA
1	Mapa de localização da área do Maciço de Piumhi	5
2	Situação geológica regional do Maciço de Piumhi, Minas Gerais (modificado de Schrank 1986)	7
3	Seção colunar esquemática do Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais, mostrando os principais tipos de rochas das três unidades estratigráficas (compilado de Schrank 1992)	12
4	Exposição de um horizonte de rocha metassedimentar (Ponto 11) da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, intercalado entre dois derrames. O topo do derrame da esquerda é marcado pela presença de textura <i>spinifex</i> , e a base do derrame da direita pela textura cumulática. Ambos contatos são bruscos e irregulares.	20
5	Seções colunares dos furos de sondagem realizados pela Metais de Minas Gerais (METAMIG) na Unidade Komatiítica do <i>greenstone belt</i> de Piumhi (Furos PHI-04, 06, 07, 08, 09, 10 e 13) e na Unidade Tholeiítica Inferior (Furo PHI-11), mostrando os intervalos de ocorrência de intercalações de rochas metassedimentares. Números romanos à direita da sondagem PHI-07 correspondem aos níveis de rochas metassedimentares referidos no Capítulo IV.	22
6	Intercalação de rocha metassedimentar entre o topo da Unidade Tholeiítica Inferior e a base da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi. Fotomicrografia de metargilito siltico, mostrando a matriz de clorita e fenoblastos de tremolita-actinolita. Furo PHI-11, profundidade de 39,50m (LP, aumento 200X).	27
7	Intercalação de rocha metassedimentar entre o topo da Unidade Tholeiítica Inferior e a base da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi. Fotomicrografia de metargilito puro, mostrando a matriz de clorita, com sericita subordinada. O cristal do canto esquerdo inferior é um fenoblasto de clorita. Furo PHI-11, profundidade de 41,60 m (LP, aumento 200X).	27
8	Amostra de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico intercalado em metabasaltos komatiíticos da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, mostrando a alternância de níveis milimétricos a centimétricos de metarenitos muito finos (níveis claros) e metargilitos (níveis escuros). Furo PHI-07, profundidade entre 151,50 e 152,00 m.	29
9	Amostra de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, mostrando um nível centimétrico de sulfeto maciço com laminação original dobrada. Furo PHI-07, profundidade entre 151,50 e 152,00 m.	29
10	Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, mostrando a alternância entre níveis de metarenito muito fino e metargilito rico em clorita. Furo PHI-04, profundidade 91,12 m. LN, 50X.	30

11	Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, mostrando a alternância entre lâminas de metargilito (níveis claros) e metargilito carbonoso (níveis escuros). Furo PHI-04, profundidade 60,09 m. LN, 25X.	32
12	Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, mostrando relíquias de acamamento gradacional. Furo PHI-04, profundidade 90,84 m. LN, 25X.	32
13	Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, mostrando relíquias de estrutura de corte-e-preenchimento no contato entre uma lâmina rica em matéria carbonosa (nível preto) e uma de metargilito (nível claro). Furo PHI-04, profundidade 60,09 m. LN, 100X.	33
14	Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, mostrando perturbações interpretadas como prováveis relíquias de estruturas em chama. Furo PHI-04, profundidade 60,09 m. LN, 50X.	33
15	Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, mostrando um cristal de pirita com sombra de pressão composta de quartzo lamelar. Furo PHI-04, profundidade 91,12 m. LP, 100X.	35
16	Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, mostrando uma vênula preenchida por carbonato. Furo PHI-04, profundidade 90,84m. LP, 50X.	35
17	Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de ouro em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppb.	47
18	Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de níquel em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.	52
19	Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de cromo em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.	55
20	Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de cobalto em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.	57

21	Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de cobre em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do greenstone belt de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.	60
22	Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de zinco em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do greenstone belt de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.	62
23	Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de chumbo em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do greenstone belt de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.	65
24	Histogramas de frequência de ocorrência de teores de Metais Nobres em rochas metassedimentares, discriminadas por litotipo, intercaladas em metabasaltos komatiíticos do <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais. Os valores de Au, Pd e Pt estão expressos em ppb e os de Ag em ppm. A legenda desta figura é extensiva às figuras 25 e 26.	67
25	Histogramas de frequência de ocorrência de teores de Ni, Cr e Co em rochas metassedimentares, discriminadas por litotipo, intercaladas em metabasaltos komatiíticos do <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais. (teores expressos em ppm). Legenda como na figura 24.	68
26	Histogramas de frequência de ocorrência de teores de Cu, Zn e Pb em rochas metassedimentares, discriminadas por litotipo, intercaladas em metabasaltos komatiíticos do <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais. (teores expressos em ppm). Legenda como na figura 24.	69
27	Diagramas (A) Pt-Pd-Au, (B) Cr-Ni-Co e (C) log Ni versus log Cr de rochas metassedimentares detríticas intercaladas em metabasaltos komatiíticos do Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais. As áreas hachuradas referem-se aos campos composicionais de rochas arqueanas similares encontradas nas regiões de Kambalda (Austrália) e Guarinos (Goiás). Ver texto para discussão.	76
28	Diagramas (A) Ni-Zn-Cu e (B) Cu-Zn-Pb das rochas metassedimentares detríticas intercaladas em metabasaltos komatiíticos do Grupo Ribeirão Araras, <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais. As áreas hachuradas referem-se aos campos composicionais de rochas arqueanas similares encontradas nas regiões de Kambalda (Austrália) e Guarinos (Goiás). Ver texto para discussão.	77

## LISTA DE TABELAS

TABELA	TEXTO	PÁGINA
I	Testemunhos de sondagem do <i>Greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais. Descrição sucinta das intercalações de rochas metassedimentares em metavulcânicas ultramáficas.	23
II	Fases de minerais opacos em seções polidas de rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do <i>greenstone belt</i> de Piumhi, MG.	39
III	Rochas metassedimentares da sondagem PHI-07, <i>greenstone belt</i> de Piumhi. Dados de teores de elementos traços em ppm (Au, Pd e Pt, em ppb).	43
IV	<i>Greenstone belt</i> de Piumhi. Concentrações elementos traços em metabasaltos komatiíticos nos quais se intercalam rochas metassedimentares detríticas.	71
V	Coefficientes de correlação entre os teores dos elementos traços de rochas metassedimentares do <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais.	73
VI	Comparação das características do Distrito de Kambalda, Austrália, com as do <i>greenstone belt</i> de Piumhi, Minas Gerais.	84

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A história sedimentar contida em *greenstone belts* é comumente definida por dois intervalos estratigráficos distintos. O primeiro, e mais precoce, consiste de formações ferríferas, *cherts*, mármores e, mais raramente, rochas clásticas intercalados em komatiitos e basaltos tholeiíticos das seções inferiores. Estes sedimentos representam períodos de quiescência do vulcanismo. O segundo, mais tardio, é comumente composto por rochas sedimentares terrígenas, que representam o término da evolução destes terrenos.

A natureza e evolução dos ambientes deposicionais dos intervalos sedimentares somente podem ser compreendidas mediante o estudo das propriedades diagnósticas das rochas sedimentares, tais como a composição, textura e estruturas primárias e de suas variações laterais e verticais. O estudo das propriedades das rochas sedimentares arqueanas é particularmente importante quando se pretende entender as relações entre a tectônica e a sedimentação, e a natureza da área fonte das rochas detríticas antes da individualização da crosta terrestre como conhecida após 2.5 Ga.

O *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais, conforme definido por Schrank (1982), contém rochas sedimentares nos dois intervalos estratigráficos acima citados. No primeiro, estas consistem de turbiditos distais, carbonosos ou não, por vezes sulfetados intercalados em metabasaltos komatiíticos. Os metabasaltos tholeiíticos, em geral, não apresentam intercalações sedimentares, sugerindo um vulcanismo ininterrupto. O segundo, é constituído por turbiditos proximais que incluem metaconglomerados, metarenitos, metassiltitos e, mais raramente mármores oolíticos e estromatolíticos.

Até o presente, as rochas metassedimentares do *greenstone belt* de Piumhi não mereceram estudos detalhados. Contrariamente a outros terrenos similares da Plataforma Sulamericana, onde as rochas sedimentares do primeiro grupo são predominantemente químicas (formações ferríferas e cherts), as do *greenstone belt* de Piumhi são detríticas. Isto favorece uma situação ímpar para o estudo das características da sedimentação correspondente aos intervalos de quiescência do vulcanismo, até então não realizada naquela área.

A presente investigação visa, portanto, caracterizar as rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do *greenstone belt* de Piumhi, quanto aos seus aspectos petrográficos, geoquímicos e proveniência. Visa, também, focar as intercalações detríticas, sob o ponto de vista de possíveis mineralizações sulfetadas, a exemplo do que ocorre no Distrito de Kambalda, Austrália, onde mineralizações sulfetadas encontram-se associadas a derrames de komatiitos, diretamente sob a influência de rochas metassedimentares sulfetadas.

Para tanto, estabeleceu-se uma metodologia de trabalho consistindo de:

(i) reconhecimento e descrição detalhada dos afloramentos das intercalações de rochas metassedimentares que afloram no leito do Ribeirão Araras e áreas adjacentes. Foram descritos seis afloramentos dessas rochas;

(ii) descrição dos testemunhos de dez furos de sondagem realizados pela Companhia de Metais de Minas Gerais (COMIG) e pela Companhia Vale do Rio Doce (DOCEGEO), com distribuição aleatória na seção metavulcânica com intercalações de rochas metassedimentares;

Estas duas etapas resultaram na coleta de aproximadamente 150 amostras representativas dos diversos tipos de rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos.

(iii) descrição das amostras em lâminas delgadas e seções polidas visando a caracterização mineralógica das rochas metassedimentares;

(iv) seleção de um grupo de amostras para análise qualitativa (varredura) em microsonda eletrônica. Este procedimento teve por objetivos a caracterização de fases opacas e, principalmente, detecção de minerais do grupo da platina;

(v) análise química para alguns elementos traços (Au, Pt, Pd, Ag, Ni, Cr, Co, Cu, Zn e Pb) visando avaliar o potencial metalogenético das rochas metassedimentares;

(vi) integração e interpretação dos dados obtidos a partir das etapas anteriores.

A área estudada localiza-se nas proximidades da cidade de Piumhi, no sudoeste do Estado de Minas Gerais (Fig. 1). A cidade de Piumhi dista aproximadamente 400 km da cidade de Campinas, no Estado de São Paulo. O

acesso, a partir de Campinas, faz-se via SP-340 até a cidade de Mococa, seguindo-se, então, por estrada vicinal até São Sebastião do Paraíso, Minas Gerais. Daí, pela BR-050, segue-se até a cidade de Piumhi, via Passos. De Belo Horizonte, o acesso é feito pela BR050, por um percurso de aproximadamente 270 km, via Contagem, Itaúna e Divinópolis, de nordeste para sudoeste.

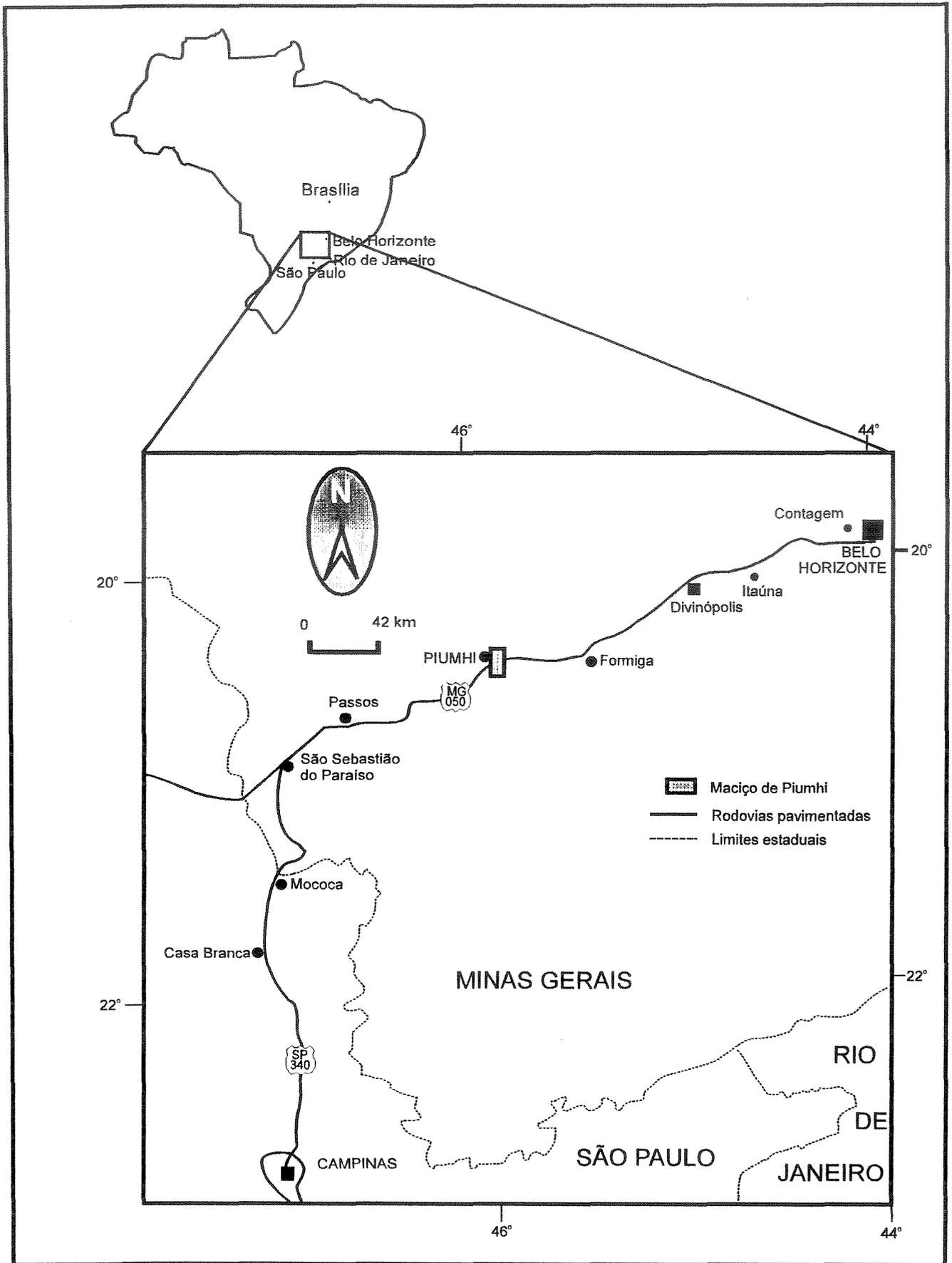


Figura 1 - Mapa de localização da área do Maciço de Piumhi (MG)

## CAPÍTULO II

### CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

#### INTRODUÇÃO

O Maciço de Piumhi, definido por Schrank (1982), localiza-se geograficamente no sudoeste do Estado de Minas Gerais, e estende-se, a partir da cidade de Piumhi, por 70 Km na direção S20°E (Fig. 2). Geologicamente, o maciço faz parte da porção meridional da Província Tocantins (Marini *et al.* 1984), próximo ao limite sudoeste da Província São Francisco.

O Maciço de Piumhi é atualmente interpretado como uma unidade geotectônica brasileira, composta por terrenos para-autóctones e alóctones (Schrank & Abreu 1990). Segundo Schrank (1992), o maciço é envolto, a norte e a leste, por rochas metassedimentares do Grupo Bambui. Este, por sua vez, é cavalgado, ao sul, por rochas do próprio maciço. A oeste, o maciço é cavalgado por rochas metassedimentares do Grupo Araxá-Canastra, as quais constituem o Complexo de *Nappes* de Passos.

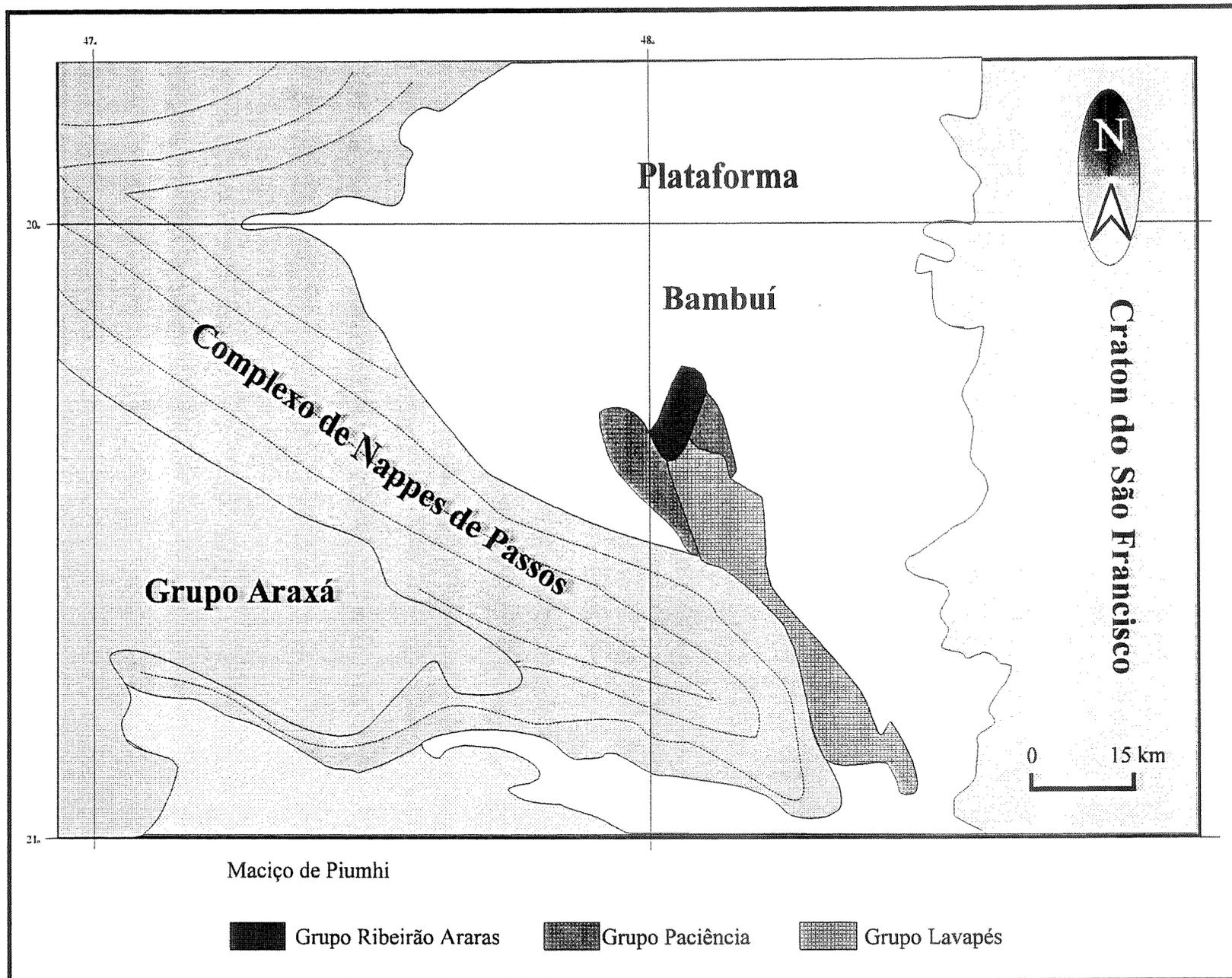


Figura 2 - Situação geológica regional do Maciço de Piumhi, Minas Gerais (modificado de Schrank *et al.* 1990)

## GRUPO BAMBUÍ

Segundo Dardenne (1979), o Grupo Bambuí consiste de seis unidades estratigráficas que, da base para o topo, compreendem as Formações Jequitaiá, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. As cinco primeiras estão agrupadas no Subgrupo Paraopeba (Marini *et al.* 1984). Rochas da Formação Jequitaiá distribuem-se em torno do Maciço de Piumhi.

Na maioria de suas ocorrências, a Formação Jequitaiá é constituída por um conglomerado formado por seixos facetados (por vezes estriados) de quartzito, calcário, dolomito, *chert*, gnaiss, granito, mica-xisto e rochas vulcânicas, imersos em uma matriz argilo-sílica esverdeada. Conglomerados correlatos recebem várias denominações locais, sendo que no sudoeste de Minas Gerais é conhecido como Conglomerado Samburá (Branco 1957 *apud.* Marini *et al.* 1984).

Ferrari & Brandalise (1971) ao se referirem as rochas do Grupo Bambuí que ocorrem em contato com o Maciço de Piumhi atribuem-lhes a categoria de Membro. Dessa forma o Membro Samburá, segundo esses autores, é constituído por um conjunto de rochas que compreendem metassiltitos, metarenitos líticos, metagrauvas e metaconglomerados de baixo grau metamórfico. Ferrari & Brandalise (1971) interpretaram esse membro como produto da deposição em conglomerados. Schrank (1992) interpreta como produto da deposição ao longo de paleo-escarpas, nas proximidades das rochas mais resistentes (brechas, quartzitos) do Grupo Paciência,

representando molassas formadas durante, ou logo após, a colocação do Complexo de *Nappes* de Passos.

## **COMPLEXO DE *NAPPES* DE PASSOS**

Segundo Schrank *et al.* (1990) o Complexo de *Nappes* de Passos (Fig. 2) é um conjunto alóctone, transportado sobre rochas do Grupo Bambuí, do Maciço de Piumhi e do Cinturão Campos Gerais e consiste de três segmentos: Norte, Central e Sul. Dos três segmentos apenas o Sul está em contato com o Maciço de Piumhi.

O segmento Sul apresenta a forma de cunha apontando para S80°E, que se estende por mais de 150 Km. A porção externa da cunha é composta por rochas do Grupo Canastra (quartzitos, sericita-xistos, meta-grauvacas e rochas carbonáticas milonitizadas). A porção interna consiste de biotita-gnaisses, biotita-xistos, muscovita-gnaisses, meta-grauvacas e gnaisses calcissilicáticos, pertencentes ao Grupo Araxá (Schrank *et al.* 1990).

## **MACIÇO DE PIUMHI**

### **Generalidades**

O Maciço de Piumhi foi inicialmente interpretado por Schrank (1982) como um paleo-alto do embasamento dos Grupos Araxá, Canastra e Bambuí. Mais recentemente, Schrank & Abreu (1990) subdividiram o maciço nos Grupos

Ribeirão Araras, Paciência e Lavapés, diante de uma nova proposta de compartimentação tectônica da borda sudoeste do Cráton do São Francisco, e Schrank *et al.* (1990) o consideram formado por terrenos para-autóctones e alóctones. Nos para-autóctones incluíram os Grupos Ribeirão Araras e Paciência, e, nos alóctones, o Grupo Lavapés.

Em virtude do Maciço situar-se em posição frontal ao Complexo de *Nappes* de Passos, Schrank (1992) admite duas hipóteses para a formação do maciço. A primeira é que o maciço, mesmo representado por terrenos para-autóctones, constituir-se-ia de uma porção arrancada do embasamento (*lambeaux du socle*) e agregado à base do Complexo. A segunda, que representaria um contraforte avançado do Cráton de São Francisco, que teria formado, preteritamente, paleorrelevos que pouco teriam se deslocado de sua porção original.

Nos terrenos para-autóctones, o Grupo Ribeirão Araras tem uma espessura estimada de 3000 m e o Grupo Paciência de 1500 m. O Grupo Lavapés, dos terrenos alóctones, tem uma espessura ainda indeterminada, mas inferior a 500 m.

O Grupo Ribeirão Araras permanece, em grande parte, indiviso devido à escassez de afloramentos e à inexistência de levantamentos geofísicos. Distribui-se por cerca de 40 Km<sup>2</sup> ao longo de uma faixa descontínua e irregular, de direção aproximada nordeste, sotoposto aos Grupos Paciência e Lavapés. O Grupo Paciência possui extensão superior a 600 Km<sup>2</sup> e se destaca na paisagem por sustentar duas serras submeridianas nas porções leste e oeste do maciço. Já o Grupo Lavapés se estende por uma superfície superior a 300 Km<sup>2</sup> e

também sustenta um conjunto de serras, mas situadas na porção central do maciço (Anexo I).

Os contatos entre os Grupos Ribeirão Araras e Paciência e entre estes e o Grupo Lavapés são tectônicos (Schrank 1992) como indicam o truncamento de estruturas e rochas, a presença de bandas de deformação penetrativa com milonitos e a alteração hidrotermal destes. Na porção central do Maciço, a sul de Piumhi, o contato entre o Grupo Lavapés e os Grupos Ribeirão Araras e Paciência é reconhecível. Contudo, a intensa deformação do contato entre os dois últimos conduziu a definição, por Schrank (1992), de uma unidade de *melange* dos Grupos Araras e Paciência.

### **Grupo Ribeirão Araras**

O Grupo Ribeirão Araras tem as características de um *Greenstone Belt* arqueano e é constituído por uma seqüência de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas de composição máfica a ultramáfica, cuja área-tipo situa-se no leito do ribeirão homônimo e áreas adjacentes (Anexo I). A base da seqüência está recortada pelo Granito Norte (Fritzsens *et al* 1980), recentemente redefinido para Granito Matinha (Sato *et al* 1992), e cujos granófiros esferulíticos da sua borda foram interpretados por Schrank (1982) como testemunhos de resfriamento brusco.

A figura 3 resume a sucessão estratigráfica do Grupo Ribeirão Araras. A sua porção basal é denominada de Unidade Tholeiítica Inferior. Esta unidade inicia-se com rochas metassedimentares detríticas granoclassificadas, de composição básica e espessura incerta, que dão lugar, para o topo, a cerca de

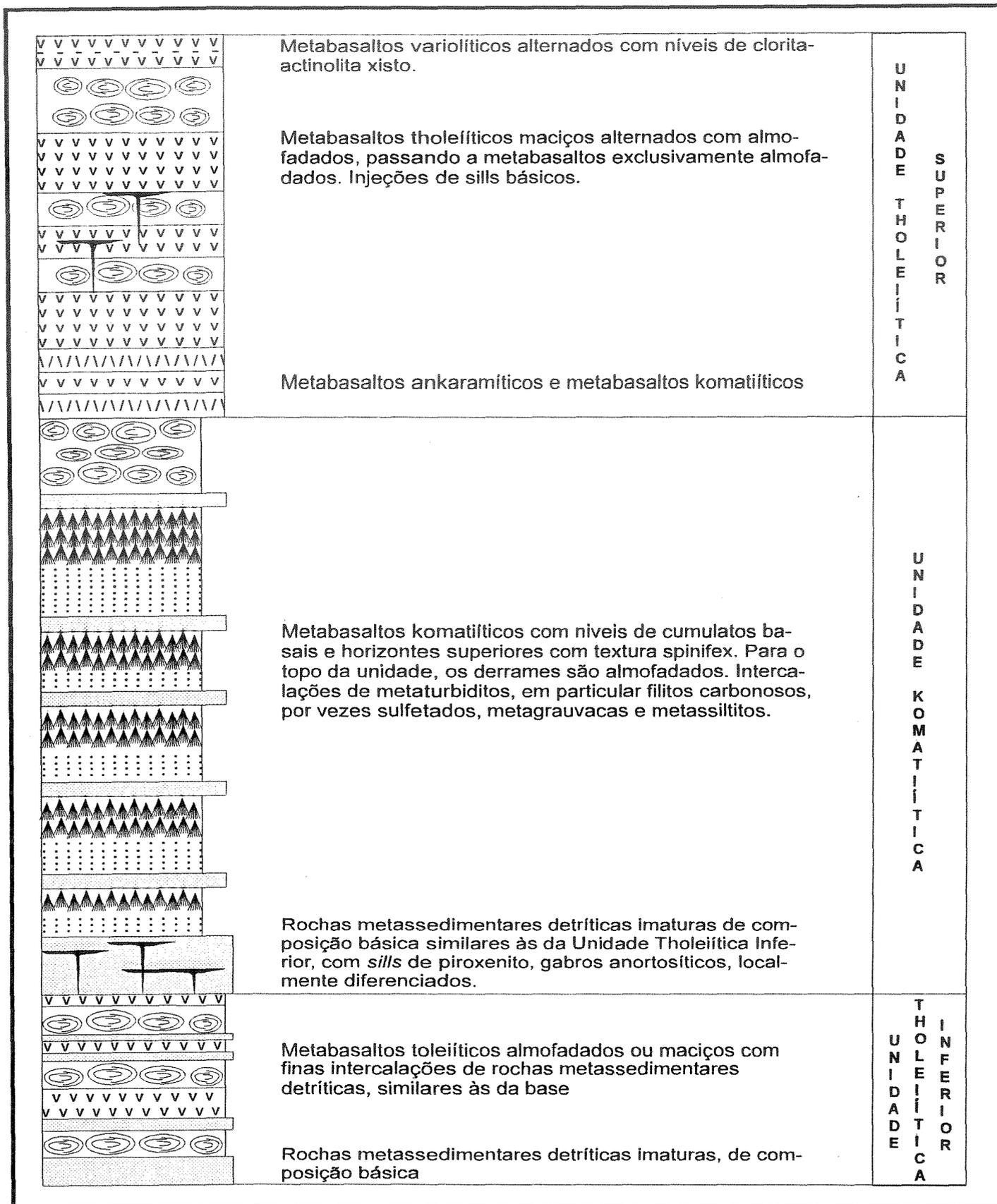


Figura 3 - Seção colunar esquemática do Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais, mostrando os principais tipos de rochas das suas três Unidades estrátigráficas (compilado de Schrank 1992)

200 m de espessura de basaltos tholeiíticos maciços, com intercalações centimétricas de rochas metassedimentares detríticas similares à da base.

A Unidade Tholeiítica Inferior está sotoposta à Unidade Komatiítica, cuja base, identificada apenas em furos de sondagem, consiste de cerca de 20 m de rochas metassedimentares detríticas imaturas contendo inúmeros *sills* acamadados de piroxenito, por vezes com ortocumulados de peridotito e gabro anortosítico. Dados geocronológicos U/Pb obtidos por Machado & Schrank (1989) em zircão de amostras de gabro anortosítico de um dos *sills* forneceram uma idade de 3.116  $-7/+10$  Ma, o que sugere que o pacote metassedimentar onde se alojam pode ser contemporâneo a mais antigo que 3.1 Ga.

O pacote metassedimentar basal dá lugar a cerca de 600 m de de espessura média de derrames de basaltos komatiíticos com intercalações de filitos carbonosos, localmente ricos em sulfetos (pirita, calcopirita e esfalerita) e por vezes silicificadas. A estrutura rítmica dos filitos carbonosos sugere que os mesmos sejam turbiditos.

Os derrames são, em sua maioria, maciços e acamadados, apresentando uma porção basal de cumulatos, seguida de horizontes com textura *spinifex*. As texturas *spinifex* variam desde 3 cm na porção interna dos derrames até cerca de 1 mm no topo (Pinheiro 1980), e são formadas por feixes de relíquias de cristais esqueléticos de olivina, na maioria transformados para clorita. Variolitos (Coltorti *et al* 1987) com textura *spinifex* interna estão localmente preservados nesses derrames.

Derrames mais espessos, descritos por Schrank (1986), mostram horizontes basais cumuláticos de orto- e clinopiroxenito e peridotito maciços a porfiríticos, sotopostos a horizontes com textura *stringbeef spinifex* com lâminas

de clinopiroxênio até 10 cm de comprimento organizadas em feixes cônicos entrelaçados.

Da base para o topo da unidade, os derrames são progressivamente mais espessos, mais magnesianos e mais diferenciados. A porção superior é constituída de um derrame komatiítico com almofadas, as quais possuem, em geral, menos de 20 cm de diâmetro. O núcleo das almofadas contem fenocristais de olivina cloritizada imersos em uma matriz com textura micro-*spinifex*. A borda das almofadas também contem fenocristais, porém imersos em matriz de provável vidro recristalizado.

A porção superior do Grupo Ribeirão Araras é representada pela Unidade Tholeiítica Superior, cuja espessura média é de 400 m. A seção basal da Unidade é caracterizada por uma sucessão de derrames de basaltos komatiíticos alternados com basaltos ankaramíticos (Jahn & Schrank 1983, Schrank 1986) que dá lugar, para o topo, a derrames de basalto tholeiítico alternadamente maciços e almofadados com injeções de *sills* básicos. O topo da unidade é composto exclusivamente por derrames de basalto almofadado e variolítico, encimados por um horizonte-guia (Schrank 1992) de estreitas bandas de basalto variolítico alternado com níveis de clorita-actinolita xistos.

Em direção a sul do maciço adentra-se no que foi denominado por Schrank (1992) de Grupo Ribeirão Araras indiviso e foliado. Corresponde a uma extensa zona de cisalhamento contendo lentes preservadas de basaltos tholeiíticos almofadados, *lapilli* tufos básicos e injeções félsicas. Estas rochas gradativamente se transformam em milonitos, comumente hidrotermalizados, contendo, dentre outros, clorita, clorita e actinolita, sericita e quartzo e sericita e carbonato. Os milonitos estão intrudidos por corpos tabulares de gabro

anortosítico com megacristais de plagioclásio. A idade mínima destes corpos é de 1.127 Ma (Machado & Schrank 1989).

O Grupo Ribeirão Araras contém ainda riolitos, andesitos e dacitos calcialcalinos, bem como um grande número de diques, *sills*, domos e *necks* de riodacito e riolito pórfiro. Machado & Schrank (1989) dataram zircões destas rochas e obtiveram idades mínimas de 3.000 Ma, 2.989 Ma e 2.965 Ma.

### **Grupo Paciência**

Segundo Schrank (1992), o Grupo Paciência é constituído por uma sucessão de turbiditos, de textura variável de fina a grossa, e inclui termos brechóides a conglomeráticos suportados por matriz. Na porção basal ocorrem pelitos e rochas carbonatadas, por vezes com oólitos e estromatólitos, seguidos por brechas sedimentares, quartzitos impuros e metapelitos.

A porção basal está sotoposta a uma sucessão cíclica de metagrauvas e metapelitos e, subordinadamente metassiltitos com intercalações de formações ferríferas. As rochas magmáticas são raras e incluem *sills* e diques de composição máfica e traquítica.

A idade dessa unidade, relativamente às demais, é ainda incerta. Schrank (1992), com base nas relações de contato entre os Grupos Paciência e Ribeirão Araras, assim como na idade de intrusões máficas, sugere que o Grupo Paciência seja mais antigo que os Grupos Lavapés, Araxá, Canastra e Bambuí, e o interpreta como uma cobertura sedimentar do *Greenstone Belt* de Piumhi.

## Grupo Lavapés

O Grupo Lavapés é uma unidade que, da base para o topo, consiste de (i) conglomerados; (ii) rochas ultramáficas com cromititos; (iii) metapelitos carbonosos; (iv) formações ferríferas e manganésíferas; (v) metapelitos carbonosos, e, (vi) conglomerados de topo. A densa foliação e o pronunciado estiramento dessas rochas foram responsáveis pela destruição da maioria das texturas e estruturas primárias, tanto sedimentares quanto ígneas. O arranjo estratigráfico do grupo é estabelecido pelo empilhamento tectônico de unidades originalmente formadas em ambientes distintos.

O Grupo Lavapés está intrudido por um granito tabular, denominado por Sato *et al.* (1992) de Granito Taquari, correspondente ao Granito Central de Fritzsos *et al.* (1980). Determinações geocronológicas pelo método U/Pb em zircão desse granito forneceram uma idade mínima de 726 Ma (Machado & Schrank 1989).

De acordo com os objetivos estabelecidos para este trabalho, nos capítulos subseqüentes, dar-se-á ênfase as rochas metassedimentares que ocorrem intercaladas em metabasaltos komatiíticos da Unidade Komatiítica do Grupo Ribeirão Araras.

## CAPÍTULO III

# OCORRÊNCIA E PETROGRAFIA DAS ROCHAS METASSEDIMENTARES

### DESCRIÇÃO GERAL

Conforme descrito no capítulo anterior, as rochas vulcânicas do Grupo Ribeirão Araras estão agrupadas nas Unidades Tholeiítica Inferior, Komatiítica e Tholeiítica Superior. As rochas metassedimentares estudadas estão associadas à Unidade Komatiítica e afloram na extremidade norte do *Greenstone Belt* de Piumhi. As exposições, no entanto, são raras e estão geralmente muito intemperizadas, o que não ocorre em testemunhos de sondagem.

As rochas estudadas ocorrem em três situações estratigráficas principais. Uma, mais rara e somente observada em um afloramento (Ponto 2, Anexo I), consiste de uma intercalação de rochas metassedimentares silicificadas situada entre um derrame maciço e um almofadado da Unidade Tholeiítica Inferior. Inicia-se com (i) um um horizonte de 20 cm de espessura

de *chert* esverdeado e maciço, (ii) seguido de cerca de 10 cm de metassilito carbonoso, amarelado por intemperismo, laminado, com filetes ora de quartzo ora sulfetos, (iii) encimado por um nível de quartzo maciço com filetes de sulfetos. Esta intercalação não será considerada no presente estudo devido a pequena expressividade do afloramento.

Outra consiste de uma camada com aproximadamente 20 m de espessura, situada entre o topo da Unidade Tholeiítica Inferior e a base da Unidade Komatiítica. Esta camada consiste de uma seqüência homogênea e monótona de metargilitos sílticos e metargilitos puros, com estrutura turbidítica. Para efeitos descritivos, esta camada é uma sucessão de metaturbiditos máficos, composicionalmente similares a metaturbiditos de níveis estratigráficos sobrepostos. O termo "máfico", apesar de ser mais utilizado para caracterizar rochas ígneas, será empregado neste trabalho para designar índice de coloração.

A última, estratigraficamente mais elevada e também a mais freqüente, é representada por rochas metassedimentares com espessura variável entre 1 e 12 m, intercaladas nos derrames da Unidade Komatiítica, sempre separando dois derrames, e afloram principalmente no leito do Ribeirão Araras e áreas adjacentes (Anexo I). Estas rochas metassedimentares são textural, composicional e estruturalmente mais variadas e mais ricas em sulfetos do que as situadas em níveis estratigráficos inferiores. Para efeitos descritivos e acomodar as diversas variações, estas rochas serão abaixo descritas sob os seguintes litotipos: (i) Metaturbiditos Máficos, (ii) Metaturbiditos Máficos Carbonosos, e (iii) Filitos Carbonosos. Em afloramento, estas rochas normalmente encontram-se intemperizadas, o que muitas vezes dificulta o

reconhecimento dos três grupos. Isto, entretanto, não ocorre nos testemunhos de sondagem.

Em um perfil ao longo do leito do Ribeirão Araras foram reconhecidas seis intercalações de rochas metassedimentares na Unidade Komatiítica, como ilustrado na figura 4, que são composicionalmente similares em testemunhos de sondagem. Os afloramentos melhor preservados, como os dos Pontos 9 e 10 (ver Anexo I), mostram que estas iniciam, na base e em contato direto com o topo do derrame precedente, com um metaturbidito máfico. Este, dá lugar, por contato brusco, a um metaturbidito máfico carbonoso, o qual, por sua vez, grada para um metalamito carbonoso, sotoposto a um derrame posterior. Níveis centimétricos de quartzo e sulfetos maciços e disseminados, concordantes e discordantes da estrutura local das rochas metassedimentares, ocorrem em toda a seqüência. Sob efeito do intemperismo, as intercalações assumem aspecto arenoso e cor avermelhada, em virtude da alteração de sulfetos e carbonato.

Nos Pontos 13 e 14 ( ver Anexo I), os derrames não estão separados por rochas metassedimentares, mas por um nível de quartzo leitoso, com cerca de 10 cm de espessura, maciço no centro e fraturado nas bordas.

A seqüência de derrames de basaltos komatiíticos com intercalações de rochas metassedimentares observada no perfil no leito do Ribeirão Araras também está exposta ao longo da BR-050, no sentido Piumhi-Belo Horizonte na posição do Ponto 1 (ver Anexo I). Entretanto, devido ao intenso processo de intemperismo, somente quatro intercalações foram distinguidas. Os horizontes sedimentares, como no Ribeirão Araras, também se mostram



Figura 4 - Exposição de um horizonte de rocha metassedimentar (Ponto 11) da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, intercalado entre dois derrames. O topo do derrame da esquerda é marcado pela presença de textura *spinifex*, e a base do derrame da direita pela textura cumulática. Ambos contatos são bruscos e irregulares.

arenosos, com cores em tons de amarelo ou vermelho, com *boxworks* de sulfetos.

## DESCRIÇÃO DOS LITOTIPOS

### Introdução

Trabalhos prévios realizados na área de estudo pela então Metais de Minas Gerais (METAMIG), hoje Companhia de Metais de Minas Gerais (COMIG) e pela Rio Doce Mineração (DOCEGEO) incluem 11 furos de sondagem com profundidade média de 250 metros. Os testemunhos permitem determinar as profundidades onde as intercalações de rochas metassedimentares se situam, desde a base até o topo da seqüência de derrames komatiíticos. O excelente estado de preservação dos testemunhos permite observar suas características composicionais, texturais e estruturais.

Dos 11 furos de sondagem, os testemunhos contínuos correspondentes a 8 foram descritos e os intervalos de profundidade de ocorrência de rochas metassedimentares registrados (Fig. 5) e os respectivos litotipos identificados (Tabela I). A localização geográfica e inclinação de cada furo de sondagem descrito são mostradas no Anexo II.

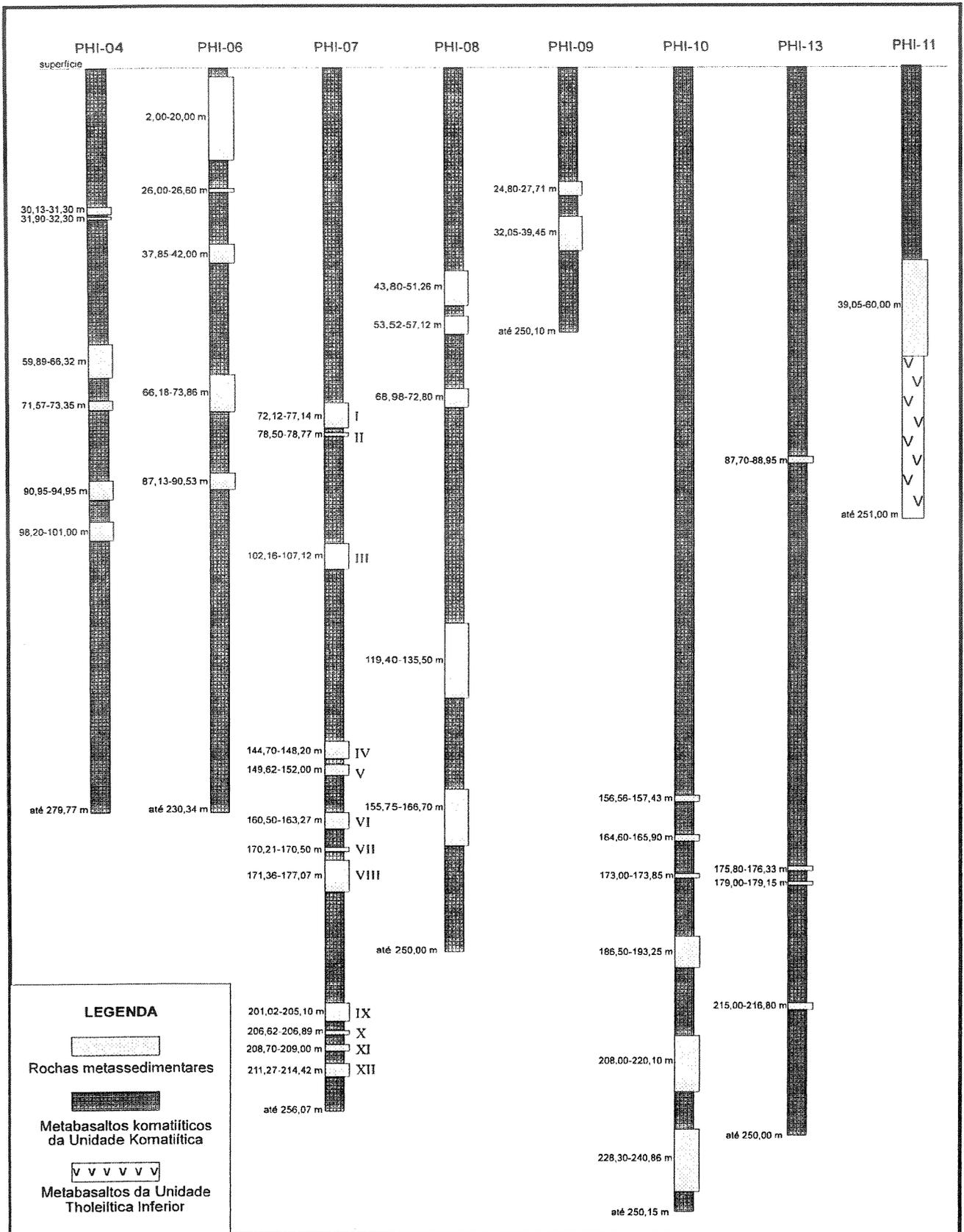


Figura 5 - Seções colunares dos furos de sondagem realizados pela Metais de Minas Gerais (METAMIG) e Companhia Vale do Rio Doce (DOCEGEO) na Unidade Komatiítica do *greenstone belt* de Piunbi (Furos PHI-04, 06, 07, 08, 09, 10 e 13) e na Unidade Tholeiítica Inferior (Furo PHI-11), mostrando os intervalos de ocorrência de intercalações de rochas metassedimentares, dados em metros a partir do início da sondagem na superfície do terreno. Números romanos à direita da sondagem PHI-07 correspondem aos níveis de rochas metassedimentares referidos no Capítulo IV.

### TABELA I

Testemunhos de sondagem do *Geenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais. Descrição sucinta das intercalações de rochas metassedimentares em metavulcânicas ultramáficas.

SONDAGEM	INTERVALO (metros)	DESCRIÇÃO
PHI-04	30,13-31,30	Metaturbidito máfico com níveis centimétricos a milimétricos de quartzo leitoso e sulfetos que grada para filito carbonoso foliado e desagregado, sem concentrações de sulfetos.
	31,90-32,30	Metaturbidito máfico. Baixa recuperação.
	59,89-59,99	Metaturbidito máfico com sulfetos disseminados e fragmentados.
	59,99-60,35	Metaturbidito máfico carbonoso com níveis milimétricos de quartzo e sulfetos.
	60,35-60,87	Filito carbonoso com disseminações de sulfetos.
	60,87-66,10	Metaturbidito máfico carbonoso com filetes de sulfetos.
	66,10-66,32	Metaturbidito máfico sem sulfetos. No intervalo em torno de 67,92 m os boletins da METAMIG apontam teores de Pt = 0,43 ppm e Pd = 0,04 ppm.
	71,57-72,46	Metaturbidito máfico carbonoso com filetes de quartzo e de sulfetos.
	72,46-72,54	Filito carbonoso.
	72,54-73,00	Metaturbidito máfico carbonoso.
	73,00-73,35	Metaturbidito máfico bastante laminado.
	90,84-92,20	Metaturbidito máfico carbonoso, muito deformado, com filetes de sulfetos. No intervalo 90,70 a 91,79 m os boletins da METAMIG apontam teores de Pt = 0,24 ppm e Pd = 0,010 ppm.
	92,20-93,40	Filito carbonoso.
	93,40-94,95	Filito carbonoso com freqüentes intercalações milimétricas de metaturbidito máfico carbonoso.
	98,20-98,58	Metaturbidito máfico.
	98,58-98,68	Dique de rocha máfica.
	98,68-99,30	Metaturbidito máfico com níveis milimétricos de sulfetos. No intervalo 98,86 a 98,96 m os boletins da METAMIG apontam teores de Pt = 0,72 ppm e Pd = 0,02 ppm.
	99,30-99,67	Dique de rocha máfica.
	99,67-101,00	Metaturbidito máfico carbonoso com sulfetos disseminados. Em torno de 100,92 m os boletins da METAMIG apontam teores de Pt = 0,10 ppm e Pd = 0,002 ppm.
PHI-06	2,00-12,90	Metaturbidito máfico alterado com coloração avermelhada.
	12,90-13,30	Nível de quartzo maciço.
	13,30- 18,00	Metaturbidito máfico alterado com níveis centimétricos de quartzo.
	18,00- 20,00	Filito carbonoso com níveis milimétricos de quartzo.
	26,00-26,60	Nível de quartzo com sulfeto.
	37,85-39,65	Metaturbidito máfico carbonoso
	39,65-42,00	Filito carbonoso.
	66,18-67,70	Metaturbidito máfico com filetes de sulfeto.
	67,70-70,70	Metaturbidito máfico carbonoso com filetes de sulfeto.
70,70-73,86	Filito carbonoso muito deformado com filetes de sulfeto.	

TABELA I - continuação...

PHI-06	87,13-87,79	Filito carbonoso com filetes de sulfetos.
	87,79-90,53	Metaturbidito máfico carbonoso com níveis milimétricos de quartzo.
PHI-07	72,14-74,70	Metaturbidito máfico com filetes submilimétricos a milimétricos de sulfeto.
	74,70-76,40	Metaturbidito máfico carbonoso intensamente deformado
	76,40-77,14	Filito carbonoso
	78,50-78,77	Filito carbonoso com sulfeto disseminado
	102,16-104,00	Metaturbidito máfico laminado com sulfeto disseminado
	104,00-06,00	Metaturbidito máfico carbonoso com sulfeto disseminado
	106,00-107,12	Filito carbonoso intensamente deformado
	144,70-145,95	Metaturbidito máfico com sulfeto disseminado
	145,95-148,20	Metaturbidito máfico carbonoso com sulfeto disseminado
	149,62-151,50	Metaturbidito máfico carbonoso laminado com sulfeto disseminado
	151,50-152,00	Metaturbidito máfico com sulfeto disseminado
	160,50-161,80	Metaturbidito máfico com filetes de sulfeto
	161,80-163,27	Metaturbidito máfico carbonoso com filetes de quartzo e sulfeto
	170,21-170,50	Metaturbidito máfico com filetes de sulfeto
	171,36-172,38	Metaturbidito máfico carbonoso intensamente deformado
	172,38-177,07	Filito carbonoso laminado com sulfeto disseminado
	201,02-203,44	Metaturbidito máfico laminado com filetes de sulfeto
	203,44-205,10	Metaturbidito máfico carbonoso com filetes de sulfeto e quartzo
	206,62-206,89	Metaturbidito máfico com filetes de sulfeto
208,70-209,00	Metaturbidito máfico com filetes de sulfeto	
211,27-213,00	Metaturbidito máfico com níveis milimétricos de sulfeto	
213,00-214,42	Metaturbidito máfico carbonoso com níveis milimétricos de sulfeto	
PHI-08	43,80-44,75	Metaturbidito máfico laminado
	44,75-46,60	Metaturbidito máfico carbonoso
	46,60-49,26	Dique de rocha máfica
	49,26-51,26	Metaturbidito máfico carbonoso laminado
	53,52-57,12	Metaturbidito máfico deformado com níveis milimétricos de quartzo
	68,98-70,23	Metaturbidito máfico laminado com filetes de sulfeto
	70,23-72,57	Metaturbidito máfico carbonoso com alta concentração de sulfeto
	72,57-72,80	Filito carbonoso
	119,40-120,00	Metaturbidito máfico com filetes de sulfeto
	120,00-121,65	Metaturbidito máfico carbonoso
	121,65-121,93	Filito carbonoso
	121,93-128,10	Metaturbidito máfico carbonoso com filetes de sulfeto
	128,10-128,70	Dique de rocha máfica
	128,70-135,50	Metaturbidito máfico carbonoso com filetes de sulfeto

TABELA I - continuação....

<b>PHI-08</b>	155,75-166,70	Metaturbidito máfico carbonoso
<b>PHI-09</b>	24,80-27,71	Metaturbidito máfico laminado
	32,05-39,45	Metaturbidito máfico laminado
<b>PHI-10</b>	156,56-157,00	Metaturbidito máfico carbonoso
	157,00-157,30	Dique de rocha máfica
	157,30-157,43	Metaturbidito máfico carbonoso com filetes de sulfeto
	164,60-165,90	Metaturbidito máfico carbonoso com filetes de sulfeto
	173,00-173,85	Metaturbidito máfico com filetes de sulfeto
	186,50-187,80	Metaturbidito máfico carbonoso com filetes de sulfeto
	187,80-189,53	Dique de rocha máfica
	189,53-190,00	Metaturbidito máfico carbonoso com filetes de sulfeto
	190,00-191,15	Dique de rocha máfica
	191,15-193,25	Filito carbonoso
	208,00-212,70	Metaturbidito máfico carbonoso laminado, com filetes de sulfeto
	212,70-219,90	Dique de rocha máfica
	219,90-220,10	Filito carbonoso
	228,30-229,60	Metaturbidito máfico silicificado
	229,60-240,86	Metaturbidito máfico carbonoso
<b>PHI-13</b>	87,70-88,95	Metaturbidito máfico
	175,80-176,33	Filito carbonoso
	179,00-179,15	Filito carbonoso
	215,00-216,80	Filito carbonoso
<b>PHI-11</b>	39,05-60,00	Alternância de Metagrauvaca fina e filito carbonoso com sulfeto disseminado

## Metaturbiditos Máficos

Metaturbiditos máficos ocorrem a partir do topo da Unidade Tholeiítica Inferior e prosseguem como intercalações ao longo da Unidade Komatiítica onde são, sistematicamente, acompanhados de Metaturbiditos Máficos Carbonosos e Filitos Carbonosos.

A camada, com cerca de 20 m de espessura, situada no topo da Unidade Tholeiítica Inferior, consiste de uma associação alternada e monótona de metargilitos sílticos e metargilitos puros, em ciclos centimétricos com acamamento gradacional, mas nem sempre nítido. Possuem cor cinza esverdeado claro, alternando com níveis sub-centimétricos cinza escuro, resultantes da variação granulométrica e composicional.

Em lâmina delgada (Fig. 6), os metargilitos sílticos são constituídos por uma matriz predominante, recristalizada por metamorfismo, composta por mais de 55% de clorita, com fenoblastos milimétricos e disseminados de tremolita-actinolita em até 35% da rocha. Os minerais acessórios compreendem leucoxênio com bordas de epidoto, carbonato e ocasionais sulfetos (produtos secundários e/ou de metamorfismo), e plagioclásio (albita), apatita e quartzo provavelmente detriticos. O conjunto dos minerais acessórios pode alcançar até 10% da rocha.

Os metargilitos puros (Fig. 7) são constituídos por mais de 90% de matriz composta por uma massa de clorita, subordinadamente sericita, com fenoblastos acessórios de epidoto, leucoxênio e quartzo, os quais podem alcançar até 10% da rocha. Veios milimétricos de quartzo sacaroidal, alguns com sulfetos, ocorrem localmente.



Figura 6 - Intercalação de rocha metassedimentar entre o topo da Unidade Tholeiítica Inferior e a base da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi. Fotomicrografia de metargilito síltico, mostrando a matriz de clorita e fenoblatos de tremolita-actinolita. Furo PHI-11, profundidade de 39,50m (LP, aumento 200X).

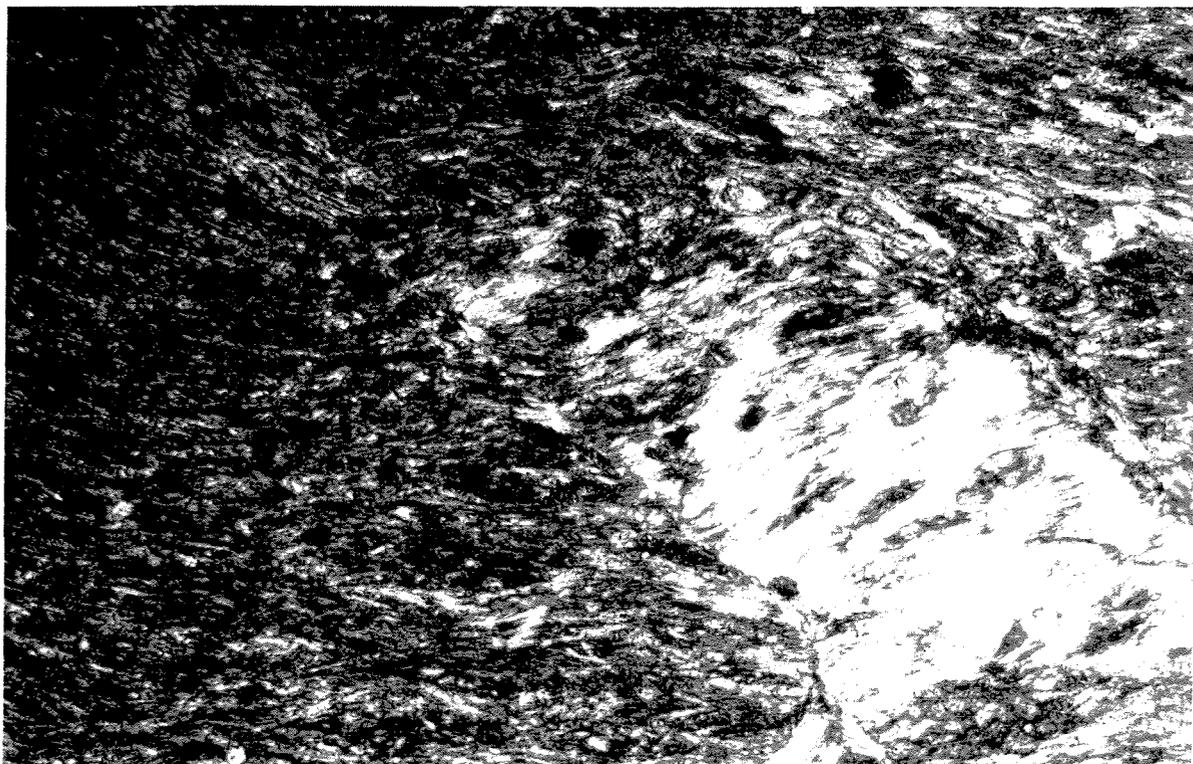


Figura 7 - Intercalação de rocha metassedimentar entre o topo da Unidade Tholeiítica Inferior e a base da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi. Fotomicrografia de metargilito puro, mostrando a matriz de clorita, com sericita subordinada. O cristal do canto esquerdo inferior é um fenoblasto de clorita. Furo PHI-11, profundidade de 41,60 m (LP, aumento 200X).

Os metaturbiditos máficos intercalados em derrames da Unidade Komatiítica são rochas de granulação fina a muito fina, com relíquias de acamamento original geralmente paralelo à foliação metamórfica. O acamamento (Fig. 8) é comumente gradacional e marcado pela sucessão de finas camadas e lâminas, com espessura inferior a 0,5 cm, alternadamente cinza claro e cinza escuro. Estas finas camadas e lâminas correspondem, também, a variações de granulação, interpretados como derivados de um protólito com alternâncias de níveis de areia fina e de silte e/ou argila. Níveis submilimétricos a centimétricos de quartzo e sulfeto ocorrem tanto ao longo dos planos de acamamento quanto em preenchimentos de fraturas. Quando em níveis paralelos ao acamamento, os sulfetos ocorrem ora como camadas centimétricas de sulfeto maciço, frequentemente dobrados, alternadas com metargilito (Fig. 9), ora como cristais euédricos disseminados em meio à matriz de clorita e sericita (Fig. 10).

Em lâmina delgada (Fig. 10) os metaturbiditos máficos exibem níveis milimétricos de quartzo, epidoto e leucoxênio em matriz de sericita e clorita, alternados com níveis, também milimétricos, com predomínio de clorita, contendo quartzo, epidoto, leucoxênio e sulfetos acessórios. Isto denota uma alternância de protólitos em lâminas de areia argilosa muito fina e argilas. Os metaturbiditos máficos podem localmente conter filmes ricos em material carbonoso dispostos segundo o acamamento.

Sericita e clorita, os principais constituintes destas rochas, ocorrem em palhetas submilimétricas a milimétricas, em geral formando uma matriz que suporta os demais constituintes. Nos níveis correspondentes a metargilitos, a clorita é geralmente o mineral predominante, enquanto a sericita predomina nos

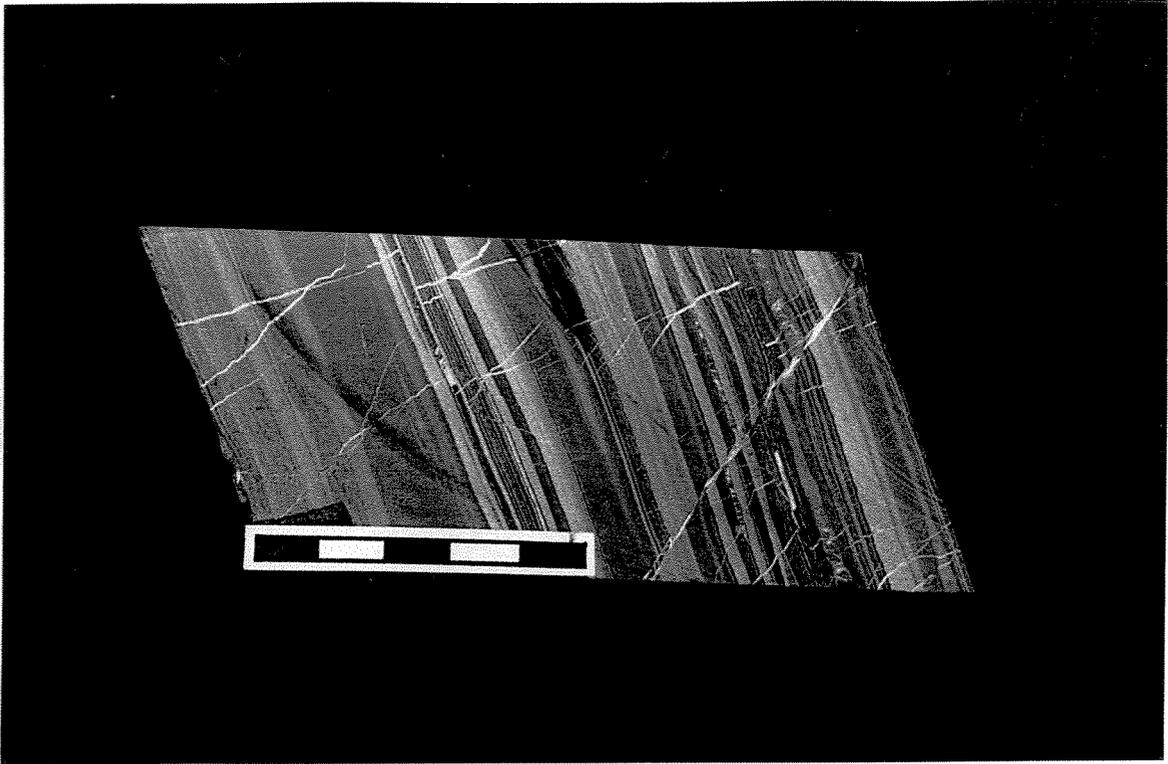


Figura 8 - Amostra de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico intercalado em metabasaltos komatiíticos da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi, mostrando a alternância de níveis milimétricos a centimétricos de metarenitos finos (níveis claros) e metargilitos (níveis escuros). Furo PHI-07, profundidade entre 151,50 e 152,00 m.



Figura 9 - Amostra de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi, mostrando um nível centimétrico de sulfeto maciço com laminação original dobrada. Furo PHI-07, profundidade entre 151,50 e 152,00 m.

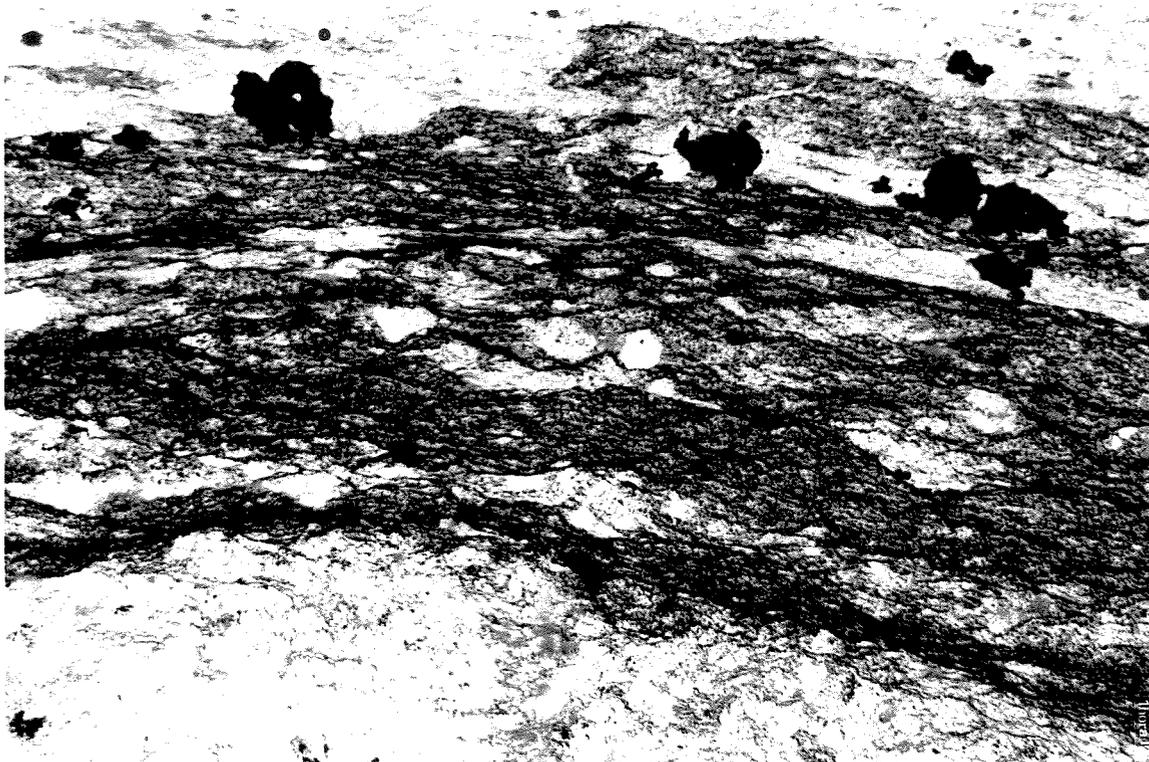


Figura 10 - Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi, mostrando a alternância entre níveis de metarenito muito fino e metargilito rico em clorita. Furo PHI-04, profundidade 91,12 m. LN, 50X.

níveis mais ricos em quartzo. Esses níveis são interpretados como metarenitos muito finos, entretanto, a clorita pode ocorrer em quantidades subordinadas.

O quartzo ocorre em grãos subarredondados, disseminados na matriz ou formando vênulas. Leucoxênio e epidoto também ocorrem disseminados, mas em quantidades geralmente inferiores a 1%. Os sulfetos podem alcançar até 10 % da rocha e, comumente, ocorrem em níveis sob a forma de agregados de grãos euédricos. Localmente, venulações de quartzo estão associadas.

### **Metaturbiditos Máficos Carbonosos**

Comparativamente aos metaturbiditos máficos, o acamamento dos metaturbiditos máficos carbonosos é mais fino e constituído de lâminas milimétricas paralelas, de cores alternadamente cinza escuro e preto. A cor preta acentuada resulta da concentração de material carbonoso. Em lâmina delgada (Fig. 11) os metaturbiditos máficos carbonosos apresentam uma estrutura acamadada. Esta, por vezes, contém relíquias de estruturas primárias tais como acamamento gradacional (Fig. 12), de corte-e-preenchimento (Fig. 13) e perturbações provavelmente resultantes de estruturas em chama (Fig. 14).

Ao microscópio, estas rochas são constituídas por níveis milimétricos ricos em clorita e sericita, as quais, em conjunto perfazem entre 50 e 60% da rocha. Esses níveis alternam-se com níveis, também milimétricos, ricos em material carbonoso sem cristalinidade. Essa alternância define um acamamento nítido e regular entre metargilitos e metargilitos carbonosos. O material carbonoso pode atingir entre 40 e 50 %, superando, em algumas lâminas, as



Figura 11 - Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi, mostrando a alternância entre lâminas de metargilito (níveis claros) e metargilito carbonoso (níveis escuros). Furo PHI-04, profundidade 60,09 m. LN, 25X.



Figura 12 - Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi, mostrando relíquias de acamamento gradacional. Furo PHI-04, profundidade 90,84 m. LN, 25X.



Figura 13 - Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi, mostrando relíquias de estrutura de corte-e-preenchimento no contato entre uma lâmina rica em matéria carbonosa (nível preto) e uma de metargilite (nível claro). Furo PHI-04, profundidade 60,09 m. LN, 100X.

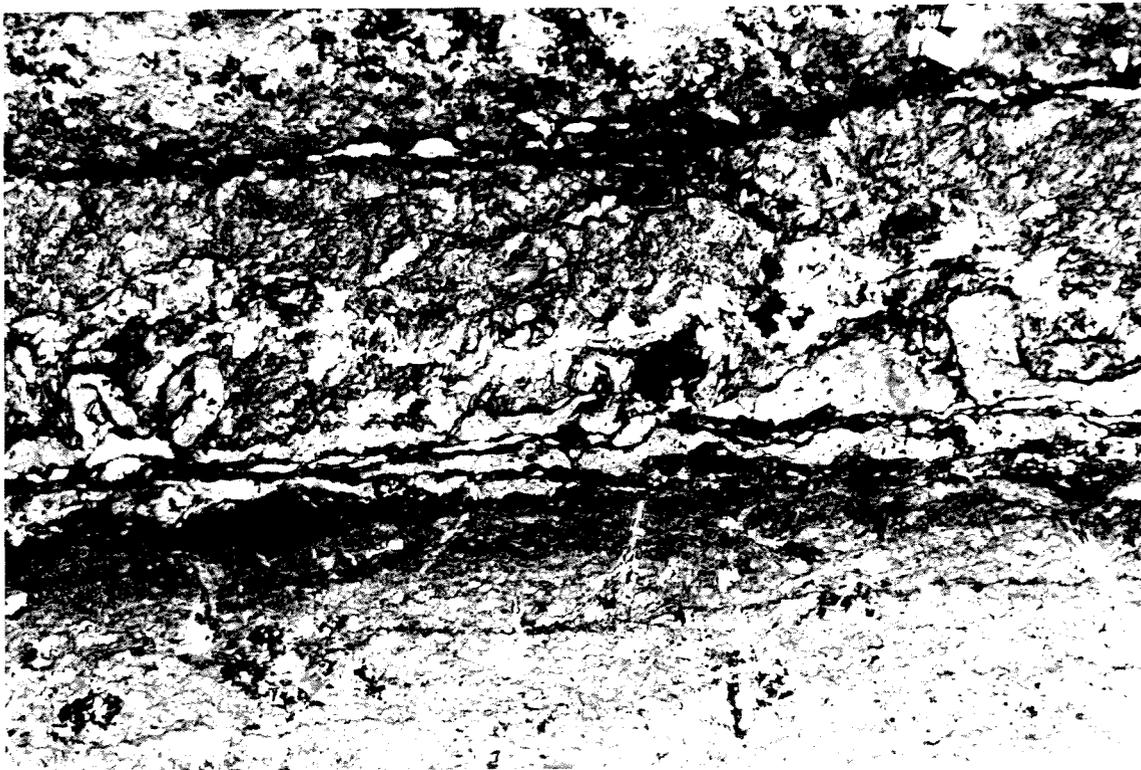


Figura 14 - Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi, mostrando perturbações interpretadas como prováveis relíquias de estruturas em chama. Furo PHI-04, profundidade 60,09 m. LN, 50X.

proporções de clorita e sericita.

Visto em detalhe, os níveis com minerais filitosos são ora mais ricos em clorita, ora em sericita. Quanto maiores as proporções de clorita, maior a frequência de fenoblastos do mineral.

Além de sericita e clorita, os metaturbiditos máfico carbonosos contém, também, quantidades acessórias de plagioclásio, epidoto, rutilo, quartzo e sulfetos. Apenas em uma lâmina foi observada a presença de fenoblastos de biotita.

O plagioclásio é albita e ocorre em cristais límpidos e maclados, como grãos disseminados na matriz de clorita e sericita, acompanhando o quartzo. O epidoto, rutilo e quartzo ocorrem em grãos diminutos, disseminados e intercrescidos ou inclusos em clorita e/ou sericita. O quartzo ocorre ainda, apesar de localmente, como constituinte de sombras de pressão em torno de sulfetos, sob a forma de cristais lamelares e curvos (Fig. 15).

Os sulfetos ocorrem mais comumente em cristais euédricos disseminados. Localmente, no entanto, podem se agrupar em filmes paralelos ao acamamento.

Vênulas são freqüentes nestas rochas (Fig. 16) e estão dispostas ora concordantes ora discordantes ao acamamento. O seu preenchimento consiste de quartzo ou de carbonato. Vênulas preenchidas com carbonato podem conter quartzo, mas o inverso não foi verificado.

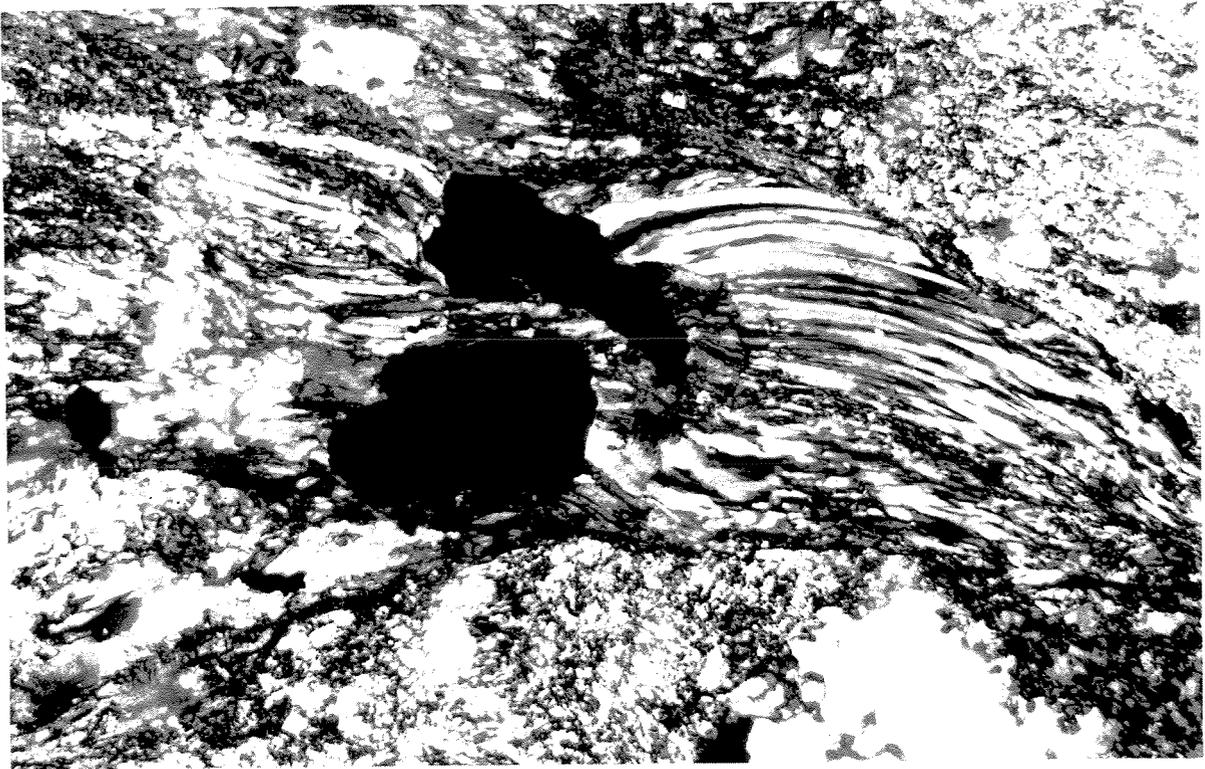


Figura 15 - Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi, mostrando um cristal de pirita com sombra de pressão composta de quartzo lamelar. Furo PHI-04, profundidade 91,12 m. LP, 100X.

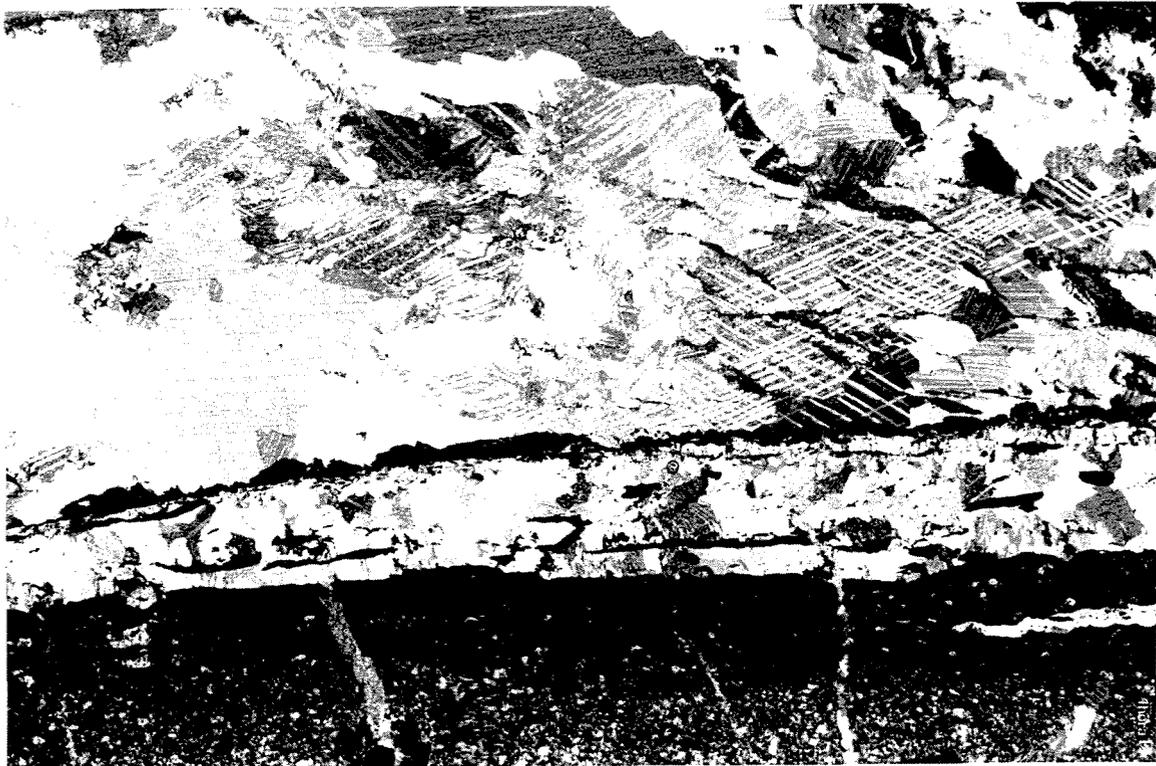


Figura 16 - Lâmina delgada de testemunho de sondagem de metaturbidito máfico carbonoso da Unidade Komatiítica, Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi, mostrando uma vênula preenchida por carbonato. Furo PHI-04, profundidade 90,84m. LP, 50X.

## Filitos Carbonosos

Os filitos carbonosos são rochas metassedimentares de cor preta, em virtude da abundância de matéria carbonosa. Possuem granulação muito fina e são persistentemente laminados. Localmente apresentam níveis centimétricos de quartzo e sulfetos. Apesar de menos abundantes, a cor e a persistente laminação os distinguem dos demais litotipos.

Em lâmina delgada esta típica laminação é definida por uma alternância de níveis com clorita e sericita ricos em matéria carbonosa, níveis com clorita e sericita pobres em matéria carbonosa e níveis ricos em quartzo. Clorita e sericita perfazem aproximadamente 70% do total da rocha, seguidas de cerca de 15% de material carbonoso, 10% de sulfetos e 5% de quartzo. Leucoxênio e epidoto ocorrem em proporções inferiores a 1%. A abundância relativa entre clorita e sericita é variável de um nível a outro.

Os níveis mais ricos em quartzo são constituídos por quartzo sacaroidal muito fino, recristalizado, intercrescido com material carbonoso, sulfetos e clorita e/ou sericita. Esses níveis são comumente recortados por filetes e vênulas de quartzo não sacaroidal, de granulação fina nas bordas que aumenta em direção ao centro destas estruturas. A porção central dos filonetes é comumente ocupada por um agregado de cristais euédricos e intercrescidos de sulfeto, carbonato e quartzo.

## MINERALOGIA DE FASES OPACAS

Quinze seções polidas de intercalações de rochas metassedimentares correspondentes aos intervalos 90,79-91,79 m e 98,86-98,96 m do furo PHI-04, foram preparadas no Laboratório de Petrografia da UNICAMP com vistas à identificação de minerais opacos em luz refletida, em particular de sulfetos e de eventuais minerais dos Elementos do Grupo da Platina (EGP). As mesmas seções foram metalizadas na Universidade de Brasília por evaporação de carbono em bastão, para identificação de fases minerais com o emprego de microscopia eletrônica de varredura.

A varredura por microscopia eletrônica foi realizada no Laboratório de Microsonda Eletrônica da Universidade de Brasília, utilizando uma microsonda eletrônica Cameca SX-50. A varredura foi feita utilizando um aumento base de 200 vezes, com uma corrente de feixes de 20nA e voltagem de 15 Kv. Fases minerais de tamanho muito reduzido foram analisadas utilizando um aumento de até 5000 vezes. A Tabela II resume a ocorrência de minerais opacos acrescidos de minerais não opacos também identificados por microsonda eletrônica. No Anexo III são apresentados os espectros dos minerais da amostra PHI04-91.72. Não foram encontrados minerais de EGP.

A pirita é o sulfeto mais comum, perfazendo cerca de 85% do total de minerais sulfetados. O mineral ocorre em cristais milimétricos subédricos a euédricos, mais comumente isolados e disseminados na matriz de silicatos, subordinadamente concentrados em lâminas e camadas centimétricas. Quando disseminados tendem a subédricos, mas quando em lâminas e camadas tendem a euédricos. Não raro a pirita está fraturada por deformação. Até o

intervalo correspondente à amostra PHI04-91.27, a pirita é subédrica, ocorre preferencialmente em lâminas e finas camadas e é de tamanho maior do que a ocorre a partir daquela profundidade (91,27 m). A partir daí, o mineral passa a ocorrer em cristais euédricos e, preferencialmente, disseminados.

Calcopirita e esfalerita perfazem, em conjunto, cerca de 15 % do total de sulfetos e se alternam em abundância. Ambos os minerais ocorrem sempre associados com a pirita, ora inclusos ora nas bordas desta. Quando inclusos, os seus cristais são submilimétricos e, por vezes, preenchem fraturas da pirita. Quando nas bordas, ocorrem em cristais geralmente um pouco maiores, em contato brusco com a pirita, mas que podem ser regulares quando a pirita é euédrica ou irregulares quando subédrica.

A galena, quando presente, ocorre preferencialmente inclusa na pirita como cristais microscópicos brilhantes. Mais raramente, ocorre como cristais anédricos maiores disseminados na matriz de silicatos.

A prata nativa ocorre em agregados submicroscópicos disseminados na matriz de silicatos e tende a ser mais freqüente nas amostras com pirita euédrica.

A hematita foi observada em apenas uma seção polida, onde ocorre em diminutos cristais circundando a pirita. A limonita é produto de alteração dos sulfetos, ocorrendo como um filme de plasma envolvente.

Fases menores que apresentaram alta reflectância em seção polida, levantaram a suspeita sobre a presença de minerais de EGP. Estas foram analisadas e na realidade tratam-se de zircão, monazita, rutilo, titanita, apatita, xenotima, barita, siderita, carbonato de Cd e Ca e asbolana. Os minerais



opacos da amostra PHI04-91.01 consistem de uma associação de cromita, magnetita, ilmenita, apatita e prata nativa, com calcopirita subordinada.

**TABELA II**

Fases de minerais opacos em seções polidas de rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do greenstone belt de Piumhi, MG.

Amostra	Mineralogia
PHI-04-90.79	pirita, calcopirita, esfalerita, barita, carbonato de Cd e Ca
PHI-04-90.84	pirita, calcopirita, esfalerita, galena, prata, Cu nativo
PHI-04-90.94	pirita, esfalerita, galena, zircão, prata, galena
PHI-04-90.96	pirita, calcopirita, galena, esfalerita, prata
PHI-04-91.01	prata, cromita, ilmenita, apatita, calcopirita
PHI-04-91.05	pirita, calcopirita, esfalerita, prata
PHI-04-91.09	pirita, calcopirita, esfalerita, zircão, prata, monazita
PHI-04-91.12	pirita, esfalerita, calcopirita, galena, prata, monazita
PHI-04-91.17	pirita, esfalerita, galena, rutilo
PHI-04-91.23	pirita, calcopirita, galena, prata, monazita
PHI-04-91.27	pirita, esfalerita, calcopirita, galena
PHI-04-91.35	pirita, esfalerita, galena, monazita
PHI-04-91.72	pirita, esfalerita, calcopirita, galena, prata, rutilo, magnetita, barita, apatita, xenotima
PHI-04-91.80	pirita, prata, esfalerita, calcopirita, galena, calcopirita, siderita.
PHI-04-98.86	pirita, esfalerita, calcopirita, zircão, titanita, prata, asbolana

## CAPÍTULO IV

# GEOQUÍMICA DAS ROCHAS METASSEDIMENTARES

### INTRODUÇÃO

Rochas sedimentares detríticas arqueanas possuem uma origem complexa e são metalogeneticamente importantes. A origem destas rochas tem sido, em geral, atribuída à participação de áreas-fonte contendo rochas ultramáficas, máficas e félsicas, como registrado, por exemplo, por Bavinton & Taylor (1980), Jenner *et al.* (1981), Lowe (1980, 1982), Taylor & McLennan (1985), Wronkiewickz & Condie (1987), Mass & McCulloch (1991), Camiré *et al.* (1993), Arora *et al.* (1994), e Jost *et al.* (1993, 1995), segundo um modelo de proveniência bimodal. Estas características as distingue de rochas sedimentares mais modernas que o Arqueano. Dois aspectos metalogenéticos podem estar relacionados a rochas sedimentares arqueanas. Um, de que parecem ter influência na formação de depósitos sulfetados de Ni-Cu-EGP em derrames de komatiitos, por contaminação de voláteis, como sugerido por Bavinton & Keays (1978), Arndt & Jenner (1986), Naldrett (1989), Duke (1990) para os depósitos de Kambalda, Austrália. Outro de que estas rochas podem hospedar depósitos sulfetados com EGP, como descrito por Gresham & Loftu-Hills (1981).

Com o objetivo de avaliar a origem e o potencial metalogenético e compará-los com os de terrenos similares, as rochas metassedimentares intercaladas em basaltos komatiíticos do *greenstone belt* de Piumhi foram amostradas para análise química. O furo de sonda PHI-07 foi escolhido para ser amostrado, a intervalos de 50 cm, nos intervalos metassedimentares. A opção por esta sondagem teve por critérios o maior número de intercalações de rochas metassedimentares e o melhor estado de preservação e recuperação das mesmas. Estes permitem a obtenção de dados mais confiáveis e também a observação de eventuais variações verticais dos teores dos elementos analisados. A sondagem PHI-04, que em análises anteriores, apresentou teores anômalos de Pt, não foi considerada para análise. Isto se deve ao fato de não ter mais material disponível para amostragem em diversos níveis metassedimentares.

Oitenta e quatro amostras foram coletadas para a determinação das proporções de elementos que fossem mais diagnósticos para a origem e para o potencial metalogenético destas rochas, compreendendo Au, Pd, Pt, Ag, Ni, Co, Cu, Cr, Zn e Pb. As amostras não foram analisadas para os óxidos de elementos maiores e menores, em razão de não serem potencialmente diagnósticas para as finalidades do estudo, voltado predominantemente para aspectos metalogenéticos. É importante destacar que todos os testemunhos analisados continham sulfetos ora disseminados, ora em filetes ou em níveis milimétricos.

As seções de testemunho com 50 cm de comprimento foram cortadas longitudinalmente ao meio. Uma das metades foi novamente cortada ao meio e uma das partes remetida para análise química pela NOMOS Laboratório, Rio de Janeiro. As amostras foram pulverizadas a 200 mesh de onde foram

separadas duas alíquotas. Uma foi submetida à pré-concentração por *fire-assay* para a determinação de Au, Pt e Pd. A segunda foi atacada por ácidos fortes para solubilização e determinação dos demais elementos. As proporções dos elementos analisados, determinadas por Absorção Atômica, estão listadas na Tabela III.

Os resultados serão, a seguir, descritos e discutidos sob dois aspectos. Primeiramente, pretende-se descrever o comportamento de cada elemento quanto aos seus teores e suas variações nos diversos estratos e ao longo da coluna estratigráfica do Furo PHI-07. Em seguida, pretende-se analisar algumas relações entre elementos, empregando-se o coeficiente de correlação e diagramas de variação binários e ternários.

### **COMPORTAMENTO E VARIAÇÃO DOS ELEMENTOS**

A descrição do comportamento e variação dos elementos será analisada tomando por referência os horizontes de rochas metassedimentares da sondagem PHI-07 designados por níveis numerados de I a XII, na ordem crescente de profundidade (Fig. 5 e Tabela III). Estes níveis foram, por sua vez, subdivididos em intervalos das respectivas profundidades de amostragem.

Os dados analíticos de cada elemento foram submetidos a uma análise da distribuição de suas respectivas populações. Como o objetivo foi de caracterizar as populações de ponto de vista metalogenético e não um tratamento estatístico aprofundado dos dados, utilizou-se os cálculos de média e desvio padrão aritméticos. Pela análise dos histogramas de distribuição de populações (ver Figs. 24, 25 e 26) a exceção de Paládio, os demais elementos não possuem distribuição simétrica, portanto, os valores de média e desvio

TABELA III

Rochas metassedimentares da sondagem PHI-07, *greenstone belt* de Piumhi. Dados de teores de elementos traços em ppm, exceto Au, Pd e Pt, em ppb.

Nível	Amostra	Intervalo	Au	Pd	Pt	Ag	Ni	Cr	Co	Cu	Zn	Pb	Descrição
I	01	72,14-72,50	6	10	10	0,20	920	700	65	70	291	22	Metaturbidito máfico
	02	72,50-73,00	24	6	5	0,10	1060	1080	75	140	300	30	Metaturbidito máfico
	03	73,00-73,50	30	8	5	0,20	450	285	64	156	211	94	Metaturbidito máfico
	04	73,50-74,00	36	9	5	0,10	430	219	93	298	2100	93	Metaturbidito máfico
	05	74,00-74,50	18	8	5	0,10	393	540	65	220	1010	47	Metaturbidito máfico
	06	74,50-75,00	8	10	5	0,10	297	210	54	167	960	29	Metaturbidito máfico/ máfico carbonoso
	07	75,00-75,50	20	8	5	0,10	198	145	44	125	841	35	Metaturbidito máfico carbonoso
	08	75,50-76,00	34	10	5	0,10	227	153	49	150	990	32	Metaturbidito máfico carbonoso
	09	76,00-76,50	32	9	10	0,10	420	198	73	228	8656	65	Metaturb. máfico carbonoso/Filito carbonoso
	10	76,50-77,00	16	10	5	0,10	859	460	45	172	730	20	Filito carbonoso
	11	77,00-77,50	6	5	5	0,10	156	281	42	41	620	6	Filito carbonoso/Derrame
II	14	78,50-78,77	14	8	5	0,20	231	38	53	332	71	1	Filito carbonoso
III	17	102,16-102,50	8	6	5	0,10	700	1320	75	145	160	50	Metaturbidito máfico
	18	102,50-103,00	1	8	10	0,10	1080	1550	70	107	100	62	Metaturbidito máfico
	19	103,00-103,50	4	6	10	0,10	1020	1460	43	286	520	62	Metaturbidito máfico
	20	103,50-104,00	11	6	10	0,90	980	249	67	373	1000	86	Metaturbidito máfico
	21	104,00-104,50	10	8	10	0,10	367	387	85	178	1620	26	Metaturbidito máfico carbonoso
	22	104,50-105,00	12	6	5	0,10	335	183	65	180	1150	23	Metaturbidito máfico carbonoso
	23	105,00-105,50	14	7	10	0,10	317	165	66	213	1820	16	Metaturbidito máfico carbonoso
	24	105,50-106,00	14	6	5	0,10	180	222	44	102	990	4	Metaturbidito máfico carbonoso
	25	106,00-106,50	10	7	5	0,10	298	120	64	218	1535	6	Filito carbonoso
	26	106,50-107,00	6	8	5	0,10	218	144	50	188	736	5	Filito carbonoso
27	107,00-107,12	14	7	5	0,10	204	160	44	200	527	8	Filito carbonoso	
IV	29	144,70-145,00	60	2	5	0,10	218	275	60	200	540	2	Metaturbidito máfico
	30	145,00-145,50	10	1	5	0,10	286	670	44	100	384	5	Metaturbidito máfico
	31	145,50-146,00	14	10	5	0,10	390	820	50	50	900	23	Metaturbidito máfico/máfico carbonoso
	32	146,00-146,50	26	8	5	0,10	201	101	110	315	3880	12	Metaturbidito máfico carbonoso
	33	146,50-147,00	20	10	5	0,10	164	62	46	212	275	4	Metaturbidito máfico carbonoso
	34	147,00-147,50	20	6	5	0,10	264	129	61	251	1240	31	Metaturbidito máfico carbonoso
	35	147,50-148,00	20	8	5	0,10	460	208	75	274	2040	65	Metaturbidito máfico carbonoso
	36	148,00-148,20	12	9	5	0,10	470	244	81	263	1150	16	Metaturbidito máfico carbonoso
	37	149,62-150,00	42	8	5	0,10	710	187	97	317	3670	53	Metaturbidito máfico carbonoso
V	38	150,00-150,50	22	8	5	0,20	560	867	100	300	3020	63	Metaturbidito máfico carbonoso
	39	150,50-151,00	14	16	10	0,10	760	355	130	570	1700	8	Metaturbidito máfico carbonoso
	40	151,00-151,50	18	12	5	0,10	590	299	130	393	1780	2	Metaturbidito máfico carbonoso
	41	151,50-152,00	18	10	5	0,10	610	294	140	327	1370	10	Metaturbidito máfico

Tabela III - continuação...

Nível	Amostra	Intervalo	Au	Pd	Pt	Ag	Ni	Cr	Co	Cu	Zn	Pb	Descrição
VI	44	160,50-161,00	2	12	5	0,10	282	136	35	63	135	3	Metaturbidito máfico
	45	161,00-161,50	1	10	5	0,80	276	68	61	214	58	1	Metaturbidito máfico
	46	161,50-162,00	6	6	5	0,10	852	116	73	383	107	15	Metaturbidito máfico/máfico carbonoso
	47	162,00-162,50	2	10	5	0,10	520	215	130	400	250	12	Metaturbidito máfico carbonoso
	48	162,50-163,00	8	8	5	0,10	460	232	82	205	252	1	Metaturbidito máfico carbonoso
	49	163,00-163,27	10	10	5	0,10	420	750	88	155	216	1	Metaturbidito máfico carbonoso
VII	51	170,21-170,50	10	10	5	0,10	490	183	120	400	130	5	Turbidito máfico carbonoso
VIII	54	171,36-171,50	64	22	5	0,20	267	77	220	156	610	6	Metaturbidito máfico carbonoso
	55	171,50-172,00	120	5	5	0,10	510	243	75	272	160	27	Metaturbidito máfico carbonoso
	56	172,00-172,50	50	10	5	0,30	700	153	101	410	3630	83	Metaturb. máfico carbonoso/ Filito carbonoso
	57	172,50-173,00	40	12	5	0,10	760	128	170	570	5190	105	Filito carbonoso
	58	173,00-173,50	54	14	5	0,10	580	137	180	340	2440	103	Filito carbonoso
	59	173,50-174,00	92	14	10	0,10	780	140	190	520	2240	38	Filito carbonoso
	60	174,00-174,50	46	12	5	0,10	860	299	220	540	4590	5	Filito carbonoso
	61	174,50-175,00	38	18	5	0,10	670	337	160	510	1490	1	Filito carbonoso
	62	175,00-175,50	36	12	10	0,10	610	267	170	770	167	3	Filito carbonoso
	63	175,50-176,00	20	12	5	0,10	361	186	84	580	560	6	Filito carbonoso
	64	176,00-176,50	18	14	5	0,10	248	187	57	830	150	5	Filito carbonoso
	65	176,50-177,00	28	18	5	0,10	364	199	83	800	590	5	Filito carbonoso
	66	177,00-177,37	10	10	5	0,10	274	560	59	117	327	8	Filito carbonoso/ Derrame
	IX	67	201,02-201,50	16	10	5	0,10	530	312	150	700	98	8
68		201,50-202,00	12	6	5	0,10	450	187	110	930	156	2	Metaturbidito máfico
69		202,00-202,50	10	14	5	0,10	630	250	160	510	920	30	Metaturbidito máfico
70		202,50-203,00	12	14	6	0,10	440	247	86	313	1130	21	Metaturbidito máfico
71		203,00-203,50	10	12	5	0,10	670	255	120	440	3220	35	Metaturbidito máfico/ máfico carbonoso
72		203,50-204,00	10	12	6	0,10	580	228	96	430	1790	31	Metaturbidito máfico carbonoso
73		204,00-204,50	44	8	5	0,30	600	144	90	368	1410	35	Metaturbidito máfico carbonoso
74		204,50-205,00	36	9	6	0,10	580	247	130	470	1570	33	Metaturbidito máfico carbonoso
75		205,00-205,20	22	8	8	0,50	198	207	78	153	960	17	Metaturbidito máfico carbonoso/ Derrame
X	76	206,62-206,89	58	8	5	0,10	324	81	68	320	1360	100	Metaturbidito máfico
XI	77	208,70-209,00	26	10	5	1,50	350	186	77	288	1000	32	Metaturbidito máfico
XII	78	211,27-211,50	56	10	8	2,40	1190	117	240	880	3390	141	Metaturbidito máfico
	79	211,50-212,00	58	8	5	2,00	1320	42	300	1250	5990	189	Metaturbidito máfico
	80	212,00-212,50	62	8	5	2,10	820	78	190	720	11290	175	Metaturbidito máfico
	81	212,50-213,00	54	4	5	1,70	1730	87	420	1390	7500	220	Metaturbidito máfico/ máfico carbonoso
	82	213,00-213,50	48	10	6	0,80	1320	84	310	1140	9700	175	Metaturbidito máfico carbonoso
	83	213,50-214,00	62	16	7	1,70	1250	90	350	1110	7400	153	Metaturbidito máfico carbonoso
	84	214,00-214,42	44	6	5	0,30	820	85	190	630	6500	124	Metaturbidito máfico carbonoso

padrão podem ser influenciados por valores extremos (Maranhão 1982, Davis, 1986). Porém, como os teores são muito baixos este fato não prejudicaria a interpretação metalogenética.

Para cada elemento, os valores foram divididos em intervalos de *background* de anomalias de 1ª e 2ª Ordem de grandeza. Teores de *background* são considerados os que se situam abaixo do valor da soma da média com o desvio padrão, o qual é também o limite inferior de anomalias de 2ª Ordem. O limite superior de anomalias de 2ª Ordem é igual à soma da média com duas vezes o desvio padrão, onde se situa o limite inferior das anomalias de 1ª Ordem. Todos os valores calculados foram arredondados para a dezena mais próxima. O comportamento dos elementos na sondagem PHI-07 será descrito agrupando-os por afinidade geoquímica, em Metais Nobres e Metais Básicos.

## Metais Nobres

### Ouro

Os teores de Ouro variam entre 1 e 120 ppb, com uma média aritmética de 26 ppb e um desvio padrão de 22 ppb. Estes valores definem que os limites inferiores das anomalias de 1ª e 2ª Ordem do elemento na população amostrada são respectivamente de 70 e 48 ppb.

Valores superiores a 70 ppb ocorrem apenas em dois intervalos do Nível VIII, respectivamente com 120 e 92 ppb, o qual inclui também três intervalos com teores correspondentes a anomalias de 2ª Ordem (ver Tabela III). O primeiro intervalo consiste de Metaturbidito Máfico Carbonoso e o segundo de Filito Carbonoso. O Nível VIII contém apenas sulfetos disseminados.

Das 7 amostras do Nível XII, onde sulfetos ocorrem em níveis milimétricos, 5 possuem teores correspondentes a anomalias de 2ª Ordem. A homogeneidade dos teores neste nível, mesmo incluindo os intervalos com teores inferiores a 48, são marcantes. A única amostra do Nível X, com filetes de sulfetos, também apresenta teor correspondente a anomalias de 2ª Ordem. Os intervalos dos demais níveis tem teores de *background*, exceto o intervalo 144,70-145,00 m do Nível IV. Este intervalo, que apresenta sulfetos disseminados, tem um teor de 60 ppb.

A variação dos teores de Ouro (Fig. 17 e Tabela III) ao longo dos níveis com mais de 2 intervalos analisados (I, III, IV, V, VI, VIII, IX e XII) se agrupa, em ordem decrescente de frequência e da base para o topo dos estratos, em (a) variações sistemáticas, (b) variações aleatórias e (c) distribuições homogêneas.

Variações sistemáticas compreendem:

a) - pequenas flutuações de teores mais elevados, sem variação aparente entre Filitos Carbonosos e Metaturbiditos Máficos Carbonosos, seguidas de declínio brusco com o ingresso dos Metaturbiditos Máficos (Nível III);

b) - aumento gradual de teores da base para o topo, como no interior dos Metaturbiditos Máficos Carbonosos do Níveis IV, V e IX, e dos Filitos Carbonosos do Nível VIII;

c) - diminuição gradual de teores da base para o topo, como observado no conjunto de Metaturbiditos Máficos Carbonosos e Metaturbiditos Máficos do Nível VI.

Uma variação aleatória é exemplificada pelo Nível I, onde os teores não possuem relação evidente com a altura estratigráfica no nível nem com os seus litotipos. Contudo, se observada no detalhe, a aparente aleatoriedade dos

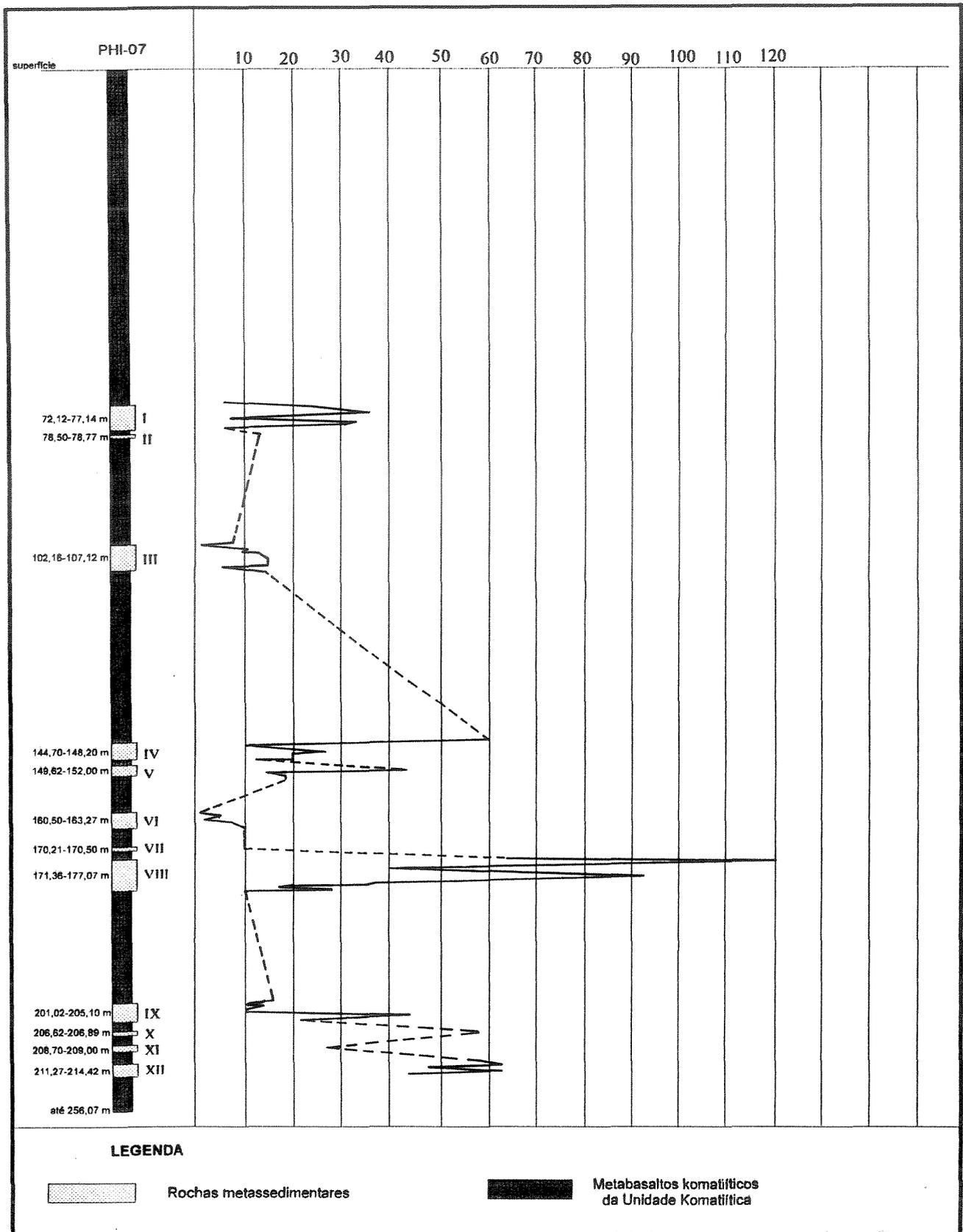


Figura 17 - Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de ouro em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatíficos do *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppb.

teores resulta do crescimento dos mesmos, da base para o topo nos filitos carbonosos, e de sua diminuição, no mesmo sentido estratigráfico, nos Metaturbiditos Máficos Carbonosos e Metaturbiditos Máficos sobrepostos, em intervalos de espessura relativamente reduzidos. Isto sugere que distribuições aleatórias reproduzem, em intervalos de espessura reduzidos, distribuições sistemáticas observadas ao longo de horizontes mais espessos.

Distribuição homogênea foi observada apenas no Nível XII, segundo a qual não há uma variação significativa ao longo da seção, nem há diferenças de teores entre Metaturbiditos Máficos Carbonosos e Metaturbiditos Máficos.

Comparando os níveis entre si, da base para o topo da sondagem, observa-se que os teores mais homogêneos, a maioria dentro do intervalo de anomalias de 2ª Ordem, situam-se na base (Nível XII), coincidindo com a ocorrência de sulfetos em níveis milimétricos. Em direção ao topo, há uma nítida alternância de níveis com teores mais elevados e mais baixos, independente dos sulfetos estarem disseminados ou em filetes, apesar de teores correspondentes a anomalias de 1ª Ordem situarem-se na metade superior da seção do Nível VIII, com sulfetos disseminados. Isso sugere que as sucessivas fases de sedimentação foram alimentadas em ciclos alternadamente de maior e menor abundância em Ouro, independente da forma de ocorrência dos sulfetos. No detalhe, cada ciclo foi alimentado de modo distinto, com teores ora crescentes, ora decrescentes, condicionados ou não à natureza dos litotipos da seção estratigráfica de cada nível.

### ***Paládio***

Os teores de Paládio variam entre 1 e 22 ppb, com uma média aritmética de 9 ppb e desvio padrão de 4 ppb. Esses valores definem que os limites

inferiores das anomalias 1ª e 2ª Ordem do elemento são respectivamente de 17 e 13 ppb.

Valores superiores a 17 ppb ocorrem apenas no Nível VIII (ver Tabela III), coincidindo, como no Ouro, com a ocorrência de sulfetos disseminados. O primeiro intervalo consiste de Metaturbidito Máfico Carbonoso e os demais de Filito Carbonoso. Teores de *background* e anomalias de 2ª Ordem estão distribuídos aleatoriamente ao longo dos diversos intervalos dos demais níveis, independente da forma de ocorrência dos sulfetos.

Os baixos teores de Paládio ao longo dos Níveis I, III, IV, V, VI, VIII, IX e XII inibem a identificação de concentrações diferenciais entre os litotipos, estilos de variação no interior dos mesmos e ao longo dos níveis, a comparação entre os níveis e a identificação de níveis anômalos.

### ***Platina***

Os teores de Platina variam entre 5 e 10 ppb, com uma média aritmética de 6 ppb e um desvio padrão de 2 ppb. Portanto, os limites inferiores das anomalias 1ª e 2ª Ordem são respectivamente de 10 e 8 ppb.

Valores de 10 ppb ocorrem (Tabela III) em dois intervalos do Nível I, em cinco do Nível III, um do Nível V e dois do Nível VIII. O primeiro contem sulfetos em filetes e os demais disseminados, sugerindo que os teores de Platina independem da forma de ocorrência dos sulfetos. O primeiro intervalo do Nível I consiste de Metaturbidito Máfico Carbonoso e o segundo de Filito Carbonoso. No Nível III apenas uma amostra é de Metaturbidito Máfico Carbonoso e as demais são de Metaturbidito Máfico. No Nível V a amostra é de Metaturbidito Máfico enquanto as do Nível VIII são Filitos Carbonosos. Teores correspondentes a anomalias de 2ª Ordem ocorrem em um intervalo do Nível IX

e um do Nível XII. Teores de *background* estão distribuídos aleatoriamente nos intervalos dos demais níveis.

Os baixos teores de Platina ao longo dos Níveis I, III, IV, V, VI, VIII, IX e XII também inibem a identificação de concentrações diferenciais entre os litotipos, estilos de variação no interior dos mesmos e ao longo dos níveis, a comparação entre os níveis e a identificação de níveis anômalos.

### **Prata**

Os teores de Prata variam entre 0,1 e 2,4 ppm, com média aritmética de 0,30 ppm e desvio padrão de 0,5 ppm. Assim, os limites inferiores das anomalias 1ª e 2ª Ordem são, respectivamente, de 1,3 e 0,8 ppm.

Valores superiores a 1,3 ppm ocorrem no Nível XI em Metaturbidito Máfico. No Nível XII ocorrem em 4 intervalos com Metaturbidito Máfico e um com Metaturbidito Máfico Carbonoso. Anomalias de 2ª Ordem ocorrem apenas no intervalo de 103,50-104,00 m do Nível III, com teor de 0,9 ppm. Teores de *background* distribuem-se aleatoriamente nos diversos intervalos dos demais níveis (ver Tabela III).

Comparando os níveis entre si, da base para o topo da sondagem, observa-se que os teores mais elevados situam-se na base (Nível XII) com sulfetos em níveis milimétricos. Os baixos teores observados ao longo dos demais níveis, também, inibem a identificação da variação no interior dos mesmos e a comparação entre os níveis.

## Metais Básicos

### **Níquel**

Os teores de Níquel situam-se entre 156 e 1730 ppm, com média aritmética de 555 ppm e desvio padrão de 325 ppm, definindo os limites inferiores das anomalias 1ª e 2ª Ordem do elemento, respectivamente, em 1205 e 880 ppm.

Valores superiores a 1205 ppm ocorrem apenas em quatro intervalos do Nível XII (Tabela III), o qual também inclui um intervalo com teores correspondentes a anomalias de 2ª Ordem. Dentre os primeiros, dois se localizam em Metaturbidito Máfico e dois em Metaturbidito Máfico Carbonoso. Anomalias de 2ª Ordem ocorrem, ainda, nos Níveis I e III, respectivamente com sulfetos em filetes e em disseminações e situam-se em Metaturbidito Máfico. Os intervalos dos demais níveis mostram teores que se enquadram como *background*.

A variação dos teores de Níquel (Fig. 18 e Tabela III) ao longo dos Níveis I, III, IV, V, VI, VIII, IX e XII se enquadram, em ordem decrescente de frequência, em (a) variações sistemáticas e (b) distribuições homogêneas.

As variações sistemáticas compreendem:

a) - aumento dos teores da base para o topo de um litotipo, como exemplificado pelos Metaturbiditos Máficos dos Níveis I e IV e pelos Metaturbiditos Máficos Carbonosos dos Níveis IV e XII;

b) - aumento de teores dos Filitos Carbonosos basais para os Metaturbiditos Máficos Carbonosos sobrepostos, seguido de um aumento substancial e brusco destes para os Metaturbiditos Máficos, como no Nível III;

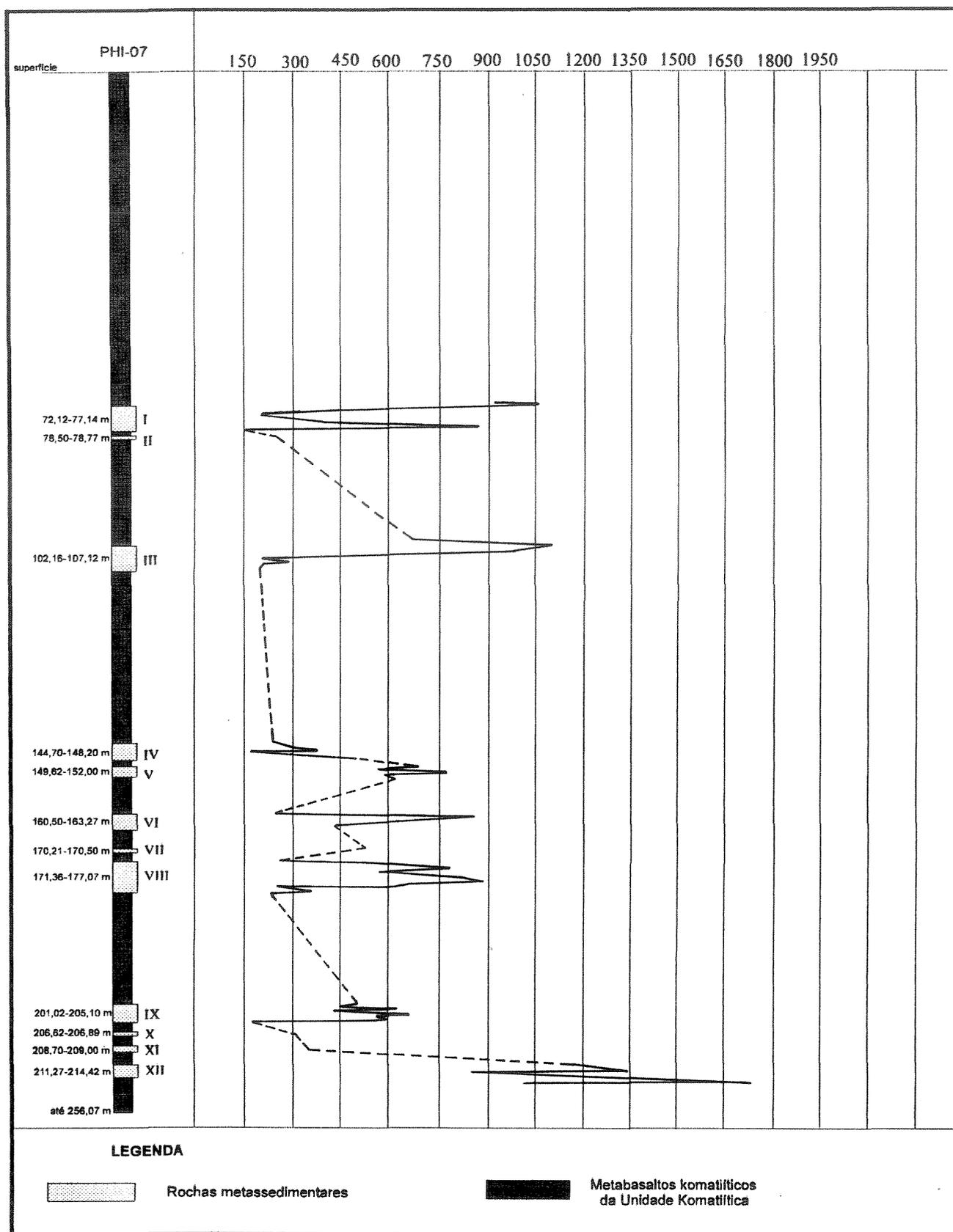


Figura 18 - Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de níquel em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.

c) - aumento de teores em ciclos menores no interior de um mesmo litotipo, como mostrado pela variação observada no interior dos Filitos Carbonosos do Nível VIII e Metaturbidito Máfico Carbonoso do Nível V;

d) - diminuição de teores de um litotipo para outro, como na passagem de Filitos Carbonosos para Metaturbiditos Máficos Carbonosos do Nível I, quanto diminuição no interior de um litotipo, independente dos demais adjacentes, como a observada nos Metaturbiditos Máficos dos Níveis IV e XII e nos Metaturbiditos Máficos Carbonosos do Nível IV;

Uma distribuição homogênea ocorre apenas no Nível IX. Não há uma variação significativa ao longo da seção, nem há diferenças entre Metaturbiditos Máficos Carbonosos e Metaturbiditos Máficos.

Comparando os níveis entre si, da base para o topo da sondagem, observa-se que os teores maiores de Níquel situam-se na base da seqüência (Nível XII), com sulfetos em níveis milimétricos. A partir da base os níveis mostram teores do metal desordenadamente elevados e baixos, indicando que as sucessivas fases de sedimentação foram alimentadas com abundâncias variáveis em Níquel, entretanto, sistematicamente elevadas. A ausência de sulfetos de Níquel e as suas baixas proporções em outras fases similares analisadas nas seções polidas por microsonda sugerem que o metal provavelmente participa das fases de silicatos, em particular clorita e anfibólios, e é independente da variação nas proporções e forma de ocorrência de sulfetos.

### **Cromo**

Os teores de Cromo variam entre 38 e 1550 ppm, com uma média aritmética de 301 ppm e um desvio padrão de 310 ppm, determinando os limites

inferiores das anomalias 1ª e 2ª Ordem do elemento na população amostrada em, respectivamente, 921 e 611 ppm.

Valores superiores a 921 ppm ocorrem (ver Tabela III) em três intervalos do Nível III e em um intervalo do Nível I, todos localizados em Metaturbidito Máfico. Anomalias de 2ª Ordem ocorrem em um intervalo do Nível I e dois intervalos do Nível IV, um no Nível V e um no Nível VI, correspondendo a Metaturbidito Máficos e Metaturbiditos Máficos Carbonosos. Os intervalos dos demais níveis mostram teores de *background*.

A variação dos teores de Cromo (Fig. 19 e Tabela III) ao longo dos níveis I, III, IV, V, VI, VIII, IX e XII são, em ordem decrescente de frequência, (a) variações sistemáticas, (b) distribuições homogêneas e (c) variações aleatórias.

Variações sistemáticas consistem de:

a) - aumento de teores da base para o topo em Filitos Carbonosos (Nível I), em Metaturbiditos Máficos Carbonosos (Nível V) e em Metaturbiditos Máficos (Nível VI);

b) - diminuição de teores da base para o topo em Filitos Carbonosos (Nível III), Metaturbiditos Máficos Carbonosos (Nível VI) e Metaturbiditos Máficos (Nível VI);

c) - variações cíclicas em Filitos Carbonosos (Nível VIII), Metaturbiditos Máficos Carbonosos (Níveis I, III, IV e VIII), e em Metaturbiditos Máficos (Nível IX).

Distribuições homogêneas de teores, com flutuações localizadas, ocorrem em Metaturbiditos Máficos Carbonosos (Níveis IX e XII). Uma variação aleatória é exemplificada pelos Metaturbiditos Máficos do Nível XII.

A variação do Cromo ao longo da seção da sondagem PHI-07 é a única crescente da base para o topo. No detalhe, a variação de um nível a outro

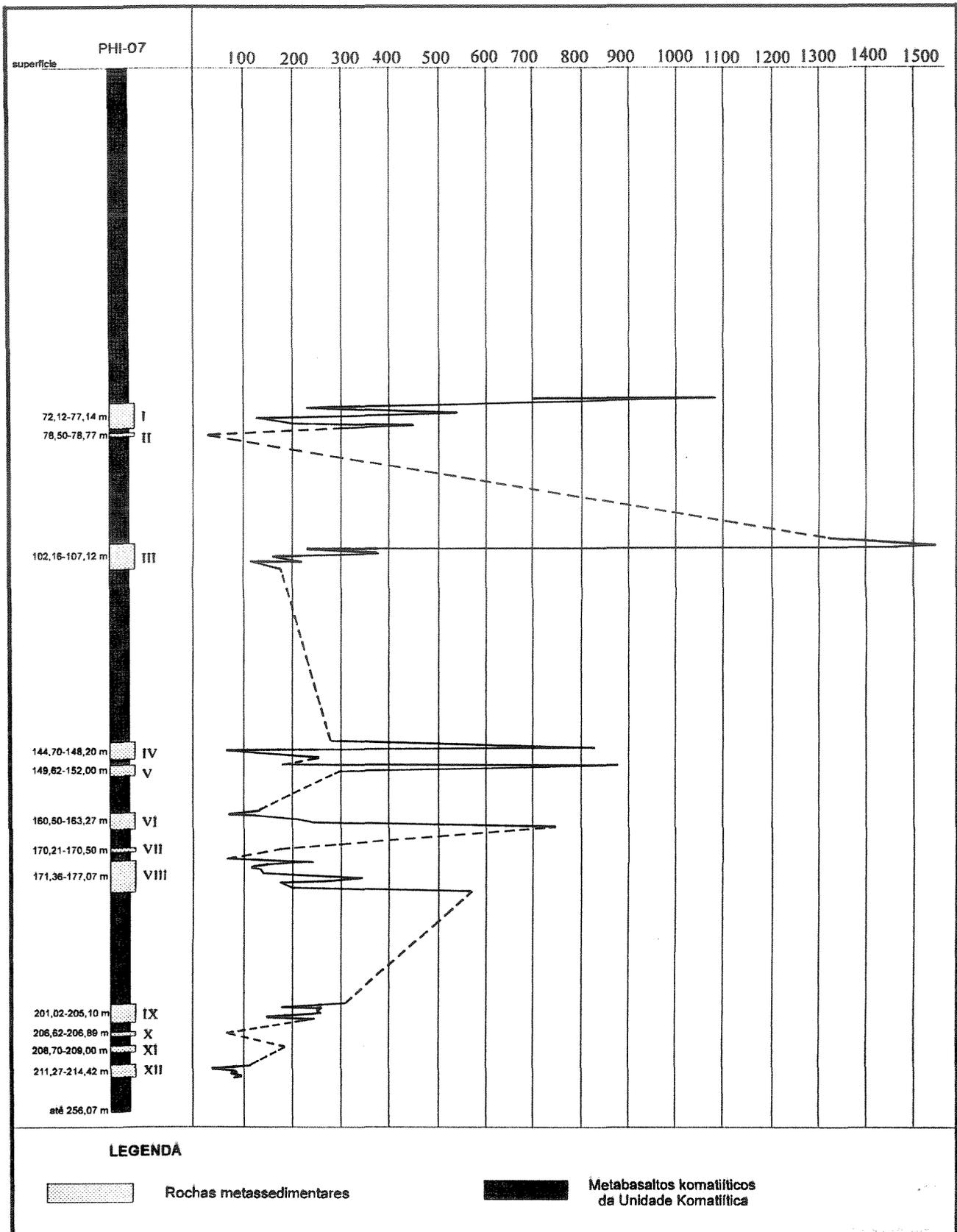


Figura 19 - Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de cromo em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.

contem ciclos de teores menores embutidos entre ciclos de teores maiores, mas crescentes em direção ao topo, indicando que cada novo ciclo foi alimentado com proporções progressivamente maiores de Cromo. Considerando a imobilidade do Cromo no ciclo superficial e que apenas uma seção polida mostra cromita detrítica, o elemento está provavelmente retido na estrutura da clorita e de anfibólios. Estes, possivelmente, recristalizados a partir de argilo-minerais resultantes de intemperismo e transportados para os sítios de sedimentação, eventualmente acompanhados de grãos detríticos submicroscópicos.

### **Cobalto**

Os teores de Cobalto variam entre 35 e 420 ppm, com média aritmética de 109 ppm e desvio padrão de 75 ppm, situando os limites inferiores das anomalias 1ª e 2ª Ordem a, respectivamente, 259 e 184 ppm.

Valores considerados como anomalias de 1ª Ordem ocorrem em quatro intervalos do Nível XII (Tabela III), dentre os quais, dois são de Metaturbidito Máfico e dois de Metaturbidito Máfico Carbonoso. O mesmo nível inclui também dois intervalos com teores de anomalias de 2ª Ordem situados em Metaturbidito Máfico e Máfico Carbonoso, também presentes em três intervalos do Nível VIII, dois em Filitos Carbonosos e um em Metaturbidito Máfico Carbonoso. Os intervalos dos demais níveis mostram teores de *background*.

A variação dos teores de Cobalto (Fig.20 e Tabela III) ao longo dos níveis I, III, IV, V, VI, VIII, IX e XII é tão somente de natureza sistemática, não ocorrendo variações aleatórias nem distribuições homogêneas. A maioria das variações sistemáticas está confinada aos horizontes individuais de litotipos, e compreendem:

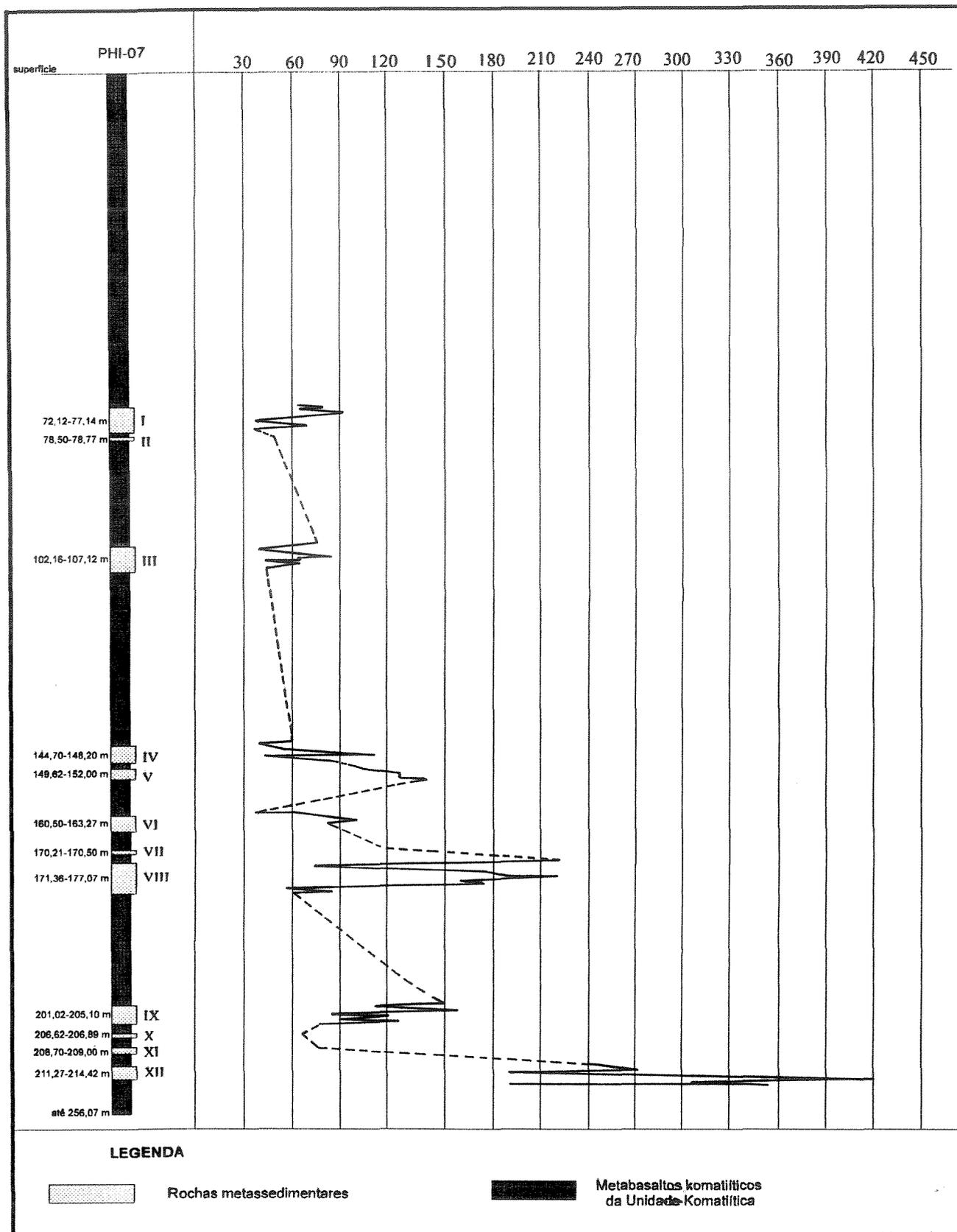


Figura 20 - Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de cobalto em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatíticos do *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.

a) - aumento de teores da base para o topo, como em Filitos Carbonosos e em Metaturbiditos Máficos Carbonosos dos Níveis I e III;

b) - diminuição de teores da base para o topo, como em Metaturbidito Máfico do Nível VI, e Metaturbidito Máfico Carbonoso dos Níveis V e VI.

c) - variações em ciclos menores, como no Nível VIII, onde os teores nos Filitos Carbonosos crescem da base para o topo, até aproximadamente a meia altura da seção, seguido de um decréscimo até o topo e passando a aumentar nos Metaturbiditos Máficos Carbonosos. Ou, como nos Níveis IX e XII, onde ciclos menores com aumento de teores da base para o topo estão superpostos, em Metaturbiditos Máficos e Metaturbiditos Máficos Carbonosos.

Comparando os níveis entre si, da base para o topo da sondagem, observa-se que os teores mais elevados situam-se na base da seção (Nível XII). Os demais níveis, exceto o VIII, contêm teores baixos. É importante observar que os níveis situados mais no topo (I, II e III) são os que contêm as menores proporções em Cobalto, implicando em que o fornecimento do metal durante a sedimentação foi progressivamente reduzido com o tempo.

### **Cobre**

Os teores de Cobre variam entre 41 e 1390 ppm, com média aritmética de 380 ppm e desvio padrão de 290, determinando os limites inferiores das anomalias 1ª e 2ª Ordem em, respectivamente, 960 e 670 ppm.

Valores superiores a 960 ppm ocorrem apenas em Metaturbidito Máfico e Metaturbidito Máfico Carbonoso do Nível XII (ver Tabela III), o qual inclui também dois intervalos com teores correspondentes a anomalias de 2ª Ordem. As demais anomalias de 2ª Ordem localizam-se em Filitos Carbonosos do Nível

VIII e em Metaturbiditos Máficos do Nível IX. Os intervalos dos demais níveis mostram teores considerados *background*.

A variação dos teores de Cobre (Fig. 21 e Tabela III), da base para o topo dos Níveis I, III, IV, V, VI, VIII, IX e XII compreende, em Ordem decrescente de frequência, (a) variações sistemáticas, (b) distribuições homogêneas e (c) variações aleatórias.

As variações sistemáticas são confinadas aos estratos dos diversos litotipos e compreendem:

a) - aumento de teores da base para o topo, como no interior dos Filitos Carbonosos do Nível I, Metaturbiditos Máficos Carbonosos dos Níveis VI e XII e nos Metaturbiditos Máficos dos Níveis IV e IX;

b) - diminuição da base para o topo, como nos Metaturbiditos Máficos dos Níveis I, III e VI. Esta diminuição não é observada em Metaturbiditos Máficos Carbonosos e Filitos Carbonosos;

c) - ciclos menores de aumento da base para o topo, como nos Metaturbiditos Máficos Carbonosos do Nível V.

Distribuições estratigraficamente homogêneas de teores de Cobre ocorrem nos Filitos Carbonosos dos Níveis III e VIII, e nos Metaturbiditos Máficos Carbonosos dos Níveis III, VIII e IX. Variações aleatórias ocorrem em Metaturbiditos Máficos Carbonosos dos Níveis I e IV e em Metaturbiditos Máficos do Nível XII.

Da base para o topo da sondagem, observa-se que os teores de Cobre são maiores na base da seqüência (Nível XII), com sulfetos em níveis milimétricos, com uma média de teores de 1015 ppm. Estes dão lugar a teores baixos (288 e 320 ppm) nos Níveis XI e X, os quais são seguidos de um incremento, com valores médios de 480 e 490 ppm, nos Níveis IX e VIII. A partir

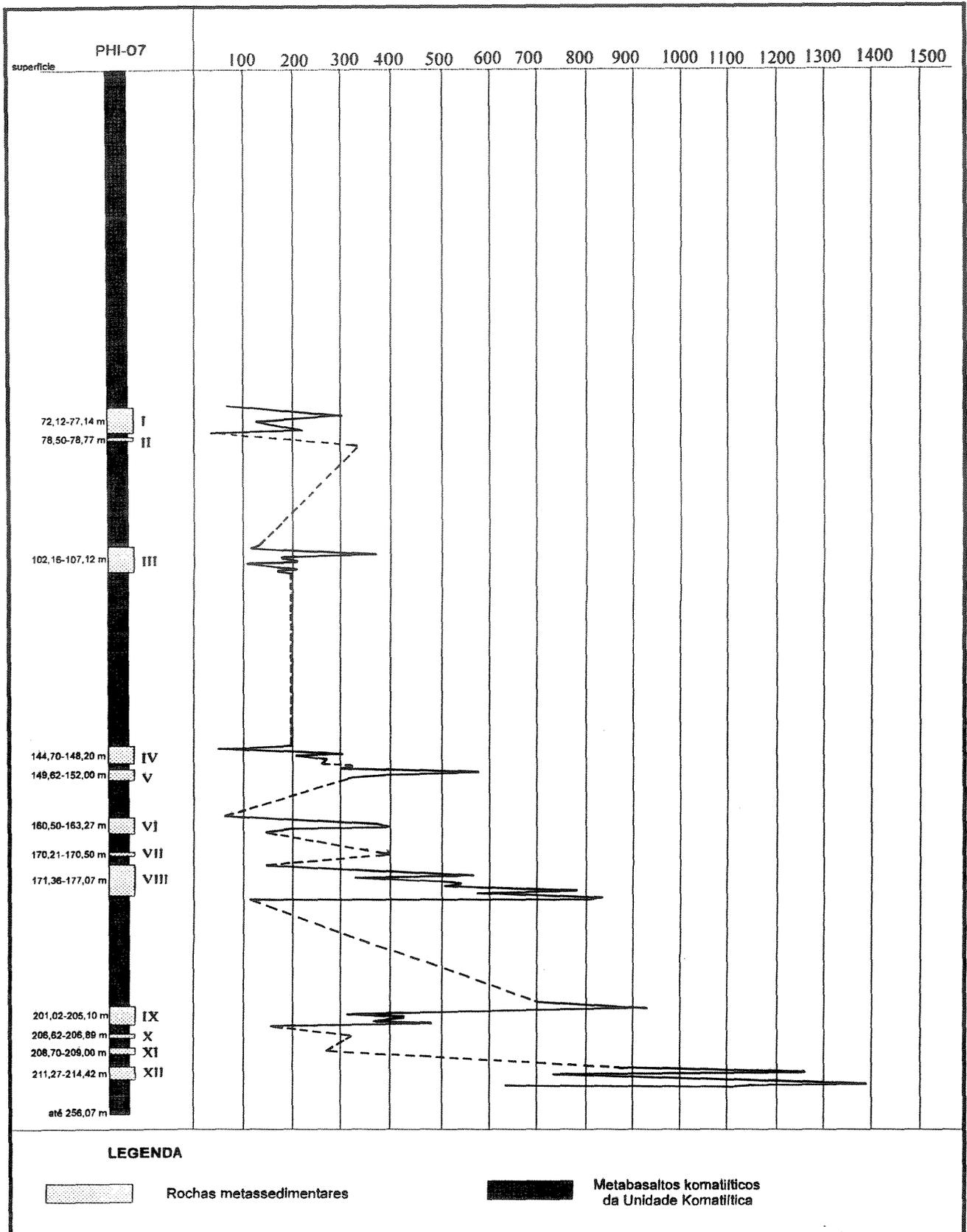


Figura 21 - Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de cobre em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.

daí os teores declinam para valores médios inferiores a 380 ppm (Nível V), preferencialmente abaixo de 236 ppm nos demais níveis, até um mínimo de 160 ppm (Nível I). Isto mostra que a disponibilidade de Cobre foi inicialmente cíclica, mas, a partir do Nível VI, em direção ao topo da seqüência, foi sistematicamente menor do que os níveis estratigráficos inferiores. As proporções de Cobre independem da forma de ocorrência de sulfetos (disseminados ou em filetes).

### **Zinco**

Os teores de Zinco variam entre 58 e 11290 ppm. Se este último valor ocorresse de modo isolado, os valores calculados para a média aritmética e desvio padrão da população do metal seriam pouco reais. Ocorrem, contudo, diversos intervalos com teores elevados, situados entre 2000 e 11290, o que significa que estes não são apenas exceções, mas característicos da população. Em vista disto, a média aritmética é de 1859 ppm e o desvio padrão de 2390 ppm e, por conseguinte, os limites inferiores das anomalias 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> Ordem situam-se, respectivamente, em 6639 e 4249 ppm.

Valores superiores a 6639 ppm (Tabela III) ocorrem em um intervalo do Nível I e quatro no Nível XII, em Metaturbidito Máfico e Metaturbidito Máfico Carbonoso. Anomalias de 2<sup>a</sup> Ordem ocorrem em dois intervalos do Nível VIII e um do Nível XII. Os intervalos dos demais níveis mostram teores de *background*.

A variação dos teores de Zinco (Fig. 22 e Tabela III) ao longo dos níveis I, III, IV, V, VI, VIII, IX e XII se agrupa, em ordem decrescente de frequência, em (a) variações sistemáticas e (b) variações aleatórias.

Variações sistemáticas compreendem:

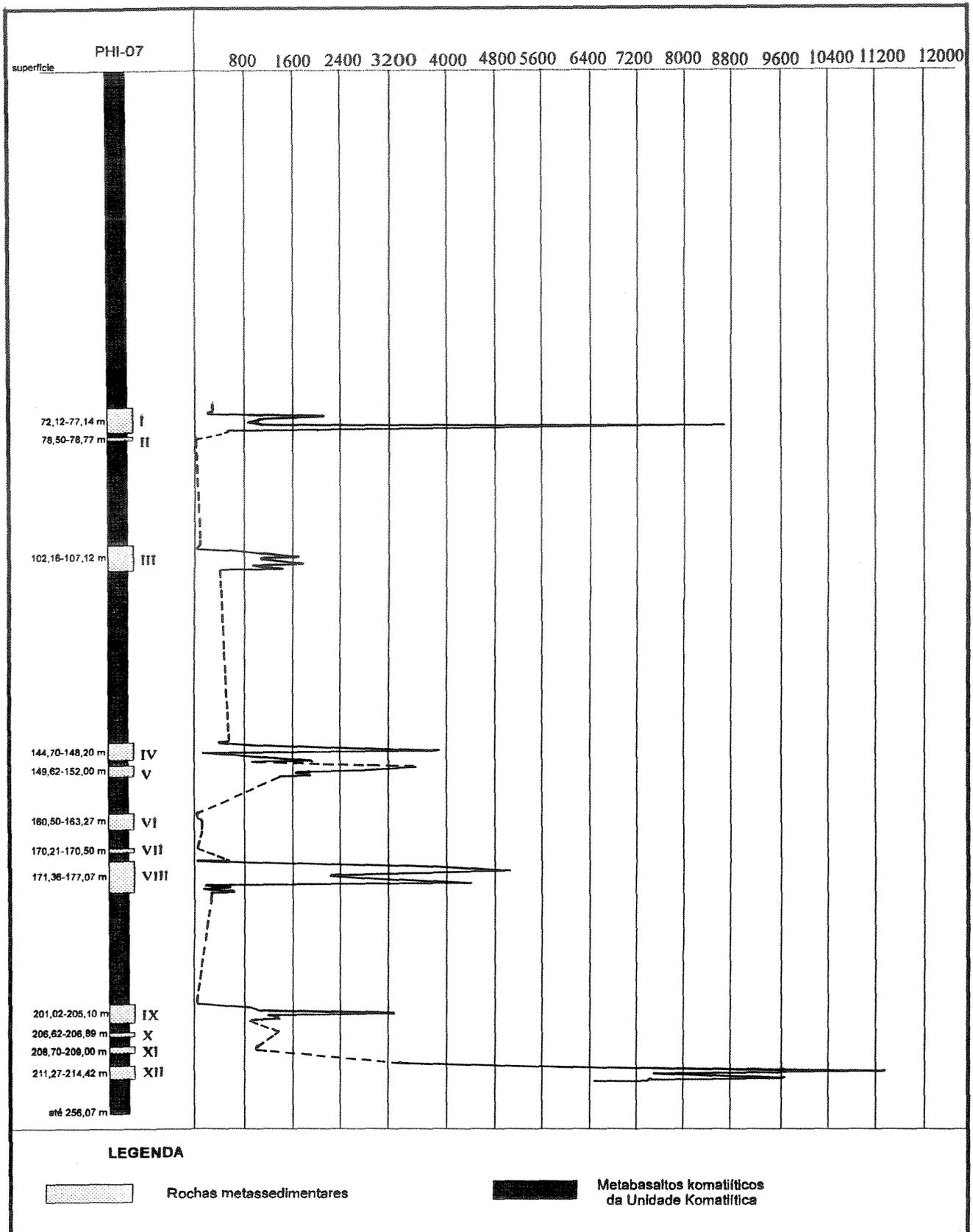


Figura 22 - Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de zinco em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.

a) - aumento de teores da base para o topo de Filitos Carbonosos (Níveis I e III), em Metaturbiditos Máficos Carbonosos (Níveis V, VI, IX e XII), e Metaturbiditos Máficos (Nível VI);

b) - diminuição de teores da base para o topo de Metaturbidito Máfico Carbonoso (Nível I), Metaturbidito Máfico (Níveis III, IX e XII).

c) - variações cíclicas, como em Metaturbidito Máfico Carbonoso (Nível III) e Metaturbidito Máfico (Nível I).

Variações aleatórias são observadas em Filitos Carbonosos (Nível VIII), em Metaturbiditos Máficos Carbonosos (Níveis IV e VIII) e em Metaturbiditos Máficos (Nível IV).

A variação do Zinco, segundo a seção estratigráfica da sondagem PHI-07, é de teores mais elevados na base (Nível XII). Os teores diminuem para o topo com valores anômalos distribuídos aleatoriamente ao longo da seqüência e independente da forma de ocorrência de sulfetos.

### **Chumbo**

Os teores de Chumbo variam entre 1 e 220 ppm, com média aritmética de 41 ppm e desvio padrão de 50 ppm, situando os limites inferiores das anomalias 1ª e 2ª Ordem em 141 e 91 ppm, respectivamente.

Dos sete intervalos do Nível XII (Tabela III), seis apresentam valores correspondentes a anomalias de 1ª Ordem e se situam em Metaturbiditos Máficos e Metaturbiditos Máficos Carbonosos, e um a anomalias de 2ª Ordem, situado em Metaturbidito Máfico Carbonoso. Estes dados implicam em que todo este nível é anômalo. Anomalias de 2ª Ordem ocorrem, ainda, nos Níveis I e X (Metaturbidito Máfico) e no Nível VIII (Filito Carbonoso). Os intervalos dos

demais níveis mostram teores que se distribuem entre anomalias de 1ª Ordem e valores de *background*.

A variação dos teores de Chumbo (Fig. 23 e Tabela III) ao longo da seqüência pode ser, em ordem decrescente de freqüência, (a) variações sistemáticas, (b) distribuições homogêneas e (b) variações aleatórias.

As Variações sistemáticas compreendem:

a) - aumento de teores da base para o topo, como no interior dos Filitos Carbonosos (Nível I), em Metaturbiditos Máficos Carbonosos (Níveis I, III, V, VI e XII), e Metaturbiditos Máficos (Nível IV);

b) - diminuição de teores da base para o topo, como observado em Metaturbiditos Máficos Carbonosos (Nível VIII) e Metaturbiditos Máficos (Níveis III, VI e IX);

c) - variações cíclicas, como ocorre em Filitos Carbonosos (Nível VIII), em Metaturbiditos Máficos Carbonosos (Nível IV), e em Metaturbiditos Máficos (Nível II).

Distribuições homogêneas ocorrem em Filitos Carbonosos do Nível III e em Metaturbiditos Máficos Carbonosos do Nível IX. A única distribuição aleatória de Chumbo ocorre em Metaturbidito Máfico do Nível I.

Comparando os níveis entre sí, da base para o topo da sondagem, observa-se que os teores mais elevados situam-se na base, onde o Nível XII é inteiramente anômalo, com diminuição para o topo, exceto alguns valores anômalos situados nos Níveis I e X e à meia altura do Nível VIII. As concentrações de Chumbo também independem da forma de ocorrência dos sulfetos.

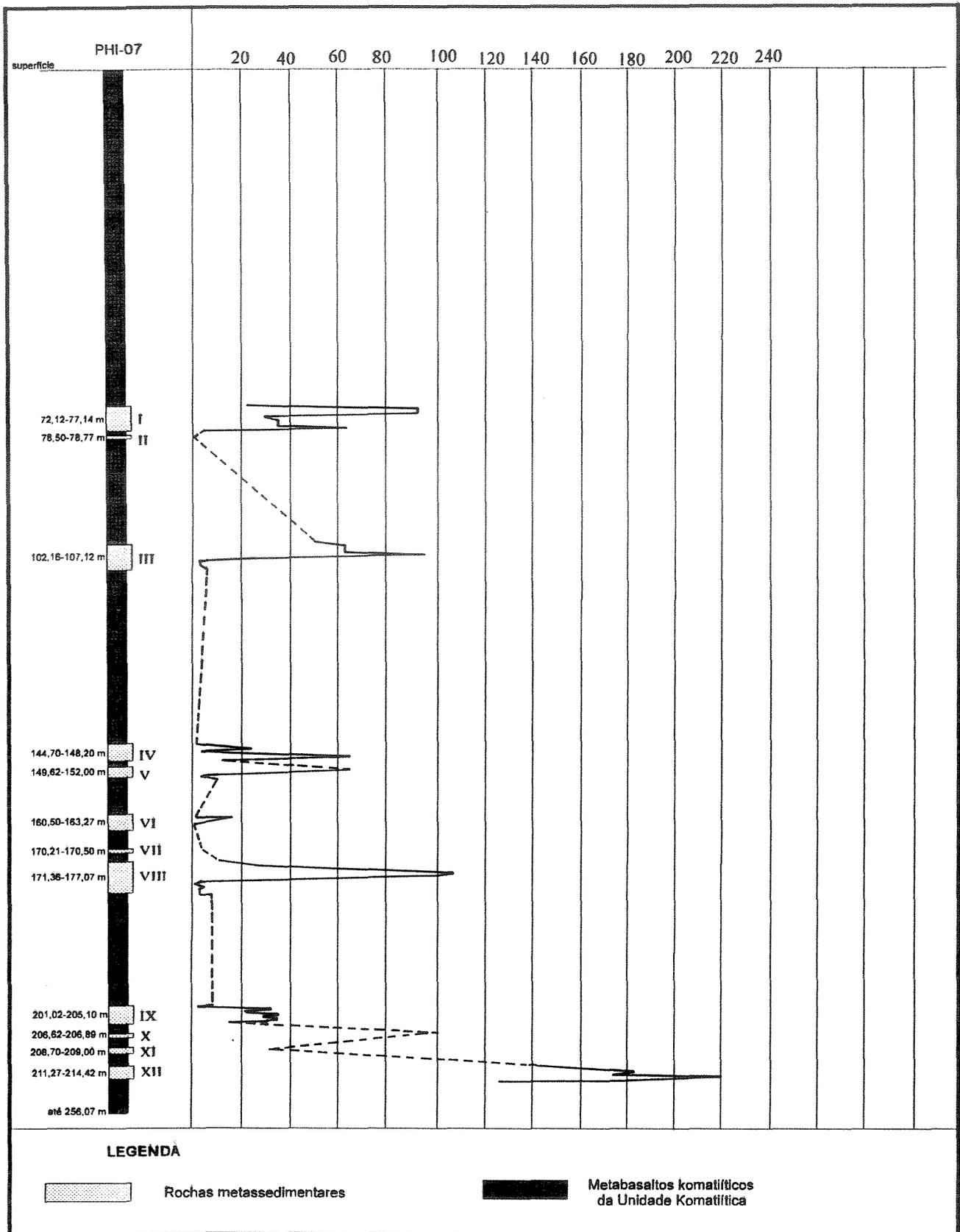


Figura 23 - Seção colunar da sondagem PHI-07 mostrando a variação de teores de chumbo em rochas metassedimentares intercaladas em metabasaltos komatiíticos do *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais. Números romanos à direita da sondagem correspondem aos níveis de rochas metassedimentares. Teores expressos em ppm.

## RELAÇÕES ENTRE ELEMENTOS TRAÇOS E LITOTIPOS

As descrições precedentes não mostram as prováveis relações entre a distribuição dos teores dos elementos traços analisados em Filitos Carbonosos, Metaturbiditos Máficos Carbonosos e Metaturbiditos Máficos. Visando identificar eventuais influências do tipo de rocha sobre as concentrações de elementos traços, foram construídos histogramas de frequência de teores por litotipo (Figs. 24, 25 e 26), agrupando-os por afinidade geoquímica.

A distribuição dos teores de Metais Nobres nos histogramas da figura 24 indica que, exceto a Ag, estes elementos em geral não mostram preferência por litotipos específicos. Au e Pd mostram intervalos de teores mais amplos em Metaturbiditos Máficos Carbonosos, e por isso também contém os teores mais elevados. A distribuição da Pt é similar nos três litotipos, e seus teores mais elevados independem da natureza desses. Já a Ag mostra uma discreta preferência por Metaturbiditos Máficos, subordinadamente Metaturbiditos Máficos Carbonosos, e as mais baixas concentrações ocorrem em Filitos Carbonosos. Considerando a mobilidade da Ag, esse comportamento indica que a sua concentração não está relacionada com a presença de matéria carbonosa, mas à de sulfetos em rochas detríticas com pouca ou nenhuma matéria carbonosa.

Os metais básicos - Ni, Cr e Co - (Fig. 25) apresentam os teores de *background* igualmente distribuídos nos três litotipos. Os teores mais elevados, no entanto, estão preferencialmente em Metaturbiditos Máficos. E, subordinadamente Metaturbiditos Máficos Carbonosos, o que indicando a sua associação com a sedimentação detrítica.

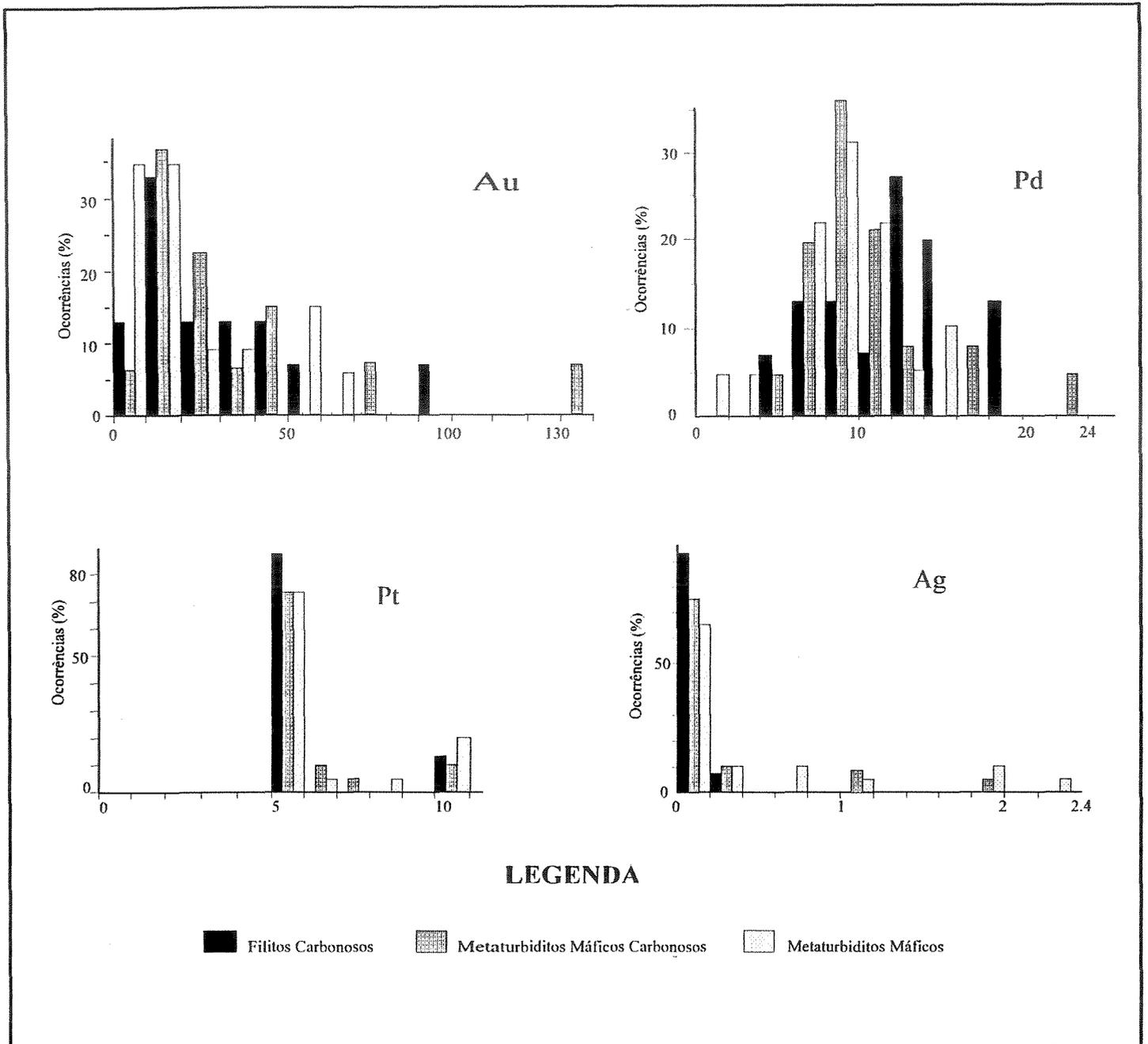


Figura 24 - Histogramas de freqüência de ocorrência de teores de Metais Nobres em rochas metassedimentares, discriminadas por litotipo, intercaladas em metabasaltos komatiíticos do *greenseone belt* de Piumhi, Minas Gerais. Os valores de Au, Pd e Pt estão expressos em ppb e os de Ag em ppm. A legenda desta figura é extensiva às figuras 25 e 26.

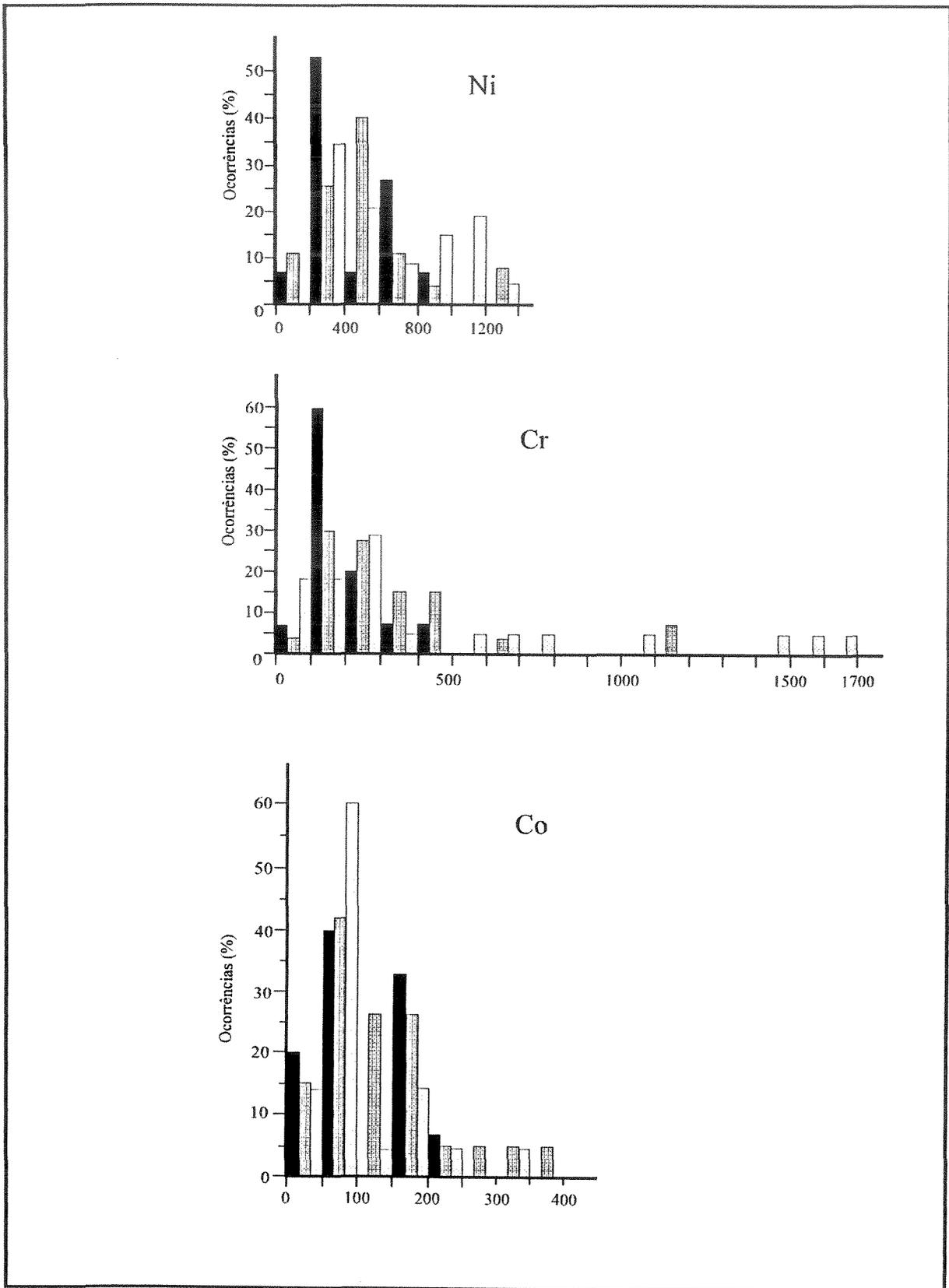


Figura 25 - Histogramas de frequência de ocorrência de teores de Ni, Cr e Co em rochas meta-sedimentares, discriminadas por litotipos, intercaladas em metabasaltos komatiíticos do *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais (teores expressos em ppm).  
 Legenda como na figura 24.

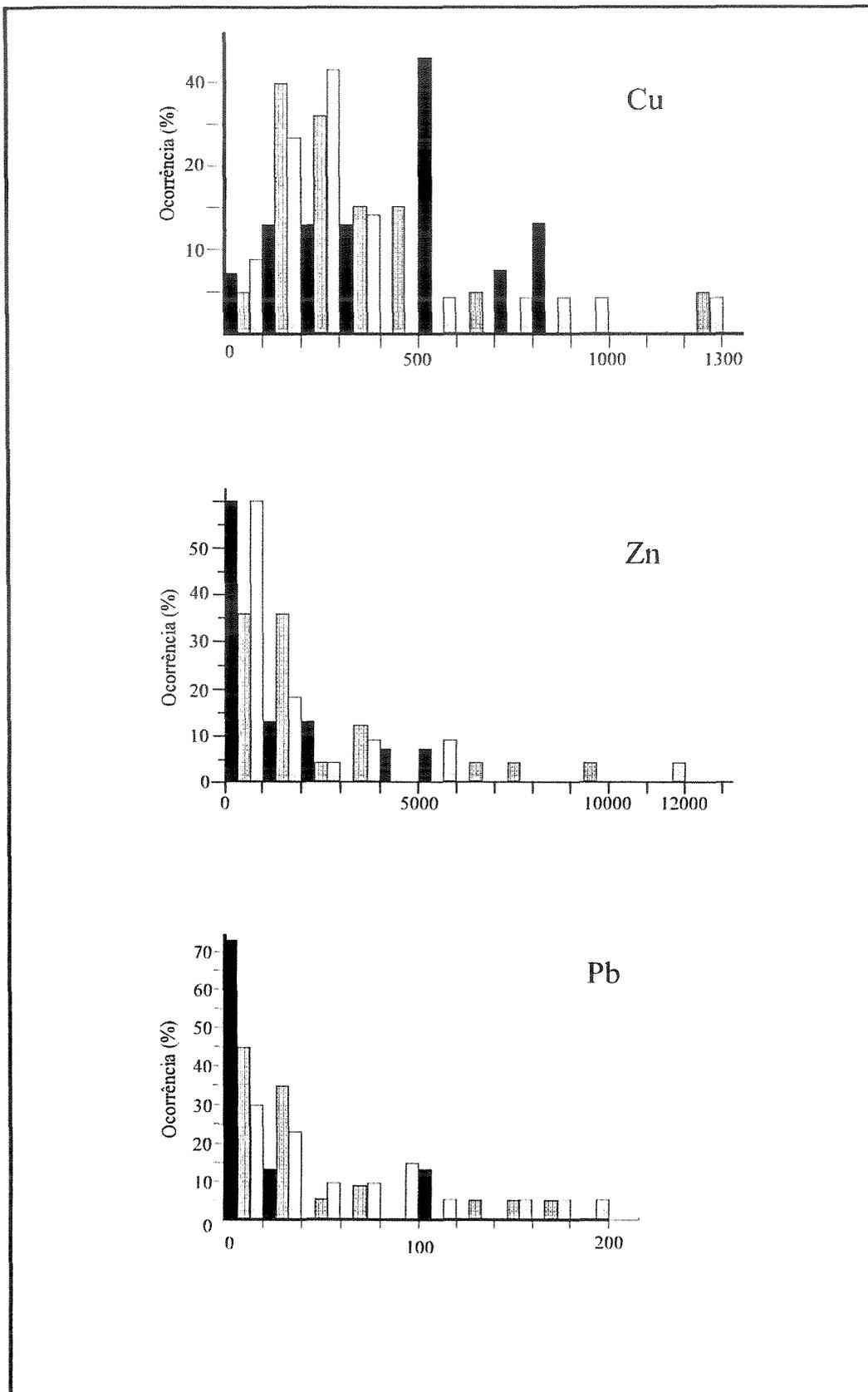


Figura 26 - Histogramas de frequência de ocorrência de teores de Cu, Zn e Pb em rochas metassedimentares, discriminadas por litotipos, intercaladas em metabasaltos komatiíticos do *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais (teores expressos em ppm). Legenda como na figura 24.

Os elementos - Cu, Zn e Pb - (Fig. 26) mostram, em geral, teores baixos a moderados nos três litotipos e teores mais elevados em Metaturbiditos Máficos e Metaturbiditos Máficos Carbonosos. A sua preferência por rochas detríticas sem matéria carbonosa está, no entanto, relacionada com a presença de fases sulfetadas, sejam elas disseminadas ou em níveis milimétricos.

## COMPARAÇÃO DE TEORES DE ROCHAS METASSEDIMENTARES COM OS DE METAVULCÂNICAS ADJACENTES

A Tabela IV apresenta os teores dos Metais Nobres, Elementos de Transição e Elementos Calcófilos de alguns derrames de basaltos komatiíticos aos quais as rochas metassedimentares estudadas se associam. A tabela mostra ainda, a posição dos derrames em relação aos Níveis de rochas metassedimentares adjacentes.

Os teores de Au e Ag dos metabasaltos situam-se abaixo da média daqueles observados nas rochas metassedimentares. Um dos derrames possui teores de Pd correspondentes aos de anomalias de 1ª Ordem (24 ppb), os demais situam-se no intervalo de *background*. Um derrame possui teores de Pt compatível com anomalias de 1ª Ordem, consistindo do valor mais alto observado na seqüência (50 ppb), e três de 2ª Ordem, todos com 10 ppb.

Considerando os Metais Básicos, um dos derrames possui 1010 ppm de Ni, o que corresponde a uma anomalia de 2ª Ordem das rochas metassedimentares, e os demais situam-se abaixo da média das mesmas. Os teores de Cr abrangem, de modo mais ou menos eqüitativo, o espectro que se

Tabela IV

*Greenstone belt* de Piumhi. Concentrações de elementos traços em metabasaltos komatíticos nos quais se intercalam rochas metassedimentares detríticas.

Níveis	Amostra	Intervalo	Au	Pd	Pt	Ag	Ni	Cr	Co	Cu	Zn	Pb
I/II	12	77,50-78,00	14	6	5	0,10	297	715	45	6	107	4
	13	78,00-78,50	4	7	5	0,10	305	720	39	6	140	2
II/III	15	79,00	2	6	10	0,10	265	1159	41	6	140	1
	16	102,16	14	8	10	0,10	460	560	51	21	330	4
III/IV	28	107,12-107,27	1	10	5	0,10	219	280	33	20	83	1
V/VI	42	152,00-152,50	15	24	5	0,10	1010	2670	80	64	126	3
	43	160,30-160,50	6	10	5	0,20	238	154	27	50	64	5
VI/VII	50	170,00-170,21	6	7	5	0,10	207	660	43	65	133	14
VII/VIII	52	170,50-171,00	14	9	10	0,20	261	898	69	57	196	11
	53	171,00-171,36	34	7	50	0,10	224	1100	51	40	190	5

estende desde valores de *background* até anomalias de 1ª Ordem. Co ocorre em todos os derrames analisados com teores abaixo da média das rochas metassedimentares. Todos os teores dos demais metais básicos situam-se abaixo da média das rochas metassedimentares.

Essas relações sugerem que os teores de Pd, Pt, Ni e Cr das rochas metassedimentares são compatíveis com os observados nos derrames de basaltos komatiíticos onde se intercalam. Essa compatibilidade, associada à composição mineral das primeiras, dominada por clorita, subordinadamente anfibólio, sugere que as rochas detríticas provavelmente derivam da erosão de rochas máficas e ultramáficas. O relativo enriquecimento das rochas metassedimentares em elementos calcófilos (Cu, Zn e Pb) pode ser explicado pelo seu fracionamento em fases sulfetadas durante a sedimentação, diagênese e metamorfismo, preferencialmente sobre outros elementos como o Ni, também capaz de formar sulfetos.

## **CORRELAÇÃO ENTRE ELEMENTOS**

A Tabela V apresenta os valores dos coeficientes de correlação entre os elementos analisados. Correlações superiores a 0,7 ocorrem nos pares Co-Ni, Cu-Co, Zn-Co, Pb-Ag e Pb-Zn. Correlações moderadas, situadas entre 0,4 e 0,7, são observadas principalmente em pares de Au ou Ag com Ni, Co, Cu, Zn e, exceto a Ag, também Pb, e nos pares Co-Pb, Ni-Cu, Ni-Zn, Cu-Pb e Cu-Zn. Baixos valores de correlação, situados entre 0 e 0,4, assim como correlações negativas ocorrem principalmente nos pares que envolvem Elementos do Grupo da Platina (Pt e Pd) e Elementos Siderófilos, em particular Cromo.

Tabela V

Coefficientes de Correlação entre os teores dos elementos traços de rochas metassedimentares do *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais.

Elemento	Au	Pd	Pt	Ag	Ni	Co	Cu	Cr	Zn	Pb
Au	1									
Pd	0,215	1								
Pt	-0,029	0,034	1							
Ag	0,406	-0,008	0,050	1						
Ni	0,421	0,072	0,226	0,590	1					
Co	0,577	0,296	0,005	0,638	0,775	1				
Cu	0,476	0,247	-0,052	0,594	0,675	0,839	1			
Cr	-0,378	-0,223	0,344	-0,236	0,087	-0,320	-0,428	1		
Zn	0,526	0,045	-0,023	0,692	0,665	0,756	0,663	-0,347	1	
Pb	0,538	-0,083	0,019	0,726	0,742	0,689	0,622	-0,192	0,830	1

Dáí conclui-se que, dentre os elementos analisados, o coeficiente de correlação mostra compatibilidade geoquímica dos elementos calcófilos (Cu, Zn, Pb) entre si, assim como entre estes e os siderófilos (Ni e Co) que também podem apresentar comportamento calcófilo. Os metais nobres se agrupam em duas categorias. De um lado, Au e Ag, mais móveis, acompanham os elementos calcófilos, enquanto, Pt e Pd, menos móveis, não acompanham quaisquer dos demais grupos de elementos, inclusive Cr e Ni, com quem, no ciclo profundo, mostram alguma afinidade, implicando que, no ciclo superficial, possam apresentar um comportamento distinto, porém ainda desconhecido. Elementos imóveis, como Cr, da mesma forma, não mostra correlação com elementos mais móveis, mesmo Ni, implicando fracionamento entre os metais típicos de rochas máficas e ultramáficas durante a alteração superficial que precedeu a sedimentação.

## DIAGRAMAS BINÁRIOS E TERNÁRIOS

Os moderados a baixos coeficientes de correlação calculados mostram que, na maioria dos pares de elementos analisados, ou a variação de um explica apenas discretamente a variação de outro, ou não a explica. Por conseguinte, foram construídos diagramas binários e ternários que reunissem os elementos em grupos de afinidade geoquímica. Desta forma, reuniu-se elementos nobres, elementos siderófilos e elementos calcófilos, com o objetivo de avaliar tendências de concentração e variações de concentração por litotipo e nos níveis como um todo, empregando razões.

Assim, as concentrações dos elementos traços das rochas metassedimentares do *greenstone belt* de Piumhi foram plotadas (Figs. 27 e 28)

nos diagramas ternários Pt-Pd-Au, Cr-Ni-Co, Ni-Zn-Cu e Cu-Zn-Pb, obedecendo uma sucessão, exceto para os Metais Nobres, mais ou menos iterativa dos elementos de transição para os calcófilos. Dentre os diagramas binários, apenas as concentrações de Cr e Ni foram comparadas entre si. Visando comparar as rochas estudadas com as de ambientes similares de outras regiões arqueanas, os diagramas incluem também dados de Kambalda, Austrália, publicados por Bavinton & Taylor (1980) e do *greenstone belt* de Guarinos, Goiás, divulgados por Jost *et al.* (1995),

Em Kambalda, Bavinton & Taylor (1980) definiram quatro situações estratigráficas distintas contendo rochas metassedimentares, quais sejam, (i) intercaladas em metabasaltos da seqüência inferior (*Footwall Basalt Sequence*), denominadas de *Footwall Basalt Sediments*, (ii) na porção mais basal da seqüência ultramáfica, no contato com a *Footwall Basalt Sequence*, denominados sedimentos de contato, (iii) intercaladas no terço inferior da seqüência ultramáfica, denominados de sedimentos internos, e (iv) na seqüência basáltica superior (*Hangingwall Basalt Sequence*), no contato entre as formações inferior e superior e denominados de *Hangingwall Basalt Sediments*. O autor fornece dados analíticos para 16 amostras, das quais três provém dos *Footwall Basalt Sediments*, três de sedimentos de contato, seis de sedimentos internos e quatro dos *Hangingwall Basalt Sediments*.

As rochas metassedimentares do *greenstone belt* de Guarinos ocorrem em quatro situações estratigráficas, compreendendo: (i) formações ferríferas intercaladas em metakomatiitos basais e metabasaltos tholeiíticos intermediários, (ii) ritimitos ricos em quartzo e clorita (Formação São Patricinho), que aparentemente ocorrem como interdigitação lateral aos metabasaltos tholeiíticos, ambos sotopostos e em contato brusco com (III)

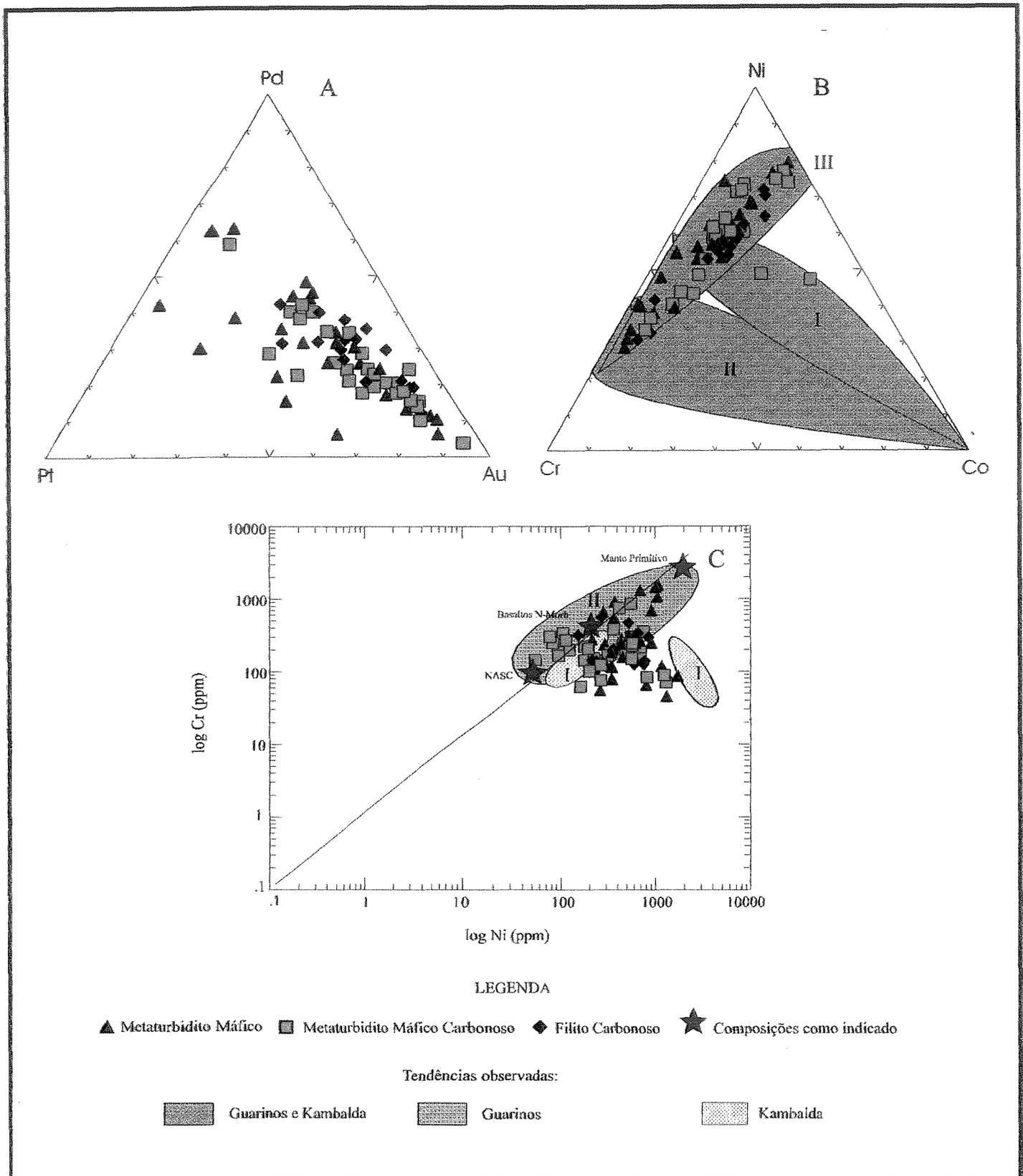


Figura 27 - Diagramas (A) Pt-Pd-Au, (B) Cr-Ni-Co e (C)  $\log Ni$  versus  $\log Cr$  das rochas metassedimentares detríticas intercaladas em metabasaltos komatiíticos do Grupo Ribeirão Araras, *greenstone belt* de Piumhi, Minas Gerais, mostrando, também, os campos composicionais de rochas arqueanas similares de Kambalda (Austrália) e Guarinos (Goiás). Ver texto para discussão.

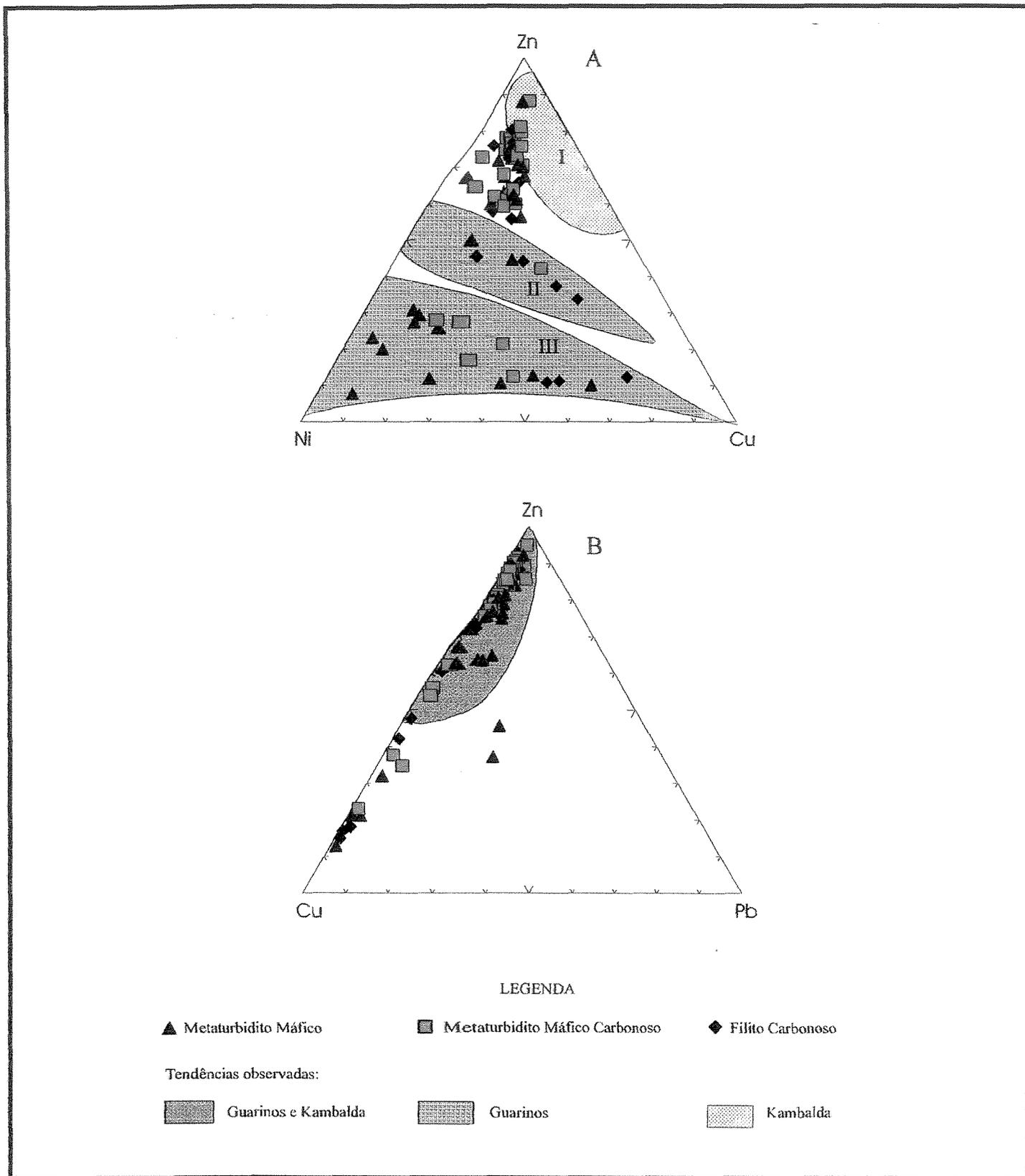


Figura 28 - Diagramas (A) Ni-Zn-Cu e (B) Cu-Zn-Pb das rochas metassedimentares detríticas intercaladas em metabasaltos komatiíticos do Grupo Ribeirão Araras, greenstone belt de Piumhi, Minas Gerais, mostrando, também, os campos composicionais de rochas arqueanas similares de Kambalda (Austrália) e Guarinos (Goiás). Ver texto para discussão.

formações ferríferas tipo SEDEX (Formação Aimbé), as quais, em direção ao topo gradam para (iv) rochas metassedimentares detríticas (Formação Cabaçal), com um Membro Basal de filitos carbonosos, sotoposto a um Membro Superior de metaturbiditos distais. Dados preliminares de Jost *et al.* (1993) sobre a natureza geoquímica das rochas metassedimentares de Guarinos referem-se às formações São Patricinho e Cabaçal. Já os dados publicados por Jost *et al.* (1995) referem-se apenas aos aspectos geoquímicos da transição entre os membros Inferior e Superior da Formação Cabaçal.

As proporções dos elementos traços determinadas nas rochas estudadas foram plotadas em conjunto com as obtidas por Bavinton & Taylor (1980) de rochas metassedimentares das quatro situações estratigráficas e por Jost *et al.* (1993, 1995) das rochas da Formação Cabaçal, exceto para Metais Nobres, para os quais não existem dados de Kambalda e de Guarinos. Para efeitos de comparação, os dados de Kambalda e Guarinos foram contornados em campos composicionais.

As proporções de Pt, Pd e Au da maioria das amostras estudadas (Fig. 27) definem um nítido *trend* de variação com enriquecimento progressivo em Au, segundo uma razão Pt/Pd relativamente constante de aproximadamente 1:2. Isto sugere que a sedimentação foi mais favorável ao enriquecimento em Pd do que em Pt, independente das proporções de Au. As amostras que definem o *trend* principal englobam os três litotipos metassedimentares. Os Filitos Carbonosos, comparativamente aos demais, estão mais concentrados próximo ao vértice do Au. As amostras deslocadas do *trend* principal, mais ricas em Pt e cobrindo um amplo espectro de proporções em Au, consistem em sua maioria de Metaturbiditos Máficos e Metaturbiditos Máficos Carbonosos subordinados.

Estas relações sugerem que Au e Pd tenham talvez sido influenciados pela presença de matéria carbonosa, tanto no sítio deposicional, quanto durante a diagênese e metamorfismo. A associação de Pt com fases detríticas sem contribuição carbonosa, parece traduzir a menor mobilidade do metal, comparativamente a Au e Pd, quer no ciclo superficial quer durante os processos subsequentes.

A variação das proporções de Cr, Ni e Co (Fig. 27B) em Kambalda e Guarinos definem três *trends* (I, II e III), dois dos quais se distinguem pelas razões de Cr /Ni de, respectivamente, 1:2 e de 2:1, independente das proporções de Co. O terceiro é definido por uma razão Ni/Co de 4:1, que se delinea a partir de uma razão Cr/Ni de 4:1. Enquanto apenas duas amostras de Piumhi se situam no interior da área definida pelo *trend* I, nenhuma amostra se superpôs ao *trend* II, mas todas as demais se situam no campo III.

Considerando a imobilidade relativa de Cr, Ni e Co no ciclo superficial, a variação observada nas amostras estudadas sugere que o maior volume das rochas metassedimentares de Piumhi derivou de área-fonte mais rica em Cr e Ni do que em Co. Considerando que, nesta mesma ordem, a afinidade geoquímica desses elementos se transfere de rochas ultramáficas para máficas, a área fonte dos detritos dos protolitos das rochas estudadas era mais rica em rochas ultramáficas do que máficas. Mineralogicamente isto se reflete na presença de cromita detrítica em algumas amostras estudadas, assim como na abundância de clorita na matriz dos litotipos correspondentes. A ausência de sulfetos de Ni e de Co nas seções polidas estudadas sugere, por outro lado, que estes dois elementos participam da composição da clorita a qual, por sua vez, deriva de argilo-minerais liberados da área-fonte. Isto reforça a sugestão de que a presença desses elementos se relaciona com a natureza da área-

fonte. Estratigraficamente esta sugestão é compatível com a intercalação das rochas metassedimentares estudadas em metabasaltos komatiíticos, provável fonte dos detritos.

A figura 27C mostra que as rochas metassedimentares de Kambalda (campos I) distribuem-se em dois *trends*, um dos quais mais enriquecido em Ni e outro superposto ao campo das rochas de Guarinos (campo II). A maioria das amostras de Piumhi superpõe-se aos campos das rochas menos ricas em Ni de Kambalda e de Guarinos. As demais dispersam-se em direção ao campo das amostras mais ricas em Ni de Kambalda. Isto implica em que, as amostras estudadas possuem proporções de Cr e Ni similares às de Kambalda e Guarinos.

Na figura 27C também foram incluídas as proporções de Cr e Ni estimadas para o Manto Primitivo (Sun & Nesbitt 1977), a média desses elementos em basaltos do tipo N-MORB (Saunders *et al.* 1988), e de rochas sedimentares pós-arqueanas sintetizadas no *North American Shale Composite - NASC* (Gromet *et al.* 1984). As proporções de Cr e Ni das rochas de Piumhi, Kambalda e Guarinos são superiores às do NASC e, exceto as amostras mais ricas em Ni, são compatíveis com as de basaltos N-MORB. Em Piumhi e Guarinos as proporções de Cr e Ni alcançam teores extremos próximos aos estimados para o Manto Primitivo. As proporções de Ni e Cr das rochas estudadas podem ser explicadas pela participação de área-fonte composta por rochas máficas e ultramáficas, talvez com uma componente maior das últimas. Esta interpretação justifica os teores anômalos de Ni.

A participação progressivamente maior de Elementos Calcófilos nas rochas estudadas (Fig. 28), permite observar que a variação conjunta de Ni, Zn e Cu (fig. 28A) destas com aquelas de Kambalda e Guarinos, estabelece três

campos. O primeiro (campo I) é definido apenas por amostras de Kambalda. Os outros (campos II e III) são definidos por amostras apenas de Guarinos. As amostras mais ricas em Zn de Piumhi são similares às de Kambalda, mas delineiam um *trend* independente, disperso em torno de uma linha média de razão Ni/Cu de 1,5:1. As demais distribuem-se nos campos II e III de Guarinos. No campo II predominam amostras de Filitos Carbonosos, ao passo que no campo III predominam Metaturbiditos Máficos, subordinadamente Máficos Carbonosos e apenas três amostras de Filito Carbonoso. Nas amostras que definem um *trend* com altos teores de Zn há uma participação equivalente entre os três litotipos. Isto sugere que determinados níveis de rochas metassedimentares iniciam com Filitos Carbonosos mais ricos em Zn e culminam com Metaturbiditos Máficos mais ricos ora em Ni ora em Cu, subordinadamente o inverso. Apesar de Cu e Zn serem elementos calcófilos e ocorrerem como sulfetos nas rochas estudadas, as relações observadas na variação conjunta entre Ni, Zn e Cu mostram que a presença de elementos calcófilos está relacionada com elementos siderófilos, subordinadamente calcófilos, como o Ni.

Considerando apenas os elementos calcófilos (Fig. 28B), observa-se que, apesar do Pb ocorrer como galena nos níveis ricos em sulfetos, de um modo geral as rochas estudadas são tipicamente ricas em Cu e Zn. As razões Cu/Zn variam dentro de um amplo intervalo, independentes de litotipo. Esta variação se estende para além dos limites do campo definido por rochas metassedimentares de Kambalda e Guarinos. Dentre todas as amostras, duas de Metaturbidito Máfico são mais ricas em Pb. As baixas proporções de Pb, comparativamente a Cu e Zn, podem, eventualmente, resultar de uma participação reduzida de rochas félsicas nos diversos níveis sedimentares.

# CAPÍTULO V

## PERSPECTIVAS METALOGENÉTICAS

### INTRODUÇÃO

Ambientes de *greenstone belts* são notoriamente férteis em ouro. Contudo, a sua natureza predominantemente vulcânica abre, também, perspectivas para três tipos adicionais de depósitos minerais, compreendendo, em ordem decrescente de expectativa, (i) os depósitos sulfetados de Ni-EGP associados a derrames de komatiitos, (ii) depósitos vulcanogênicos de metais básicos e (iii) depósitos sedimentares singenéticos associados a ambientes redutores. Nos parágrafos que seguem, a área estudada será analisada sob o ponto de vista de suas perspectivas metalogenéticas, considerando suas características geológicas comparadas com a de distritos conhecidos.

### DEPÓSITOS EM KOMATIITOS

Naldrett (1981) dividiu os depósitos sulfetados associados a komatiitos em três grupos. O primeiro consiste de depósitos que ocorrem na base dos derrames, sendo em geral pequenos (1 a  $5 \times 10^6$  toneladas) e de altos teores (1,5-3,5% de Ni), como exemplificado pelos depósitos do Distrito de Kambalda

(Ross & Hopkins 1975). O segundo compreende depósitos localizados na base de intrusões ultramáfico-máficas interpretadas como prováveis alimentadores de vulcanismo komatiítico, e os quais possuem volume moderado ( $10\text{--}40 \times 10^6$  toneladas) e teores elevados (1.5-2.5% de Ni), como nos depósitos proterozóicos de Cape Smith, Canadá (Barnes 1979) e provavelmente também os de Manitoba, Canadá, apesar de intensamente deformados e metamorfisados. O terceiro inclui os depósitos com sulfetos disseminados em corpos lenticulares de dunito, também interpretados como alimentadores do vulcanismo komatiítico, minério esse em geral de grande volume ( $100\text{--}250 \times 10^6$  toneladas) e baixos teores (0,6% Ni), como os depósitos de Six-Miles e Mt. Keith, W-Austrália (Naldrett & Turner 1977) e de Dumont, Quebec (Duke 1980).

As características gerais da área estudada possuem algumas semelhanças gerais com o Distrito de Kambalda. Uma comparação entre ambas áreas está resumida na Tabela VI, a qual resulta de uma compilação de dados publicados por Ross & Hopkins (1975), Binns *et al.* (1976), Bavinton & Keays (1978), Bavinton & Taylor (1980), Gresham & Loftus-Hills (1981) e Chauvel *et al.* (1985) para Kambalda, e Schrank (1982), Jahn & Schrank (1983), Schrank (1986), Machado & Schrank (1989) e Schrank & Abreu (1990) para Piumhi.

Apesar de Piumhi ser mais antigo que Kambalda, a seqüência estratigráfica da duas regiões é similar no que tange à ordem do vulcanismo, pois ambas iniciam com basaltos tholeiíticos, seguidos de rochas ultramáficas, por sua vez substituídas por novos derrames de basaltos.

Tabela VI

Comparação das características do distrito de Kambalda, Austrália, com as do *greenstone belt* de Piumhi.

	KAMBALDA	PIUMHI
Idade	2,7 a 2,8 Ga	3.0 a 3.1 Ga
Estratigrafia: - Unidade Superior - Unidade Intermediária - Unidade Inferior	- basaltos tholeiíticos composicional e texturalmente variável - komatiitos - basaltos tholeiíticos, uniforme.	- basaltos tholeiíticos intercalados com basaltos ankaramíticos - basaltos komatiíticos - basaltos tholeiíticos, uniforme
UNIDADE DE KOMATIITOS		
a. Estrutura	- unidades de fluxos sucessivas, de espessura variável entre 10 cm e 10 m, separadas por rochas sedimentares	- idem
b. Estratigrafia	- Membro Superior de lavas picríticas - Membro Inferior de lavas peridotíticas	- Uma única seqüência de basaltos komatiíticos
c. MgO (base livre de voláteis)	- picritos = 15-28% - peridotitos = 28-36% - olivina peridotitos = > 36%	- 21 a 29%
d. Estrutura dos derrames	- horizontes inferiores com textura cumulática seguidos de horizontes com textura <i>spinifex</i> com olivina	- idem, por vezes com textura <i>spinifex</i> de clinopiroxênio
e. Metamorfismo	- fácies anfibolito	- xisto verde
f. Alterações	- serpentinização, talcificação, carbonatação	- idem
g. Intercalações Sedimentares		
i - Tipos	Rochas provavelmente químicas e detríticas, compreendendo: (i) uma variedade silicosa cinza claro a branca com aspecto maciço e aparência de chert e mais abundante; (ii) ardósia cinza-escuro a preto, com material carbonoso; (iii) uma variedade menos comum não silicosa verde-claro rica em clorita e anfibólio.	Rochas detríticas contendo clorita, sericita, quartzo e, localmente anfibólio, em três tipos: (i) filitos carbonosos situados na base das camadas sedimentares, seguidos de (ii) turbiditos máficos carbonosos, sotopostos a (iii) turbiditos máficos
ii - Mineralogia	. a variedade silicosa consiste de 20 - 25% de sulfetos de ferro (pirrotita e piritita, ou ambos), com albita e quartzo, seguidos de clorita, tremolita, muscovita, biotita, óxidos de ferro e epidoto, localmente feldspato potássico, talco, diopsídio e cummingtonita; . a ardósia contém mais quartzo e menos albita e clorita que o tipo anterior; . a variedade não silicosa contém clorita e tremolita dominantes.	- filitos carbonosos com clorita e sericita, seguidas de material carbonoso, quartzo, sulfetos, e traços de leucoxênio e epidoto; - turbiditos máficos com clorita e sericita, subordinadamente quartzo, sulfetos, epidoto, albita e rutilo; - turbiditos máficos carbonosos são similares aos turbiditos máficos, exceto pela presença de material carbonoso e leucoxênio e ausência de rutilo.
iii - Natureza química	- silicosas, aluminosas e ricas em enxófre	- magnesianas e ricas em enxófre
iv - Presença de sulfetos	- sulfetos maciços de Fe em níveis com 5 a 15 mm de espessura ou em nódulos e lentes milimétricas paralelas ao acamamento	- idem, mas também disseminados e incluem calcopirita, esfalerita e galena

Contudo, ambas diferem em dois aspectos relacionados com a composição das lavas no decurso do tempo. Em Kambalda os basaltos tholeiíticos basais dão lugar a lavas mais primitivas (komatiitos), com posterior recorrência de basaltos tholeiíticos. Em Piumhi, os tholeiitos basais dão lugar a basaltos komatiíticos, por sua vez substituídos por vulcanismo com uma componente alcalina. Em ambos casos o vulcanismo é marcado por uma evolução na qual, em determinado instante, lavas mais evoluídas dão lugar a lavas mais primitivas.

As mineralizações sulfetadas de Kambalda estão restritas aos komatiitos, razão pela qual a análise que segue se restringe ao intervalo estratigráfico dos mesmos e sua comparação com o intervalo equivalente em Piumhi, objeto do presente estudo.

Em ambas as áreas, a seqüência de komatiitos consiste de unidades de fluxo (seqüência ininterrupta de derrames) de espessuras variadas. As unidades de fluxo são separadas por rochas sedimentares. Em ambos casos, a maioria dos derrames está diferenciada em um cumulado basal de olivina seguido de horizontes com textura *spinifex*. Em Kambalda, os derrames komatiíticos seguem uma evolução que permite distinguir um membro inferior peridotítico (MgO = 28-36% ou mais) seguido de um superior de lavas picríticas (MgO = 15-28%). Em Piumhi os derrames são somente de basaltos komatiíticos (MgO = 21-29%).

Como as mineralizações de Ni-sulfetado em komatiitos são um produto de imiscibilidade de líquidos durante o fluxo dos derrames, eventos posteriores como a deformação e metamorfismo não são significativos na comparação.

Apesar disto, podem influenciar na intensidade de remobilização da mineralização primária em terrenos com distintos graus de metamorfismo. O mesmo raciocínio pode ser estendido para alterações posteriores, tais como serpentinização, talcificação e carbonatação.

Além das diferenças acima apontadas, e que se relacionam diretamente com a composição das lavas komatiíticas de ambas regiões, Piumhi e Kambalda também diferem nos tipos deposicionais, na composição mineralógica e natureza química das rochas sedimentares intercaladas. Mesmo com natureza distinta as rochas sedimentares de ambas as áreas possuem conteúdos e ocorrências similares de sulfetos. Isto implica em condições idênticas de remobilização de enxôfre e contaminação dos derrames. A contaminação de derrames em Kambalda tem sido atribuída à erosão térmica do substrato sedimentar por fluxo turbulento e contaminação, com formação de depressões onde os sulfetos decantaram por gravidade (Huppert & Sparks 1985, Turner *et al.* 1986).

Nas áreas mineralizadas, os derrames fluíram sobre rochas com temperatura de fusão inferiores à dos derrames komatiíticos, facilitando, assim, a erosão térmica e contaminação. Note que, em Piumhi, as rochas metassedimentares intercaladas aos derrames possuem quantidades significativas de clorita magnésiana (derivada de um mineral sedimentar precursor rico em MgO), em mistura com baixas proporções de minerais de menor ponto de fusão, como o quartzo. Isto implica em temperaturas de fusão maiores que as dos substratos de derrames de Kambalda. A isto se acresce que, enquanto os derrames de Kambalda são komatiitos e, portanto, de temperatura elevada (1450 e 1600°C), os de Piumhi são de basaltos

komatiíticos, de temperatura inferior. Assim, o baixo contraste composicional entre as rochas sedimentares e os derrames pode ter sido um efeito inibidor à erosão térmica dos primeiros e contaminação dos últimos. Portanto, uma prospecção para depósitos de sulfetos do tipo Kambalda em Piumhi, no nível estratigráfico dos basaltos komatiíticos, deveria ser concentrada junto a horizontes de rochas metassedimentares termicamente compatíveis para uma contaminação efetiva.

É interessante observar na Tabela III que a maioria dos intervalos imediatamente sotopostos ao primeiro derrame de uma unidade de fluxo, mostra uma tendência ao enriquecimento em um ou mais dos elementos traços mais móveis. Este enriquecimento pode ser explicado por dois processos. O primeiro, por transferência destes elementos dos derrames para os sedimentos devido à interação da lava com água na superfície de fluxo e nos interstícios dos sedimentos subjacentes. O segundo, mediante curtos períodos de exalações que precederam o primeiro derrame da unidade de fluxo seguinte à sedimentação, o que se justifica pela frequência de níveis de sulfetos sedimentares nos Metaturbiditos Máficos.

Mesmo havendo fatores inibidores para a formação de depósitos minerais de sulfetos disseminados ou maciços de metais básicos nos derrames ao longo das seções estudadas, alguma previsão metalogenética pode ser efetuada. É fato conhecido que sulfetos de Fe-Ni são característicos de komatiitos. Na medida em que os líquidos magmáticos passam de peridotíticos para basálticos, mais se enriquecem em Cu, gerando uma população de depósitos sulfetados de Cu-Ni, que culmina, no outro extremo, com mineralizações de Fe-Cu-Zn. Ao longo dessa linha, os EGP deixam de

participar de depósitos de Cu-Ni, por afinidade geoquímica com líquidos de alta temperatura e mais primitivos, como os komatiitos. Portanto, a expectativa metalogenética dos derrames de basaltos komatiíticos estaria orientada mais para mineralizações de Fe-Cu, subordinadamente Zn, como muito bem sinalizam as anomalias desses elementos nas rochas metassedimentares.

## DEPÓSITOS VULCANOGÊNICOS

Exceto pela presença de delgados níveis sedimentares de sulfetos intercalados em Metaturbiditos Máficos os quais podem, eventualmente, ser interpretados como discretas manifestações exalativas, até o presente não foram observadas evidências concretas de que emanações vulcânicas foram efetivas durante o vulcanismo. Isto é corroborado pela ausência de níveis mais espessos de produtos de sedimentação química tais como chert, formações manganesíferas e formações ferríferas que denotem longos períodos de quiescência. Nestes casos a sedimentação detrítica, se presente, deveria ser subordinada.

É importante salientar que a maioria dos níveis sedimentares é, em geral, reduzida e inferior a 7 metros, sugerindo que os sítios deposicionais pudessem estar representados apenas por depressões na topografia vulcânica local, ao invés de extensos lençóis sedimentares. Se esta interpretação é viável e se exalações foram localmente efetivas, estas poderiam ter sido canalizadas para apenas algumas depressões, não registradas nas seções estudadas, o que implica, novamente, em analisar outras áreas do *greenstone belt* de Piumhi.

## DEPÓSITOS SEDIMENTARES SINGENÉTICOS

A associação de depósitos minerais com sulfetos de metais básicos associados com ambientes redutores é bem conhecida, como exemplificam as reservas do tipo Kupferschiefer, Alemanha (Jensen & Bateman 1979, Stanton 1972) e depósitos de polielementos na China (Delian 1983). A presença de filitos carbonosos na base dos diversos níveis sedimentares estudados indicam que a sedimentação em cada ciclo iniciou com ambiente redutor, de natureza euxênica.

Dentre os doze níveis sedimentares do Furo PHI-07, os Níveis VIII e XII contém anomalias de metais básicos, Au, Pd e Ag situadas em filitos carbonosos e metaturbiditos máficos carbonosos, subordinadamente metaturbiditos máficos. Isto indica que a presença de matéria carbonosa foi importante para fixação desses elementos. Os teores, no entanto, não são economicamente significativos. Contudo, levanta-se, novamente a possibilidade de a sedimentação ter ocorrido em depressões da topografia vulcânica, o que abre perspectivas para horizontes sedimentares, outros que não os analisados, mas talvez em situações estratigráficas similares às dos níveis VIII e XII.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

A análise da sucessão de rochas metassedimentares intercaladas na Unidade Komatiítica do Grupo Ribeirão Araras em testemunhos contínuos de furos de sondagem e os estudos petrográficos e geoquímicos detalhados da sondagem PHI-07 permitem concluir diversos aspectos importantes acerca da natureza e regimes da sedimentação durante os períodos quiescência do vulcanismo komatiítico, das características composicionais da área-fonte da carga detrítica e do seu potencial metalogenético.

Como não foram mapeados os derrames, a semelhança das rochas metassedimentares que ocorrem nos diversos níveis e a ausência de horizontes guias dificulta a correlação entre os furos de sondagem. Por outro lado, a reduzida espessura desses sugere que os sítios deposicionais eram de dimensões provavelmente reduzidas e que cada horizonte sedimentar pode representar um sítio independente dos situados em horizontes estratigráficos equivalentes.

A variedade textural, estrutural e mineralógica das rochas estudadas permitem agrupá-las em três litotipos que, seqüencialmente da base para o topo de cada intercalação, compreendem (i) Filitos Carbonosos, (ii) Metaturbiditos Máficos Carbonosos e (iii) Metaturbiditos Máficos. A

abundância de clorita indica que essas rochas são produtos metamórficos de protólitos imaturos, texturalmente correspondentes a argilitos sílticos e argilitos puros, com ou sem matéria carbonosa. A organização interna de cada intercalação indica que a sedimentação iniciou sob ambiente euxênico, representado por Filitos Carbonosos. Este ambiente foi gradativamente substituído por um regime de correntes de turbidez, como indicado pelos Metaturbiditos Máficos; a transição entre ambos é marcada por Metaturbiditos Máficos Carbonosos. A presença de sulfetos, ora disseminados ora em leitos com estruturas sedimentares reliquiares, em todos os litotipos de cada ciclo, sugere que a deposição ocorreu sob condições redutoras, mesmo admitindo recristalização por diagênese e metamorfismo.

A ausência de recorrências de ambiente euxênico e a transição desse para ambiente turbidítico nas diversas intercalações indica que cada uma representa um único ciclo sedimentar progressivo. A semelhança de empilhamento litológico entre os vários horizontes implica em regimes sedimentares idênticos, indicando, assim, que os sucessivos períodos de recesso do vulcanismo foram caracterizados por ciclos superficiais recorrentes, sob regimes tectônicos idênticos.

As sucessivas fases de sedimentação foram alimentadas por cargas clásticas de composição mineralógica similar, mas com conteúdos de elementos traços variáveis. A ocorrência de variações sistemáticas, aleatórias e de distribuições homogêneas de elementos traços em cada ciclo, mas variável entre ciclos, indica disponibilidade variável desses elementos, com teores ora crescentes, ora decrescentes, condicionados ou não à natureza dos litotipos dos diversos níveis.

As concentrações de elementos relativamente imóveis e auxiliares na diagnose da área-fonte da carga detrítica para os protolitos das rochas estudadas, em particular Cr e Ni, sinalizam para uma proveniência a partir da erosão de rochas máficas e ultramáficas. Contudo, a contribuição félsica é incerta, o que poderia ser melhor diagnosticado mediante a determinação de elementos traços adicionais, tais como Terras Raras e Tório.

A proveniência a partir de rochas máficas e ultramáficas, as razões entre elementos traços e suas variações e as semelhanças destas com as observadas em rochas metassedimentares arqueanas de outras regiões amplia a universalidade dos processos sedimentares daquele período para uma parte do território brasileiro, ainda pouco conhecida. Acrescente-se a esta contribuição o primeiro registro de algumas semelhanças composicionais entre as rochas metassedimentares detríticas precoces e tardias da evolução de *greenstone belts* e, a exemplo de distritos mineiros como Kambalda, o provável potencial metalogenético das rochas estudadas e de seus envelopes vulcânicos.

A presença de níveis anômalos em Au, Pd, Ag, Cu e Zn, se comparados com os demais da seqüência, induz a concentração de esforços de prospeção naqueles intervalos estratigráficos de sua ocorrência, mesmo que as bacias tenham tido dimensões reduzidas, pois sítios deposicionais adjacentes poderiam, eventualmente, ser mais ricos nesses elementos, ou, alternativamente, enriquecer os derrames sobrepostos por contaminação. Neste último caso, é importante reforçar a observação de que os elementos com comportamento calcófilo (apesar de seus teores geralmente baixos a moderados nos três litotipos), tendem a ser mais concentrados em

Metaturbiditos Máficos. Estes encerram o ciclo sedimentar e estão imediatamente sotopostos ao primeiro derrame do ciclo vulcânico seguinte e a sua preferência por fases detríticas sem matéria carbonosa está, no entanto, relacionada com a presença de fases sulfetadas.

Metalogeneticamente, as seções estudadas não são favoráveis a conter depósitos minerais relacionados com vulcanismo, seja do tipo Ni-sulfetado em komatiitos, Fe-Zn-Cu sulfetado exalativo, ou mesmo depósitos de metais básicos associados a ambientes euxênicos. Contudo, os resultados dos estudos daquelas seções não esgotam a potencialidade da área.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNDT, N.T. & JENNER, G.A. - 1986 - Crustally contaminated komatiites and basalts from Kambalda, Western Australia. *Chemical Geology*, 56: 229-255.
- ARORA, M.; KHAN, R.M.K. & NAQVI, S.M. - 1994 - Composition of the middle and late Archean upper continental crust as sampled from the Kaldurga Conglomerate, Dharwar craton, India. *Precambrian Research*, 70: 93-112.
- BARNES, S.J. - 1979 - Petrology and Geochemistry of the Katinig nickel deposit and related rocks, Ungava, Northern Quebec. Ph.D. thesis, University of Toronto, 220 p. In: Platinum Group Elements: Mineralogy, Geology, Recovery. Ed. L.J. Cabri. CIM Special, 23. The Canadian Institute of Mining and Metallurgy. 1981.
- BAVINTON, O.A. & KEAYS, R.R. - 1978 - Precious metal values from interflow sedimentary rocks from the komatiite sequence at Kambalda, Western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 1151-1163.
- BAVINTON, O.A. & TAYLOR, S.R. - 1980 - Rare earth geochemistry of Archean metasedimentary rocks from Kambalda, Western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44: 639-648.
- BINNS, R.A.; GUNTHORPE, R.J. & GROVES, D.I. - 1976 - Metamorphic patterns and development of greenstone belts in the Eastern Yilgarn Block, W.A. In: BAVINTON, O.A.; KEAYS, R.R. - 1978 - Precious metal values from interflow sedimentary rocks from the komatiite sequence at Kambalda, Western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 1151-1163.
- CAMIRÉ, G.E.; LAFLÈCHE, M.R. & LUDDEN, J.N. - 1993 - Archean metasedimentary rocks from the northwestern Pontiac Subprovince of the Canadian Shield: chemical characterization, weathering and modelling of the source areas. *Precambrian Research*, 62: 285-305.

- CHAUVEL, C. et al. - 1985 - The Sm-Nd age of Kambalda volcanics is 500 Ma too Old! *Earth and Planetary Science Letters*, 74(4): 315-324.
- COLTORTI, M.; GIRARDI, V.A.V. & SCHORSCHER, J.H.D. - 1987 - Liquid immiscibility in the Archean greenstone belt of Piumhi, MG, Brazil. *Lithos*, 20:77-91.
- DARDENNE, M.A. 1979. Les minéralisations de plomb, zinc, fluor du Proterozoïque Supérieur dans le Brésil Central. Avec une mise au point sur la chronologie du Précambrien Brésilien. Thèse, Université Paris VI. 250 p.
- DAVIS, J.C. - 1986 - *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons, Inc. Canada. 646p.
- DELIAN, F. - 1983 - Polyelements in the lower Cambrian black shale series in Southern China. In: The significance of trace elements in solving petrogenetic problems & controversies. Ed. S.S. Augustithis. *Theophrastus Publications S.A. Athenes*. 1983. 917ps.
- DUKE, J.M. - 1980 - Petrology and economic geology of the Dumont Sill, N-W Quebec. *Geol. Assoc. Canada, Mineral. Assoc. Canada, Annual Meeting*. 5: 50. In: Platinum Group Elements: Mineralogy, Geology, Recovery. Ed. L.J. Cabri. CIM Special, 23. *The Canadian Institute of Mining and Metallurgy*. 1981.
- DUKE, J.M. - 1990 - Mineral deposit models: nickel sulfide deposits of the Kambalda Type. *Canadian Mineralogist*, 28: 379-388.
- FERRARI, P.A. & BRANDALISE, L.B. - 1971 - Projeto Folha do Rio de Janeiro - Geologia da região do Médio Rio Grande, Minas Gerais, escala 1:100.000. Rio de Janeiro, DNPM, Vol.2, 73pp.
- FRITZSONS Jr. O.; BIONDI, J.C. & CHABAN, N. - 1980 - Geologia da Região de Piumhi (MG). In: CONG.BRAS.GEOL, 31. Camboriú, 1980. *Anais...* Camboriú, SBG. v.5, p.2906-2917.
- GRESHAM, J.J. & LOFTUS-HILLS, G.D. - 1981 - The geology of the Kambalda nickel field, Western Australia. *Economic Geology*. 76:1373-1416.

- GROMET, L.P.; DYMER, R.F.; HASKIN, L.A. & KOROTEV, R.L. - 1984 - The "North American Shale Composite:" Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 48: 2469-2482.
- HUPPERT, H. & SPARKS, S.J. - 1985 - Komatiites I: Eruption and flow. *Journal of Petrology*, 26(3): 694-725.
- JAHN, B.M. & SCHRANK, A. - 1983 - REE geochemistry of komatiites and associated rocks from Piumhi, Southeastern Brazil. *Precambrian Research*, 21: 1-20.
- JENNER, G.A.; FRYER, B.J. & McLENNAN, S.M. - 1981 - Geochemistry of the Archean Yellowknife Supergroup. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45: 1111-1129.
- JENSEN, M.L. & BATEMAN, A. - 1979 - *Economic Mineral Deposits*. John Wiley & Sons, 593p.
- JOST, H.; KUYUMJIAN, R.M. & SILVA, C.A. - 1993 - Características geoquímicas e a proveniência dos metassedimentos arqueanos do Grupo Guarinos, GO. - Soc. Bras. Geoquímica, V Congresso Brasileiro de Geoquímica, Brasília, *Anais*, pg.109-112
- JOST, H.; FIGUEIREDO, A.M. & FERREIRA, A.V. - 1995 - Elementos em traço e a proveniência clástica na transição de ambiente euxênico para turbidítico em metassedimentos de Greenstone Belt de Guarinos, Goiás. CONGR. BRAS. GEOQ., 5, Niterói, 1995. *Anais em CD*.
- LOWE, D.R. - 1980 - Archean sedimentation. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 8: 145-167.
- LOWE, D.R. - 1982 - Comparative sedimentology of the principal volcanic sequences of Archean greenstone belts in South Africa, Western Australia and Canada: Implications for crustal evolution. *Precambrian Research*, 17: 1-29.

- MACHADO, N. & SCHRANK, A. - 1989 - Geocronologia U/Pb no Maciço de Piumhi - resultados preliminares. In: SIMPOSIO DE MINAS GERAIS, 5. 1989. p.45-49 (Boletim 10).
- MARANHÃO, R.J.L. - 1982 - Introdução à Pesquisa Mineral. Fortaleza, BNB. ETENE. 680p.
- MARINI, O.J.; FUCK, R.A.; DARNENNE, M.A. & DANNI, J.C.M. - 1984 - Província Tocantins - Setores Central e Sudeste. In: ALMEIDA, F.F.M. e HASUI, Y. 1984 - *O Pré-Cambriano no Brasil*. São Paulo, Edgard Blucher. 378p.
- MARINI, O.J.; FUCK, R.A.; DANNI, J.C.M.; DARNENNE, M.A.; LOGUERCIO, S.O.C. & RAMALHO, R. - 1984 - As faixas de dobramentos Brasília, Uruaçu e Paraguai-Araguaia e o Maciço Mediano de Goiás. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A., DERZE, G.R. & ASMUS, H.E. *Geologia do Brasil - Texto Explicativo do Mapa Geológico de Brasil e da Área Oceânica Adjacente*. Brasília. DNPM. 501p.
- MASS, R. & McCULLOCH, M.T. - 1991 - The provenance of Archean clastic metasediments in the Narryer Gneiss Complex, Western Australia: trace element geochemistry, Nd isotopes, and U-Pb ages for detrital zircons. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 55: 1915-1932.
- NALDRETT, A.J. - 1981 - Nickel sulfide deposits: Classification, composition and genesis. *Economic Geology*, 75: 628-685.
- NALDRETT, A.J. - 1989 - *Magmatic Sulfide Deposits*. Oxford University Press.
- NALDRETT, A.J. & TURNER, A.R. - 1977 - The geology and petrogenesis of a greenstone belt and related nickel sulfide mineralization at Yakabindie, Western Australia. *Precambrian Research*, 5 (1): 43-103.
- PINHEIRO, S.O. - 1980 - Petrografia da sequência de rochas ígneas metamorfisadas de Piumhi. In: CONG.BRAS.GEOL, 31. Camboriú, 1980. *Anais...* Camboriú, SBG. v.5, p.2906-2917.
- ROSS, J.R. & HOPKINS, G.M.F. - 1975 - The nickel sulfide deposits of Kambalda, Western Austrália. *Economic Geology of Australia and Papua New Guinea. Australian Inst. Min. Metall.*, 1: 100-121.

- SATO, L.M.; CHOUDHURI, A. & SCHRANK, A. - 1992 - Dados preliminares: Estudos petrográficos e geoquímicos dos corpos graníticos do Maciço de Piumhi-MG. In: CONG.BRAS.GEOL., 37. São Paulo, 1992. *Anais...* São Paulo, SBG. v.1, p.386-387.
- SAUNDERS, A.D.; NORRY, M.J. & TARNEY, J. - 1988 - Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: trace element constraints. In: MENZIES, M.A. & COX, K.G. (editors). *Oceanic and Continental Lithosphere Similarities and Differences*. Journal of Petrology. Spec. vol., 415-445.
- SCHRANK, A. - 1982 - *Petrologie des komatiites et des roches associees de la ceinture verte du massif precambrien de Piumhi (Minas Gerais-Brésil)*. Paris, 272p. (Tese de Doutorado, Universidade de Paris Sud - ORSAY).
- SCHRANK, A. - 1986 - Gênese e evolução de derrames a clinopiroxênio-spinifex de Piumhi - MG. In: CONG.BRAS.GEOL., 34. Goiânia, 1986. *Anais...* Goiânia, SBG. V.2, p.695-709.
- SCHRANK, A. - 1992 - Greenstone belt de Piumhi, Minas Gerais. Roteiro de Excursão. In: CONG.BRAS.GEOL., 37 São Paulo, 1992. *Roteiros das Excursões...* São Paulo, SBG. v.6, 8p.
- SCHRANK, A. & ABREU, F.R. - 1990 - Nova proposta de evolução estratigráfica e tectônica para o Maciço de Piumhi-SW de Minas Gerais. In: CONG.BRAS.GEOL., 36. Natal, 1990. *Boletim de Resumos...* Natal, SBG. p.331.
- SCHRANK, A.; ABREU, F.R.; ROIG, H.L.; CHOUDHURI, A.; SZABÓ, G.J.A. & CARVALHO, E.D.R. - 1990 - Determinação dos vetores de transporte tectônico na borda sudoeste do Cráton do São Francisco. In: CONG.BRAS.GEOL., 36 Natal, 1990. *Anais...* Natal, SBG. v.5, p.2276-2283.
- STANTON, R.L. - 1972 - *Ore Deposits*. N.Y. MacGraw-Hill, 713p.
- SUN, S.S. & NESBITT, R.W. - 1977 - Chemical heterogeneity of the Archaean mantle, composition of the earth and mantle evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.* 35 (3): 429-448.

TAYLOR, S.R. & McLENNAN, S.M. - 1985 - *The Continental Crust: its composition and evolution*. Blackwell, London, 312 pgs.

TURNER, J.S.; HUPPERT, H. & SPARKS, S.J. - 1986 - Komatiites II: Experimental and theoretical Investigations of post-emplacement cooling and crystallization. *Journal of Petrology*, 27(2): 397-437.

WRONKIEWICKZ, D. & CONDIE, K.C. - 1987 - Geochemistry of archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 2401-2416.

## **ANEXO I**

Mapa Geológico do Maciço de Piumhi - Minas Gerais, plotados os pontos de campo. (Fonte: Schrank 1992)

## **ANEXO II**

Localização geográfica de oito furos de sondagem na sequência vulcânica do Maciço de Piumhi - Minas Gerais. (Fonte: METAMIG - Metais de Minas Gerais, 1987)

LEGENDA

-  Furo de sonda.
- (45°)

 Inclinação do furo de sonda
-  Ribeirão Araras
-  Estrada Principal e Secundária



0 80 m

p/Doresópolis

p/Plumhi

Ribeirão Araras

PHI-04  
(45°)

PHI-06  
(45°)

PHI-08  
(45°)

PHI-07  
(45°)

PHI-09  
(45°)

PHI-10  
(45°)

PHI-13  
(60°)

PHI-11  
(45°)

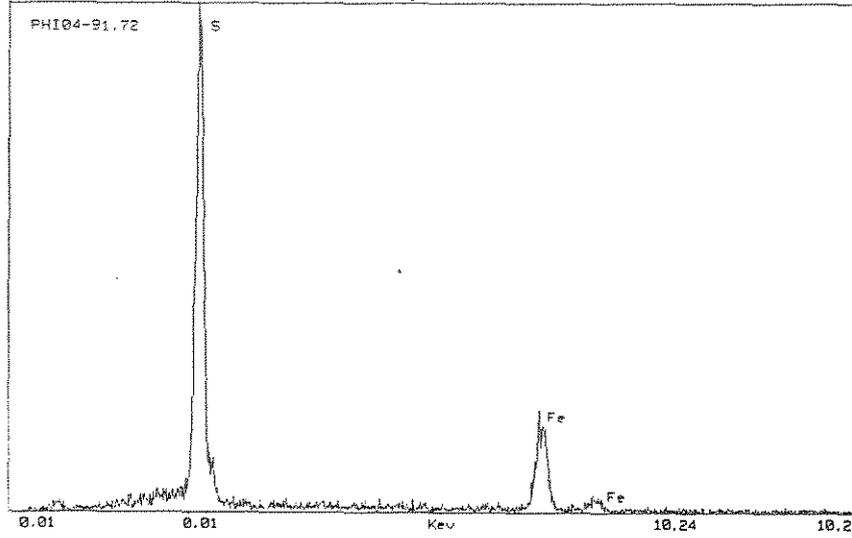
## **ANEXO III**

Espectros dos minerais da amostra PHI04-91.72 obtidos através de microscopia eletrônica de varredura.

EYS - Spectrum Display

Version: 4  
Date: 10-JUN-93

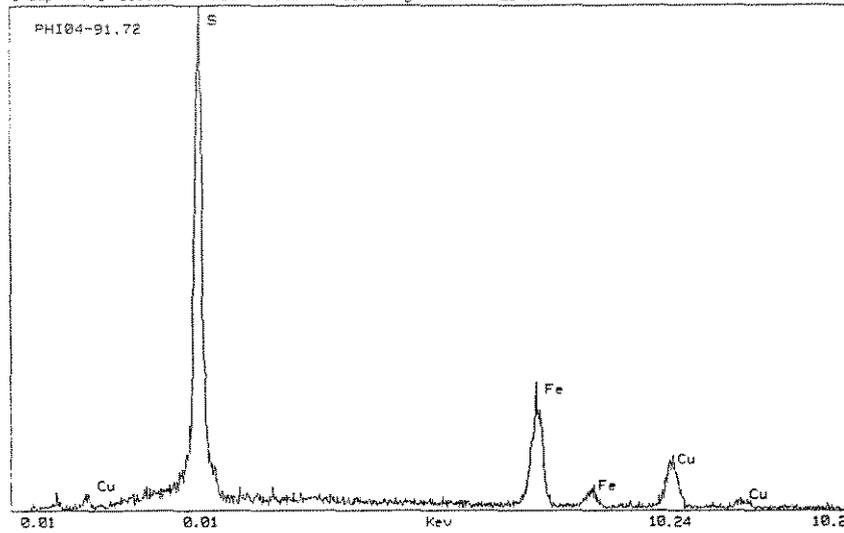
Group #: 1 Scale: 400 cts Counting time: 11 Sec



EDS - Spectrum Display

Version: 4  
Date: 10-JUN-93

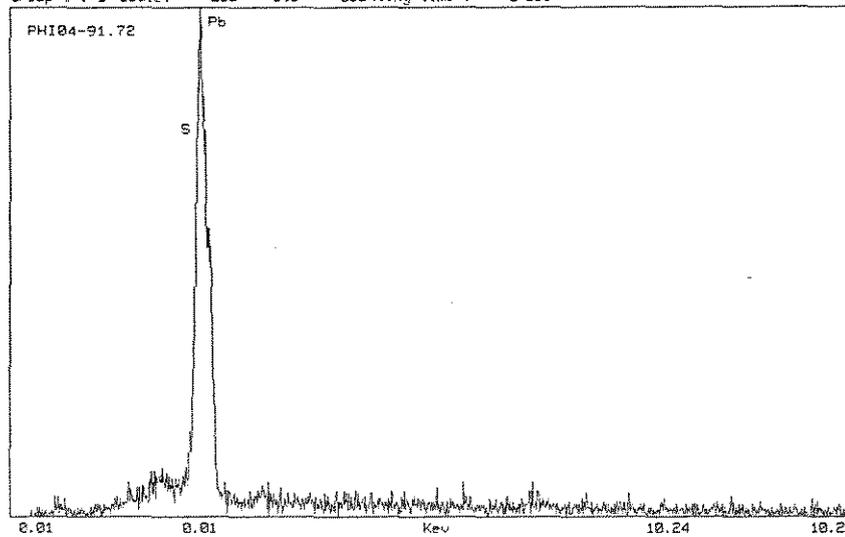
Group #: 1 Scale: 700 cts Counting time: 29 Sec



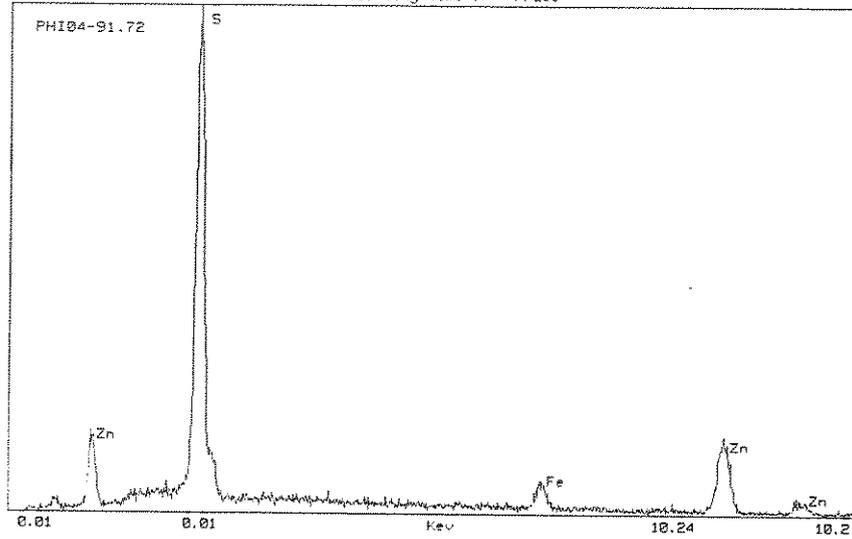
EDS - Spectrum Display

Version: 4  
Date: 10-JUN-93

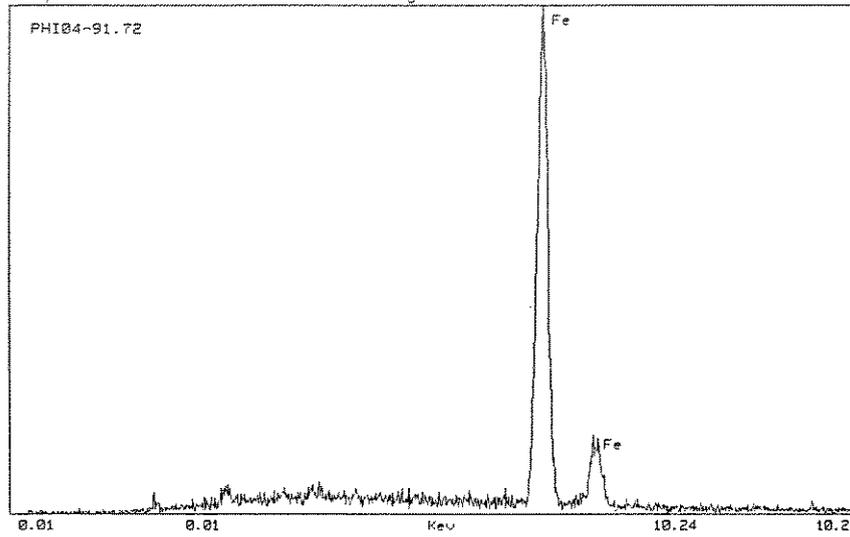
Group #: 1 Scale: 200 cts Counting time: 6 Sec



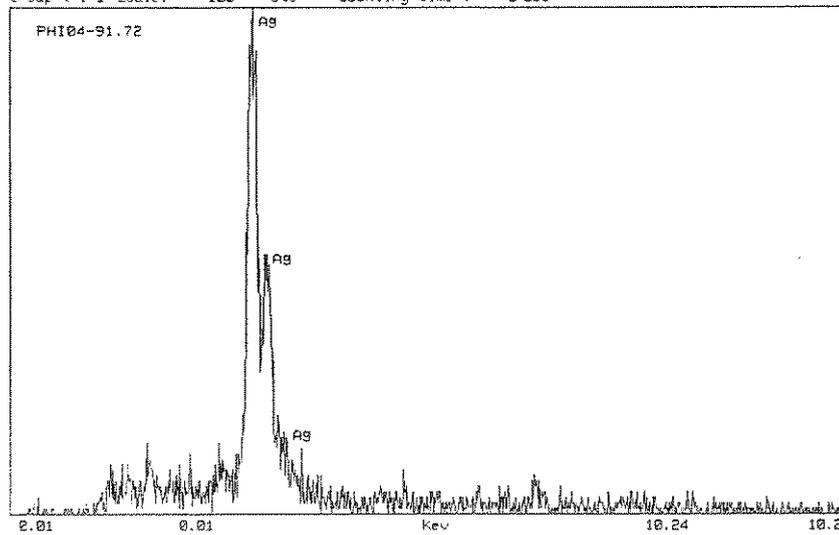
Group #: 1 Scale: 900 cts Counting time: 44 Sec



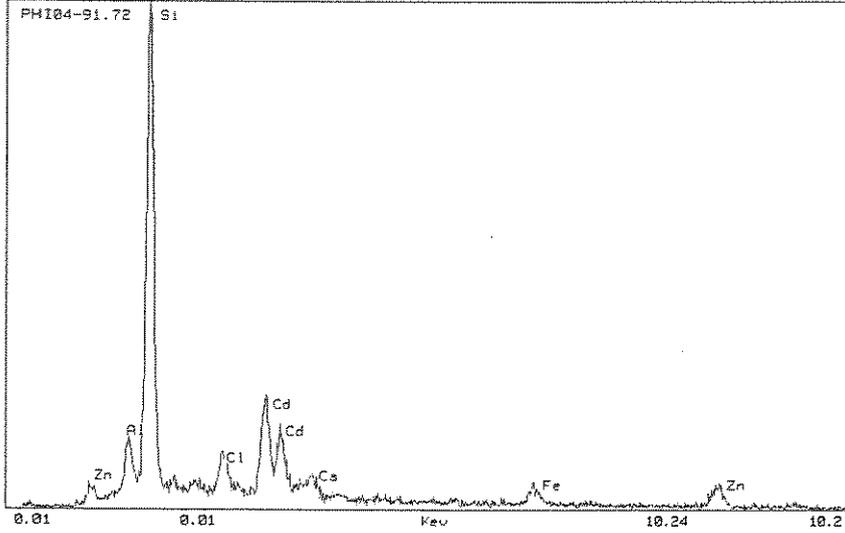
Group #: 1 Scale: 500 cts Counting time: 55 Sec



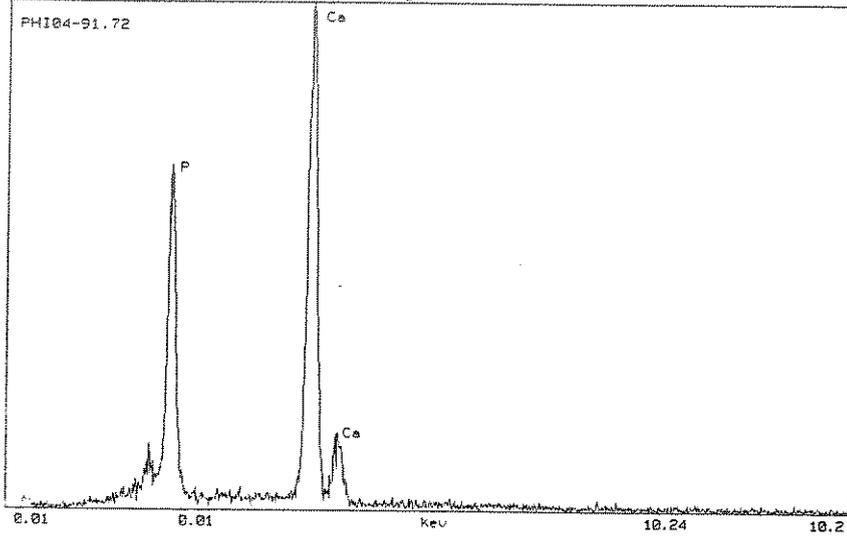
Group #: 1 Scale: 100 cts Counting time: 6 Sec



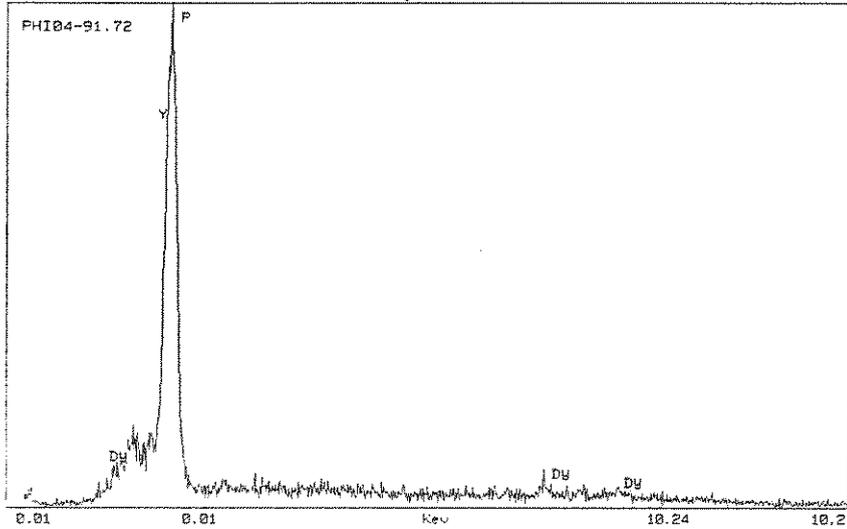
Group #: 1 Scale: 900 cts Counting time: 85 Sec



Group #: 1 Scale: 500 cts Counting time: 28 Sec



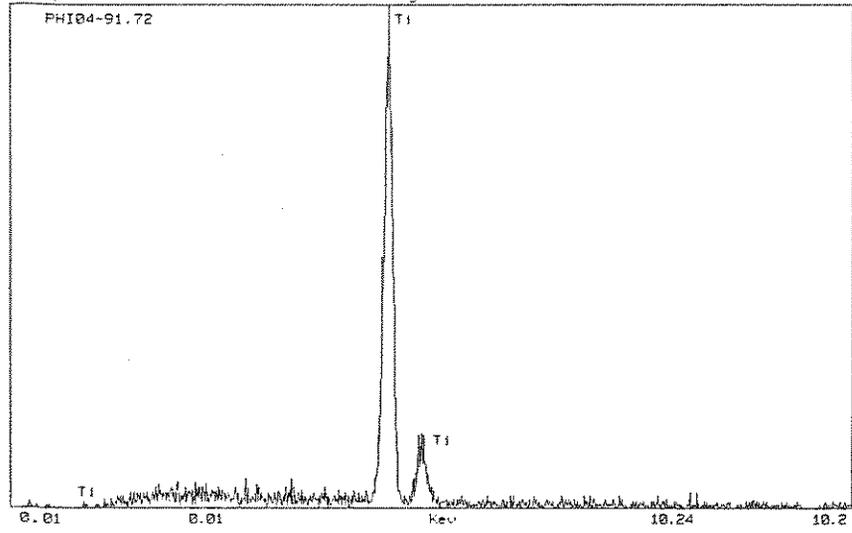
Group #: 1 Scale: 500 cts Counting time: 35 Sec



EDS - Spectrum Display

Version: 4  
Date: 10-JUN-93

Group #: 1 Scale: 200 cts Counting time: 10 Sec



EDS - Spectrum Display

Version: 4  
Date: 10-JUN-93

Group #: 1 Scale: 100 cts Counting time: 12 Sec

